

# НАУКА и ТЕХНИКА

Международный  
научно-технический журнал



Science V. 16, No 1  
and Technique (2017)

International  
Scientific and Technical Journal

Серия 1. Машиностроение

Series 1. Mechanical Engineering

Издается с января 2002 года  
Периодичность издания – один раз в два месяца

Published from January 2002  
Publication frequency – bimonthly

### Учредитель

Белорусский национальный  
технический университет

### Founder

Belarusian National  
Technical University

### Главный редактор

Борис Михайлович Хрусталев

### Editor-in-Chief

Boris M. Khroustalev

Журнал включен в базы данных:

Web of Science Core Collection (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat,  
OpenAIRE, Google Scholar, РИНЦ, ЭБС «Лань», НЭБ «КиберЛенинка», Соционет

The Journal is included in the following databases:

Web of Science Core Collection (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat,  
OpenAIRE, Google Scholar, RISC, Lan, CyberLeninka, Socionet

## СОДЕРЖАНИЕ

## CONTENTS

### Машиностроение

### Mechanical Engineering

<b>Занковец П. В., Шелег В. К.</b> Математическое моделирование и автоматизация технологической подготовки производства сварных конструкций . . . . .	5	<b>Zankovets P. V., Sheleg V. K.</b> Mathematical Simulation and Automation of Process Engineering for Welded Structure Production . . . . .	5
<b>Исаевич Л. А., Сидоренко М. И.</b> Интенсификация процесса разделения прутков материала на мерные заготовки клиновидными ножами . . . . .	16	<b>Isaevich L. A., Sidorenko M. I.</b> Intensification of Separation Process for Bar Material in Cut-to-Length Sections by Wedge-Shaped Knives . . . . .	16
<b>Оковитый В. В., Девойно О. Г., Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И., Асташинский В. М.</b> Разработка комплекса оборудования для нанесения плазменных керамических покрытий . . . . .	21	<b>Okovity V. V., Devoino O. G., Okovity V. A., Panteleenko F. I., Astashinsky V. M.</b> Development of Equipment Complex for Plasma Spray Ceramic Coatings . . . . .	21
<b>Баханович А. Г., Кусяк В. А., Гурин А. Н., Ле Ван Нгиа</b> Электронное управление топливоподачей дизельного двигателя на основе программного ПИД-регулирования . . . . .	28	<b>Bakhanovich A. G., Kusyak V. A., Gurin A. N., Le Van Ngia</b> Electronic Control for Fuel Supply of Diesel Engine on the Basis of Programmable PID-Regulator . . . . .	28
<b>Капский Д. В., Навой Д. В.</b> Развитие автоматизированной системы управления дорожным движением Минска как части интеллектуальной транспортной системы города . . . . .	38	<b>Kapskiy D. V., Navoy D. V.</b> Development of Automated Road Traffic Control Systems in Minsk as Part of Intellectual City Transport System . . . . .	38

<b>Кузьмич В. В., Карпунин И. И., Почанин Ю. С., Балабанова Т. Ф., Козлов Н. Г.</b> Методики исследований химических характеристик полимерных материалов . . . . .	49
<b>Кузьменко В. Н., Мозалевский Д. В., Коржова А. В., Красильникова А. С., Ермакова Н. С., Киселевич Н. В., Горелик Е. Н., Гамульский И. К.</b> Обоснование мероприятий по повышению качества и безопасности дорожного движения на магистральной улице районного значения в г. Минске . . . . .	57
<b>Самотугин С. С., Гагарин В. А., Мазур В. А.</b> Повышение стойкости крановых рельсов при использовании плазменной дискретной поверхностной обработки . . . . .	68
<b>Жданович Ч. И., Калинин Н. В.</b> Анализ эффективности использования накопителей энергии на тракторе с электромеханической трансмиссией . . . . .	73
<b>Гуськов В. В., Дзёма А. А., Колола А. С., Макаренко Р. Ю., Зезетко Н. И.</b> Исследование процесса взаимодействия ведущих колес трактора с грунтовой поверхностью . . . . .	83

<b>Kuzmich V. V., Karpunin I. I., Pochanin Yu. S., Balabanova T. F., Kozlov N. G.</b> Methods for Investigation of Chemical Characteristics in Polymer Materials . . . . .	49
<b>Kuzmenko V. N., Mozalevsky D. V., Korzhova A. V., Krasilnikova A. S., Yermakova N. S., Kiselevich N. V., Gorelik Ye. N., Gamulsky I. K.</b> Justification of Measures to Improve Quality and Road Safety at Regional Arterial Street in Minsk . . . . .	57
<b>Samotugin S. S., Haharin V. A., Mazur V. A.</b> Improvement of Crane Rail Hardness while Using Plasma Discrete Surface Treatment . . . . .	68
<b>Zhdanovich Ch. I., Kalinin N. V.</b> Efficiency Analysis of Energy Accumulating Mechanism for Tractor with Electromechanical Transmission . . . . .	73
<b>Guskov V. V., Dzioma A. A., Kolola A. S., Makarenko R. Yu., Zezetko N. I.</b> Investigation of Process Pertaining to Interaction of Tractor Driving Wheels with Ground Surface . . . . .	83

**Редакционная коллегия**

- В. В. БАБИЦКИЙ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),*
- В. Г. БАШТОВОЙ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),*
- А. В. БЕЛЫЙ (Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),*
- В. П. БОЙКОВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),*
- С. В. БОСАКОВ (Республиканское унитарное предприятие по строительству «Институт БелНИИС», Минск, Республика Беларусь),*
- Ю. В. ВАСИЛЕВИЧ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),*
- О. Г. ДЕВОЙНО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),*
- К. В. ДОБРЕГО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),*
- П. И. ДЯЧЕК (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),*

**Editorial Board**

- V. V. BABITSKY (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),*
- V. G. BASHTOVOI (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),*
- A. V. BYELI (Physical-Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),*
- V. P. BOYKOV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),*
- S. V. BOSAKOV (Republican Unitary Scientific-Research Enterprise for Construction “Institute BelNIIS”, Minsk, Republic of Belarus),*
- Yu. V. VASILEVICH (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),*
- O. G. DEVOINO (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),*
- K. V. DOBREGO (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),*
- P. I. DYACHEK (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),*

- М. З. ЗГУРОВСКИЙ* (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина),
- Р. Б. ИВУТЬ* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- А. С. КАЛИНИЧЕНКО* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь) (заместитель главного редактора),
- М. Г. КИСЕЛЕВ* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- Я. Н. КОВАЛЕВ* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- В. В. КОЗЛОВСКИЙ* (Минский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова», Минск, Республика Беларусь),
- В. М. КОНСТАНТИНОВ* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- Н. В. КУЛЕШОВ* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- С. Н. ЛЕОНОВИЧ* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- С. А. МАСКЕВИЧ* (Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь),
- Э. И. МИХНЕВИЧ* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- НГУЕН ТХУ НГА* (Научный энергетический институт Вьетнамской академии наук и технологий, Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам),
- М. ОПЕЛЯК* (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),
- О. Г. ПЕНЯЗЬКОВ* (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
- Г. А. ПОТАЕВ* (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- M. Z. ZGUROVSKY* (National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, Kiev, Ukraine),
- R. B. IVUT* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- A. S. KALINICHENKO* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus) (Deputy Editor-in-Chief),
- M. G. KISELEV* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- Ya. N. KOVALEV* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- V. V. KOZLOVSKIY* (Minsk Branch of Plekhanov Russian University of Economics, Minsk, Republic of Belarus),
- V. M. KONSTANTINOV* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- N. V. KULESHOV* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- S. N. LEONOVICH* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- S. A. MASKEVICH* (International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus),
- E. I. MIHNEVICH* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- NGUYEN THU NGA* (Institute of Energy Science of the Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Republic of Vietnam),
- M. OPELYAK* (Lublin University of Technology “Politechnika Lubelska”, Lublin, Republic of Poland),
- O. G. PENYAZKOV* (A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
- G. A. POTAEV* (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),

О. П. РЕУТ (Филиал БНТУ «Институт повышения квалификации и переподготовки кадров по новым направлениям развития техники, технологии и экономики», Минск, Республика Беларусь),  
Ф. А. РОМАНИУК (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),  
И. И. СЕРГЕЙ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),  
В. Л. СОЛОМАХО (Республиканский институт инновационных технологий Белорусского национального технического университета, Минск, Республика Беларусь),  
С. А. ЧИЖИК (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь),  
А. Н. ЧИЧКО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),  
В. К. ШЕЛЕГ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),  
Й. ЭБЕРХАРДШТАЙНЕР (Венский технический университет, Вена, Австрия),  
Б. А. ЯКИМОВИЧ (Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Российская Федерация)

O. P. REUT (Branch of the BNTU "Institute of Advanced Training and Retraining for New Areas of Engineering, Technology and Economy", Minsk, Republic of Belarus),  
F. A. ROMANIUK (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),  
I. I. SERGEY (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),  
V. L. SOLOMAKHO (Republic Institute of Innovative Technologies of the Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),  
S. A. CHIZHIK (A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),  
A. N. CHICHKO (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),  
V. K. SHELEG (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),  
J. EBERHARDSTEINER (Vienna University of Technology, Vienna, Austria),  
B. A. YAKIMOVICH (M. T. Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation)

**Ответственный секретарь редакции**

В. Н. Гурьянчик

**Адрес редакции**

Белорусский национальный технический университет  
пр. Независимости, 65, корп. 2, комн. 327  
220013, г. Минск, Республика Беларусь

Тел. +375 17 292-65-14

E-mail: sat@bntu.by  
http://sat.bntu.by

**Executive Secretary of Editorial Staff**

V. N. Guryanichy

**Address**

Belarusian National Technical University  
Nezavisimosty Avenue, 65, Building 2, Room 327  
220013, Minsk, Republic of Belarus

Tel. +375 17 292-65-14

E-mail: sat@bntu.by  
http://sat.bntu.by

Перерегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 19 декабря 2011 г.  
Регистрационный номер 285

С 2002 г. издание выходило под названием «Вестник БНТУ»

**ISSN 2227-1031. Подписные индексы 00662, 006622**

Подписано в печать 27.01.2017. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 250 экз. Дата выхода в свет . Заказ № .

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 02330/74 от 03.03.2014.  
220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

© Белорусский национальный технический университет, 2017

DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-5-15

УДК 621.791:658

## Математическое моделирование и автоматизация технологической подготовки производства сварных конструкций

Канд. техн. наук, доц. П. В. Занковец<sup>1)</sup>, чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. В. К. Шелег<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017  
Belarusian National Technical University, 2017

**Реферат.** На основе состава и структуры информационных потоков в технологическом процессе сварки разработаны модели и методы представления данных и знаний и создана база данных и знаний. Информация в базе данных и знаний представлена в виде многоуровневой иерархической структуры, организована по функциональному назначению в виде отдельных файлов. Каждый файл содержит множество таблиц. С использованием математического моделирования и информационных технологий разработана экспертная система для принятия проектных решений при конструировании и технологической подготовке производства сварных конструкций, позволяющая осуществлять технически обоснованный выбор свариваемых и сварочных материалов, типов сварных соединений, способов, параметров и режимов сварки. Разработанная система дает возможность повысить качество принимаемых проектных решений за счет сокращения затрат ручного труда на работу с нормативно-справочной документацией, анализ и оценку множества возможных альтернатив, сократить затраты труда при отработке конструкций на технологичность, обеспечить снижение материалоемкости сварных конструкций и на этом этапе гарантировать бездефектное формирование сварных соединений.

**Ключевые слова:** дуговая сварка, сварные соединения, базы данных и знаний, дефектность, причины брака, доминирующие факторы, уровень качества

**Для цитирования:** Занковец, П. В. Математическое моделирование и автоматизация технологической подготовки производства сварных конструкций / П. В. Занковец, В. К. Шелег // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 1. С. 5–15. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-5-15

## Mathematical Simulation and Automation of Process Engineering for Welded Structure Production

P. V. Zankovets<sup>1)</sup>, V. K. Sheleg<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** Models and methods for presentation of database and knowledge base have been developed on the basis of composition and structure of data flow in technological process of welding. The information in data and knowledge base is presented in the form of multilevel hierarchical structure and it is organized according to its functionality in the form of separate files. Each file contains a great number of tables. While using mathematical simulation and information technologies an expert system has been developed with the purpose to take decisions in designing and process engineering for production of welded structures. The system makes it possible to carry out technically substantiated selection of welded and welding materials,

---

### Адрес для переписки

Занковец Павел Васильевич  
Белорусский национальный технический университет  
ул. Я. Коласа, 24,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-92-39  
pmstm@bntu.by

### Address for correspondence

Zankovets Pavel V.  
Belarusian National Technical University  
24 Ya. Kolasa str.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 293-92-39  
pmstm@bntu.by

sttypes of welded connections, welding methods, parameters and modes of welding. The developed system allows to improve quality of the accepted design decisions due to reduction of manual labour costs for work with normative-reference documentation, analysis and evaluation of dozens of possible alternatives. The system also permits to reduce labour inputs for testing structures on technological effectiveness, to ensure reduction of materials consumption for welded structures, to guarantee faultless formation of welded connections at this stage.

**Keywords:** arc welding, welded connections, data and knowledge base, unsoundness, cause of defects, dominating factors, quality level

**For citation:** Zankovets P. V., Sheleg V. K. (2017) Mathematical Simulation and Automation of Process Engineering for Welded Structure Production. *Science and Technology*, 16 (1), 5–15. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-5-15 (in Russian)

Процесс конструирования, разработки технологии сборки и сварки конструкции является основополагающим в сварочном производстве. На этом этапе определяется, что требуется сварить (материал свариваемой конструкции), чем и в каких условиях варить (сварочные материалы, сварочное и вспомогательное оборудование), как варить (тип сварного соединения, способ, параметры и режимы сварки) и кто будет варить (квалификация сварщика). Только безусловное выполнение и учет всех требований и взаимозависимости факторных связей позволяют изготавливать бездефектные сварные соединения [1–5]. Неправильный выбор хотя бы одного факторного параметра технологического процесса приводит к дефектам сварного соединения.

Для исключения таких ситуаций в процессе конструкторско-технологической подготовки, обоснованного выбора требуемых параметров технологии сборки и сварки металлоконструкций авторами разработана и внедрена на ряде предприятий республики автоматизированная экспертная система принятия проектных решений в сварке [4–6]. Предлагаемая система явля-

ется одной из важнейших в сварочном производстве. Автоматизация процесса конструирования и разработки технологии позволяет оперативно получать требуемую информацию и обоснованные рекомендации по проблемам оптимального выбора материала сварной конструкции, способа и режимов сварки, сварочных материалов и типов сварных соединений. Общая структура экспертной системы (ЭС) приведена на рис. 1.

В диалоге по запросу пользователя обеспечивается получение информации по наиболее распространенным способам сварки (ручной дуговой покрытыми электродами, в защитных газах и под флюсом) и стандартным сварным соединениям, предусмотренным этими способами сварки. На основании выполненных исследований и информации, необходимой при конструкторской и технологической подготовке производства сварных конструкций, разработана структура автоматизированной системы, состоящая из базы данных и знаний (БД и З), программ анализа, расчета и выдачи информации, необходимой для конструктора или технолога.

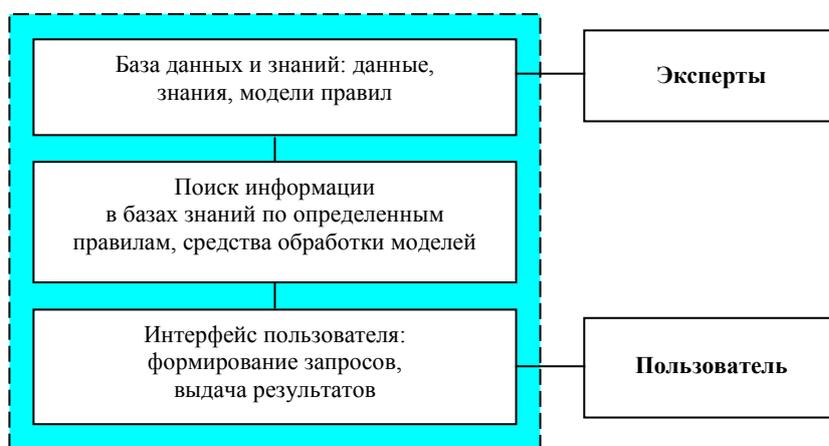


Рис. 1. Общая структура экспертной системы

Fig. 1. General structure of expert system

С учетом состава и структуры информационных потоков в сварке разработаны модели и методы представления данных и знаний и создана БД и З. Информация в БД и З представлена в виде многоуровневой иерархической структуры, организована по функциональному назначению в виде отдельных файлов. Каждый файл содержит множество таблиц. Формирование структур таблиц и запись их в файлы БД и З на магнитные носители выполнены средствами СУБД InterBase 6.5. База данных является открытой для дополнения и корректировки и имеет защиту от несанкционированного доступа. Вывод на экран и принтер, а также работа по дополнению и корректировке таблиц БД и З могут выполняться средствами SQL Explorer, IVExpert и др.

Общий технологический процесс в системе максимально упрощен для работы конструктора или технолога и представляет собой комплекс программ, состоящий из семи диалоговых систем, объединенных в головной управ-

ляющей программе. Каждая из систем содержит в своем составе БД и З, базу правил и программы логического вывода. Системы могут вызываться автономно или из управляющей программы. В БД и З записана структурированная информация, необходимая для работы систем. База правил содержит идентификаторы понятий и объектов, ключевые слова, модели запросов, производственные правила (ориентированные на прямой логический вывод) и фреймы. Системы по усмотрению пользователя могут работать в нескольких режимах: поиска информации по ключевым словам, выбора модели запроса из базы правил или формирования запроса с помощью разработанного для этих целей проблемно-ориентированного языка высокого уровня. Окно вызова систем из управляющей программы ЭС представлено на рис. 2.

Состав БД и З приведен в табл. 1. Каждый из представленных в табл. 1 файлов состоит из множества данных (числовых и текстовых).

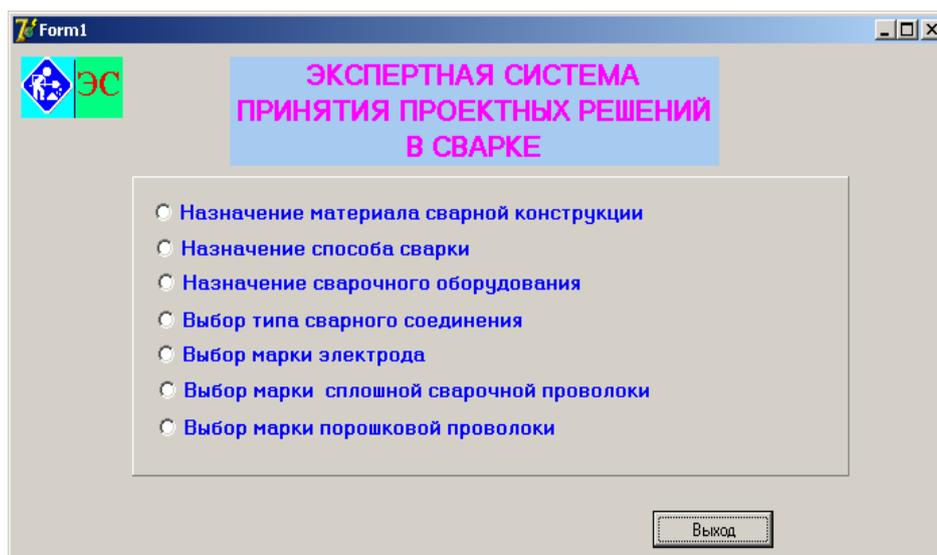


Рис. 2. Окно вызова систем из управляющей программы экспертной системы

Fig. 2. Window for system call from control software program of expert system

Таблица 1

Группы понятий и объектов базы данных и знаний  
Groups of notions and objects for database and knowledge base

Наименование понятия	Наименование групп понятий и объектов		Имя файла базы данных
«Сварка»	Свариваемые материалы		BazaDKSvar
	Способы сварки		Gosts_SpSv
	Сварочные материалы	Покрытые электроды Порошковая проволока Металлическая проволока сплошного сечения	Baza_Weld_El Svaro4n_Mat Svar_ProvSp
	Типы сварных соединений		TipS_SvSoed
«Резка»	Механическая		
	Термическая		

Программы логического вывода по запросу пользователя (конструктора или технолога) обеспечивают оперативное получение требуемой информации для принятия проектных решений, рекомендаций и пояснений обоснованности вывода. В результате формирования запроса или выбора его из базы правил на экран выводится фрейм с определенным набором полей для ввода данных. Система предлагает ввести данные и ответить на поставленные вопросы, после этого она выполняет поиск и вывод на экран одного или нескольких приемлемых решений. Окончательное принятие того или иного решения остается за пользователем.

Для каждой из групп сталей и сплавов созданы таблицы, содержащие марки сталей, номера стандартов, заменители выбранной марки, их технологические свойства и другие сведения. Следует отметить, что именно технологические свойства наиболее интересны для специалистов, занимающихся разработкой новых сварочных технологий и оптимизацией качества существующих сборочно-сварочных процессов [5–9].

Из всего комплекса технологических свойств сталей в БД и З системы приведены только свойства, относящиеся к сварке, а именно связанные с проблемой качества свариваемости. Свариваемые материалы систематизированы по группам и приведены в табл. 2. Свариваемость сталей и сплавов является комплексной характеристикой, определяющейся, с одной стороны, технологическими трудностями, возникающими при сварке, а с другой – отсутствием дефектов и эксплуатационной надежностью сварных соединений.

Таблица 2

Систематизация свариваемых материалов  
Systemization of welded materials

Код группы (KOD_GR)	Наименование группы (NAIMT_GRM)
1	Стали углеродистые обыкновенного качества
2	Стали углеродистые качественные
3	Стали легированные
4	Стали теплоустойчивые
5	Стали и сплавы высоколегированные коррозионностойкие, жаростойкие, жаропрочные
6	Стали и сплавы для отливок
7	Алюминий и алюминиевые сплавы
8	Медь и медно-никелевые сплавы
9	Титан и его сплавы
10	Магниеые сплавы
11	Тугоплавкие

При создании БД и З в качестве основных приняты характеристики так называемой тех-

нологической свариваемости, по которой материал условно разделен на следующие группы:

- материал, свариваемый без ограничений (при сварке нет необходимости применения каких-либо дополнительных технологических операций, например подогрева, промежуточной термообработки и т. п., названный в таблицах БД и З как хорошо свариваемый);
- ограниченно свариваемый материал (при сварке рекомендуются или необходимы дополнительные технологические операции);
- трудносвариваемый материал (невозможно получить качественное соединение без обязательного применения дополнительных операций);
- материал, не применяемый для изготовления сварных конструкций;
- материал, не имеющий сведений по свариваемости.

Характеристика свариваемости сталей и сплавов в БД и З состоит из трех частей:

- код группы и оценка свариваемости материала;
- рекомендуемые способы сварки;
- необходимость дополнительных технологических операций при сварке.

Приняты следующие обозначения способов сварки:

- РДС – ручная дуговая сварка покрытым электродом;
- АДС – автоматическая дуговая сварка;
- АФ – автоматическая сварка под флюсом;
- МП – механизированная сварка плавящимся электродом в защитном газе (CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> + Ar);
- ЭШС – электрошлаковая сварка;
- КТС – контактная сварка;
- РАДС – аргодуговая сварка;
- ЭЛ – электронно-лучевая сварка.

Группа свариваемости определяется химическим составом материала, степенью разработки технологических приемов сварки и освоения в производственных условиях. Способы сварки являются рекомендованными, возможно использование других, применяемых в производстве.

С каждой маркой стали связаны таблицы химического состава, назначения, механических характеристик и основных технологических особенностей материала. Пример и результаты работы с системой назначения материала свариваемой конструкции приведен на рис. 3. БД и З по свариваемым материалам содержит: стали конструкционные углеродистые обыкновенного качества общего назначения; стали конструкционные углеродистые качест-

венные; стали конструкционные легированные, стали конструкционные теплоустойчивые; стали и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие, жаропрочные, износостойкие; стали и сплавы для отливок. По каждой из групп сталей и сплавов может быть получена следующая информация: наименование группы материала и марка; группа и оценка свариваемости; заменитель выбранной марки и технологические свойства. Также для каждой марки стали приведены химический состав, основное назначение и применение.

В связи с различием структуры, данные и знания по сварочным материалам размещены в отдельных файлах по видам материалов: покрытые электроды, металлическая проволока сплошного сечения, порошковая проволока. Файл покрытых электродов, применяемых для ручной дуговой сварки, наплавки и резки (Baza\_Weld\_El), содержит практически все известные марки и может постоянно обновляться и расширяться. По каждой из марок в БД и З приведены: основное назначение, технические характеристики, включая производительность сварки и наплавки, типичные механические свойства металла шва при нормальной (кроме особо оговоренных случаев) температуре, ти-

пичный химический состав наплавленного металла, рекомендуемые режимы сварки, технологические особенности применения, условное обозначение электродов или обозначение электродов в документации, соответствие электродов зарубежным стандартам (американскому AWS, международному ISO, немецкому DIN), принятая в соответствии с ГОСТ 9466–75 буквенно-цифровая структура условного обозначения электродов. В этом же файле записаны сведения по неплавящимся (вольфрамовым) электродам.

Файл Svar\_ProvSp содержит информацию по металлическим проволокам сплошного сечения, применяемым для сварки в защитных газах и под флюсом. При выборе пользователем способа сварки и марки проволоки для проведения сравнительного анализа и принятия решения на экран монитора будет выведена следующая информация: основное применение, химический состав проволоки, механические свойства металла сварного шва (для сварки в защитном газе), состояние проволоки (для сварки под флюсом) и рекомендуемые защитные материалы (для сварки под флюсом).

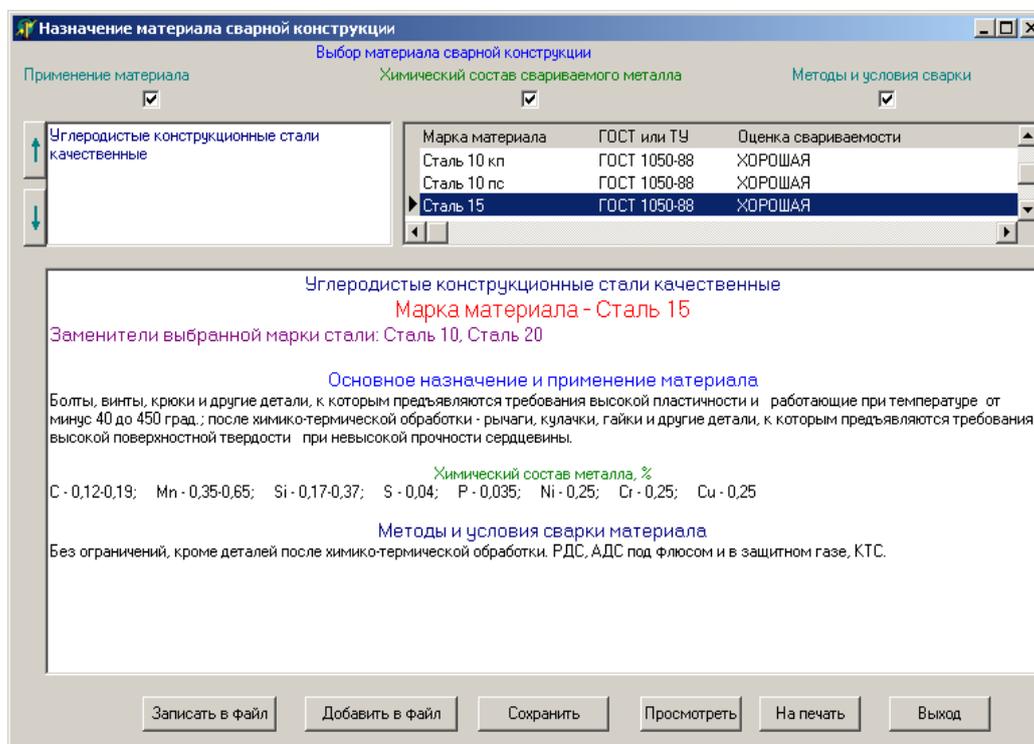


Рис. 3. Пример и результаты работы с технологией назначения материала свариваемой конструкции

Fig. 3. Example and results of work with application technology for material of welded structure

Файл Svago4n\_Mat содержит данные и знания по порошковым проволокам, БД и 3 – информацию по пяти группам свариваемых материалов (стали, чугуны). Каждой из групп свариваемых материалов соответствует подмножество марок порошковых проволок, допустимых для выполнения сварки. Для выбранной марки порошковой проволоки система обеспечивает вывод на экран такой информации, как: назначение, область применения и рекомендации; диаметр, конструкция, тип; сварочные свойства и особенности технологии сварки; химический состав наплавленного металла; механические характеристики металла шва; физические свойства, параметры режима сварки. Защитные материалы (флюсы, газы и их смеси) сгруппированы по видам и размещены в файле BazaDKSvar. Основные виды флюсов приведены в табл. 3.

Каждому виду флюса в БД и 3 поставлено в соответствие подмножество марок флюсов, рекомендуемых для применения. Основные виды защитных газов приведены в табл. 4. Каждому

виду защитных газов в БД и 3 поставлено в соответствие подмножество наименований газов и смесей, рекомендуемых для применения.

Таблица 3

Виды флюсов по содержанию кремния  
Types of fluxes according to silicon content

Код	Вид флюса
1	Высокремнистый
2	Низкремнистый
3	Бескремнистый

Таблица 4

Виды защитных газов  
Types of protective gas

Код	Вид газа
1	Инертный
2	Смесь инертного и активного
3	Активный

Пример и результат работы с системой выбора покрытых электродов для ручной дуговой сварки, наплавки и резки приведены на рис. 4, а пример и результат работы с системой выбора порошковой проволоки – на рис. 5.

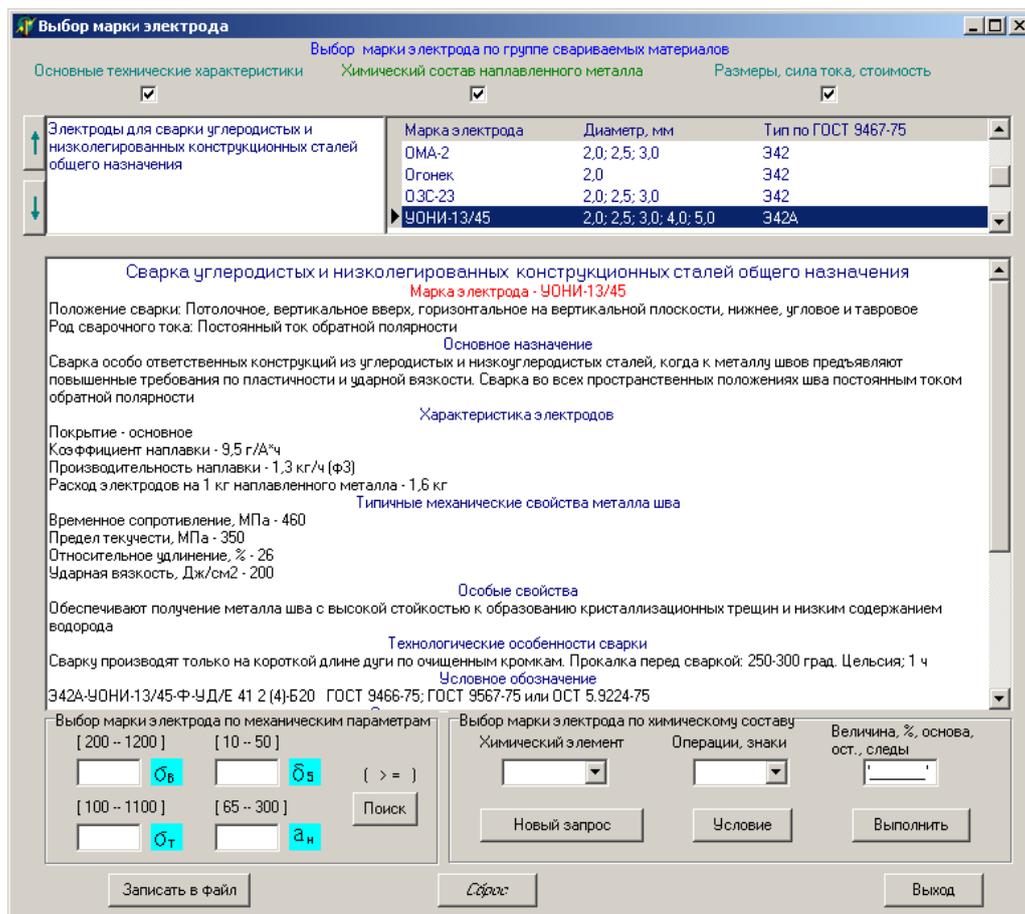


Рис. 4. Пример и результат работы с системой выбора покрытых электродов для ручной дуговой сварки, наплавки и резки

Fig. 4. Example and results of work with selection system of coated electrodes for manual arc welding, depositing and cutting

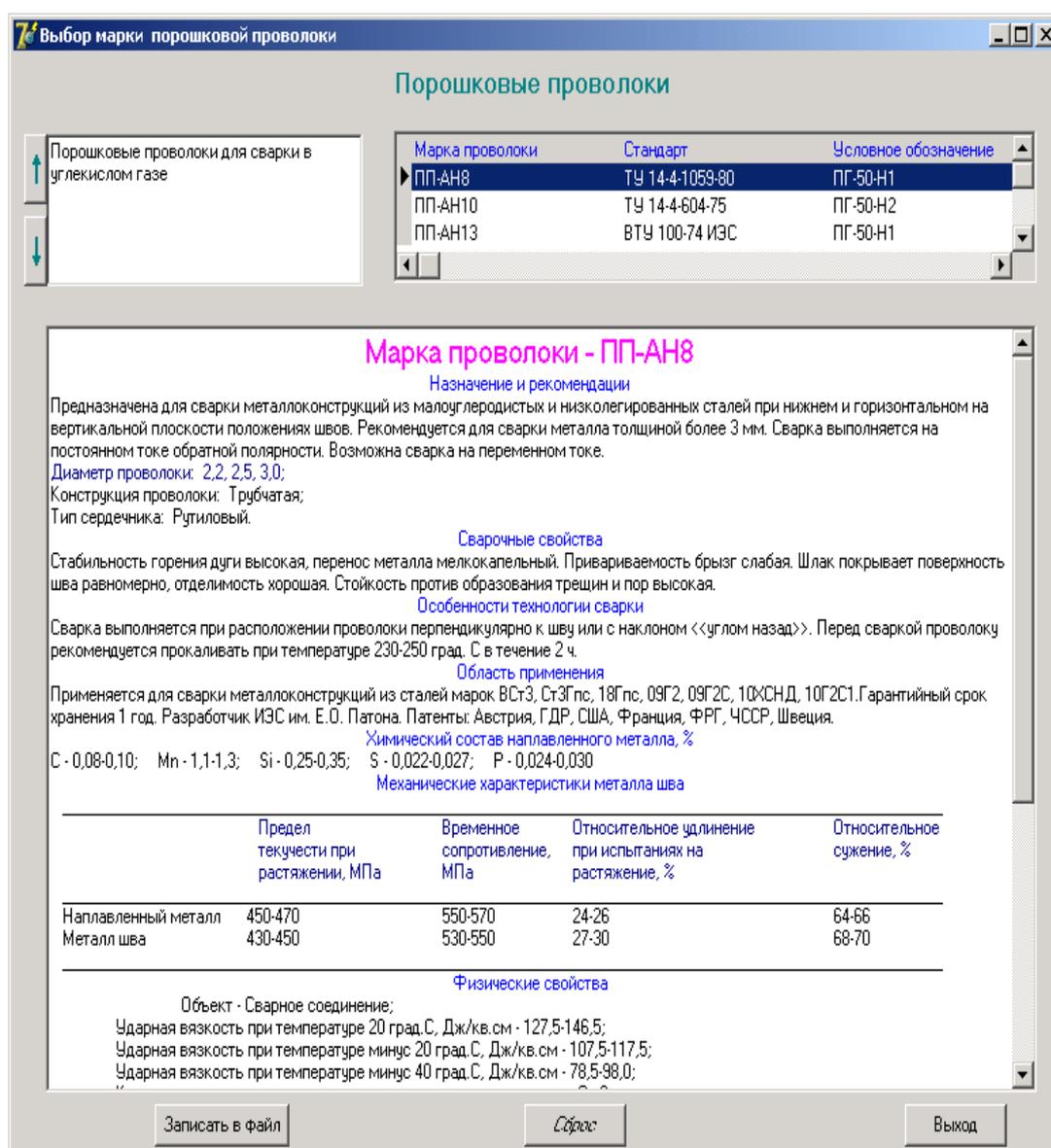


Рис. 5. Пример и результат работы с системой выбора порошковой проволоки

Fig. 5. Example and results of work with selection system of flux cored wire

Для получения информации о сплошных металлических проволоках необходимо задать способ сварки, затем отметить, какая информация нужна (химический состав и/или механические свойства металла сварного шва), и марку проволоки. Пример и результат работы с системой выбора металлической проволоки сплошного сечения приведен на рис. 6.

Данные и знания по способам сварки записаны в файле Gosts\_SpSv, состав БД и 3 приведен в табл. 5.

Типы стандартных сварных соединений в БД и 3 представлены по ГОСТам на спосо-

бы сварки и записаны в формате .bmp в виде отдельных файлов. Система, позволяющая выбирать способ сварки, ограничена подмножеством наиболее распространенных способов в машино- и приборостроении, строительстве, в то же время она открыта для дополнения и развития. База способов сварки представлена отдельным файлом, содержащим подмножество таблиц, в которых приведены код способа, обозначение по стандарту и наименование. Исходными данными для назначения способа сварки являются группа материала и марка.

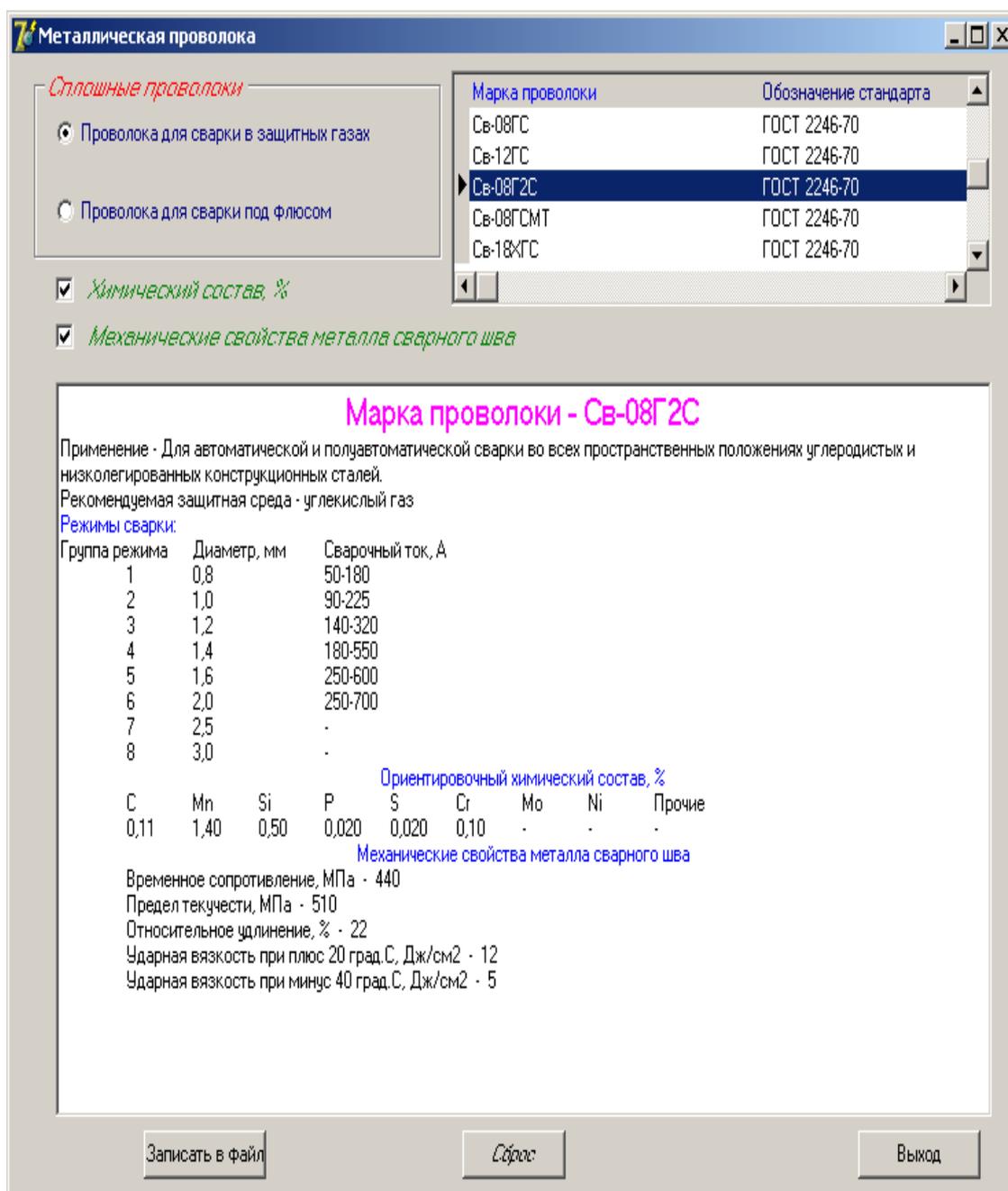


Рис. 6. Пример и результат работы с системой выбора металлической проволоки сплошного сечения  
 Fig. 6. Example and results of work with selection system of continuous metal wire

Таблица 5

Состав базы данных и знаний по способам сварки  
 Composition of database and knowledge base according to welding types

Код стандарта (Kod GOST)	Наименование стандарта (NaimGOST)	Номер стандарта (NomGOST)	Обозначение способа сварки (OboznSS)	Код способа сварки (KSS)	Номер таблицы (NomTab)
1	2	3	4	5	6
1	Ручная дуговая сварка. Соединения сварные	ГОСТ 5264-80	П	1	Tab01_01

Окончание табл. 5

1	2	3	4	5	6
2	Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные	ГОСТ 14771–76	РИН	31	Tab02_31
			АИН	32	Tab02_32
			РИНп	20	Tab02_20
			АИНп	21	Tab02_21
			АИНп-3	22	Tab02_22
			АИП	23	Tab02_23
			МИП	24	Tab02_24
			МУП	3	Tab02_03
3	Дуговая сварка алюминия и алюминиевых сплавов в инертных газах. Соединения сварные	ГОСТ 14806–80	АУП	4	Tab02_04
			РИНп	20	Tab03_20
			АИНп	21	Tab03_21
			АИНп-3	22	Tab03_22
4	Сварка под флюсом. Соединения сварные	ГОСТ 8713–79	АИП	23	Tab03_23
			МИП	24	Tab03_24
			АФ	10	Tab04_10
			АФф	11	Tab04_11
			Афм	12	Tab04_12
			Афо	13	Tab04_13
			Афп	14	Tab04_14
			Афш	15	Tab04_15
			Афк	16	Tab04_16
			МФ	6	Tab04_06
8	Дуговая сварка в защитных газах. Соединения сварные под острыми и тупыми углами	ГОСТ 23518–79	Мфо	7	Tab04_07
			МФш	8	Tab04_08
			МФк	9	Tab04_09
			РИН	31	Tab08_31
			АИН	32	Tab08_32
			АИНп	21	Tab08_21
			РИНп	20	Tab08_20
			АИП	23	Tab08_23
6	Автоматическая и полу- автоматическая дуговая сварка под флюсом. Соединения сварные под острыми и тупыми углами	ГОСТ 11533–75	МИП	24	Tab08_24
			МУП	3	Tab08_03
			АУП	4	Tab08_04
			АФ	10	Tab06_10
			АФс	13	Tab06_13
1	Ручная дуговая сварка. Соединения сварные под острыми и тупыми углами	ГОСТ 11534–75	Афпш	15	Tab06_15
			МФ	6	Tab06_06
9	Дуговая сварка. Соединения сварные стальных трубопроводов	ГОСТ 16037–80	МФс	7	Tab06_07
			МФпш	8	Tab06_08
			П	11	Tab01_11
			Р	1	Tab09_01
			ЗП	3	Tab09_03
10	Дуговая сварка. Соединения сварные трубопроводов из меди и медно-никелевого сплава	ГОСТ 16038–80	ЗН	31	Tab09_31
			Ф	6	Tab09_06
			Г	50	Tab09_50
			ЗН/ЗП	31/3	Tab10_31/3
13	Контактная сварка. Соединения сварные	ГОСТ 15878–79	Р	1	Tab10_01
			ЗП	3	Tab10_03
			ЗН	31	Tab10_31
13	Контактная сварка. Соединения сварные	ГОСТ 15878–79	Кт	36	Tab13_36
			Кш	37	Tab13_37
			Кр	38	Tab13_38

В качестве сварочных материалов, применяемых для ручной дуговой сварки, механизированной и автоматизированной сварки в защит-

ных газах и под флюсом используются покрытые электроды, проволока, защитные газы и флюсы. БД и З экспертной системы по свароч-

ным материалам состоит из четырех файлов. Данные по электродам для сварки, наплавки и резки размещены в файле Baza\_Weld\_El, по порошковым проволокам – в файле Svaro4n\_Mat, по металлическим проволокам сплошного сечения – в файле Svar\_ProvSp, по защитным газам и флюсам – в таблицах файла BazaDKSvar. В каждом из файлов содержится некоторое подмножество таблиц.

Типы сварных соединений в системе представлены для наиболее распространенных в машиностроении и строительстве способов сварки. Имеется дополнительная возможность ознакомиться с общими требованиями к сварным конструкциям, типам сварных соединений и технологической доступности при выполнении сварки. Пример и результат работы с системой выбора типа сварного соединения приведены на рис. 7.

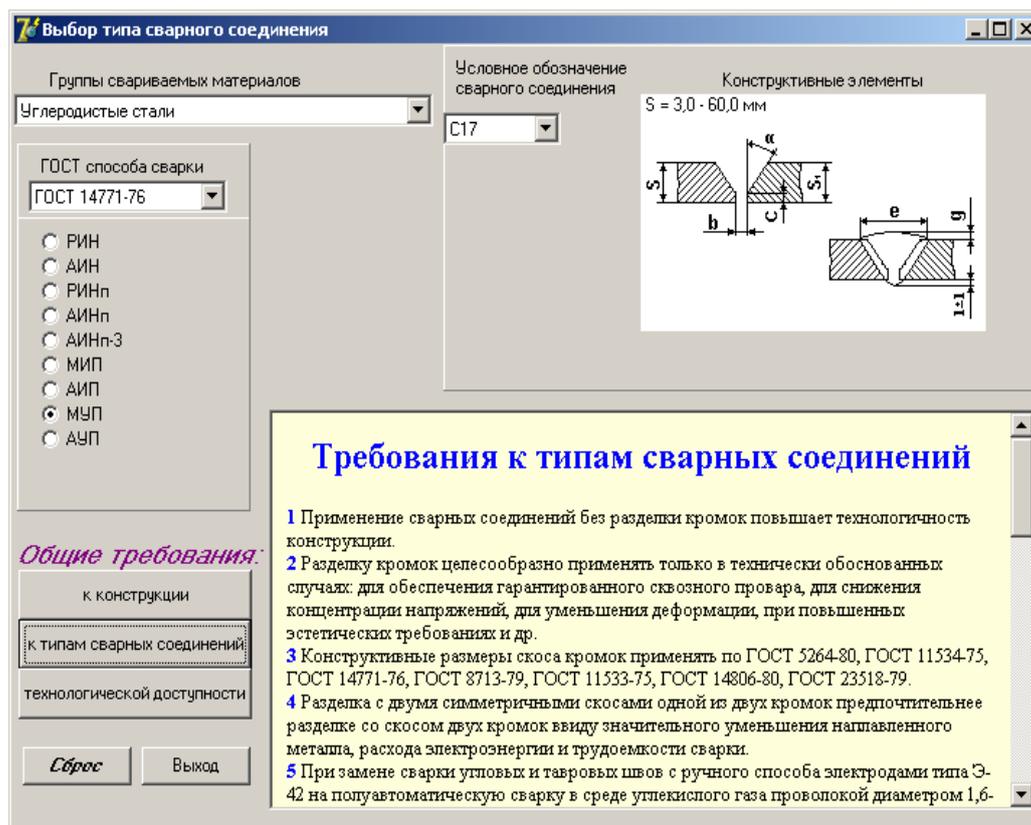


Рис. 7. Пример и результат работы с системой выбора типа сварного соединения

Fig. 7. Example and results of work with selection system of welding joint type

### ВЫВОДЫ

1. С учетом требований международных и отечественных стандартов разработаны базы данных и знаний по свариваемым материалам, способам сварки, сварочным материалам, типам сварных соединений, включающие производительность сварки и наплавки, типичные механические свойства металла шва при нормальной (кроме особо оговоренных случаев) температуре, типичный химический состав наплавленного металла и рекомендуемые режимы сварки, технологические особенности применения, условное обозначение электродов или обозначение электродов в документации,

соответствие электродов зарубежным стандартам – американскому (AWS), международному (ISO), немецкому (DIN), принятому в соответствии с ГОСТ 9466–75 буквенно-цифровую структуру условного обозначения электродов.

2. На основе созданных баз данных и знаний разработана экспертная система, позволяющая осуществлять технически обоснованный выбор свариваемых и сварочных материалов, способов сварки, типов сварных соединений и параметров режима сварки, повысить качество принимаемых проектных решений за счет сокращения затрат ручного труда на работу с нормативно-справочной документацией, анализ и оценку множества возможных альтерна-

тив, сократить затраты труда при отработке конструкций на технологичность, обеспечить снижение материалоемкости сварных конструкций и на этом этапе гарантировать бездефектное формирование сварных соединений.

3. Разработанная экспертная система внедрена на ряде предприятий республики, в том числе в ОАО «ЦентроЭнергоМонтаж», ОАО «Промтехмонтаж», ОАО «ГродноАзот», ОАО «Мозырьремспецстрой», ОАО «Белсантехмонтаж-2», ОАО «Мотовело», ЗАО «Атлант».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Занковец, П. В. Математическое моделирование влияния производственных факторов на образование дефектов сварных соединений / П. В. Занковец, В. К. Шелег // Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах: сб. трудов 2-й междунар. конф. Киев: ИЭС имени Е. О. Патона НАН Украины, 2004. С. 95–98.
2. Совершенствование технологических процессов и оптимизация качества сборочно-сварочных работ / П. В. Занковец [и др.]. Минск, 2004. 343 с.
3. Занковец, П. В. Разработка методов и исследование причин дефектности сварных соединений / П. В. Занковец, Г. Н. Здор, В. К. Шелег // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2006. № 2. С. 107–113.
4. Занковец, П. В. Математическое моделирование и информационные технологии в обеспечении качества сварных металлоконструкций / П. В. Занковец // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2007. № 2. С. 120–128.
5. Занковец, П. В. Оптимизация качества и конкурентоспособности сварочной продукции на основе математического моделирования причинно-следственных связей образования дефектов сварных соединений / П. В. Занковец // Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах: сб. трудов 4-й междунар. конф. Киев: ИЭС имени Е. О. Патона НАН Украины, 2009. С. 17–22.
6. Занковец, П. В. Использование математического моделирования для исследования влияния сварочных материалов на качество сварных соединений трубопроводов / П. В. Занковец // Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2010. № 4. С. 24–27.
7. Zankovets, P. V. Level of Effect of Preparation End Assembly for Welding on Quality of Welded Joints for Industrial Pipelines / P. V. Zankovets // The Paton Welding Journal. 2011. № 6. P. 40–44.
8. Занковец, П. В. Основы формирования бездефектных сварных соединений в условиях мелкосерийного и единичного сборочно-сварочного производства / П. В. Занковец // Сварка и родственные технологии: сб. докл. Междунар. симпозиума. Минск, 2012. С. 49–54.
9. Занковец П. В. Информационно-аналитические системы в обеспечении качества сварочных работ / П. В. Занковец // Эффективная сварка: качество, безопасность, ресурсосбережение: сб. докл. III межотрасл. науч.-практ. конф. Минск, 2016. С. 143–149.

Поступила 06.07.2016

Подписана в печать 20.09.2016

Опубликована онлайн 30.01.2017

## REFERENCES

1. Zankovets P. V., Sheleg V. K. (2004) Mathematical Simulation of Production Factors Influence on Defect Formation in Welded Joints. *Matematicheskoe Modelirovanie i Informatsionnye Tekhnologii v Svarke i Rodstvennykh Protseсах: Sb. Tr. 2-i Mezhdunar. Konf.* [Mathematical Simulation and Information Technologies in Welding and Allied Processes: Collected Papers of the 2<sup>nd</sup> International Conference]. Kiev, Institute of Electric them. Paton NASU, 95–98 (in Russian).
2. Zankovets P. V., Sheleg V. K., Denisov L. S., Berbasova N. Iu., Pavliuk S. K. (2004) *Improvement of Technological Processes and Quality Optimization for Assembly and Welding Works.* Minsk, Pravo i Ekonomika. 343 (in Russian).
3. Zankovets P. V., Zdor G. N., Sheleg V. K. (2006) Development of Methods and Investigation of Defect Reasons for Welded Joints. *Izvestiia Natsionalnoi Akademii Nauk Belarusi. Ser. Fiziko-Tekhnicheskikh Nauk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physico-Technical Series], (2), 107–113 (in Russian).
4. Zankovets P. V. (2007) Mathematical Simulation and Information Technologies in Quality Assurance for Welded Metal Structures. *Izvestiia Natsionalnoi Akademii Nauk Belarusi. Ser. Fiziko-Tekhnicheskikh Nauk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physico-Technical Series], (2), 120–128 (in Russian).
5. Zankovets P. V. (2009) Quality and Competitiveness Optimization for Welding Products on the Basis of Mathematical Simulation of Cause-and-Effect Relations for Defect Formation in Welded Joints. *Matematicheskoe Modelirovanie i Informatsionnye Tekhnologii v Svarke i Rodstvennykh Protseсах: Sb. Tr. 4 Mezhdunar. Konf.* [Mathematical Simulation and Information Technologies in Welding and Allied Processes: Collected Papers of the 4<sup>th</sup> International Conference]. Kiev, Institute of Electric them. Paton NASUP. 17–22 (in Russian).
6. Zankovets P. V. (2010) Usage of Mathematical Simulation for Investigation of Welding Material Influence on Quality of Pipeline Welded Joints. *Truboprovodny Transport (Teoriya i Praktika)* [Pipeline Transport – Theory and Practice], (4), 24–27 (in Russian).
7. Zankovets P. V. (2011) Level of Effect of Preparation and Assembly for Welding on Quality of Welded Joints for Industrial Pipelines. *The Paton Welding Journal*, 6, 40–44.
8. Zankovets P. V. (2012) Fundamentals on Formation of Defectless Welded Joints under Conditions of Small-Scale and Individual Assembly and Welding Production. *Svarka i Rodstvennye Tekhnologii: Sb. Dokl. Mezhdunar. Simp.* [Welding and Allied Technologies: Collected Papers of the International Symposium]. Minsk, 49–54 (in Russian).
9. Zankovets P. V. (2016) Information and Analytical Systems for Welding Work Quality Assurance. *Effektivnaia Svarka: Kachestvo, Bezopasnost, Resursoberezhenie: Sb. Dokl. III Mezhotrasl. Nauch.-Prakt. Konf.* [Effective Welding: Quality, Safety, Resource-Saving: Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Inter-Industry Scientific and Practical Conference]. Minsk, 143–149 (in Russian).

Received: 06.07.2016

Accepted: 20.09.2016

Published online: 30.01.2017

## Интенсификация процесса разделения пруткового материала на мерные заготовки клиновидными ножами

Докт. техн. наук, проф. Л. А. Исаевич<sup>1)</sup>, канд. техн. наук, доц. М. И. Сидоренко<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017  
Belarusian National Technical University, 2017

**Реферат.** На основе анализа известных способов разделения пруткового сортамента на мерные заготовки установлено, что наиболее эффективным является способ формообразования в нем кольцевой канавки клиновидного сечения пластическим деформированием металла дисковыми ножами, при постепенном углублении которой происходит разрушение сортамента в этой зоне. С целью снижения глубины канавки предложено после ее формообразования производить в этой же зоне локальный изгиб прутка. На основании полученных экспериментальных данных предложена эмпирическая формула, показывающая зависимость угла изгиба оси прутка от глубины кольцевой канавки. Установлено, что наибольшее влияние на угол локального изгиба оси прутка в зоне кольцевой канавки происходит при изменении ее глубины от 0,5 до 3,0 мм. Причем эта зависимость имеет степенной характер. Уменьшение угла локального изгиба оси заготовки для указанного интервала глубин канавки будет находиться в пределах  $8,83^{\circ}$ – $2,23^{\circ}$ . Дальнейшее увеличение глубины кольцевой канавки не имеет практического смысла, поскольку угол изгиба оси прутка при этом уменьшается незначительно. Установленная зависимость справедлива для процесса разделения прутков дисковыми клиновидными ножами с локальным изгибом их оси и практически не зависит от исходного диаметра разделяемого сортамента. Поэтому процесс может эффективно осуществляться при глубине канавки, не превышающей 3,0 мм.

**Ключевые слова:** пруток, заготовка, кольцевая канавка, локальный изгиб, глубина, угол, фаска, диаметр, ножи, концентратор напряжений

**Для цитирования:** Исаевич, Л. А. Интенсификация процесса разделения пруткового материала на мерные заготовки клиновидными ножами / Л. А. Исаевич, М. И. Сидоренко // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 1. С. 16–20. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-16-20

## Intensification of Separation Process for Bar Material in Cut-to-Length Sections by Wedge-Shaped Knives

L. A. Isaevich<sup>1)</sup>, M. I. Sidorenko<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** It has been established on the basis of well-known method analysis on separation of bar materials in cut-to-length sections that a method for shape-formation of an annular groove in the bar material which has tapered cross-section is considered as the most efficient one. The annular groove has been formed by plastic metal deformation with the help of disk cutting shears. Bar material fracture occurs in the groove zone when it has progressive deepening. In order to decrease groove depth it has been proposed to make a local bar bending in this zone after completion of groove shape-formation process. An empirical formula has been recommended on the basis of the obtained experimental data and it demonstrates dependence of bar bending angle on annular groove depth. It has been found that maximum impact on local bending angle of bar axis in the annular groove zone originates in the case when its depth is changing from 0.5 to 3.0 mm and the dependence has power-law character. Decrease in the local bending angle of the workpiece axis for specified range of the groove depth will be within the following limits:  $8.83^{\circ}$  to  $2.23^{\circ}$ . A further increase in the depth of the annular groove is out of practical importance because in this case the angle of bar bending axis is decreasing insignificantly. The determined dependence is valid for separation process of bars with the help of disk wedge-shaped knives. In this case local bending of the axis takes place and the dependence is not dictated by an initial diameter of bar material which is to be separated. Therefore, the process can be carried out efficiently when the groove depth does not exceed 3.0 mm.

**Keywords:** bar, workpiece, annular groove, local bending, depth, angle, chamfer, diameter, knives, stress concentrator

**For citation:** Isaevich L. A., Sidorenko M. I. (2017) Intensification of Separation Process for Bar Material in Cut-to-Length Sections by Wedge-Shaped Knives. *Science and Technique*. 16 (1), 16–20. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-16-20 (in Russian)

### Адрес для переписки

Исаевич Леонид Александрович  
Белорусский национальный технический университет  
ул. Я. Коласа, 24,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 296-67-85  
nitomd@bntu.by

### Address for correspondence

Isaevich Leonid A.  
Belarusian National Technical University  
24 Ya. Kolasa str.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 296-67-85  
nitomd@bntu.by

### Введение

Известно [1], что для процессов безоблойной штамповки, холодного выдавливания, холодной поперечной прокатки и других предъявляются повышенные требования к качеству исходных заготовок, в которых должны отсутствовать вырывы, задиры, смятины и утяжины на торцах и боковой поверхности, отклонения от перпендикулярности торцов к оси заготовки. Распространенные в заготовительном производстве способы разделения прутковых материалов в штампах в большинстве своем не удовлетворяют этим требованиям [2]. Поэтому в ряде случаев прибегают к резке прутков пилами либо с помощью токарных автоматов. Однако производительность таких процессов сравнительно низка и значительная часть металла уходит в стружку [3].

Более совершенными и экономически оправданными являются процессы разделения прутковых материалов методами поперечно-клиновой прокатки [4–7]. Однако возможности таких методов ограничиваются рядом нерешенных проблем, среди которых – получение коротких заготовок с отношением длины к диаметру менее единицы, разделение прутков большого диаметра и др.

### Основная часть

При использовании способа, представленного в [7], решающее влияние на условия разделения пруткового материала на мерные заготовки оказывает глубина внедрения в него клиновидных дисковых ножей с формованием на торцах заготовок фасок соответствующей величины (рис. 1) [8].

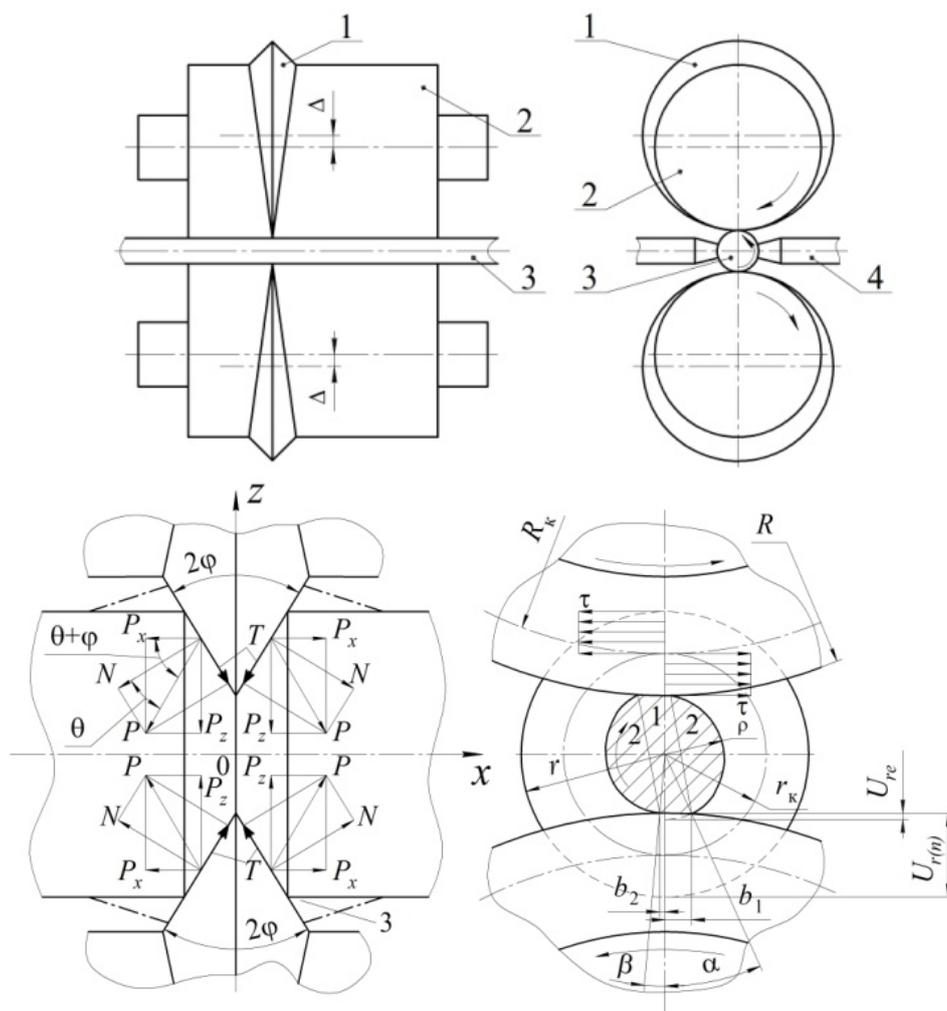


Рис. 1. Схемы разделения пруткового сортамента на мерные заготовки и действующих сил в очаге деформации:  
1 – дисковый нож с клиновидным лезвием; 2 – валки; 3 – пруток; 4 – проводки

Fig. 1. Schemes for separation of bar assortment on cut-to-length sections and active forces in deformation zone:  
1 – circular knife with wedge-shaped blade; 2 – rollers; 3 – bar; 4 – wirings

В свою очередь, представленное последнее решение не всегда приемлемо из-за конструктивных особенностей получаемых заготовок, в которых вводятся ограничения на размер фасок. С целью минимизации этого параметра предложено устройство [7, 8], в котором после предварительного формообразования в прутке клиновидной кольцевой канавки отделяемую его часть отгибают в процессе вращения прутка (рис. 2).

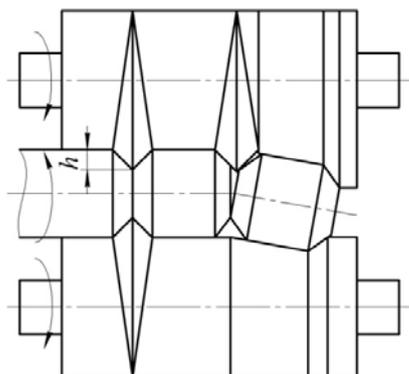


Рис. 2. Сборный инструмент для поперечной прокатки тел вращения

Fig. 2. Assembled tool for cross rolling of solids of revolution

В этом случае большую роль играет угол изгиба оси прутка в зоне формообразованной канавки, при котором происходит отделение

самой заготовки. Его можно рассчитать с помощью эмпирической формулы

$$\psi = \arctg \frac{1}{l} \left( \frac{K_1}{2^{2K-1}} + K_2 \right), \quad (1)$$

где  $K_1, K_2$  – коэффициенты, имеющие размерность в мм;  $K$  – безразмерный коэффициент, численно равный  $h$ ;  $h$  – глубина канавки (внедрения ножа), мм;  $l$  – расстояние от линии дна канавки, мм, до точки приложения отгибающей силы  $P$ .

Формула (1) составлена на основании экспериментальных данных, полученных при разделении прутков на токарном станке (рис. 3).

После нанесения на прутке резцом канавки с углом при вершине  $2\varphi$  и глубиной  $h$  заготовку отгибают с помощью роликовой головки на угол  $\psi$  вплоть до разрушения материала в зоне канавки, фиксируя при этом значение параметра  $m$  смещения головки. С изменением глубины  $h$  канавки будет меняться и значение параметра  $m$ , которое фиксируется с помощью поперечного перемещения суппорта станка с точностью 0,05 мм. В случае разделения таким путем прутка диаметром 20 мм из стали 35 в состоянии поставки при угле канавки  $2\varphi = 60^\circ$  получены данные, которые после статистической обработки [9] представлены в табл. 1.

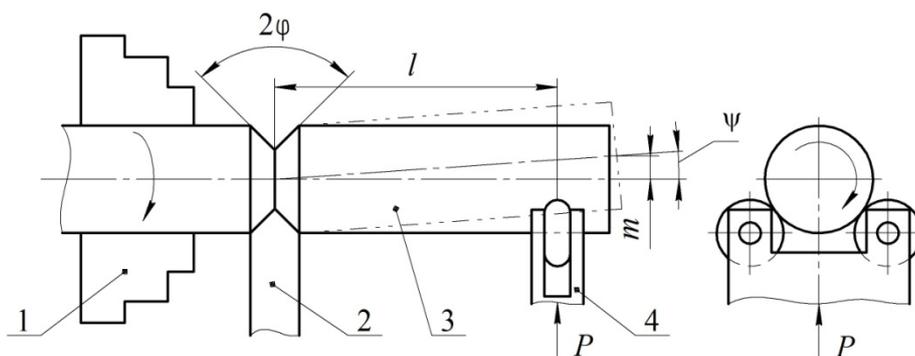


Рис. 3. Схема разделения прутка на заготовки в токарном станке:

1 – пруток; 2 – резец; 3 – заготовка; 4 – роликовая головка

Fig. 3. Scheme for separation of bar on work-pieces in a lathe:

1 – bar; 2 – cutter; 3 – work-piece; 4 – roller head

Экспериментальные данные измерения параметра  $m$  от глубины канавки  $h$   
Experimental data for measuring parameter  $m$  from groove depth  $h$

Таблица 1

$h$ , мм	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5
$m$ , мм	15,5	9,5	6,5	5,0	4,25	3,9	3,7	3,6	3,55	3,5	3,5

При этом расстояние между острием резца и точкой приложения отгибающей силы  $P$  составляет  $l = 100$  мм. По приведенным данным построена графическая зависимость параметра  $m$  от глубины канавки  $h$  (рис. 4).

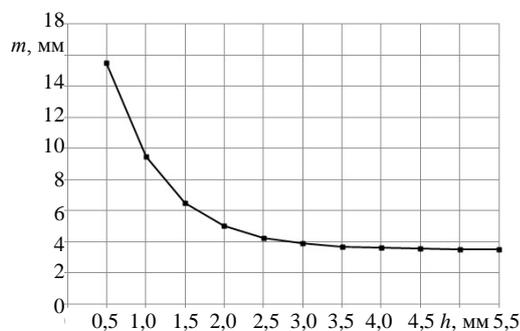


Рис. 4. Зависимость параметра  $m$  от глубины канавки  $h$  в момент разрушения образца

Fig. 4. Dependence of parameter  $m$  on groove depth  $h$  at the moment of specimen fracture

Из приведенных данных следует, что наиболее существенно параметр  $m$  меняется при глубинах канавки в интервале  $h = 0,5-3,0$  мм. При более значительных глубинах канавки это изменение несущественно. Подставим в (1) полученные на основе эксперимента значения  $K_1 = 12$  мм,  $K_2 = 3,5$  мм,  $K = h$  и  $l = 100$  мм. Тогда оно примет вид

$$\psi = \arctg 0,01 \left( \frac{12}{2^{2h-1}} + 3,5 \right). \quad (2)$$

Рассчитаем с его помощью значения угла  $\psi$  для разных глубин  $h$  канавки. Полученные в результате расчетов данные представлены в табл. 2.

Анализируя данные табл. 2, а также уравнение (2), можно отметить, что наибольшее влияние на изгиб прутка в зоне кольцевой канавки оказывает ее глубина в пределах  $h = 0,5-3,0$  мм. Дальнейшее увеличение этой глубины несущественно изменяет значение угла  $\psi$  изгиба. Это дает основание считать указанный интервал глубины канавки вполне определенным и обеспечивающим эффективное разделение прутка

с помощью предложенного технологического приема.

Сравнивая полученные результаты с данными [10], нетрудно заметить, что в известном случае для эффективного разделения прутка диаметром 20 мм просто клиновидными роликовыми ножами потребовалось бы сформировать канавку глубиной не менее 5 мм. Таким образом, существенное влияние локального изгиба прутка в зоне клиновидной кольцевой канавки на снижение ее глубины при отделении заготовки очевидно. Положительное воздействие изгиба прутка в зоне разделения, по мнению авторов, можно объяснить тем, что согласно [11] при одноосном растяжении образцов с надрезами у дна этого надреза возникает высокая концентрация напряжений. Она зависит от глубины надреза и радиуса закругления у его вершины, что отражается соответствующим уравнением

$$\sigma_{\max} = 2\sigma_{\text{cp}} \sqrt{\frac{h}{\rho_k}}, \quad (3)$$

где  $\sigma_{\text{cp}}$  – среднее растягивающее напряжение по сечению образца, МПа;  $\sigma_{\max}$  – максимальное растягивающее напряжение у дна канавки, МПа;  $\rho_k$  – радиус закругления у вершины канавки, мм.

В момент локального изгиба прутка в зоне кольцевой канавки у дна последней возникает высокая концентрация растягивающих напряжений со стороны растянутых волокон пруткового сортамента. Это в процессе поворота прутка вокруг своей оси обеспечивает постепенное зарождение трещин, сливающихся в единое целое в момент разрушения по опасному сечению.

Проведенные исследования также показали, что при разделении таким способом прутков диаметром 15, 20, 25 и 30 мм не выявили существенного влияния данного параметра на изменение установленной зависимости между глубиной канавки и углом локального изгиба прутка.

Таблица 2

Расчетные данные изменения угла  $\psi$  изгиба прутка в зоне кольцевой канавки от ее глубины  $h$   
Calculated data for changing angle  $\psi$  of bar bending in annular groove zone according to its depth  $h$

$h$ , мм	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5
$\psi$ , град.	8,83	5,43	3,73	2,88	2,43	2,23	2,13	2,10	2,03	2,01	2,00

**ВЫВОДЫ**

1. На основании проведенных исследований при разделении прутков с помощью клиновидных вращающихся дисков установлено, что в случае наличия локального изгиба прутка в зоне сформированной кольцевой канавки клиновидного сечения для обеспечения эффективного отделения заготовки глубина этой канавки может быть значительно меньше, чем в отсутствие указанного изгиба.

2. С учетом полученных экспериментальных данных показано, что значение угла локального изгиба прутка в зоне кольцевой канавки при ее глубине не менее 0,5 мм не превышает 9° и не зависит от диаметра разделяемого прутка.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Ковка и штамповка: справ.: в 4 т. / В. И. Семенов (гл. ред.) [и др.]. М.: Машиностроение, 1985–1987. Т. 3: Холодная объемная штамповка / под ред. Г. А. Навроцкого. 1987. 384 с.
2. Соловцов, С. С. Отрезка в штампах точных заготовок от сортового проката / С. С. Соловцов. М.: НИИМаш, 1980. 52 с.
3. Егоров, М. Е. Технология машиностроения / М. Е. Егоров, В. И. Дементьев, В. Л. Дмитриев. М.: Высш. шк., 1976. 534 с.
4. Клущин, В. А. Совершенствование поперечно-клиновой прокатки / В. А. Клущин, Е. М. Макушок, В. Я. Щукин. Минск: Наука и техника, 1974. 155 с.
5. Казанская, И. И. Станы для производства точных заготовок машиностроительных деталей / И. И. Казанская, В. Ф. Мухонин, Ю. А. Марков // Кузнечно-штамповочное производство. 1984. № 4. С. 5–8.
6. Васильчиков, М. В. Производство точных заготовок машиностроительных деталей прокаткой / М. В. Васильчиков, М. В. Барбарич, Е. А. Жукевич-Стоша. М.: МТЭиТМ, 1968. 338 с.
7. Сидоренко, М. И. Разделение прутков на мерные заготовки / М. И. Сидоренко. Минск: Парадокс, 1999. 228 с.
8. Инструмент для поперечной прокатки тел вращения: а. с. 1292887 СССР, МПК4 В21Н 1/18 / А. В. Степаненко, Л. А. Исаевич, М. И. Сидоренко; дата публ.: 28.02.1987.
9. Степнов, М. Н. Статистические методы обработки результатов технических испытаний: справ. / М. Н. Степнов. М.: Машиностроение, 1985. 232 с.
10. Сидоренко, М. И. Особенности разделения пруткового сортамента на мерные заготовки роликовыми клино-

видными ножами / М. И. Сидоренко // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2012. № 1. С. 43–50.

11. Губкин, С. И. Пластическая деформация металлов / С. И. Губкин. М.; Л.: ОНТИ НКТП, 1935. 448 с.

Поступила 04.07.2016

Подписана в печать 20.09.2016

Опубликована онлайн 30.01.2017

**REFERENCES**

1. Navrotsky G. A. (Editorship) [et al.] (1987) *Forging and Stamping. Reference Book. Vol. 3. Cold Die Forging*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 384 (in Russian).
2. Solovtsov S. S. (1980) *Die Cutting of Precise Blanks from Rolled Sections*. Moscow, Scientific Research Institute of Mechanical Engineering. 52 (in Russian).
3. Egorov M. E., Dementiev V. I., Dmitriev V. L. (1976) *Mechanical Engineering Technology*. Moscow, Vysshaya Shkola. 534 (in Russian)
4. Klushin V. A., Makushok E. M., Shchukin V. Ya. (1974) *Improvement of Cross-Wedge Rolling*. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ. 155 (in Russian).
5. Kazanskaya I. I., Mukhonin V. F., Markov Yu. A. (1984) *Mills for Production of Precise Blanks for Machine Parts. Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo [Forging and Stamping Production]*, (4), 5–8 (in Russian).
6. Vasilchikov M. V., Barbarich M. V., Zhukevich-Stosha E. A. (1968) *Production of Precise Blanks for Machine Parts while Using Rolling Process*. Moscow, Ministry of Heavy Power and Transport Engineering. 338 (in Russian).
7. Sidorenko M. I. (1999) *Separation of Bars in Cut-to-Length Sections*. Minsk, Paradoкс Publ. 228 (in Russian).
8. Stepanenko A. V., Isaevich L. A., Sidorenko M. I. (1987) *Tool for Cross Rolling of Rotation Bodies*. Inventors Certificate 1292887 USSR (in Russian).
9. Stepnov M. N. (1985) *Statistical Methods for Processing of Technical Test Results: Reference Book*. Moscow, Mashinostroyeniye. 232 (in Russian).
10. Sidorenko M. I. (2012) *Specific Features Pertaining to Separation of Bar Assortment in Cut-to-Length Sections while Using Roller Wedge-Like Blade*. *Izvestia Natsionalnoi Akademii Nauk Belarusi. Ser. Fiziko-Tekhnicheskikh Nauk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physico-Technical Series], (1), 43–50 (in Russian).
11. Gubkin S. I. (1935) *Plastic Deformation of Metals*. Moscow; Leningrad, United Scientific and Technical Publishing House – Peoples' Commissariat of Heavy Industry. 448 (in Russian).

Received: 04.07.2016

Accepted: 20.09.2016

Published online: 30.01.2017

DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-21-27

УДК 621.793.71

## Разработка комплекса оборудования для нанесения плазменных керамических покрытий

Асп. В. В. Оковитый<sup>1)</sup>, докт. техн. наук, проф. О. Г. Девойно<sup>1)</sup>, канд. техн. наук В. А. Оковитый<sup>1)</sup>,  
чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. Ф. И. Пантелеенко<sup>1)</sup>,  
чл.-кор. НАН Беларуси, докт. физ.-мат. наук, проф. В. М. Асташинский<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

<sup>2)</sup>Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017  
Belarusian National Technical University, 2017

**Реферат.** Разработан комплекс оборудования для формирования плазменных керамических покрытий, приведены характеристики и результаты тестирования данного комплекса. Методика экспериментов основана на исследованиях структурных элементов композиционных плазменных покрытий системы  $ZrO_2-Y_2O_3$ , полученных с помощью разработанного комплекса оборудования. Один из наиболее эффективных способов защиты деталей от высокотемпературной коррозии и окисления – формирование на их поверхности плазменных теплозащитных покрытий. К теплозащитным покрытиям предъявляются очень жесткие требования: они должны характеризоваться плавным изменением физико-механических свойств (пористости, микротвердости, модулей упругости) в сечении от металлической основы к внешнему керамическому слою; выдерживать многократные циклы теплосмен в пределах от комнатной температуры до температуры эксплуатации; сохранять газонепроницаемость в условиях эксплуатации и обеспечивать при этом достаточно высокий уровень адгезионной прочности. Для реализации новых технологических схем нанесения теплозащитных покрытий с повышенными эксплуатационными характеристиками разработан, запатентован и изготовлен целый спектр нового оборудования. Предлагаемые авторами плазматрон ПБГ-1 и порошковый питатель ППБГ-04 имеют минимум в 2–3 раза больше ресурс работы при напылении керамических материалов по сравнению с серийным оборудованием фирмы «Плазма-Техник». Это достигается за счет изменения конструкции катодно-анодного узла плазматрона и подающего узла питателя, способствующих равномерной подаче порошка в плазменную струю и лучшему его проплавлению. В результате получают более качественные плазменные покрытия, с повышенными эксплуатационными характеристиками: прочность сцепления увеличивается в 1,3–2 раза, коэффициент использования материала – в 1,5–1,6 раза, микротвердость – в 1,2–1,4 раза, пористость уменьшается в 2–2,5 раза.

**Ключевые слова:** плазменные керамические покрытия, диоксид циркония, плазматрон, порошковый питатель, эксплуатационные характеристики, прочность сцепления, пористость

**Для цитирования:** Разработка комплекса оборудования для нанесения плазменных керамических покрытий / В. В. Оковитый [и др.] // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 1. С. 21–27. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-21-27

## Development of Equipment Complex for Plasma Spray Ceramic Coatings

V. V. Okovity<sup>1)</sup>, O. G. Devoyno<sup>1)</sup>, V. A. Okovity<sup>1)</sup>, F. I. Panteleenko<sup>1)</sup>, V. M. Astashinsky<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>2)</sup>A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** An equipment complex has been developed for formation of plasma spray ceramic coatings. The paper presents characteristics and testing results of the given complex. Methodology for experiments is based on investigation of structural elements of composite plasma coatings for system  $ZrO_2-Y_2O_3$  which have been obtained while using the developed equipment

### Адрес для переписки

Оковитый Вячеслав Александрович  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-93-71  
niil\_svarka@bntu.by

### Address for correspondence

Okovity Vyacheslav A.  
Belarusian National Technical University  
65 Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 293-93-71  
niil\_svarka@bntu.by

complex. One of the most effective methods for protection of parts against high temperature corrosion and oxidation is formation of plasma thermal barrier coatings on their surface. Rather severe requirements are imposed on thermal barrier coatings: they must be characterized by a smooth change of physico-mechanical properties (porosity, micro-hardness, elastic modulus) in the cross section from metal substrate to outer ceramic layer; they must withstand multiple cycles of thermal cycling within the following limits: from room temperature to operating temperature; they must maintain gas-tightness under operating conditions and thus they must ensure rather high level of adhesive strength. A range of new equipment has been developed, patented and manufactured for realization of new technological schemes for application of thermal barrier coatings with high operational characteristics. The proposed ПБГ-1 (PBG-1) plasmatron and powder feeder ППБГ-04 (PPBG-04) have a service life for deposition of ceramic materials which is at least 2–3 times higher in comparison with the standard equipment of the “Plasma-Technik” company. Such characteristic is obtained due to changes in design of cathode-anode plasma torch unit and feeder delivery unit which ensure uniform supply of powder into plasma jet and its better fusion penetration. The proposed methodology makes it possible to obtain more qualitative plasma coatings with improved operational characteristics: adhesion strength is increased by 1.3–2 fold, material utilization rate – by 1.5–1.6 fold, micro-hardness – by 1.2–1.4 fold, porosity is reduced by 2–2.5 fold.

**Keywords:** plasma ceramic coatings, zirconium dioxide, plasmatron, powder feeder, operating characteristics, adhesive strength, porosity

**For citation:** Okovity V. V., Devoino O. G., Okovity V. A., Panteleenko F. I., Astashinsky V. M. (2017) Development of Equipment Complex for Plasma Spray Ceramic Coatings. *Science and Technique*. 16 (1), 21–27. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-21-27 (in Russian)

## Введение

Основной метод, используемый для нанесения теплозащитных покрытий (ТЗП) из диоксида циркония, – плазменное напыление (до 90 % разработок) [1–4]. Положительные результаты получены также при использовании электронно-лучевого, ионно-плазменного напылений, магнетронного распыления. Тем не менее преимущественное распространение плазменного напыления ТЗП сохраняется, прежде всего, вследствие его высокой производительности и универсальности, позволяющих наносить металлические и керамические материалы заданных химического и фазового составов. Рабочая температура деталей и узлов газотурбинных двигателей (ГТД) характеризуется тенденцией роста, что, в свою очередь, позволяет повысить мощность установок и коэффициент полезного действия (КПД). Ответственные узлы ГТД изготавливаются из жаропрочных никелевых сплавов типа ЖС6К, ЦНК7РС, ЭИ893, ЭИ929 и др. [5–7]. Однако при удовлетворительных значениях жаропрочности эти сплавы характеризуются относительно низкой стойкостью к коррозионному воздействию продуктов сгорания топлива и высокотемпературному окислению в условиях повышенных рабочих температур. Один из наиболее эффективных способов защиты деталей от высокотемпературной коррозии и окисления – формирование на их поверхности плазменных ТЗП [8–10]. К теплозащитным покрытиям предъявляются очень жесткие требования. Покрытия должны [11–13]:

- характеризоваться плавным изменением физико-механических свойств (пористости,

микротвердости, модулей упругости) в сечении от металлической основы к внешнему керамическому слою;

- выдерживать многократные циклы тепло-смен в пределах от комнатной температуры до температуры эксплуатации;

- сохранять газонепроницаемость в условиях эксплуатации и обеспечивать при этом достаточно высокий уровень адгезионной прочности.

На основании изложенного можно сделать вывод о том, что разработка технологических процессов плазменного напыления ТЗП на детали газотурбинных двигателей является важной народно-хозяйственной задачей. Ее выполнение требует решения проблем, связанных с изучением и созданием методов регулирования свойств материалов, технологий их напыления, разработки комплекса оборудования для нанесения ТЗП.

## Разработка оборудования для нанесения теплозащитных покрытий

Наиболее часто для напыления ТЗП используется плазменное оборудование фирмы «Плазма-Техник» (рис. 1а). Единственным, но существенным недостатком ее плазмотронов является ограниченный ресурс катодно-анодного узла. При жестких режимах работы, больших токах и расходах плазмообразующего газа происходит интенсивный износ катода. Приходится останавливать процесс напыления, выключать установку, разбирать плазменную горелку и менять катодно-анодный узел, что приводит к нестабильности наносимых покрытий. Поэтому авторами

разработан и запатентован аксиальный кантовый плазматрон ПБГ-1 [14–17] (рис. 1b), который лишен этих недостатков. При износе электрода и увеличении межэлектродного зазора электрод можно передвинуть в канте, с помощью специального приспособления замерить межэлектродное пространство и продолжать процесс напыления. На установке «Плазма-Техник» стандартной комплектации с порошковым питателем TWIN-10 производили испытания серийного плазматрона и плазматрона ПБГ-1. В качестве рабочего газа использовали азот. На первом этапе выполняли испытания плазматронов на длительность непрерывной работы при токе 450 А, напряжении 70 В, расходе азота 35 л/мин (стандартный режим напыления оксидной керамики). Оба плазматрона проработали непрерывно 8 ч (испытания были прерваны после интенсивных пульсаций параметров тока и напряжения стандартного плазматрона фирмы «Плазма-Техник»).

После разборки были выявлены значительные изменения в геометрии катодно-анодного узла плазматрона: изменение угла заточки катода  $\alpha_3$ ; оплавление и соответственно изменение диаметра притупления катода  $d_n$ ; оплавление и вырывы внутри сопла-анода. Все это

приводит к изменению заглубления электрода-катода в сопле  $l_3$  и соответственно к пульсации параметров плазматрона.

В геометрии катодно-анодного узла плазматрона ПБГ-1 заметные изменения не были выявлены. На втором этапе на тех же режимах плазматроны работали по схеме: работа в течение 15 мин, отключение, включение и т. д. (15 мин – технологическое время для напыления оксидной керамики ролика-замазливателя). Плазматрон фирмы «Плазма-Техник» вышел из строя через 4 ч работы (16 технологических циклов) – не происходил поджиг электрической дуги за счет сильного износа электродов. Испытания ПБГ-1 прекратили после 8 ч работы (32 технологических цикла). На третьем этапе произвели напыление порошка оксида циркония на разных плазматронах при одном и том же режиме: ток – 450 А; напряжение – 70 В; расход азота – 35 л/мин; дистанция напыления – 110 мм; фракция порошка – 40–63 мкм; расход порошка – 3 кг/ч. После 30 мин напыления плазматрон фирмы «Плазма-Техник» пришлось отключить и прочистить сопло, даже при напылении мелкодисперсной керамики плазматрон работал нестабильно.

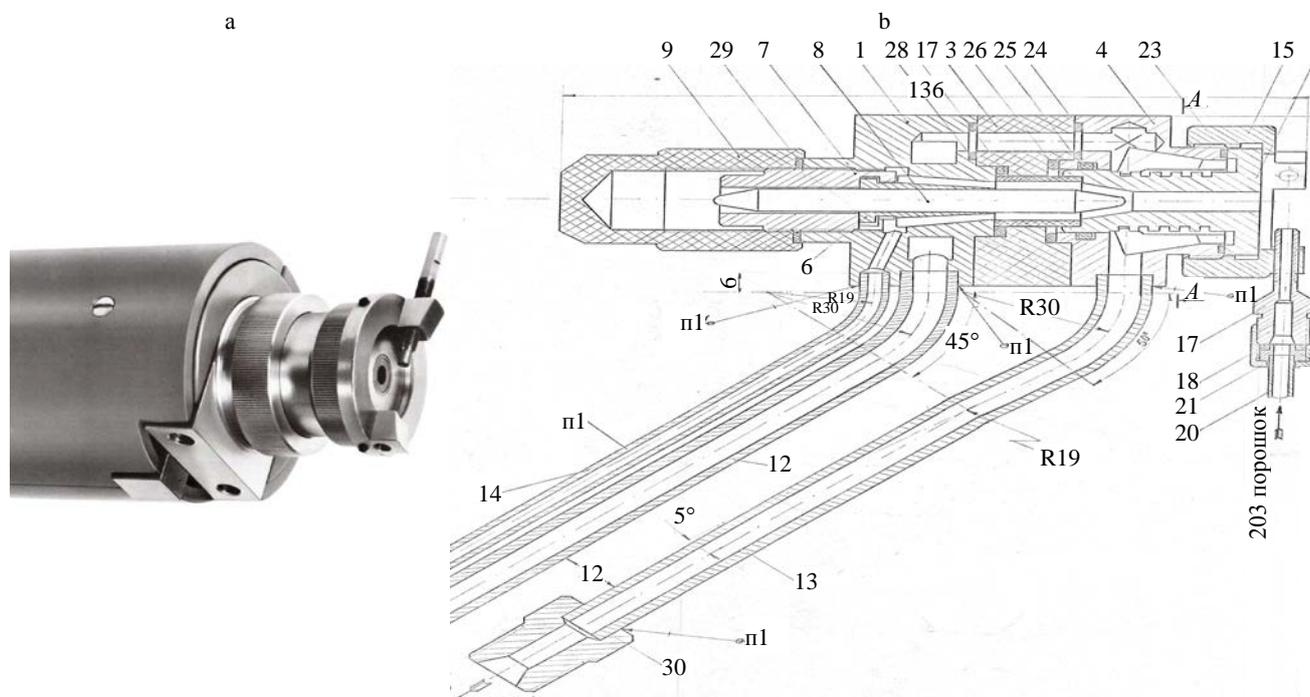


Рис. 1. Плазматрон для напыления покрытий: а – фирмы «Плазма-Техник»; б – ПБГ-1

Fig. 1. Plasmatron for spray coating: а – “Plasma-Technik” company; б – PBG-1 (ПБГ-1)

Характеристики покрытий из оксида циркония, напыленных на плазматронах фирмы «Плазма-Техник» и ПБГ-1, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики покрытий из оксида циркония, напыленных на плазматронах фирмы «Плазма-Техник» и ПБГ-1

Characteristics of zirconium oxide coatings sprayed with the help of plasmatrons of "Plasma-Technik" company and PBG-1 ( ПБГ-1)

Плазматрон	Прочность сцепления, МПа	Пористость, %	Коэффициент использования материала, %	Микротвердость, МПа
«Плазма-Техник»	12,5	14	39	6400
ПБГ-1	25,4	5	61	8700

Порошковые питатели предназначены для подачи распыляемого порошка в плазменную струю. От стабильности работы этого устройства зависит качество наносимого покрытия. Конструкции порошковых питателей столь же разнообразны, как и плазменных распылителей. Используемый для напыления порошок помещают в бункер (емкость бункеров самая разная) питателя, расположенного на небольшом (~1 м) расстоянии от плазматрона. Поток транспортирующего газа порошок подается к плазменному распылителю по эластичной трубке и через штуцер или специальное отверстие в канале сопла газопорошковая смесь вводится в плазменную струю. Расход подаваемого в распылитель порошка регулируется дозирующим устройством, в качестве которого используются инжекторы (расход порошка зависит от расхода транспортирующего газа), штоки с отверстием различной величины для порошка, вращающиеся вертикальные или горизонтальные барабаны с пазами для порошка, горизонтальные или вертикальные шнеки и т. п. Для улучшения сыпучести порошка и предотвращения его зависания в бункере используются электромагнитные, механические или пневматические вибраторы. В некоторых случаях порошок взмучивается транспортирующим газом. Наибольшую стабильность подачи порошка обеспечивают питатели с механической дозировкой.

Порошок из загрузочного бункера порошкового питателя фирмы «Плазма-Техник», дно которого выполнено в виде перевернутого конуса, попадал на вращающийся и вибрирующий вдоль своей оси плоский диск, откуда ссыпался в инжекционное устройство порошкового питателя. К недостаткам порошкового питателя фирмы «Плазма-Техник» можно отнести трудность подачи мелкодисперсного порошка с плохой сыпучестью. Поэтому авторами разработан и запатентован для нанесения покрытий на компактные материалы порошковый питатель ППБГ-04 [18, 19], позволяющий подавать порошок с размерами частиц 1–2 мкм. Кроме того, ППБГ-04 имеет минимум регулировочных характеристик для использования при нанесении покрытий (рис. 2). Конструктивной особенностью испытываемого порошкового питателя является наличие двух цилиндрических бункеров емкостью 2,0 л каждый и конической смесительной воронки. Каждый бункер соединен с воронкой трубкой с внутренним диаметром 12 мм. Через бункер и трубку проходит гибкий шнек, соединенный через редуктор с электродвигателем постоянного тока напряжением 27 В. Скорость вращения гибкого шнека варьируется от 0 до 140 об/мин. Вращение происходит за счет транзисторного блока питания, обеспечивающего регулировку напряжения, подаваемого на электродвигатель, от 0 до 27 В. Смесительная воронка соединена трубопроводом с каждым бункером выше уровня засыпаемого порошка. В нее также подводится сжатый газ. Порошок, засыпанный в бункеры гибкими шнеками, подается в смесительную воронку, где подхватывается тангенциально подводимым сжатым газом в виде газопорошковой смеси гибким трубопроводом и подается в распылительную головку. Соединительный трубопровод между смесительной воронкой и бункерами служит для уравнивания давления газа в смесительной воронке и бункерах и предотвращает пульсацию подачи порошка за счет предотвращения вакуумирования бункеров по мере уменьшения объема порошка в них. Управление скоростью вращения гибких шнеков каждого бункера автономно, и поэтому подача порошка из каждого бункера осуществляется поочередно или вместе. Если засыпать в бункеры разные порошки, то возможна их

совместная подача с разным расходом в один трубопровод. Производительность подачи порошка из каждого бункера регулируется в диапазоне от 0 до 2,5 л/ч.

На установке «Плазма-Техник» в стандартной комплектации производили испытания порошковых питателей TWIN-10 и ППБГ-04. В качестве рабочего газа при напылении использовали азот, при подаче порошка – воздух. На первом этапе выполняли испытания питателей на длительность непрерывной работы при использовании порошка оксида циркония с фракционным составом менее 50 мкм. Расход порошка – 3 кг/ч; расход подающего газа – 3,5 л/мин. На питателе TWIN-10 вибратор включали на максимальном режиме – 16 ед.

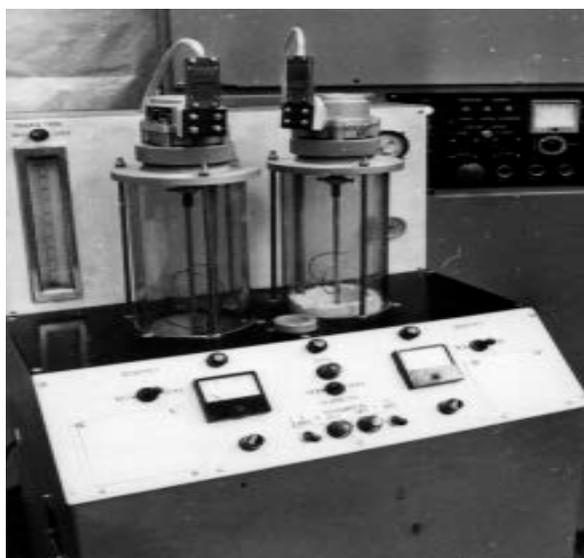


Рис. 2. Порошковый питатель ППБГ-04  
Fig. 2. PPBG-04 (ППБГ-04) powder feeder

Порошковый питатель вышел из строя через 40 мин работы: после разборки установлено, что шнек и приемный конус забиты плотно спрессованным порошком. Попытки наладить работу питателя при уменьшении или увеличении расхода порошка тоже не дали положительных результатов, питатель не пригоден для подачи мелкодисперсной керамики. Испытания ППБГ-04 прекратили после 2 ч работы. На втором этапе испытывали питатели на стабильное воспроизведение заданного расхода при повторном включении порошкового питателя. На тех же режимах питатели работали по схеме: работа в течение 15 мин, отключение,

включение и т. д. Это делалось для проверки стабильного воспроизведения заданного расхода при повторном включении порошкового питателя (15 мин – технологическое время для напыления керамикой ролика-замазливателя). Питатель TWIN-10 не мог выйти на установленный режим подачи порошка уже после первого отключения, после четырех отключений возобновить подачу порошка без разборки питателя не удалось. Питатель ППБГ-04 выдержал 10 отключений до прекращения эксперимента. На третьем этапе произвели напыления окиси алюминия с использованием разных питателей на одном и том же режиме работы плазматрона: ток – 450 А; напряжение – 70 В; расход азота – 35 л/мин; дистанция напыления – 110 мм; фракция порошка – 50–63 мкм; расход порошка – 3 кг/ч. Характеристики покрытий из оксида циркония, напыленных с использованием питателей TWIN-10 и ППБГ-04, приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Характеристики покрытий из оксида циркония, напыленных питателями TWIN-10 и ППБГ-04**

**Characteristics of zirconium oxide coatings sprayed with the help of TWIN-10 and PPBG-04 (ППБГ-04) feeders**

Питатель	Прочность сцепления, МПа	Пористость, %	Коэффициент использования материала, %	Микротвердость, МПа
TWIN-10	15,5	18	34	5800
ППБГ-04	20,1	10	56	7200

## ВЫВОД

Для реализации новых технологических схем нанесения теплозащитных покрытий с повышенными эксплуатационными характеристиками разработан, запатентован и изготовлен целый спектр нового оборудования. Согласно проведенным экспериментам, разработанные авторами плазматрон ПБГ-1 и порошковый питатель ППБГ-04 имеют минимум в 2–3 раза больше ресурс работы при напылении керамических материалов по сравнению с серийным оборудованием фирмы «Плазма-Техник». Это достигается за счет изменения конструкций катодно-анодного узла плазматрона и подающего узла питателя, способствующих равно-

мерной подаче порошка в плазменную струю и лучшему его проплавлению. В результате получают более качественные плазменные покрытия с повышенными эксплуатационными характеристиками: прочность сцепления увеличивается в 1,3–2 раза, коэффициент использования материала – в 1,5–1,6 раза, микротвердость – в 1,2–1,4 раза, пористость уменьшается в 2–2,5 раза.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Стернс, К. А. Теплозащитные покрытия / К. А. Стернс // *Аэрокосмическая техника*. 1997. № 10. С. 144–164.
2. Duane, L. Ruckle. Plasma-Sprayed Ceramic Thermal Barrier Coatings for Turbine Vane Platforms / Ruckle Duane L. // *Thin Solid Films*. 1980. Vol. 73, № 2. P. 455–461.
3. Stecura, S. New ZrO<sub>2</sub>-YbO Plasma-Sprayed Coatings for Thermal Barrier Applications / S. Stecura // *Thin Solid Films*. 1987. Vol. 150, No 1. P. 15–40.
4. Fairbanks, S. W. The Durability and Performance of Coatings in Gas Turbine and Diesel Engines / S. W. Fairbanks, R. J. Hecht // *Materials Science and Engineering*. 1987. Vol. 88. P. 321–330.
5. Suhr, D. S. Microstructure and Durability of Zirconia Thermal Barrier Coatings: Thesis (Ph. D.) 5756909 / D. S. Suhr. Cleveland, OH (USA): Case Western Reserve Univ, 1984.
6. Miller, R. A. Performance of Thermal Barrier Coatings in High Hear Flues / R. A. Miller, C. Christopher // *Thin Solid Films*. 1984. Vol. 119, No 2. P. 195–202.
7. Therinomechanical Behaviour of Plasma-Sprayed ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Coatings Influenced by Plasticity Creep and Oxidation / J. Padovan [et al.] // 11<sup>th</sup> Annual Conference on Composites and Advanced Ceramic Materials: Ceramic Engineering and Science Proceedings. John Wiley & Sons, 1987. Vol. 8, Issue 7/8. P. 572–582.
8. Создание градиентных плазменных покрытий на основе диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттербия / В. А. Оковитый [и др.] // *Вестник Белорусского национального технического университета*. 2011. № 6. С. 5–8.
9. Композиционный порошок на основе диоксида циркония, частично стабилизированный оксидом иттербия / В. В. Оковитый [и др.] // *Порошковая металлургия: респ. межведомственный сб.* Минск: Вышэйш. шк., 2012. Вып. 35. С. 80–85.
10. Процесс получения композиционного порошка на основе гидроксипатита и диоксида циркония для нанесения плазменных биокерамических покрытий / В. А. Оковитый [и др.] // *Наука и техника*. 2013. № 1. С. 31–38.
11. Создание градиентных плазменных покрытий на основе диоксида циркония, частично стабилизированных оксидом церия / В. А. Оковитый [и др.] // *Порошковая металлургия*. 2013. № 36. С. 331–337.
12. Девойно, О. Г. Композиционный порошок на основе диоксида циркония, частично стабилизированный ок-

сидом церия / О. Г. Девойно, В. В. Оковитый // *Наука и техника*. 2013. № 6. С. 3–8.

13. Девойно, О. Г. Плазменные теплозащитные покрытия на основе диоксида циркония с повышенной термостойкостью / О. Г. Девойно, В. В. Оковитый // *Наука и техника*. 2015. № 1. С. 35–39.
14. Плазматрон для нанесения покрытий: пат. 14906 Респ. Беларусь, МПК C23C4/04 / В. А. Оковитый, А. И. Шевцов, О. Г. Девойно, В. В. Оковитый; дата публ.: 30.10.2010.
15. Порошковый питатель для нанесения покрытий: пат. 16809 Респ. Беларусь, МПК В 22С 9/08; В 23К 5/18 / В. А. Оковитый, А. Ф. Ильющенко, А. И. Шевцов, В. М. Асташинский, В. В. Оковитый; дата публ.: 28.02.2013.
16. Плазматрон для нанесения покрытия на внутренние поверхности деталей: пат. на полезную модель 8930 Респ. Беларусь, МПК Н 05Н 1/00 / В. В. Оковитый; дата публ.: 28.02.2013.
17. Плазматрон для нанесения покрытия: пат. на полезную модель 9423 Респ. Беларусь, МПК Н 05Н 1/00 / В. В. Оковитый; заявитель – БНТУ, № u 20121081; заявл. 12.05.2012, опубл. 30.08.2013 // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці*. 2013. № 4.
18. Порошковый питатель для нанесения покрытий: пат. на полезную модель 9665 Респ. Беларусь, МПК Н 05Н 1/00 / В. В. Оковитый; дата публ. 30.10.2013.
19. Плазматрон для нанесения покрытия: пат. на полезную модель 10210 Респ. Беларусь, МПК Н 05Н 1/00 / В. В. Оковитый; дата публ. 30.08.2014.

Поступила 16.02.2016

Подписана в печать 18.04.2016

Опубликована онлайн 30.01.2017

#### REFERENCES

1. Sterns K. A. (1997) Thermal Barrier Coatings. *Aerokosmicheskaya Tekhnika* [Aerospace Equipment], (10), 144–164 (in Russian).
2. Duane L. Ruckle (1980) Plasma-Sprayed Ceramic Thermal Barrier Coatings for Turbine Vane Platforms. *Thin Solid Films*, 73, (2), 455–461. DOI: 10.1016/0040-6090(80)90514-3.
3. Stecura S. (1987) New ZrO<sub>2</sub>-YbO Plasma-Sprayed Coatings for Thermal Barrier Applications. *Thin Solid Films*, 150 (1), 15–40. DOI: 10.1016/0040-6090(87)90305-1.
4. Fairbanks S. W., Hecht R. J. (1987) The Durability and Performance of Coatings in Gas Turbine and Diesel Engines. *Materials Science and Engineering*, 88, 321–330. DOI: 10.1016/0025-5416(87)90101-7.
5. Suhr D. S. (1984) Microstructure and Durability of Zirconia Thermal Barrier Coatings. Thesis (Ph. D.) 5756909. Cleveland, OH (USA). Case Western Reserve Univ.
6. Miller R. A., Christopher C. (1984) Performance of Thermal Barrier Coatings in High Hear Flues. *Thin Solid Films*, 119 (2), 195–202. DOI: 10.1016/0040-6090(84)90534-0.

7. Padovan J., Chung B. T. F., McDonald G. E., Hendricks R. C. (1987) Therinomechanical Behaviour of Plasma-Sprayed  $ZrO_2$ - $Y_2O_3$  Coatings Influenced by Plasticity Creep and Oxidation. *11<sup>th</sup> Annual Conference on Composites and Advanced Ceramic Materials: Ceramic Engineering and Science Proceedings*. John Wiley & Sons, 8 (7/8), 572–582. DOI: 10.1002/9780470320402.ch10.
8. Okovity V. A., Panteleenko F. I., Devoino O. G., Okovity V. V., Sobolevsky S. V., Shevtsov A. I. (2011) Creation of Gradient Plasma-Sprayed Coatings on Basis of Zirconium Dioxide Stabilized with Ytterbium Dioxide. *Vestnik BNTU* [Bulletin of the Belarusian National Technical University], (6), 5–8 (in Russian).
9. Okovity V. V., Iliushchenko A. F., Devoino O. G., Shevtsov A. I., Sobolevskii S. B. (2012) Composite Powder on the Basis of Zirconium Dioxide Partially Stabilized with Ytterbium Oxide. *Poroshkovaia Metallurgiiia. Respublikanskii Mezhdedomstvennyi Sbornik* [Powder Metallurgy. Republican Interdepartmental Collection]. Minsk, Vysheishaia Shkola Publ., Is. 35, 80–85 (in Russian).
10. Okovity V. A., Panteleenko F., Panteleenko A., Okovity V. V., Kulak A., Ulasevich S. (2013) The Process of Composite Powder Production on the Base Hydroxyapatite and Zirconium Dioxide for Plasma Bioceramic Coatings. *Nauka i Tekhnika* [Science & Technique], (1), 31–38 (in Russian).
11. Okovity V. A., Iliushchenko A. F., Devoino O. G., Shevtsov A. I. (2013) Creation of Gradient Plasma Coatings on the Basis on Zirconium Dioxide Partially Stabilized with Cerium Oxide. *Poroshkovaia Metallurgiiia. Respublikanskii Mezhdedomstvennyi Sbornik* [Powder Metallurgy. Republican Interdepartmental Collection]. Minsk, Vysheishaia Shkola Publ., Is. 36, 331–337 (in Russian).
12. Devoino O. G., Okovity V. V. (2013) Composite Powder on the Basis of Zirconium Dioxide Partially Stabilized with Cerium Oxide. *Nauka i Tekhnika* [Science & Technique], (6), 3–8 (in Russian).
13. Devoino O. G., Okovity V. V. (2015) Plasma Thermal Barrier Coatings Based on zirconium dioxide with High Thermal Stability. *Nauka i Tekhnika* [Science and Technique], (1), 35–39 (in Russian).
14. Okovity V. A., Shevtsov A. I., Devoino O. G., Okovity V. V. (2010) Plasmatron for Coating Deposition. Patent 14906 Republic of Belarus (in Russian).
15. Okovity V. A., Ilyushchenko A. F., Shevtsov A. I., Astashinsky V. M., Okovity V. V. (2013) Powder Feeder for Coating Deposition. Patent 16809 Republic of Belarus (in Russian).
16. Okovity V. V. (2013) Plasmatron for Coating Deposition on Internal Surfaces of Parts. Utility Model Patent 8930 Republic of Belarus (in Russian).
17. Okovity V. V. (2013) Plasmatron for Coating Deposition. Utility Model Patent 9423 Republic of Belarus (in Russian).
18. Okovity V. V. (2013) Powder Feeder for Coating Deposition. Utility Model Patent 9665 Republic of Belarus (in Russian).
19. Okovity V. V. (2014) Plasmatron for Coating Deposition. Utility Model Patent 10210 Republic of Belarus (in Russian).

Received: 16.02.2016

Accepted: 18.04.2016

Published online: 30.01.2017

## Электронное управление топливоподачей дизельного двигателя на основе программного ПИД-регулирования

Докт. техн. наук, доц. А. Г. Баханович<sup>1)</sup>, канд. техн. наук, доц. В. А. Кусяк<sup>1)</sup>, магистры техн. наук А. Н. Гурин<sup>1)</sup>, Ле Ван Нгиа<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017  
Belarusian National Technical University, 2017

**Реферат.** Представлена принципиальная схема электронного управления дизельным двигателем внутреннего сгорания стандарта Euro-3, описана программно-аппаратная платформа пневматического привода регулятора топливного насоса высокого давления, позволяющая реализовать электронное управление топливоподачей дизельного двигателя КамАЗ-740. В основу концепции электронного управления положена стратегическая зависимость углового положения рычага регулятора топливного насоса высокого давления от углового перемещения электронной педали акселератора. Реализацию указанной зависимости осуществляли путем подачи модулированного широтно-импульсного сигнала определенной скважности от контроллера на обмотку пропорционального электромагнитного клапана, отвечающего за величину давления сжатого воздуха в рабочей полости силового пневмоцилиндра, шарнирно соединенного с рычагом регулятора топливного насоса высокого давления. При этом в цепь управления вводили обратную связь по положению рычага регулятора топливного насоса высокого давления, а управление оборотами коленчатого вала двигателя осуществляли с использованием программного ПИД-регулятора непрерывного действия. Разработанная стратегия дает возможность в режиме реального времени отследить отклонение регулируемого параметра от заданной величины и практически мгновенно выработать управляющее воздействие на исполнительные механизмы для устранения этого отклонения, обеспечивая минимальное время переходного процесса. Настройку параметров регулятора (пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих) производили эмпирическим путем с использованием классического метода Циглера – Никольса, основанного на анализе запаса устойчивости системы автоматического регулирования. Приведены результаты расчета коэффициентов пропорционального интегрально-дифференциального регулятора, а также осциллограммы полунатурного эксперимента по апробации предложенной стратегии управления топливоподачей дизельного двигателя с использованием средств визуализации CoDeSys V2.3.

**Ключевые слова:** дизельный двигатель, электронное управление, топливоподача, программно-аппаратная платформа, ПИД-регулирование, обратная связь, ШИМ-сигнал

**Для цитирования:** Электронное управление топливоподачей дизельного двигателя на основе программного ПИД-регулирования / А. Г. Баханович [и др.] // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 1. С. 28–37. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-28-37

## Electronic Control for Fuel Supply of Diesel Engine on the Basis of Programmable PID-Regulator

A. G. Bakhanovich<sup>1)</sup>, V. A. Kusyak<sup>1)</sup>, A. N. Gurin<sup>1)</sup>, Le Van Ngia<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The paper presents a schematic diagram of the Euro-3 diesel engine electronic control and describes hard- and software platform of the high pressure fuel pump pneumatic actuator control that allows to realize the concept of electronic fuel supply control for KamAZ-740 diesel engine. A strategic dependence between an angular position of high pressure fuel pump governor lever and angular displacement of electronic accelerator pedal is taken as a basic principle for an electronic

### Адрес для переписки

Кусяк Виктор Анатольевич  
Белорусский национальный технический университет  
ул. Я. Коласа, 12,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 292-82-05  
avto\_atf@bntu.by

### Address for correspondence

Kusyak Victor A.  
Belarusian National Technical University  
12 Ya. Kolasa str.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 292-82-05  
avto\_atf@bntu.by

control concept. Implementation of the indicated dependence has been carried out through supplying a modulated PWM-signal with some impulse ratio from a controller to a coil of proportional solenoid-operated valve which is responsible for compressed air pressure value in the working space of a power pneumatic cylinder pivotally connected with a governor lever of a high pressure fuel pump. In this case a feedback has been introduced in the control circuit according to the position of governor lever in the high pressure fuel pump and engine crankshaft speed control has been carried out while using a programmable PID-regulator of continuous action. The developed strategy provides the possibility to trace deflection of the controlled parameter from a preset value in real-time mode and practically instantly to develop a control action on operating actuators with the purpose to eliminate this deflection while providing a minimum time for transition process. Setting of regulator parameters (proportional, integral and differential components) has been made empirically while using a classical Ziegler – Nichols method which is based on the analysis of a stability factor for an automatic control system. The paper presents results of calculation on coefficients of a proportional integral-differential regulator and an oscillogram of semi-natural experiment according to approbation of the proposed control strategy for fuel delivery in a diesel engine while using CoDeSys V2.3 visualization tools.

**Keywords:** diesel engine, electronic control, fuel supply, hardware and software platform, PID-regulator, feedback, PWM-signal

**For citation:** Bakhanovich A. G., Kussyak V. A., Gurin A. N., Ngia Le Van. Electronic Control for Fuel Supply of Diesel Engine on the Basis of Programmable PID-Regulator. *Science and Technology*, 16 (1), 28–37. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-28-37 (in Russian)

## Введение

По данным Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь, доля эксплуатирующихся транспортных средств, оснащенных дизельными двигателями стандарта Euro-2, все еще довольно велика и составляет приблизительно 55–62 % от общего парка. Поэтому реализация концепции электронного управления таких двигателей принесла бы ощутимый экономический эффект, особенно при автоматизации силового агрегата в комплексе, включая дизельный двигатель внутреннего сгорания (ДВС), сухое фрикционное сцепление и механическую коробку передач. Электронное управление дизельным двигателем с механической топливopодачей требует введения в цепь управления обратной связи по оборотам коленчатого вала двигателя или по положению рычага регулятора топливного насоса высокого давления (ТНВД). И в том и другом случае концепция электронного управления предусматривает наличие пропорционального, пропорционально-интегрального или пропорционально-интегрально-дифференциального регулирования контролируемого параметра.

## Основная часть

Для электронного управления ДВС с механической топливopодачей необходимо разорвать механическую связь между педалью и рычагом регулятора ТНВД. При этом в качестве органа управления следует использовать электронную педаль акселератора с датчиком ее углового положения. В этом случае датчик педали «газа», непрерывно регистрирующий изменение угла ее положения и передающий соответствующий сигнал в блок управления

работой двигателя, функционально эквивалентен механической связи.

Исходя из вышеизложенного, пульт управления испытательным стендом [1] был оснащен напольной педалью Global MT 7000 серии Mechatronic с бесконтактным электронным датчиком положения vSENSETM [2], работающим на эффекте Холла. Использование технологии на базе эффекта Холла [3, с. 133; 4, с. 379, рис. 3] для определения углового положения педали управления топливopодачей, а также отсутствие подвижных контактов в паре «ось педали – сенсор» в совокупности обеспечивают высокую точность мониторинга позиционирования и степень надежности измерительного узла. По данным, предоставленным концерном Kongsberg Automation (Германия) и ООО «Кора» (Россия), педаль Global MT 7000 превышает степень защиты IP67 при работе в динамических и статических условиях [2, 5].

Принципиальная схема электронного управления дизельным ДВС КамАЗ-740 с механической топливopодачей представлена на рис. 1. В приведенной мехатронной системе в качестве рабочего тела используется сжатый воздух, что обусловлено наличием автономного источника энергии (компрессора) в пневматической тормозной системе грузовых автомобилей и магистральных автопоездов.

В качестве исполнительного механизма управления топливopодачей используются пневматический силовой цилиндр 11 (рис. 1) серии C85N20-40S, шарнирно соединенный с рычагом регулятора ТНВД 17, и пропорциональный электромагнитный клапан (ПЭМК) 6 модели VER3121-1 [6]. ПЭМК предназначен для непрерывного пропорционального управ-

ления давлением воздуха в рабочей полости силового цилиндра 11 с помощью электрического сигнала. Управление пропорциональным электромагнитным клапаном осуществляется электронным блоком управления (ЭБУ) 15 посредством модулированного широтно-импульс-

ного (ШИМ) сигнала напряжения [3, с. 103, рис. 44]. Потенциметрический датчик 12 угловых перемещений МУ 615-А отслеживает текущее положение рычага регулятора ТНВД, обеспечивая обратную связь в контуре управления топливоподачей.

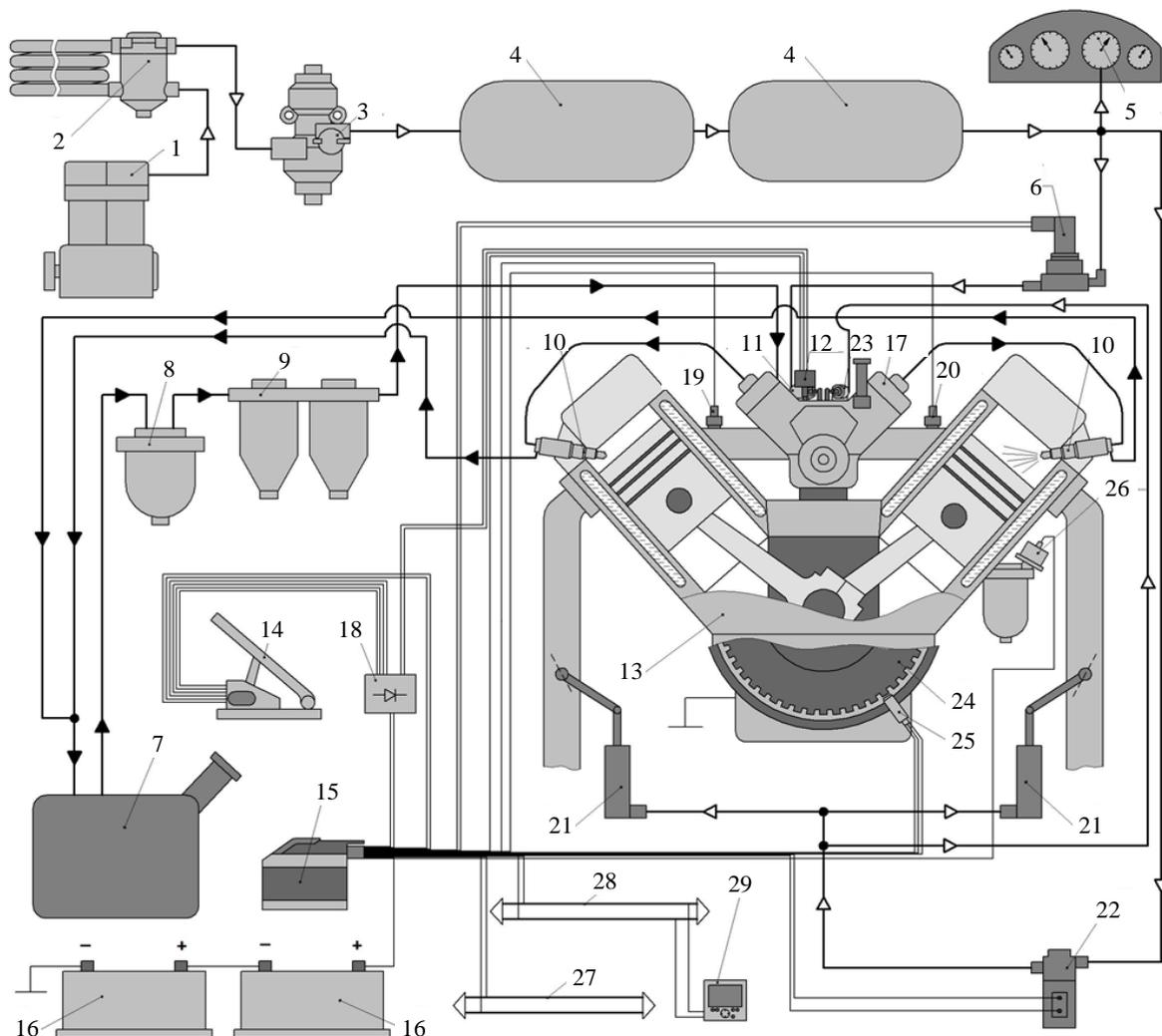


Рис. 1. Структурная схема электронного управления дизельным двигателем внутреннего сгорания с механической топливоподачей: 1 – компрессор; 2 – воздухоосушитель; 3 – регулятор давления; 4 – ресиверы; 5 – приборная панель; 6 – пропорциональный электромагнитный клапан управления двигателем; 7 – топливный бак; 8, 9 – фильтр грубой и тонкой очистки топлива; 10 – форсунка; 11, 21 – пневмоцилиндр; 12 – датчик угловых перемещений; 13 – блок цилиндров; 14 – электронная педаль «газа»; 15 – электронный блок управления; 16 – аккумуляторная батарея; 17 – топливный насос высокого давления; 18 – стабилизатор напряжения; 19 – датчик перегрева; 20 – датчик температуры охлаждающей жидкости; 22 – клапан моторного тормоза; 23 – пневмоцилиндр выключения топливоподачи; 24 – маховик; 25 – датчик частоты вращения; 26 – датчик давления масла; 27, 28 – шины данных CANOpen и J1939; 29 – ЖК-монитор

Fig. 1. Structural scheme of electronic control for diesel internal combustion engine with mechanical fuel supply: 1 – compressor; 2 – air-drier; 3 – pressure regulator; 4 – receivers; 5 – control panel; 6 – proportional electromagnetic valve for engine control; 7 – fuel tank; 8, 9 – coarse and fine filters for fuel purification; 10 – injector; 11, 21 – pneumatic cylinders; 12 – angular movement sensor; 13 – cylinder block; 14 – electronic accelerator pedal; 15 – electronic control unit (ECU); 16 – accumulator battery; 17 – high-pressure fuel injection pump; 18 – voltage stabilizer; 19 – overheating sensor; 20 – temperature coolant sensor; 22 – engine brake valve; 23 – pneumatic cylinder for fuel shutoff; 24 – flywheel; 25 – RPM sensor; 26 – oil-pressure sensor; 27, 28 – CANOpen and J1939 data bus; 29 – liquid-crystal display

Размещение вышеописанных компонентов мехатронной системы на дизельном двигателе и рабочем месте оператора испытательного стенда проиллюстрировано на рис. 2. Технические характеристики смарт-контроллера Esomat R360 серии CR2500 [7], являющегося основой спроектированной программно-аппаратной платформы, представлены в табл. 1. Распределение датчиков и электромагнитных клапанов управления исполнительными механизмами автоматизированного двигателя КамАЗ-740 по портам смарт-контроллера приведено в [8, с. 47, табл. 1].

Благодаря наличию CAN-интерфейса (табл. 1), ЭБУ дизельного двигателя имеет возможность интеграции в архитектуру бортовой сети автомобиля (рис. 1, поз. 27), что позволяет обрабатывать комплексные алгоритмы взаимодействия между различными мехатронными системами, используя для обмена данными протокол высокого уровня SAE J1939 [9].

Концепция электронного управления дизельным двигателем с механической топливоподачей заключается в обеспечении пропорционального соотношения между положением педали акселератора и рычага регулятора ТНВД [10], определяющего цикловую подачу топлива и, как следствие, частоту вращения коленчатого вала ДВС. Максимальный угол

перемещения электронной педали «газа» составляет  $17^\circ$ , что соответствует диапазону изменения выходного сигнала от 18 до 140 бит (0012...008С HEX) при 10-битном аналого-цифровом преобразователе (АЦП) контроллера и опорном напряжении питания датчика 5 В. Угол перемещения рычага регулятора составляет  $40^\circ$ , что соответствует при тех же параметрах АЦП и опорном напряжении диапазону изменения выходного сигнала датчика от 14 до 122 бит (000E...007A HEX).

Однако ввиду того что на рычаг управления регулятором ТНВД оказывают силовое воздействие пружина насоса и сила от перемещающихся грузов регулятора, возникает проблема согласования начала перемещения педали «газа» и начала перемещения штока силового цилиндра, шарнирно соединенного с рычагом регулятора. Экспериментально при помощи построителя диаграмм CoDeSys [11, с. 6–65] определено, что для отрыва рычага регулятора ТНВД из крайнего положения, соответствующего минимально устойчивой частоте вращения коленвала двигателя, необходим ток на обмотке ПЭМК 1 (рис. 2)  $I_{нач} = 0,29$  А. Это значение выходит за пределы неустойчивой работы пропорционального электромагнитного клапана [6], определяемой его технической характеристикой (рис. 3).

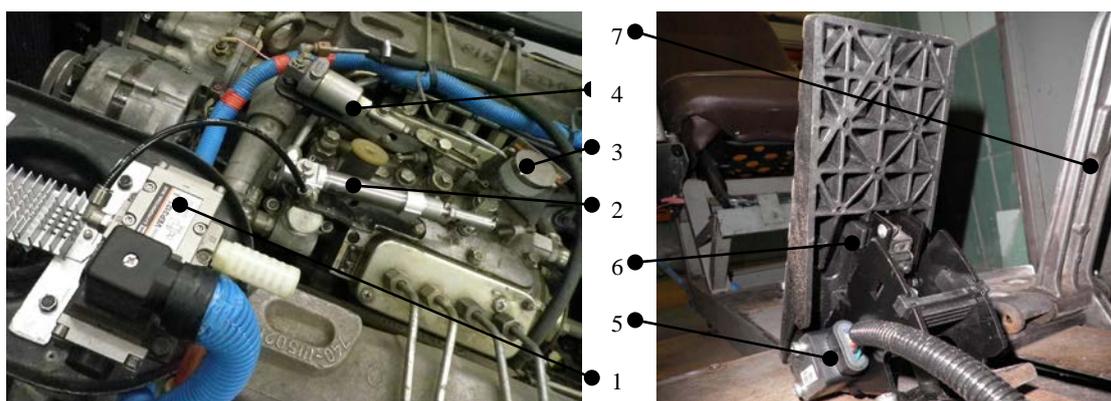


Рис. 2. Размещение компонентов мехатронной системы на испытательном стенде:

1 – пропорциональный электромагнитный клапан; 2 – силовой пневмоцилиндр; 3 – датчик перемещения рычага регулятора топливного насоса высокого давления; 4 – пневмоцилиндр выключения подачи топлива; 5 – датчик углового положения; 6 – педаль управления топливоподачей двигателя внутреннего сгорания; 7 – педаль тормоза

Fig. 2. Component layout of mechatronic system on testing bench:

1 – proportional electromagnetic valve; 2 – actuating pneumatic cylinder; 3 – governor lever position sensor of high-pressure fuel injection pump; 4 – pneumatic cylinder for fuel shutoff; 5 – angular position sensor; 6 – control pedal of fuel engine supply; 7 – brake pedal

Таблица 1

Технические характеристики контроллера CR2500  
 Technical characteristics of CR2500 controller

Наименование параметра	Значение (описание)
Процессор	CMOS C167C
Напряжение питания, В	10–32
Разрядность микроконтроллера, бит	16
Частота работы процессора, МГц	20
Количество входов	8: конфигурируются как 4 аналоговых входа, 4 цифровых входа, 2 частотных входа (до 30000 Гц)
Количество выходов	4: конфигурируются как цифровые выходы (до 4 А на канал), PWM-выходы (20–250 Гц)
Диапазон рабочих температур, °С	(–40)–(+85)
Интерфейс	CAN (2), RS232
Память программ, кБ	192
Память данных, кБ	64 – SRAM; 32 – FLASH; 3 – EEPROM

Верхнюю границу токового диапазона определяли исходя из условия упора рычага регулятора в винт ограничения максимальных оборотов двигателя. В этом случае ток, протекающий через ПЭМК, составляет  $I_{кон} = 0,74$  А. То есть верхняя граница токового диапазона также попадает в зону устойчивой работы пропорционального клапана (рис. 3).

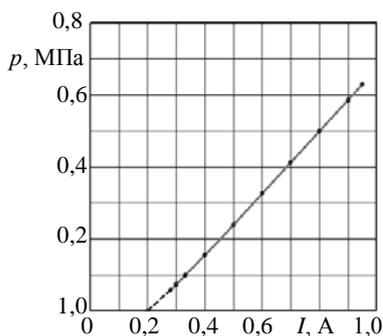


Рис. 3. Характеристика «ток – давление» пропорционального электромагнитного клапана SMC VEP3121-1

Fig. 3. “Current – pressure” characteristic of SMC VEP3121-1 proportional electromagnetic valve

Величина силы тока на обмотках ПЭМК зависит от скважности ШИМ-сигнала, генерируемого таймером-счетчиком и выходным каска-

дом контроллера при инициализации функционального блока PWM [7, с. 9–7]. Коэффициент заполнения площади ШИМ-сигнала задавали на программном уровне входным аргументом Value [7, с. 9–7, табл. 3], принимающим значения от 0 до 65535 (0000...FFFF HEX). При этом эквивалентное напряжение на контактах пропорционального электромагнитного клапана изменялось от минимального 0 (при Value = 65535) до максимального 24 В значений напряжения бортовой сети (при Value = 0), что соответствовало изменению коэффициента заполнения ШИМ-сигнала от 0 до 100 % (рис. 4).

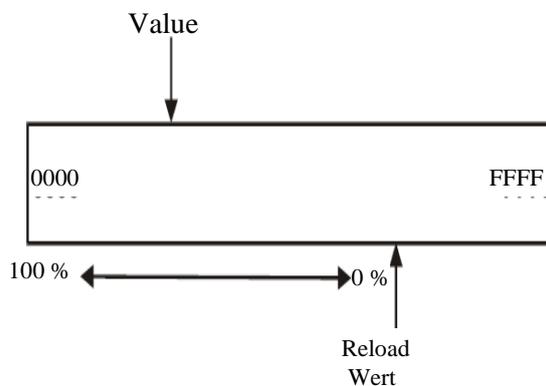


Рис. 4. Принцип формирования широтно-импульсного сигнала

Fig. 4. Generation principle of PWM-signal

С помощью функционального блока Output Current [7, с. 4–16], возвращающего величину силы тока на активном PWM-канале контроллера, определено, что токовому диапазону 290–740 мА на электромагнитном клапане соответствует диапазон 40500–1700 (9E34...06A4 HEX) значений аргумента Value, что составляет 59 % (3–62 %) скважности управляющего ШИМ-сигнала. Таким образом, для управления оборотами двигателя от минимально устойчивых (550–560 об/мин) до максимальных (2600 об/мин) ток на электромагнитном клапане  $I_{кл}$  должен изменяться от 0,29 до 0,74 А в зависимости от углового положения педали акселератора.

Программно реализуемые посредством функционального блока NORM [7, с. 11–33] пропорциональные преобразования в среде CoDeSys [11] позволили получить стратегическую зависимость (рис. 5) углового положения рычага регулятора ТНВД ( $\alpha_{рег}$ ) от углового положения электронной педали «газа» ( $\alpha_{пед}$ ).

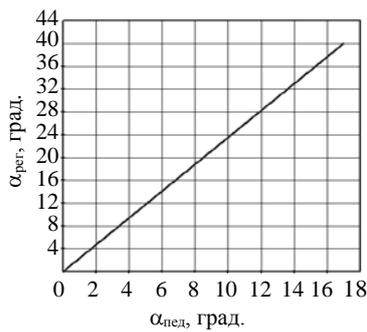


Рис. 5. Зависимость углового положения рычага регулятора топливного насоса высокого давления от положения педали акселератора

Fig. 5. Dependence of governor lever angular position for injection pump on position of electronic accelerator pedal

Реализацию указанной зависимости  $I_{кл} = f(\alpha_{ped})$  при электронном управлении топливоподачей осуществляли путем подачи модулированного ШИМ-сигнала определенной скважности от контроллера 15 (рис. 1) на обмотку ПЭМК 6, отвечающего за величину давления сжатого воздуха в рабочей полости силового пневмоцилиндра 11. Осциллограмма вышеописанного процесса управления топливоподачей при неработающем двигателе и давлении  $P = 0,65$  МПа в пневмосистеме представлена на рис. 6.

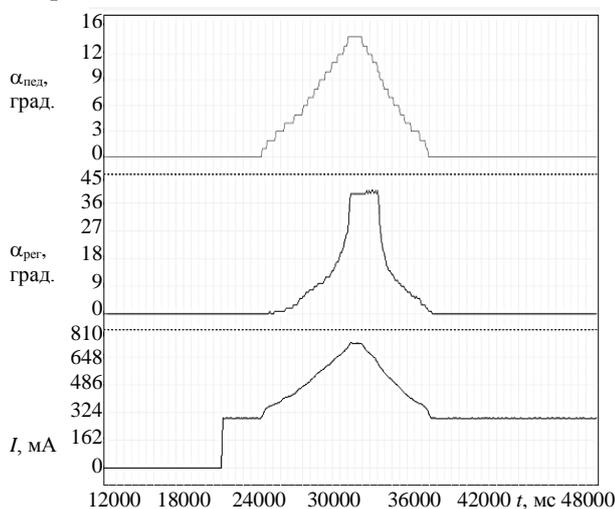


Рис. 6. Осциллограмма процесса электронного управления топливоподачей:  $\alpha_{ped}$  – угловое положение педали акселератора;  $\alpha_{reg}$  – угловое положение рычага регулятора топливного насоса высокого давления;  $I$  – ток на обмотках пропорционального электромагнитного клапана;  $t$  – текущее время

Fig. 6. Operational oscillogram of electronic control fuel supply:  $\alpha_{ped}$  – angular position of accelerator pedal;  $\alpha_{reg}$  – angular position of governor lever angular position of high-pressure fuel injection pump;  $I$  – winding current of proportional electromagnetic valve;  $t$  – current time

Однако при стендовых испытаниях спроектированной мехатронной системы на определенных нагрузочных режимах двигателя наблюдали потерю устойчивости системы («раскачка двигателя»), выразившуюся в изменении оборотов двигателя при постоянном положении электронной педали «газа». Этот негативный эффект объясняется тем, что пропорциональное управление по положению педали акселератора, в принципе, позволяет выработать управляющее воздействие на исполнительный механизм топливоподдачи для установки требуемых оборотов коленчатого вала, но электронная система не может отследить результат и ввести коррекцию без наличия обратной связи. Поэтому дальнейшие усилия были направлены на выбор параметра обратной связи и переход от пропорционального управления к пропорциональному управлению с регулированием.

Как известно из теории автоматических систем, основным признаком регулирования является замкнутая последовательность действий в пределах рассматриваемого контура. При этом фактическое значение контролируемого параметра постоянно сравнивается с его требуемой величиной, и при обнаружении значимых различий происходит автоматическая коррекция работы исполнительного механизма. Реализация указанной стратегии дает возможность в режиме реального времени отследить отклонение регулируемого параметра от заданной величины и практически мгновенно выработать управляющее воздействие для устранения этого отклонения.

С учетом вышесказанного в цепь управления пропорциональным электромагнитным клапаном была введена обратная связь по положению рычага регулятора ТНВД. Управление оборотами коленчатого вала двигателя осуществляли с использованием программного ПИД-регулятора непрерывного действия, передаточная функция которого описывается уравнением [11, с. 10–58]

$$u(t) = P + I + D = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de}{dt},$$

где  $e$  – ошибка регулирования;  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  – пропорциональный, интегральный и дифференци-

альный коэффициент усиления;  $\tau$  – время с момента, когда отклонение  $e$  регулируемой величины стало значимым;  $t$  – текущее время.

Вышеописанный регулятор обеспечивает отрицательную обратную связь изменения регулируемого параметра на управляющее воздействие. В частности, регулирование частоты вращения коленчатого вала двигателя (поддержание углового положения  $\alpha_{\text{рег}}$  рычага регулятора на заданном уровне) осуществляется с помощью регулирования давления воздуха в силовом цилиндре 7 (рис. 7), величина которого зависит от скважности ШИМ-сигнала, генерируемого контроллером 8 и поступающего на катушку ПЭМК 6.

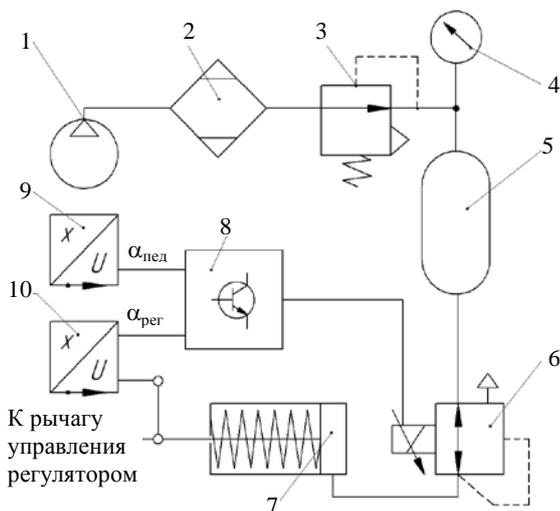


Рис. 7. Структурная схема контура регулирования:

- 1–5 – питающая часть пневмопривода;
- 6 – пропорциональный электромагнитный клапан;
- 7 – пневмоцилиндр; 8 – электронный блок управления;
- 9, 10 – датчик положения педали «газа» и рычага регулятора топливного насоса высокого давления;
- $\alpha_{\text{пед}}$ ,  $\alpha_{\text{рег}}$  – угловое положение педали «газа» и рычага регулятора

Fig. 7. Structural scheme of control loop:

- 1–5 – supply part of pneumatic actuator; 6 – proportional electromagnetic valve; 7 – pneumatic cylinder;
- 8 – electronic control unit (ECU); 9, 10 – accelerator pedal position sensor and governor lever position sensor of high-pressure fuel injection pump;  $\alpha_{\text{ped}}$ ,  $\alpha_{\text{reg}}$  – angular position of accelerator pedal and governor lever position

При отклонении положения рычага регулятора от заданного значения на некую положительную величину  $e$ , т. е. при превышении уставки до уровня  $(\alpha_{\text{рег}} + e)$ , к текущему входному сигналу эквивалентного напряжения  $U$

пропорционального электромагнитного клапана будет добавлен отрицательный сигнал регулятора  $u$  (рис. 8). Таким образом, результирующим сигналом на входе пропорционального электромагнитного клапана будет  $(U - u)$ , что уменьшит выходную скважность ШИМ-сигнала в катушке ПЭМК и, следовательно, частоту вращения коленчатого вала.

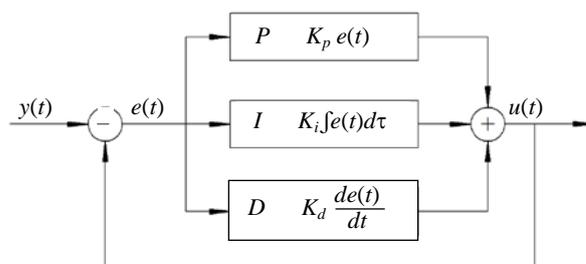


Рис. 8. Структурная схема ПИД-регулирования

Fig. 8. Structural scheme of PID-regulator

Выбор ПИД-регулирования в качестве базового закона обусловлен необходимостью иметь нулевую ошибку регулирования при минимальном времени переходного процесса. Управляющая программа ЭБУ была написана в среде CoDeSys V2.3 на языке ST [12, с. 59] с использованием функционального блока PID1, реализующего функцию ПИД-регулирования [7, с. 7–12].

Настройку параметров регулятора (пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих) производили эмпирическим путем с помощью классического метода Циглера – Никольса [13], основанного на использовании запаса устойчивости системы. Согласно указанному методу пропорциональный коэффициент передачи  $K_p$  ПИД-регулятора на программном уровне увеличивался до тех пор, пока на выходе системы не устанавливались колебания с постоянной амплитудой, т. е. система не оказывалась на границе устойчивости. При этом фиксировали коэффициент передачи регулятора ( $K_p^* = 60$ ) и производили запись переходного процесса (рис. 9) с последующим определением периода  $T^*$  установившихся в системе колебаний ( $T^* = 1$  с).

Значения параметров ПИД-регулятора рассчитывали по формулам [14, с. 197, табл. 4–8]:

$$K_p = 0,6K_p^* = 0,6 \cdot 60 = 36;$$

$$K_i = 0,12 \frac{K_p^*}{T^*} = 0,12 \frac{60}{1} = 7,2;$$

$$K_d = 0,075 K_p^* T^* = 0,075 \cdot 60 \cdot 1 = 4,5.$$

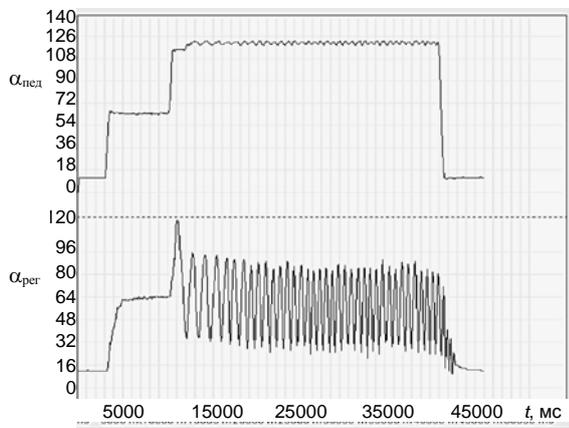


Рис. 9. Осциллограмма автоколебаний системы

Fig. 9. Oscillogram of system self-oscillations

После проведения многочисленных экспериментов с применением интерактивного программного обеспечения на компьютере, вре-

менно включенном в контур управления, в память контроллера в рамках управляющей программы были записаны следующие значения коэффициентов регулятора:  $K_p = 34$ ;  $K_i = 7$ ;  $K_d = 5$ . Осциллограммы переходного процесса в системе при данных настройках регулятора представлены на рис. 10, 11.

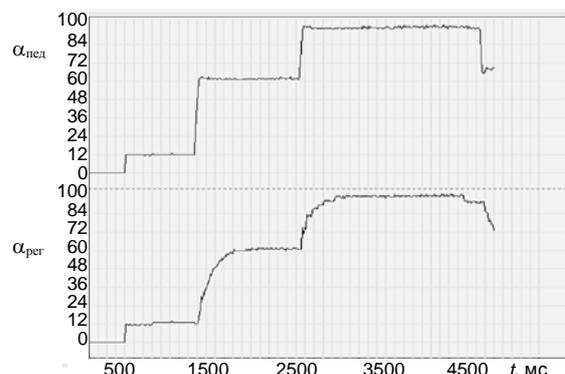


Рис. 10. Осциллограмма процесса управления топливоподачей при неработающем двигателе

Fig. 10. Oscillogram for fuel supply control with non-operated engine

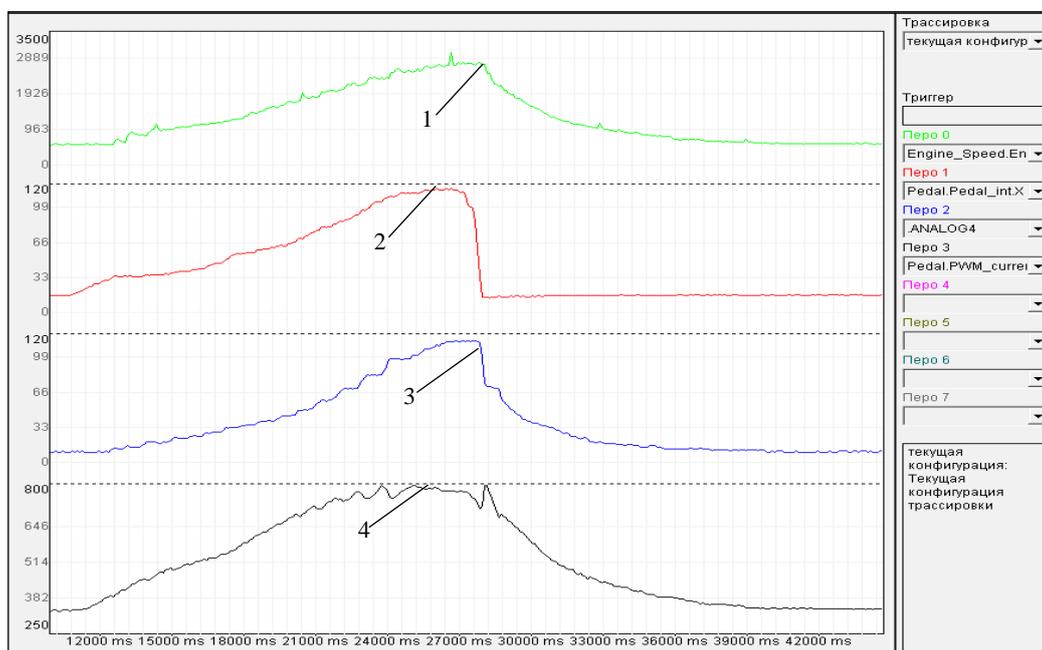


Рис. 11. Осциллограмма процесса управления топливоподачей двигателя внутреннего сгорания:

1 – частота вращения коленвала двигателя, об/мин; 2 – перемещение педали акселератора, бит;

3 – перемещение рычага регулятора топливного насоса высокого давления, бит;

4 – ток на обмотках пропорционального электромагнитного клапана управления топливоподачей, мА

Fig. 11. ICE fuel supply control oscillogram: 1 – engine crankshaft speed, rpm; 2 – accelerator pedal movement, bit;

3 – governor lever movement of high-pressure fuel injection pump, bit;

4 – winding current of proportional electromagnetic valve for fuel supply control, mA

Таким образом, программный ПИД-регулятор с данными настройками позволяет придерживаться выбранной стратегии управления исполнительными механизмами, обеспечивая требуемую частоту вращения коленчатого вала двигателя пропорционально положению педали управления топливоподачей на различных нагрузочных режимах двигателя, а также необходимую устойчивость спроектированной системы автоматического управления и минимальное время переходного процесса.

### ВЫВОДЫ

1. Разработанная программно-аппаратная платформа системы управления позволяет реализовать концепцию электронного управления топливоподачей дизельного двигателя в соответствии с нормами стандарта Euro-3, что значительно расширяет возможности управления силовым агрегатом грузовых автомобилей, уменьшает количество единиц аппаратной части, упрощает процедуру диагностики, а также способствует повышению технического уровня, а следовательно, и конкурентоспособности выпускаемой в Республике Беларусь автотракторной техники.

2. С учетом структуры и специфики проектируемой системы для регулирования частоты вращения коленчатого вала двигателя оптимальным будет использование электронного регулятора непрерывного непрямого действия, реализованного в рамках управляющей программы электронного блока управления и описываемого одним из типовых законов регулирования.

3. Как показали результаты теоретических и экспериментальных исследований, программный ПИД-регулятор с коэффициентами усиления  $K_p = 34$ ;  $K_i = 7$  и  $K_d = 5$  позволяет придерживаться выбранной стратегии управления исполнительными механизмами двигателя внутреннего сгорания, обеспечивая требуемую частоту вращения коленчатого вала дизельного двигателя КамАЗ-740 пропорционально положению педали управления топливоподачей на различных нагрузочных режимах, а также не-

обходимую устойчивость спроектированной мехатронной системы автоматического управления и минимальное время переходного процесса.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Интеллектуальная система управления стэнда автоматизированного силового агрегата автомобиля / О. С. Руктепель [и др.] // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2009. № 4. С. 31–36.
2. MT Series Mechatronic Throttle Pedal with vSENSETM Technology [Electronic Resource] // Kongsberg Automation GmbH, 2009. Mode of access: <http://www.controlsandcables.com/assets/Uploads/Throttle-Pedals-MT-Series.pdf>. Date of Access: 20.07.2012.
3. Шило, И. Н. Электронные системы мобильных машин / И. Н. Шило, А. И. Бобровник, В. Г. Левков. Минск: Беларус. гос. аграрный техн. ун-т, 2013. 320 с.
4. Autoelektrik, Autoelektronik / Robert Bosch GmbH. Springer, 2002. 503 p.
5. Электронная педаль Глобал управления подачей топлива серии MT [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://kopa.ru/netcat\\_files/instr/MT\\_Series.pdf](http://kopa.ru/netcat_files/instr/MT_Series.pdf). Дата доступа: 20.07.2012.
6. Устройства для регулирования давления и расхода [Электронный ресурс] // SMC Corporation – пневматика, гидравлика, вакуумная техника, контроллеры. Mode of Access: <http://www.smc-pneumatik.ru/cat.php?sub=89>. Date of Access: 31.06.2012.
7. System Manual Ecomat Mobile Controller Range R360 for CoDeSys from Version 2.3 and Target Version 04.xx.xx / Ifm Electronics GmbH. Germany, Essen, 28.07.2006.
8. Кусяк, В. А. Исследование динамики дизельного двигателя при электронном управлении моторным тормозом / В. А. Кусяк // Изобретатель. 2014. № 9. С. 45–48.
9. SAE International TM: Surface Vehicle Recommended Practice. J1939-71: Vehicle Application Layer. SAE Truck and Bus Control and Communications Network Subcommittee, 2003. 379 p.
10. Реализация концепции электронного управления при автоматизации дизельного двигателя с механической топливоподачей / А. Г. Баханович [и др.] // Новости науки и технологий. 2015. № 1. С. 11–18.
11. Руководство пользователя по программированию ПЛК в CoDeSys V2.3. Смоленск: Пролог, 2008. 452 с.
12. John, Karl-Heinz. IEC 61131-3 Programming Industrial Automation Systems: Concepts and Programming Languages, Requirements for Programming Systems, AIDS to Decision-Making Tools / Karl-Heinz John, Michael Tiegelkamp. New York: Springer, 2001. 376 p.
13. Ziegler, J. G. Optimum Settings for Automatic Controllers / J. G. Ziegler, N. B. Nichols // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 115 (2B), 220–222.

14. Digitale Regelung und Steuerung in der Versorgungstechnik (DDC-GA) / S. Baumgarth [et al.]. Berlin: Springer-Verlag, 1993. 450 p.

Поступила 26.04.2016

Подписана в печать 30.06.2016

Опубликована онлайн 30.01.2017

#### REFERENCES

- Ruktshel O. S., Solomakho V. L., Filimonov A. A., Kussyak V. A. (2009) Intellectual Control System for Test Bench of Automobile Automatic Power-Transmission Plant. *Izvestiia Natsionalnoi Akademii Nauk Belarusi. Ser. Fiziko-Tekhnicheskikh Nauk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physico-Technical Series], (4), 31–36 (in Russian).
- MT Series Mechatronic Throttle Pedal with vSENSE™ Technology. *Konsberg Automation GmbH, 2009*. Available at: <http://www.controlsandcables.com/assets/Uploads/Throttle-Pedals-MT-Series.pdf>. (Accessed: 20 July 2012).
- Shilo I. N., Bobrovnik A. I., Levkov V. G. (2013) *Electronic Systems of Mobile Machines*. Minsk, Belarusian State Agrarian Technical University. 320 (in Russian).
- Robert Bosch GmbH (2002) *Autoelektrik, Autoelektronik*. Springer. 503. DOI: 10.1007/978-3-322-91560-3.
- Electronic Global Pedal for Fuel supply Control, MT Series. Available at: [http://kopa.ru/netcat\\_files/instr/MT\\_Series.pdf](http://kopa.ru/netcat_files/instr/MT_Series.pdf). (Accessed: 20 July 2012) (in Russian).
- Pressure and Consumption Regulating-Devices. *SMC Corporation – Pneumatics, Hydraulics, Vacuum Equipment, Controllers*. Available at: <http://www.smc-pneumatik.ru/cat.php?sub=89>. (Accessed: 31 Juny 2012) (in Russian).
- System Manual Ecomat Mobile Controller Range R360 for CoDeSys from Version 2.3 and Target Version 04.xx.xx. Ifm Electronics GmbH, Germany, Essen, 28.07.2006.
- Kussyak V. A. Investigations on Dynamics of diesel Engine During Electronic Control of Engine Brake. *Izobretatel [Inventor]*, (9), 45–48 (in Russian).
- SAE International TM: Surface Vehicle Recommended Practice. J1939-71: Vehicle Application Layer. SAE Truck and Bus Control and Communications Network Subcommittee, 2003. 379.
- Bakhanovich A. G., Ruktshel O., Kussyak V., Gurin A. (2015) Realization of Conception on Electronic Control During Automation of Diesel Engine with Mechanical Fuel Supply. *Novosti Nauki i Tekhnologii* [News of Science and Technology], (1), 11–18 (in Russian).
- Operating Manual for PLC Programming in CoDeSys V2.3*. Smolensk, Prolog Publ., 2008. 452 (in Russian).
- John Karl-Heinz, Tiegelkamp Michael (2001) *IEC 61131-3 Programming Industrial Automation Systems: Concepts and Programming Languages, Requirements for Programming Systems, AIDS to Decision-Making Tools*. New York, Springer. 376. DOI: 10.1007/978-3-662-07847-1.
- Ziegler J. G., Nichols N. B. (1993) Optimum Settings for Automatic Controllers. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 115 (2B), 220–222. DOI: 10.1115/1.2899060.
- Baumgarth S., Karbach A., Otto D., Schernus G. P., Treusch W. (1993) *Digitale Regelung und Steuerung in der Versorgungstechnik (DDC-GA)*. Berlin, Springer-Verlag. 450 (in German).

Received: 26.04.2016

Accepted: 30.06.2016

Published online: 30.01.2017

## Развитие автоматизированной системы управления дорожным движением Минска как части интеллектуальной транспортной системы города

Канд. техн. наук Д. В. Капский<sup>1)</sup>, Д. В. Навой<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017  
Belarusian National Technical University, 2017

**Реферат.** Приведены результаты анализа характеристик транспортной системы г. Минска. Показано, что рост автомобилизации вызвал ряд проблем, среди которых: низкая скорость сообщения, плохие режимы движения, наличие перегрузок и повышенный уровень аварийности. Получены соответствующие показатели аварийности для Минска и некоторых городов мира, позволяющие характеризовать транспортную систему Минска как удовлетворительную. Для улучшения системы и повышения качества дорожного движения необходимо создание интеллектуальной транспортной системы города, которая, являясь общемировым трендом, позволяет кардинальным образом улучшить качество дорожного движения. Автоматизированная система управления дорожным движением и другие подсистемы в составе интеллектуальной транспортной системы – инструменты реализации целей по повышению безопасности и комфорта дорожного движения. Разработаны технологические требования к функционированию целостной системы, касающиеся уровня эффективности, в том числе и аварийности на участках улично-дорожной сети, входящих в создаваемую систему. Модернизация автоматизированной системы управления дорожным движением и ее трансформация в интеллектуальную транспортную систему позволят снизить аварийные, экономические, экологические и социальные потери в дорожном движении не менее чем на 15 % от существующего их уровня, несмотря на постоянный рост автомобилизации в городе.

**Ключевые слова:** дорожное движение, безопасность, интеллектуальная транспортная система, эффективность, качество, координированное регулирование

**Для цитирования:** Капский, Д. В. Развитие автоматизированной системы управления дорожным движением Минска как части интеллектуальной транспортной системы города / Д. В. Капский, Д. В. Навой // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 1. С. 38–48. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-38-48

## Development of Automated Road Traffic Control Systems in Minsk as Part of Intellectual City Transport System

D. V. Kapskiy<sup>1)</sup>, D. V. Navoy<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The paper presents results of the analysis of characteristics for Minsk city transport system. It has been shown that an increase in automobilization has caused a number of problems such as low-speed communication, bad traffic modes, availability of overloading and higher rate of accidents. Corresponding indices for accidents in Minsk and some cities in the world have been obtained in the paper and they allow to characterize Minsk transport system as a satisfactory one. It is necessary to create an intelligent transportation system in Minsk in order to improve the system and quality of road traffic. The intelligent transportation system being a global trend enables significantly to improve road traffic quality. Automated traffic control system and other subsystems as part of the intelligent transportation systems are considered as tools for achieving the goals to improve safety and comfort of road users. The paper describes the developed technological requirements for functioning of an integrated system. These requirements concern efficiency level including accident incidence rate on the sections of street and road network included in the system which is to be created. Modernization of the automated traffic control

---

### Адрес для переписки

Капский Денис Васильевич  
Белорусский национальный технический университет  
ул. Я. Коласа, 12,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-95-70  
oapdd\_atf@bntu.by

### Address for correspondence

Kapskiy Denis V.  
Belarusian National Technical University  
12 Ya. Kolasa str.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 293-95-70  
oapdd\_atf@bntu.by

system and its transformation into an intelligent transportation system make it possible to reduce accident, economic, ecologic and social costs in the road traffic not less than 15 % in comparison with the current level though continuous growth of automobilization is observed in the city.

**Keywords:** road traffic, road safety, intelligent transport system, efficiency, quality, coordinated regulation

**For citation:** Kapskiy D. V., Navoy D. V. (2017) Development of Automated Road Traffic Control Systems in Minsk as Part of Intellectual City Transport System. *Science and Technology*, 16 (1), 38–48. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-38-48 (in Russian).

За последние 20 лет число автомобилей в Республике Беларусь увеличилось в четыре раза, превысило 3 млн единиц и продолжает расти. Мы постепенно приближаемся к среднеевропейскому уровню – порядка 500 автомобилей на 1000 жителей [1]. Сценарии развития уровней автомобилизации для г. Минска, привязанные к транспортным системам Стокгольма, Варшавы и Торонто, представлены на рис. 1.

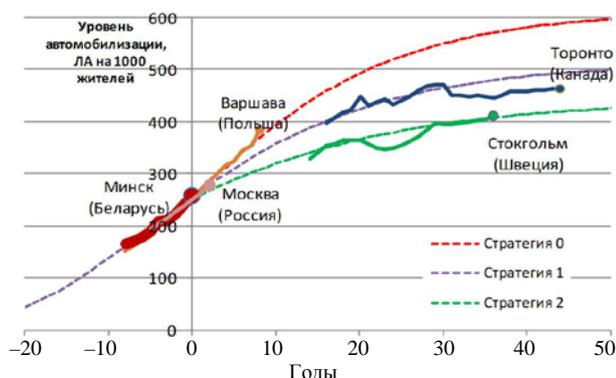


Рис. 1. Изменение уровня автомобилизации в некоторых странах [1–5]

Fig. 1. Changes in automobilization level in some countries [1–5]

Этот рост вызвал ряд проблем, связанных с увеличением нагрузки на улично-дорожную

сеть (УДС), особенно в городах. Снизилась скорость сообщения, ухудшились режимы движения, появились перегрузки, увеличились выбросы вредных веществ в атмосферу и уровень транспортного шума, возросло количество аварий. Иными словами, ухудшилось качество дорожного движения, поэтому актуальнейшей задачей является повышение этого качества. Оно определяется совокупностью основных свойств – безопасностью, экономичностью, экологичностью и социологичностью – и может оцениваться по величине потерь, под которыми понимается социально-экономическая стоимость необязательных издержек процесса движения. Эти потери достигли таких масштабов (порядка 6 млрд дол./год), что стали представлять значимую угрозу для безопасности страны [6].

### Описание транспортной системы города Минска

Приведем краткую характеристику транспортной системы Минска. Уровень качества транспортных систем для разных городов мира представлен на рис. 2. Качество определено уровнем энтропии той или иной транспортной системы.

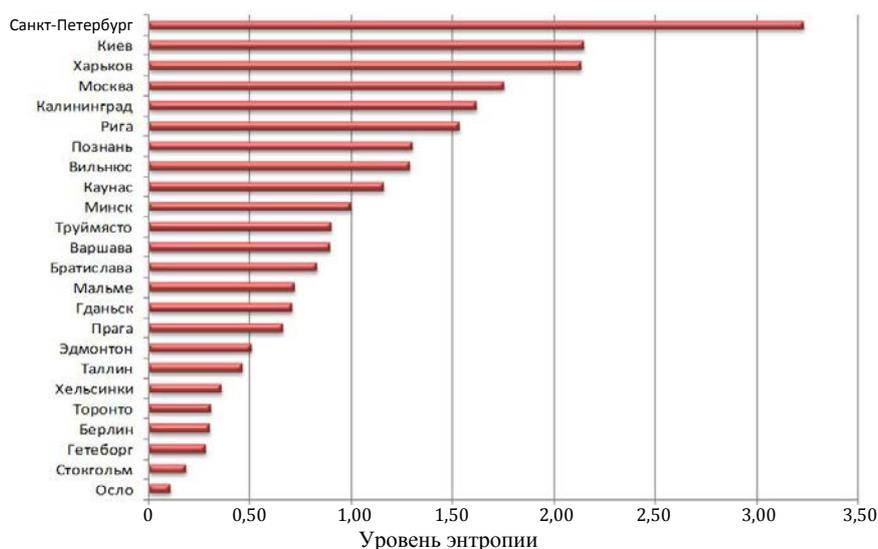


Рис. 2. Уровень качества транспортных систем

Fig. 2. Level of transport system quality

Сравнительный уровень аварийности различных городов за 2014 г., а именно количество погибших в дорожно-транспортных происшествиях (ДТП) на 100 тыс. жителей, представлен на рис. 3 [3–5, 7, 8].

Дорожное движение содержит аварийную, экологическую, экономическую и социальную угрозы. Для участников движения из всех угроз наиважнейшая – аварийность, поскольку она непосредственно касается их жизни, здоровья и благополучия. Поэтому борьба с аварийностью имеет большую социальную значимость и является делом государственной важности. Тем не менее ежегодно в мире погибают более 1 млн человек и около 50 млн человек получают ранения и травмы. В Республике Беларусь за последние пять лет произошло около 534,5 тыс. аварий, в которых погибли 5645 человек и получили ранения более 30,9 тыс. человек, а аварийные потери составили примерно 1,7 млрд дол. [1, 7, 9, 10].

Общие характеристики транспортной системы (ТС) г. Минска можно представить следующим образом:

стоимость активов транспорта (ТС и инфраструктура) ~4–5 млрд дол.;  
 количество автомобилей ~750 тыс.;  
 общий пробег транспорта ~3,5 млрд км в год;

общие транспортные издержки ~500 млн дол. в год;  
 потери от регулирования ~100 млн дол. в год;  
 общий расход топлива ~300 тыс. т в год;  
 потери времени ~25 млн ч в год;  
 вред от выбросов вредных веществ ~200 млн дол. в год;  
 вред от аварийности ~100 млн дол. в год.

Рассмотрим структуру интеллектуальной транспортной системы (ИТС) Минска, которая на функциональном уровне в настоящее время представлена следующими подсистемами [11, 12]:

- автоматизированная система управления дорожным движением (АСУДД);
- автоматизированная система диспетчерского управления общественным транспортом;
- система видеонаблюдения в местах массового скопления граждан;
- система фотофиксации скоростных режимов;
- система контроля инцидентов и маршрутного ориентирования;
- система управления движением грузового транспорта;
- система управления парковочным пространством.

Интеграция подсистем в составе ИТС имеет различный уровень. Так, на рис. 4 показана глубина интеграции подсистем в составе ИТС.

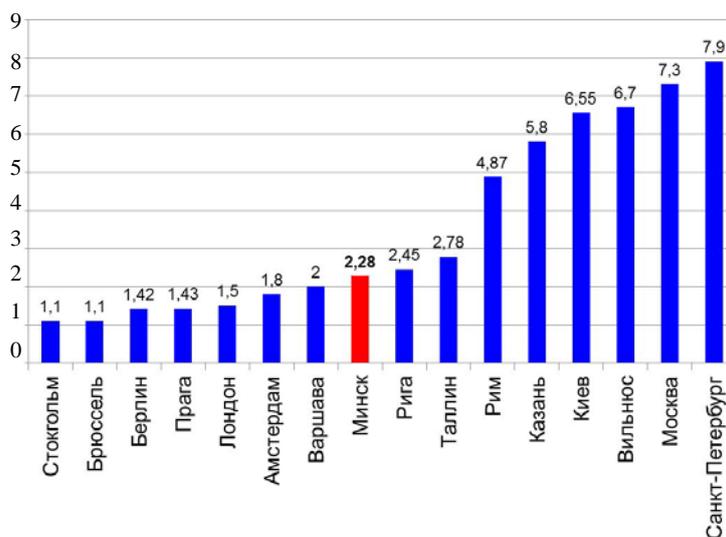


Рис. 3. Распределение количества погибших в дорожно-транспортных происшествиях на 100 тыс. жителей в 2014 г.

Fig. 3. Distribution of death toll in road traffic accidents per 100 000 of population in 2014

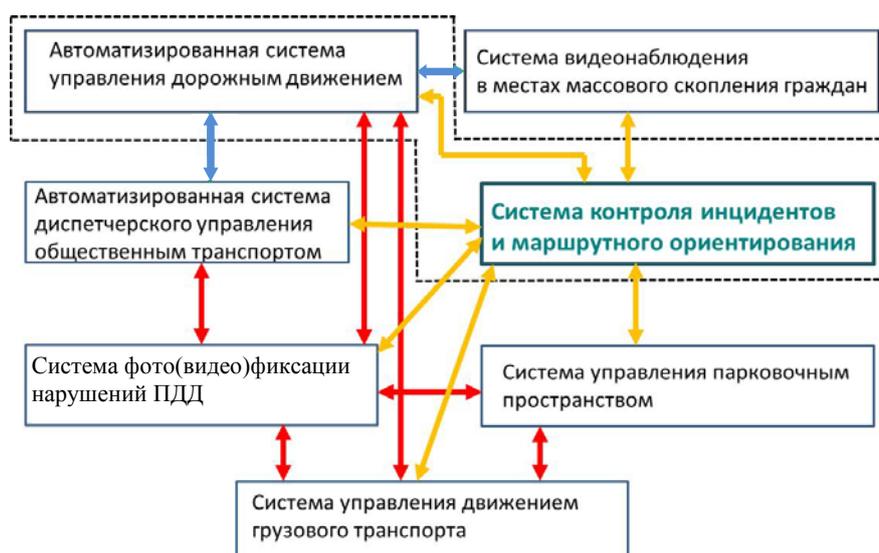


Рис. 4. Существующие структурные связи в интеллектуальной транспортной системе г. Минска:

←→ – интеграция существует; → – интеграция в процессе реализации;  
 ↔ – интеграция отсутствует

Fig. 4. Existing structural relations in intellectual transport system of Minsk:

←→ – integration exists; → – integration is under realization process;  
 ↔ – integration does not exist

Характеристика АСУДД Минска заключается в том, что она предназначена для управления движением транспортных и пешеходных потоков в городе. АСУДД состоит из:

- программно-технического комплекса центрального управляющего пункта (ПТК ЦУП);
- каналообразующей аппаратуры;
- периферийных средств для светофорных объектов (дорожные контроллеры, детекто-

ры транспорта, указатели скорости и другие управляемые знаки, табло информирования и табло вызывные пешеходные, светофоры).

АСУДД технологически функционирует в рамках требований:

- а) к уровню аварийности (табл. 1)
- б) к уровню эффективности движения (табл. 2, 3).

Таблица 1

**Уровень аварийности**  
**Accident rate**

Магистраль общегородского значения	Среднесуточная (базовая) интенсивность в обоих направлениях, авт./ч													
	100	250	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000
ДТП с пострадавшими на 1 км в год	1,05	1,130	1,250	1,50	1,750	2,00	2,250	2,50	2,750	3,00	3,250	3,50	3,750	4,00
ДТП с пострадавшими пешеходами на 1 км в год	1,01	1,030	1,050	1,10	1,150	1,20	1,250	1,30	1,350	1,40	1,450	1,50	1,550	1,60
ДТП с пострадавшими, кроме пешеходов, на 1 км в год	0,04	0,100	0,200	0,40	0,600	0,80	1,000	1,20	1,400	1,60	1,800	2,00	2,200	2,40
Количество погибших в ДТП на 1 км в год	0,10	0,103	0,105	0,11	0,115	0,12	0,125	0,13	0,135	0,14	0,145	0,15	0,155	0,16
ДТП с пострадавшими на 1 автомобилекилометр в год	0,58	0,540	0,490	0,40	0,330	0,27	0,220	0,18	0,150	0,12	0,100	0,08	0,070	0,05
Количество погибших в ДТП на 1 автомобилекилометр в год	0,0336	0,0317	0,0287	0,0235	0,0192	0,0157	0,0129	0,0105	0,0086	0,0071	0,0058	0,0047	0,0039	0,0032

Таблица 2

Характеристики уровней обслуживания  
Characteristics of service levels

Уровень обслуживания	Средняя скорость сообщения, км/ч	Коэффициент загрузки	Количество маневров торможения на 1 км
A	>48	<0,50	0–1
B	40–48	0,50–0,60	1–2
C	32–40	0,60–0,75	2–3,5
D	24–32	0,75–0,85	3,5–6
E	20–24	0,85–0,95	6–10
F	<20	>0,95	>10

Таблица 3

Распределение уровней обслуживания по статусам объектов управления  
Distribution of service levels according control object status

Статус	Уровень		
	оптимальный	максимальный	предельно допустимый
1	B	C	10 % времени на уровне D
2	B	C	15 % времени на уровне D
3	C	D	10 % времени на уровне E
4	C	D	15 % времени на уровне E

Реализация вышеуказанных требований происходит следующим образом. В соответствии с Концепцией управления дорожным движением г. Минска каждой улице в городе присвоен соответствующий статус. Он определяет набор требований к той или иной улице. Постоянный мониторинг дорожной ситуации позволяет определить выход различных параметров за установленные пределы в соответствии со статусом. В таком случае, если система не имеет предустановленных сценариев, технологу необходимо подготовить данные сценарии (планы координации, изменение графика светофорных объектов, изменение схемы организации дорожного движения и др.). Или если решение требует капитальных затрат – выйти с предложением на муниципальный уровень для решения транспортной задачи.

Пример мониторинга соответствия заданных показателей реальным с помощью gps-трека показан на рис. 5. Так, при проезде той или иной улицы программа рассчитывает ряд данных, таких как скорость сообщения задержки и т. д., и выдает параметры, не соответствующие заданным, для дальнейшего проектирования.

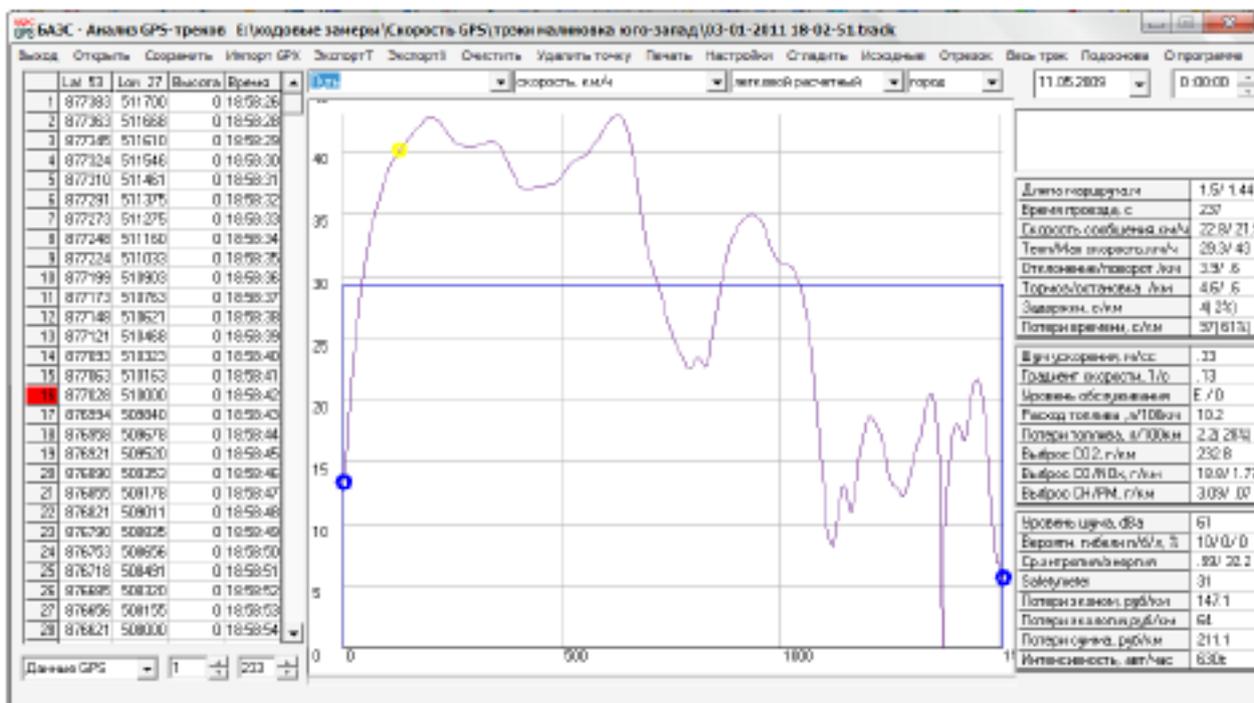


Рис. 5. Пример gps-трека для мониторинга дорожной ситуации

Fig. 5. Example of gps-track for road situation monitoring

АСУДД обеспечивает управление дорожным движением в нескольких режимах:

- централизованное управление от ПТК ЦУП;
- децентрализованное управление от контроллера зонального центра (КЗЦ-М1) или узлового дорожного контроллера (ДК) на улично-дорожной сети;
- локальное управление от ДК.

Переход от одного режима к другому производится по параметрам транспортных потоков на перекрестке или по решению инженера по организации дорожного движения. При децентрализованном и централизованном управлении от ПТК ЦУП обеспечивается решение следующих задач:

- формирование информационной базы системы, рассылка ее фрагментов, обеспечивающих реализацию требуемой технологии управления, по элементам АСУДД (по КЗЦ и ДК);
- управление светофорной сигнализацией в соответствии с полученным фрагментом информационной базы системы и реализуемыми алгоритмами управления.

Функции АСУДД:

- оперативное формирование и корректировка информационной базы АСУДД, в том числе с использованием системы автоматического проектирования (САПР);
- расчет и оптимизация с помощью САПР параметров организации дорожного движения для всех режимов сетевого управления;
- прием, накопление, обработка, анализ, отображение и печать статистической информации от периферийных средств с целью контроля режимов работы и их технического состояния, а также определение параметров транспортных потоков, эффективности управления, выбросов вредных веществ;
- координированное управление светофорным объектом на магистрали (в районе):
  - с выбором планов координации по карте;
  - с выбором планов координации по параметрам движения в характерных точках;
  - с оптимизацией сдвигов (динамическая корректировка планов координации с учетом текущей интенсивности транспортного потока);
  - с управлением скоростью на перегоне;
- управление режимом движения на магистрали по длине очереди, коэффициенту загрузки, суммарным потерям;
  - сетевое координированное управление;
  - диспетчерское управление;

- управление маршрутом «Зеленая улица»;
- локальное гибкое регулирование с учетом параметров транспортного потока и показателей эффективности управления;
- локальный жесткий режим управления;
- локальное многопрограммное управление с переключением по времени суток и дням недели, а также по параметрам транспортного потока и эффективности;
- вызываемое регулирование с вызовом от пешехода, транспортного средства или диспетчера, с оптимизацией вызовов;
- обеспечение приоритета движения общественного транспорта (трамвая);
- речевое информирование о выходе из строя конкретного светофорного объекта и о нестандартных ситуациях;
- отображение на фоне цифровой карты города дислокации всех светофорных объектов, режимов их работы и состояния;
- расчет модели данных о надежности светофорного объекта;
- автоматизация функций обработки и учета информации о параметрах функционирования;
- выписка нарядов на текущий ремонт светофорных объектов;
- формирование, отображение и печать отчетов планово-предупредительного ремонта;
- расчет коэффициентов готовности, среднего времени восстановления, наработки на отказ светофорных объектов.

#### **Описание программно-технического комплекса автоматизированной системы управления дорожным движением**

ПТК ЦУП АСУДД включает в себя:

- автоматизированное рабочее место (АРМ) технолога (САПР);
- АРМ инженера по организации дорожного движения;
- АРМ инженера КЗЦ-М;
- сервер базы данных (БД);
- управляющий вычислительный комплекс (УВК);
- систему отображения;
- локальную вычислительную сеть.

САПР, установленная на АРМ технолога, дает возможность осуществлять технологическое сопровождение АСУДД. В САПР реализованы программные модули, позволяющие получать данные из БД системы о параметрах

транспортных потоков и соответствии системы заданным технологическим параметрам. САПР также дает возможность вносить управляющие воздействия в систему на локальном и магистральном уровнях.

Оценка качества управляющих сценариев для конкретного плана координации проводится на основании сравнения ситуаций «до» и «после».

Система отображения ПТК ЦУП реализует-ся путем визуализации информации о функциональном состоянии периферийных устройств

на УДС, параметров транспортных потоков от детекторов транспорта, а также видеоинформации. Видеоинформация в ПТК ЦУП АСУДД поступает как от видеодетекторов транспорта, так и от системы видеонаблюдения в местах массового скопления граждан. Пример работы видеодетекторов транспорта представлен на рис. 6.

Конфигурация зала управления ПТК ЦУП АСУДД и системы видеонаблюдения приведена на рис. 7.

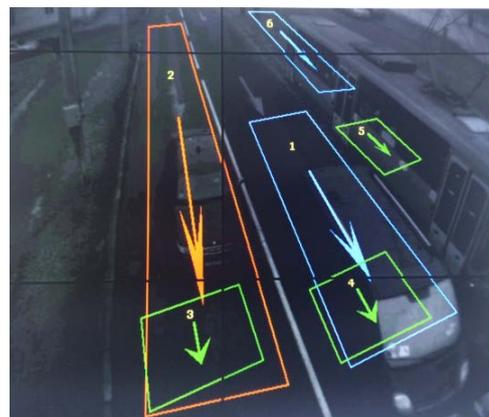
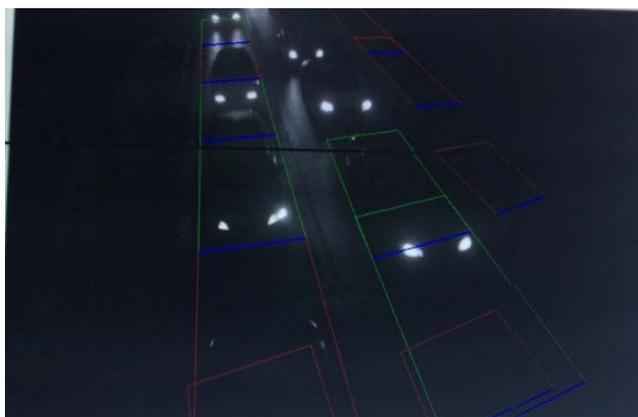


Рис. 6. Работа видеодетекторов транспорта в ночное и дневное время суток

Fig. 6. Operation of traffic video detector at night and during the daytime



Рис. 7. Зал управления с системой видеонаблюдения

Fig. 7. Control room with video detection system

Другое программное обеспечение (ПО) ПТК ЦУП АСУДД обеспечивает централизованное и децентрализованное управление светофорными объектами. Помимо ранее описанного технологического ПО, установленного на АРМ, ПТК ЦУП АСУДД также включает:

- системное ПО, в том числе:

- 1) ОС Red Hat Enterprise Linux;
- 2) СУБД Oracle Database Release 10.2 (10.2.0.4 Enterprise Edition) for Linux;

- 3) библиотеку функций QT v.3.3.3 из состава операционной системы Red Hat Enterprise Linux;

- 4) ПО ЛС Ethernet из состава операционной системы Red Hat Enterprise Linux;

- 5) антивирусные средства NOD32 Enterprise Edition Linux WorkStation и Linux File Server;

- 6) редакторы (текстовый, графический) из состава операционной системы Red Hat Enterprise Linux;

- прикладное ПО, включающее следующие программные продукты:

- 1) сервер БД, предназначенный для хранения информации в таблицах;

- 2) УВК, предназначенный для обмена информацией с коммуникационными компьютерами (АРМ КЗЦ-М1), для обработки информации и организации взаимодействия с базой данных, для анализа параметров транспортных потоков и выбора режима управления с учетом измеряемых параметров транспортных потоков. УВК также выполняет функции архивирования статистики;

- 3) АРМ дежурного ГАИ и АРМ резервное, предназначенные для отображения текущей информации (данных по параметрам транспортных потоков, режимам функционирования, состоянию периферийного оборудования), а также формирования команд управления дорожным движением при диспетчерском управлении. АРМ технолога предназначено для формирования базы данных, расчета планов координации при помощи САПР, анализа эффективности управления;

- 4) АРМ инженера по надежности и АРМ функционирования, предназначенные для автоматизации функций инженера по надежности и диспетчера ЦУП;

- 5) АРМ инженера КЗЦ-М1, предназначенное для управления дорожными контроллера-

ми. Обеспечивает прием, обработку и накопление информации телесигнализации и телеизмерений от периферийных средств (дорожных контроллеров, детекторов транспорта), анализ данных с целью отслеживания режимов работы и технического состояния периферийных средств, формирование информации телеуправления, в соответствии со сложившейся транспортной обстановкой, состоянием и режимами работы периферийного оборудования, связь с периферийными устройствами.

Коммуникационный профиль заключается в следующем. Для передачи данных на светофорные объекты используются протокол «Старт» и протокол GPRS-связи. Для подключения каналообразующей аппаратуры (КЗЦ-М1) используется интерфейс CAN2.0, а для подключения GPRS-модема – интерфейс RS-232.

LAN-коммуникация: TCP/IP, Ethernet, скорость передачи данных – 100 Мбит/с. MAN-коммуникация: телефонные линии связи, GPRS-связь.

Сервер управления дорожным движением реализуется на УВК. Обмен информации с БД осуществляется по протоколу Net8, с АРМ – по протоколу TCP/IP совместно с протоколом Sockets. В качестве сервера БД используется СУБД ORACLE, для передачи данных от видеокамер и видеодетекторов – оптоволоконные каналы.

Технические средства управления дорожным движением являются основными исполнительными элементами системы. ДК – основное периферийное оборудование АСУДД. Для подключения ДК к центру управления используются два вида связи:

- проводная (телефонные линии связи);
- беспроводная (GPRS-связь).

ПТК ЦУП АСУДД позволяет подключить к системе до 640 ДК по проводным линиям связи и до 200 ДК – по беспроводным линиям связи. Обмен информацией между ДК и центром управления осуществляется по проводным линиям связи каждую секунду, по GPRS-связи – по запросам каждые 4 мин. К ДК подключается дополнительное периферийное оборудование:

- детекторы транспорта (ДТ);
- табло вызывное пешеходное (ТВП);
- указатели скорости (УСК);
- табло предварительного информирования (ТПИ).

В ДК белорусских производителей реализованы следующие функции управления:

- ручное управление;
- управление по графику;
- управление на основе информации от ДТ;
- координированное управление;
- диспетчерское управление;
- «зеленая улица» (режим пропуска спецтранспорта);
- управление от вызывных кнопок.

В г. Минске используются контроллеры нескольких типов – Peek, ДУМКА и БДКЛМ.

### Цели автоматизированной системы управления дорожным движением Минска в составе интеллектуальной транспортной системы

ИТС, являясь общемировым трендом, позволяет кардинальным образом улучшить качество дорожного движения. АСУДД и другие подсистемы в составе ИТС – это инструменты реализации целей по повышению безопасности и комфорта дорожного движения [12, 13]. Анализируя тенденции изменения транспортной нагрузки в г. Минске (рис. 8), стоит отметить, что при существенном росте автомобилизации и объема движения аварийность снижается [14].



Интенсивность и пропускная способность, тыс. авт./сут.  
Аварийность, количество погибших в год

Рис. 8. Тенденции изменения транспортной нагрузки

Fig. 8. Tendencies in changing of transport loading

Цели по реализации ИТС и АСУДД в ее составе с учетом тенденций изменения транспортной нагрузки и анализа аварийности представлены на рис. 9.

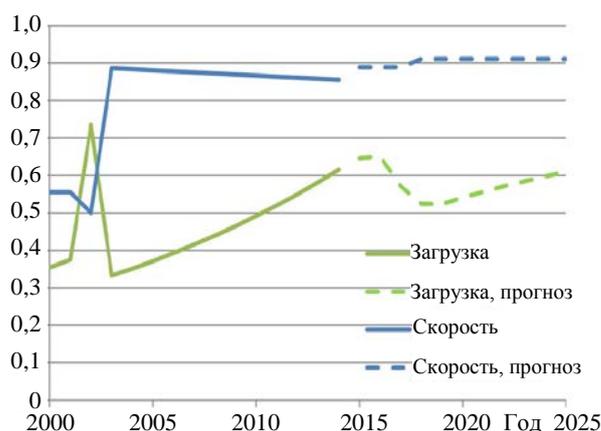


Рис. 9. Цели интеллектуальной транспортной системы г. Минска

Fig. 9. Targets of intellectual transport system in Minsk

В рамках экономической стратегии, ставя целью повышение качества жизни населения города за счет снижения транспортных потерь, можно сформировать экономическую стратегию с помощью внедрения ИТС и АСУДД в ее составе как основного компонента (табл. 4) [11, 15].

Таблица 4

Компонент	Статья выгоды	Масштаб, млн дол./год
Экономика	Снижение потерь из-за альтернативного использования МКАД вместо городской территории.	20–20
	Снижение потерь из-за увеличения скорости сообщения	6–3
Безопасность	Сохранение жизни и здоровья.	3–1,5
	Снижение числа и ликвидация инцидентов	2–1
Экология	Снижение потерь из-за альтернативного использования МКАД вместо городской территории	6–3

### ВЫВОДЫ

1. В процессе исследований установлено, что рост автомобилизации вызвал ряд проблем, среди которых – низкая скорость сообщения, плохие режимы движения, наличие перегрузок и повышенный уровень аварийности. Изменить ситуацию можно с помощью совершенствова-

ния организации дорожного движения и создания интеллектуальной транспортной системы г. Минска, которая, являясь общемировым трендом, позволяет кардинальным образом повысить качество дорожного движения. Автоматизированная система управления дорожным движением и другие подсистемы в составе интеллектуальной транспортной системы – это инструменты реализации целей по повышению безопасности и комфорта дорожного движения.

2. Целесообразно в качестве базовой для создания интеллектуальной транспортной системы выбрать автоматизированную систему управления дорожным движением, которая имеет соответствующие функциональные, структурные, организационные и институциональные резервы для своего развития.

3. Разработаны технологические требования к функционированию целостной системы, касающиеся уровня эффективности, в том числе и аварийности на участках улично-дорожной сети, входящих в создаваемую систему.

4. Модернизация автоматизированной системы управления дорожным движением в интеллектуальную транспортную систему позволит снизить аварийные, экономические, экологические и социальные потери в дорожном движении не менее чем на 15 % от существующего их уровня, несмотря на постоянный рост автомобилизации в городе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сведения о состоянии дорожно-транспортной аварийности в Республике Беларусь в 2015 г.: аналитич. сб. / сост. О. Г. Ливанский; под общ. ред. Н. А. Мельченко. Минск: Полиграфический центр МВД Респ. Беларусь, 2016. 89 с.
2. 2013 Motor Vehicle Crashes: Overview [Electronic Resource]. Mode of Access: <https://crashstats.nhtsa.dot.gov/Api/Public/ViewPublication/812101>. Date of Access: 16.05.2015.
3. Road Traffic Accidents Involving Personal Injury, November 2014 [Electronic Resource] // Statistics Norway 2014. Mode of Access: <http://www.ssb.no/en/transport-og-reiseliv/statistikker/vtu>. Date of Access: 16.05.2015.
4. Accident Rate [Electronic resource] // Lithuanian Road under the Ministry of Transport and Communications. Mode of Access: [http://www.lra.lt/en.php/traffic\\_safety/accident\\_rate\\_information/106](http://www.lra.lt/en.php/traffic_safety/accident_rate_information/106). Date of Access: 20.03.2016.
5. Albalatea, D. The Road against Fatalities: Infrastructure Spending vs. Regulation? / D. Albalatea, L. Fernández, A. Yarygina // Accident Analysis & Prevention. 2013. Vol. 59. P. 227–239.
6. Капский, Д. В. Метод прогнозирования дорожно-транспортной аварийности по потенциальной опасности / Д. В. Капский. М.: Новое знание, 2015. 327 с.
7. Сведения о состоянии дорожно-транспортной аварийности в Республике Беларусь в 2014 г.: аналитич. сб. / сост. О. Г. Ливанский; под общ. ред. Н. А. Мельченко. Минск: Полиграфический центр МВД Респ. Беларусь, 2015. 89 с.
8. CSNg dati Latvijā (2000–2014 g.) // CSDD [Electronic Resource]. 2014. Mode of Access: [http://www.csdd.lv/lat/noderiga\\_informacija/statistika/celu\\_satiksmes\\_negadijumi/?doc=523](http://www.csdd.lv/lat/noderiga_informacija/statistika/celu_satiksmes_negadijumi/?doc=523). Date of Access: 16.05.2015.
9. Состояние безопасности дорожного движения в Республике Беларусь в 1999–2008 гг. и наметившиеся тенденции: аналитич. сб. / сост. В. В. Бульбенков, А. А. Сушко, О. Г. Ливанский; под общ. ред. А. Н. Кулешова. Минск: Полиграфический Центр МВД Респ. Беларусь, 2009. 144 с.
10. Сведения о состоянии дорожно-транспортной аварийности в Республике Беларусь в 2011 г.: аналитич. сб. / сост. В. В. Бульбенков, О. Г. Ливанский; под общ. ред. Н. А. Мельченко. Минск: Полиграфический центр МВД Респ. Беларусь, 2012. 89 с.
11. Врубель, Ю. А. Определение потерь в дорожном движении / Ю. А. Врубель, Д. В. Капский, Е. Н. Кот. Минск: БНТУ, 2006. 240 с.
12. Капский, Д. В. Аварийность в дорожном движении. Исследование дорожно-транспортных происшествий с помощью страховой статистики / Д. В. Капский // Вестник БНТУ. 2011. № 1. С. 48–54.
13. Аудит безопасности дорожного движения / Д. В. Капский [и др.]; науч. ред. Д. В. Капского; Мин-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. Гомель: БелГУТ, 2015. 428 с.
14. Капский, Д. В. Прогнозирование аварийности в дорожном движении / Д. В. Капский. Минск: БНТУ, 2008. 243 с.
15. Капский, Д. В. Разработка методики определения экономических потерь при координированном регулировании транспортно-пешеходных потоков / Д. В. Капский, Д. В. Навой // Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопасность движения: Междунар. сб. науч. тр. / Тихоокеанский гос. ун-т; редкол.: А. И. Ярмолинский, И. Ю. Белуцкий, П. А. Пегин. Хабаровск, 2009. № 9. С. 12–31.

Поступила 10.06.2016

Подписана в печать 29.08.2016

Опубликована онлайн 30.01.2017

#### REFERENCES

1. Livansky O. G., Melchenko N. A. (ed.) (2016) *Information on Road Transport Accident Rate in the Republic of Belarus in 2015: Analytical Collected Book*. Minsk, Polygraphic Centre of Ministry of Internal Affairs of the Republic of Belarus. 89 (in Russian).

2. 2013 Motor Vehicle Crashes: Overview. Available at: <https://crashstats.nhtsa.dot.gov/Api/Public/ViewPublication/812101>. (Accessed 16 May 2015).
3. Road Traffic Accidents Involving Personal Injury, November 2014. *Statistics Norway 2014*. Available at: <http://www.ssb.no/en/transport-og-reiseliv/statistikker/vtu>. (Accessed 16 May 2015).
4. Accident Rate. *Lithuanian Road Administration under the Ministry of Transport and Communications*. Available at: [http://www.lra.lt/en.php/traffic\\_safety/accident\\_rate\\_information/106](http://www.lra.lt/en.php/traffic_safety/accident_rate_information/106). (Accessed 20 March 2016).
5. Albalatea D., Fern6n4deza L., Yarygina A. (2013) The Road against Fatalities: Infrastructure Spending vs. Regulation? *Accident Analysis & Prevention*, 59, 227–239. DOI: 10.1016/j.aap.2013.06.008.
6. Kapskiy D. V. *Method for Forecasting Road Transport Accident Rate According to Potential Danger*. Moscow, Novoye Znanie Publ. 327 (in Russian).
7. Livansky O. G., Melchenko N. A. (ed.) (2015) *Information on Road Transport Accident Rate in the Republic of Belarus in 2014: Analytical Collected Book*. Minsk, Polygraphic Centre of Ministry of Internal Affairs of the Republic of Belarus. 89 (in Russian).
8. CSNg dati Latvijā (2000–2014 g.). CSDD. Available at: [http://www.csdd.lv/lat/noderiga\\_informacija/statistika/celu\\_satiksmes\\_negadijumi/?doc=523](http://www.csdd.lv/lat/noderiga_informacija/statistika/celu_satiksmes_negadijumi/?doc=523). (Accessed 16 May 2015) (Latvian).
9. Bulbenkov V. V., Sushko A. A., Livansky O. G., Kuleshov A. N. (ed.) (2009) *Situation with Road-Traffic Safety in the Republic of Belarus in 1999–2008 and Emerging Tendencies: Analytical Collected Book*. Minsk, Polygraphic Centre of Ministry of Internal Affairs of the Republic of Belarus. 144 (in Russian).
10. Bulbenkov V. V., Livansky O. G., Melchenko N. A. (ed.) (2012) *Information on Road Transport Accident Rate in the Republic of Belarus in 2011: Analytical Collected Book*. Minsk, Polygraphic Centre of Ministry of Internal Affairs of the Republic of Belarus. 89 (in Russian).
11. Vruble Yu. A., Kapskiy D. V., Kot E. N. (2006) *Deremination of Losses in Road Traffic*. Minsk, Belarusian National Technical University. 240 (in Russian).
12. Kapskiy D. V. (2011) Accidence in Road Traffic. Investigations on Road Transport Accidents with the Help of Insurance Statistics. *Vestnik BNTU* [Bulletin of the Belarusian National Technical University], (1), 48–54 (in Russian).
13. Kapskiy D. V., Azemsha S. A., Kuzmenko V. N., Mozalevskiy D. V., Skirkovskiy S. V., Korzhova A. V., Polkhovskaia A. S., Ermakova N. S., Artiushevskaja S. N. (2015) *Audit of Road Traffic Safety*. Gomel, Belarusian State University of Transport. 428 (in Russian).
14. Kapskiy D. V. (2008) *Forecasting of Accidence in Road Traffic*. Minsk, Belarusian National Technical University. 243 (in Russian).
15. Kapskiy D. V., Navoy D. V. (2009) Development of Methodology for Determination of Economic Losses During Coordinated Regulation of Transport and Pedestrian Flows. *Dalnii Vostok. Avtomobilnye Dorogi i Bezopasnost Dvizheniia: Mezhdunar. Sb. Nauch. Tr.* [Far East. Automobile Roads and Traffic Safety: International Collection of Research Papers]. Khabarovsk, Pacific National University, (9), 12–31 (in Russian).

Received: 10.06.2016

Accepted: 29.08.2016

Published online: 30.01.2017

DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-49-56

УДК 620.75

## Методики исследований химических характеристик полимерных материалов

Доктора техн. наук, профессора В. В. Кузьмич<sup>1)</sup>, И. И. Карпунин<sup>1)</sup>, канд. техн. наук, доц. Ю. С. Почанин<sup>1)</sup>, Т. Ф. Балабанова<sup>1)</sup>, докт. хим. наук Н. Г. Козлов<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

<sup>2)</sup>Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017  
Belarusian National Technical University, 2017

**Реферат.** Метод измерения химического сопротивления полимера путем погружения образцов в химический реагент – стандартная процедура испытаний, используемая в химической промышленности (стандарты ASTM D543, ИСО 155). Такой способ использовался только для сравнительной оценки химического сопротивления различных материалов в ряде типичных реагентов. Результаты, получаемые этим методом, не дают прямой оценки возможности применения данного материала для того или иного изделия, используемого в контакте с различными химическими средами. Необходимо иметь в виду такие ограничения используемых результатов испытаний, как продолжительность воздействия среды, температура и концентрация реагента в среде. Если предполагается применение в условиях, когда изделие непрерывно взаимодействует с жидкостью, то результаты кратковременных испытаний могут использоваться только для исключения наименее подходящих материалов. Оборудование для испытаний включало прецизионные химические весы, микрометр, контейнер для иммерсионной среды, термостат для задания и поддержания необходимой температуры и приборы для измерений физических свойств. Размеры и тип испытываемого образца определяются формой материала, который предназначен для испытаний. При испытаниях в каждом реагенте требуются, по крайней мере, три образца. Для каждого образца измеряются изменения размеров и веса. Образец помещается в контейнер на семь суток в стандартной лабораторной атмосфере, причем он не должен касаться дна или стенок контейнера.

**Ключевые слова:** метод оценки, иммерсионная среда, размер, вес, химическая среда, температура, концентрация, реагенты, лабораторная атмосфера

**Для цитирования:** Методики исследований химических характеристик полимерных материалов / В. В. Кузьмич [и др.] // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 1. С. 49–56. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-49-56

## Methods for Investigation of Chemical Characteristics in Polymer Materials

V. V. Kuzmich<sup>1)</sup>, I. I. Karpunin<sup>1)</sup>, Yu. S. Pochanin<sup>1)</sup>, T. F. Balabanova<sup>1)</sup>, N. G. Kozlov<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>2)</sup>Institute of Physical Organic Chemistry of National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** A method for measuring polymer chemical resistance by dipping specimens in chemical reagents is a standard investigation procedure used in chemical industry (Standards ASTM D543, ISO 155). Such method has been used only for comparative evaluation of chemical resistance for various materials in a number of typical reagents. The results obtained with the help of the method do not provide the possibility directly to estimate application of the given material for this or that products which are used in contact with various chemical environments. It is necessary to take into account such limitations of

### Адрес для переписки

Кузьмич Василий Васильевич  
Белорусский национальный технический университет  
ул. Я. Коласа, 14,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-96-48  
oup@bntu.by

### Address for correspondence

Kuzmich Vasilij V.  
Belarusian National Technical University  
14 Ya. Kolasa str.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 293-96-48  
oup@bntu.by

the used testing results as duration of environmental exposure, temperature and reagent concentration in the medium. If it is assumed that the method is applied under conditions when a product is continuously contacting with liquid then the results of short-term testings can be used only with the purpose to exclude the least adequate materials. Testing equipment has included a precision chemical balance, a micrometer, a container for immersion medium, a thermostat for setting and maintaining the required temperature and devices for measuring physical properties. Dimensions and type of a test specimen are specified by the shape of material which is used for testing. At least three specimens are needed for testing in every reagent. Changes in dimension and weight are measured for every specimen. The specimen is placed in container for 7 days in standard laboratory atmosphere where it should not touch a bottom or walls of the container.

**Keywords:** evaluation method, immersion medium, dimension, weight, chemical medium, temperature, concentration, reagents, laboratory atmosphere

**For citation:** Kuzmich V. V., Karpunin I. I., Pochanin Yu. S., Balabanova T. F., Kozlov N. G. (2017) Methods for Investigation of Chemical Characteristics in Polymer Materials. *Science and Technology*, 16 (1), 49–56. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-49-56 (in Russian)

### Методы определения стойкости пластмасс к химическим реагентам

Методы определения стойкости пластмасс к действию химических сред описаны в ГОСТ 12020–72. Сущность методов заключается в определении изменения массы, линейных размеров и механических свойств стандартных образцов пластмасс в ненапряженном состоянии и растрескивания их в напряженно-деформированном состоянии после выдержки в течение определенного периода времени в реагентах – жидких химических веществах, растворах твердых химических веществ и технических жидких средах (топливе, масле и т. п.). Результаты испыта-

ний, полученные по настоящему стандарту, позволили установить:

- сравнительную стойкость пластмасс в данной химической среде;
- сравнительную стойкость испытуемой пластмассы в различных химических средах;
- влияние введенных в пластмассу добавок на стойкость в данной химической среде или в нескольких химических средах.

Метод определения изменения массы образцов пластмасс после выдержки в химических реагентах также применяют для нахождения количества экстрагируемых веществ при воздействии на них химических реагентов [1]. Рекомендуемый перечень химических реагентов для определения стойкости полимерных материалов представлен в табл. 1 [2, 3].

Таблица 1

Рекомендуемый перечень химических реагентов  
Recommended list of chemical reagents

Наименование реагента	Концентрация, %
Кислота серная: по ГОСТ 4204–66 по ГОСТ 4204–66, плотность 1,84 г/см <sup>3</sup>	
	3; 30
	Концентрированная
Кислота азотная: по ГОСТ 4461–67 по ГОСТ 4461–67, плотность 1,41 г/см <sup>3</sup>	
	10; 40
	Концентрированная
Кислота соляная: по ГОСТ 3118–67 по ГОСТ 3118–67, плотность 1,19 г/см <sup>3</sup>	
	10 Концентрированная
Кислота хромовая	40
Кислота фтористоводородная по ГОСТ 10484–63	40
Кислота уксусная по ГОСТ 61–69	5; 100
Кислота лимонная по ГОСТ 3652–69	10
Кислота олеиновая по ГОСТ 10475–63	100
Натрия гидрат окиси (натр едкий) по ГОСТ 4328–66	1; 10; 60
Натрий хлористый по ГОСТ 4233–66	10; 3

Окончание табл. 1

Наименование реагента	Концентрация, %
Натрия гипохлорит	10
Натрий углекислый по ГОСТ 84–66	2; 20
Аммиак водный:	
по ГОСТ 3760–64	10
по ГОСТ 3760–64, плотность 0,90 г/см <sup>3</sup>	–
Водорода перекись (пергидроль) по ГОСТ 10929–64	3; 30
Ацетон по ГОСТ 26-03–71	100
Этилацетат по ГОСТ 8981–71	100
Спирт этиловый гидролизный высшей очистки	50; 96
Метанол-яд по ГОСТ 1942–63	100
Дихлорэтан технический по ГОСТ 1942–63	100
Углерод четыреххлористый по ГОСТ 5827–68	100
Гептан нормальный эталонный по ГОСТ 4375–48	100
Бензол по ГОСТ 5955–68	100

### Характеристика оборудования для испытаний

Оборудование для испытаний включало прецизионные химические весы, микрометр, контейнер для иммерсионной среды, термостат для задания и поддержания необходимой температуры и приборы для измерений физических свойств. Размеры и тип испытуемого образца определяли формой материала, который предназначался для испытаний. При испытаниях в каждом реагенте требуются, по крайней мере, три образца. Для каждого образца измеряются изменения размеров и веса. Образец помещали в контейнер на семь суток в стандартной лабораторной атмосфере, причем он не должен касаться дна или стенок контейнера. После семидневной выдержки в жидкости образец вынимали из контейнера и взвешивали. Также измеряли его размеры. Этот же порядок испытаний сохраняется и в том случае, если проводятся измерения изменений механических свойств после пребывания в реагенте. Механические свойства исходных образцов и образцов после испытаний погружением в среду измеряли по стандартной процедуре, которая описана в соответствующей спецификации. К результатам испытаний относятся также наблюдения потери отражательной способности поверхности, набухание, образование мути, появление крейзов и пузырей.

В течение последних 20 лет полимерные материалы широко используются в различных

областях и повседневно находятся в контакте с самыми различными химическими соединениями [1–10]. Поэтому важно оценить, не оставляют ли эти соединения пятен на изделии, что особенно существенно в условиях домашнего применения. Методы испытаний, предложенные для оценки возможности образования пятен, относятся к случайному контакту с различными пачкающими агентами. Оценка влияния длительного контакта должна проводиться по другим методикам. Некоторые типы добавок могут оказывать существенное влияние на эффект образования пятен.

Для проведения испытаний необходимо иметь камеру, аппликатор, замкнутый контейнер для хранения маловязкой жидкости. Для испытаний использовали разнообразие загрязняющие реагенты. К числу наиболее популярных относятся: пищевые продукты, предметы косметики, растворители, моющие и чистящие средства, фармацевтические изделия, прохладительные напитки, желе, чай, кровь, кофе, отбеливающие вещества, крем для обуви, цветные мелки, губная помада, жидкость для удаления лака с ногтей и многие др.

### Характеристика образцов для испытаний

Для проведения испытаний могут использоваться любые образцы, лишь бы они имели достаточно большую гладкую ровную поверхность, чтобы их можно было испытать и визуально наблюдать за результатами. Перед

началом испытаний любых декоративных ламинатов с терморезистивным связующим необходимо протереть их шероховатой влажной тряпкой или пемзой, чтобы поверхность не была блестящей. Затем поверхность следует промыть мягким мылом. Испытуемый реагент наносится на образец с помощью аппликатора, при этом образуется тонкое покрытие. Если испытывается маловязкая жидкость, то образец надо погрузить в стеклянный контейнер, в который налита эта жидкость. Затем контейнер плотно закрывается, и образец выдерживается в жидкости

в течение 16 ч при температуре  $(50 \pm 2) ^\circ\text{C}$ . После завершения опыта избыточное количество химического реагента удаляется с образца, и результаты изучаются визуально. В зависимости от конкретных требований остаточные загрязнения (пятна) могут быть допустимыми или нет. Цвет пластмассы играет существенную роль в оценке пятна загрязнения. Поэтому при проведении эксперимента необходимо учитывать цвет изделия, для которого проводятся испытания.

Во многие композиции на основе полимеров входят соли различных металлов – свинца, меди, сурьмы, которые используются в виде пигментов, стабилизаторов, наполнителей и добавок иного назначения. Когда они контактируют с посторонними материалами, содержащими серу, например сероводородом, легко образуются пятна загрязнения. Так, если композиция на основе поливинилхлорида, содержащая в качестве стабилизатора свинец, смешивается с композицией, стабилизированной соединениями олова, в которые входит сера, то появляются совершенно отчетливо видимые пятна. К числу наиболее часто встречающихся посторонних агентов, содержащих серу, относятся резины, а также выбросы промышленных предприятий. Методика загрязнения соединениями серы изложена в стандарте ASTM D1712.

Испытания, в которых определяется стойкость пластмассы к образованию пятен под действием серосодержащих веществ, очень просты. Для этого достаточно иметь свежеприготовленный раствор сероводорода и испытуемый образец любых размеров и формы. Часть образца погружается в насыщенный раствор сероводорода на 15 мин. Для сравнения ис-

пользуется контрольный образец из другого материала, обладающий известным сопротивлением к образованию пятен под влиянием соединений серы. Через 15 мин испытуемый образец вынимается из раствора и сопоставляется с исходным и контрольным образцами на предмет образований пятен загрязнения.

### **Влияние подбора материала для конкретных условий его применения**

Наиболее важный и трудный вопрос для инженера-конструктора – правильно подобрать материал для конкретных условий его применения. В этом отношении сопротивление воздействию химических веществ должно рассматриваться как одно из основных свойств при правильном выборе материала. Первичным и удобным источником информации относительно химического сопротивления полимера являются данные, публикуемые поставщиком материала. Такие данные обычно получают на основании простейших испытаний методом погружения. Для большинства полимеров, испытываемых под нагрузкой, характерно образование трещин в условиях длительного воздействия на них определенных жидкостей. Этот эффект имеет место даже в том случае, когда те же жидкости не вызывают образования трещин в ненапряженных образцах, так что простые испытания на погружение не дают адекватных результатов.

Важно понять природу воздействий, вызывающих образование трещин полимеров [1–5]. Вначале происходит замещение связей «полимер – полимер» на связи «полимер – растворитель» вследствие понижения когезионной энергии поверхностных слоев материала, на который воздействует жидкость. При этом вновь образовавшиеся связи «полимер – растворитель» не вносят вклад в прочность полимера. Если приложенные напряжения превысят когезионную прочность такого ослабленного слоя полимера, то происходит разрыв. Тип и количество разрывов зависят от характера распределения напряжений в материале. Далее растворитель проникает в глубь полимера, и трещина становится более резко выраженной.

Эффект образования трещин в напряженных образцах в той или иной мере присущ всем полимерам [1, 6–10]. Однако при этом сущест-

венно, чтобы действовали либо внешние, либо внутренние напряжения. Наибольшую сложность здесь представляют внутренние напряжения, возникшие при литье, поскольку практически невозможно полностью избавиться от этих напряжений. Можно лишь минимизировать их влияние путем правильного конструирования формы, оптимизации технологического режима и отжига изделия после его изготовления. При одновременном воздействии напряжений и химического агента можно установить такое «критическое напряжение», ниже которого растворитель не оказывает воздействия на полимер. Под критическим напряжением понимают такое минимальное напряжение, при котором обнаруживаются первые признаки образования трещин в образце, находящемся под воздействием химического агента.

Для определения уровня критического напряжения предложены два способа испытаний. Согласно первому из них, часто рассматриваемому как тест на оценку растворителя, используют обычную испытательную машину, с помощью которой осуществляется растяжение, и стандартный образец. Испытания состоят в том, что создаются растягивающие напряжения, и после этого образец немедленно подвергается воздействию растворителя. Это воздействие осуществляется либо разбрызгиванием жидкости по поверхности образца, либо протиранием поверхности тампоном, смоченным этой жидкостью. Воздействие продолжается в течение 1 мин, после чего образец рассматривается невооруженным глазом на предмет обнаружения следов образовавшихся трещин. Если трещины отсутствуют, то уровень напряжений повышается, и эксперимент повторяется. Полагается, что материал стоек в данной среде, если следов образования трещин не наблюдается вплоть до предела текучести.

Одним из недостатков этого метода является необходимость использования большого количества образцов для того, чтобы определить критическое напряжение. Другой фактор – насколько долго полимер подвергается действию химического агента. Вполне вероятно, что воздействие растворителя на полимер проявится только при достаточно длительной экспозиции. Поскольку на практике нецелесообразно проводить длительные эксперименты,

необходимой оказалась разработка ускоренного метода испытаний. Такой метод основывается на выполнении измерений либо при повышенной температуре, либо при более высоких напряжениях.

Как правило, не существует адекватной альтернативы испытанию изделия в реальных условиях применения. Однако лабораторные измерения могут дать полезную информацию относительно поведения материала, контактирующего с жидкостью, под действием различных напряжений. Значения критических напряжений, установленных для различных пар «полимер – растворитель», весьма полезны для оценки уровня остаточных напряжений в изделии.

Альтернативный метод оценки стойкости полимера, находящегося под действием напряжений, к образованию трещин обладает определенными преимуществами по сравнению с описанным выше. Согласно этому методу, образец размерами  $4 \times 1 \times 0,03$  дюйма прижимается к поверхности лекала, имеющей эллиптическую форму. Схема установки образца показана на рис. 1.

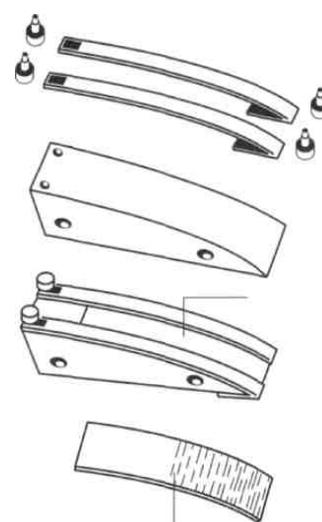


Рис. 1. Схема испытаний образца на стойкость к образованию трещин  
Fig. 1. Scheme for testing a specimen for resistance against crack formation

Трещины возникают на определенной части образца, и точка, в которой трещины отсутствуют, отвечает критическому напряжению. Конкретное значение напряжения в этой точке

предварительно рассчитывается. Если по истечении 1 мин трещины вообще не образуются, то эксперимент повторяется при продолжительности погружения в жидкость, составляющей до нескольких часов. Испытания могут проводиться при повышенных температурах, что ускоряет процесс образования трещин. Важнейшее преимущество этого метода состоит в том, что в одном опыте на одном образце оценивается действие напряжений в широком диапазоне из значений.

### Химическое сопротивление образца растрескиванию

Химическое сопротивление образованию трещин под воздействием окружающей среды определяется по стандартам ASTM D1693, ИСО 4599. Растрескивание под воздействием окружающей среды относится к испытаниям на хрупкое разрушение полиэтиленовых образцов, начинающееся с образования трещин на поверхности, или же на разрушение изделий под воздействием многоосного напряжения при контакте с внешней средой, в условиях, когда при отсутствии этой среды разрушение вообще бы не происходило. При таких испытаниях может появиться наложение внутренних и внешних напряжений, а в качестве внешней среды могут быть различные газообразные, жидкие, полутвердые и твердые вещества. Для того чтобы произошло разрушение под воздействием окружающей среды, необходимо выполнение нескольких условий. Во-первых, важнейшим фактором является присутствие концентрации напряжений или надреза. Нужно также, чтобы имелись напряжения – внутренние, сохранившиеся после изготовления изделия, или внешние. И, наконец, разрушение не происходит, если отсутствует внешний агент, под воздействием которого образуются трещины.

Образование трещин под действием окружающей среды не следует смешивать с иными случаями их образования, например под влиянием растворителя и высокой температуры. Появление трещин в изделиях из полиэтилена приводит к преждевременному их разрушению, что обусловлено присутствием моющих веществ, воды, солнечного света, масел или иных активных компонентов, встречающихся на практике, обычно в условиях, когда происхо-

дили сильные деформации изделия. Это явление имеет чисто физическую природу, причем набухание или иные явления, приводящие к ослаблению материала, отсутствуют.

Именно полиэтилен в наибольшей степени чувствителен к воздействиям такого рода, образуя крейзы или трещины под воздействием внешней среды. Рассматриваемое явление особенно характерно для полиэтиленовой изоляции кабелей, на которую часто наносят смазку, содержащую поверхностно-активные вещества, облегчающие сборку электрических схем. В этих случаях в полиэтилене, который в лабораторных условиях демонстрирует прекрасную стойкость к воздействию химических агентов, образуются глубокие трещины, проникающие вплоть до проводника.

Сопротивление полиэтилена воздействию химических реагентов может быть повышено увеличением его молекулярной массы, снижением напряжений путем выбора правильного технологического режима формования изделий и введением в состав композиций эластомеров. Кроме того, наблюдалось, что сужение молекулярно-вещного распределения заметным образом улучшало сопротивление полиэтилена образованию трещин по сравнению с материалами с теми же средними молекулярными массами и той же плотностью. Образование крупных кристаллических элементов структуры и ориентация материала усугубляют проблему.

Рассмотрим образец размерами 1,5×1,0 дюйма, который аккуратно вырезается с помощью острого лезвия и устройства гильотинного типа (рис. 2). Затем образец перегибается на 180° с тем, чтобы сторона, по которой производился надрез, оказалась наружной и была под прямым углом к линии перегиба. Образец устанавливали на держателе, смонтированном в испытательную трубку. Немедленно после этого в трубку заливали химический реагент, с которым проводили испытания. Этим реагентом может быть моющее вещество, мыльный раствор или любое органическое вещество. Трубку помещали в термостат, в котором поддерживали постоянную температуру:  $(50 \pm 0,5)^\circ\text{C}$  или  $(100 \pm 0,5)^\circ\text{C}$  – в зависимости от выбора условий испытания. После заданного времени образец вынимали из трубки и визуально определяли образование трещин.

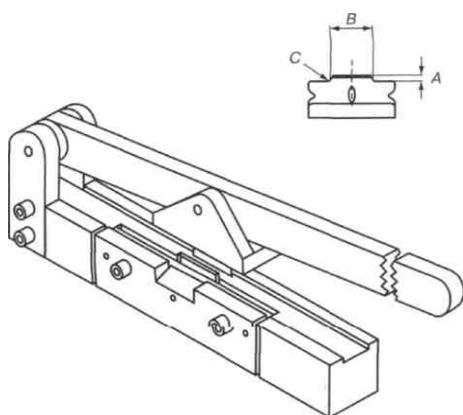


Рис. 2. Устройство для обрезания образцов

Fig. 2. Device for specimen cutting-off

### Санитарно-гигиенические характеристики исследуемых образцов

Комплекс показателей, которые могут вызвать потенциальную опасность полимерных изделий для здоровья человека, и их соответствие гигиеническим требованиям, предъявляемым к материалам конкретного назначения, определяет санитарно-гигиеническую характеристику. Независимо от области применения полимерных материалов они должны удовлетворять общему требованию – не выделять в окружающую среду вредных веществ в количествах, вызывающих неблагоприятное действие на организм человека. Соответствие полимерных материалов санитарно-гигиеническим требованиям испытывают путем проведения:

- санитарно-химического исследования по идентификации и определению концентрации веществ, мигрирующих из материала в контактирующие с ним среды;
- токсикологического исследования по выявлению возможного токсического действия материала и содержащихся в нем химических веществ на организм.

К упаковочным материалам пищевой, косметической и фармацевтической продукции предъявляются наиболее жесткие требования. При выборе упаковочного материала для таких видов продукции в первую очередь следует обеспечить необходимый уровень санитарно-гигиенических характеристик. Обязательным условием применения упаковочного материала для указанной продукции должно быть наличие

гигиенического сертификата, подтверждающего физиологическую безвредность упаковки для человека (ранее основанием для применения материала для этих целей было разрешение, выдаваемое Министерством здравоохранения).

Санитарно-гигиенические требования включают следующие положения:

- в состав упаковочного материала не должны входить высокотоксичные вещества, обладающие кумулятивными свойствами и специфическим действием на организм (канцерогенность, мутагенность, аллергенность и др.);
- упаковочный материал не должен изменять органолептические и физиологические свойства продукции, а также выделять вредные вещества в количествах, превышающих допустимые с гигиенической точки зрения уровни миграции.

### ВЫВОДЫ

1. При выборе методик исследования нужно учитывать комплекс показателей. В процессе санитарно-гигиенического исследования, проводимого специально сертифицированными для этой цели организациями, определяется, какие соединения и в каких количествах переходят (мигрируют) из упаковочного материала в контактирующую с ним пищевую или другую продукцию, потребляемую человеком. При выборе оборудования с целью упрощения испытаний, как правило, исследуют не конкретные пищевые продукты, а искусственные модельные среды, имитирующие свойства того или иного реального пищевого продукта. Для мяса и свежей рыбы при испытаниях применяют модельный раствор – дистиллированную воду, 0,3%-й раствор молочной кислоты; для молока, молочных продуктов – дистиллированную воду, 3%-й раствор молочной кислоты; для вареных колбас, мясных, рыбных и овощных консервов, маринованных и квашеных овощей – дистиллированную воду, 2%-й раствор уксусной кислоты, содержащий 2 % поваренной соли, нерафинированное подсолнечное масло и т. д. Для жирных продуктов в качестве модельных сред используют гептан, диэтиловый эфир, циклогексан, ацетон, парафиновое масло, какао-масло, синтетические полиглицериды. Органи-

ми здравоохранения регламентируются как предельно допустимая величина суммарной (интегральной) миграции в модельные среды (50–60 мг/кг продукта), так и нормативы миграции отдельных наиболее токсичных соединений (тяжелых металлов, органических растворителей, мономеров и других компонентов упаковочных материалов, красителей и др.).

2. В процесс выбора оборудования для определения комплекса гигиенической оценки упаковочного материала входят органолептические, санитарно-химические и токсикологические исследования. Органолептическая оценка (запах, привкус и др.) проводится комиссией на закрытой дегустации по трехбалльной системе (от 0 до 3): 0 – лучшая оценка; 1 – допустимая оценка; 2 и 3 – недопустимые или допустимые с ограничением. Наличие ярко выраженных дефектов материала, а также постороннего запаха является причиной отказа от применения материала в непосредственном контакте с пищевым продуктом. Санитарно-химические исследования проводят путем определения компонентов упаковочного материала в вытяжках, получаемых при экспозиции (выдержке) образцов исследуемого материала в модельной среде при определенных температурно-временных условиях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пластмассы, полимеры и синтетические смолы. Химические наименования, термины и определения: ГОСТ 24888–81. М.: Изд-во стандартов, 1981. 18 с.
2. Максанова, Л. А. Высокомолекулярные соединения и материалы на их основе, применяемые в пищевой промышленности / Л. А. Максанова. М.: Колос, 2005. 213 с.
3. Avérous, L. Environmental Silicate Nano-Biocomposites, Green Energy and Technology / L. Avérous, E. Pollet. Лондон: Springer-Verlag, 2012. 450 p.
4. Полимерные пленки: пер. с англ. под ред. Е. Заикова. СПб.: Профессия, 2006. 352 с.
5. Мэллой, Р. А. Конструирование пластмассовых изделий для литья под давлением / Р. А. Мэллой; пер. с англ. СПб.: Профессия, 2008. 519 с.
6. Шварц О. Переработка пластмасс / О. Шварц, Ф. В. Эбеллинг, Б. Фурт. СПб.: Профессия, 2005. 320 с.
7. Технологическая подготовка производства. Термины и определения основных понятий: ГОСТ 14.004–83 (СТ СЭВ 2521–80). Взамен ГОСТ 14.004–74; введ. 01.07.1983. М.: Изд-во стандартов, 1983. 8 с.

8. Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий: ГОСТ 3.1109–82 (СТ СЭВ 2064–79, СТ СЭВ 2522–80, СТ СЭВ 2523–80). Взамен ГОСТ 3.1109–73; введ. 01.01.1983. М.: Изд-во стандартов, 1982. 18 с.
9. Механизация и автоматизация технологических процессов в машиностроении и приборостроении. Основные термины, определения и обозначения: ГОСТ 23004–78. Введ. 01.01.79. М.: Изд-во стандартов, 1978. 25 с.
10. Пономарева, В. Т. Использование пластмассовых отходов за рубежом / В. Т. Пономарева, Н. Н. Лихачева, З. А. Ткачик // Пластические массы. 2002. № 5. С. 44–48.

Поступила 10.06.2016

Подписана в печать 29.08.2016

Опубликована онлайн 30.01.2017

#### REFERENCES

1. State Standard 24888–81 (1981). Plastic Materials, Polymers and Synthetic Resin. Chemical Names, Terms and Definitions. Moscow, Publishing House of Standards. 18 (in Russian).
2. Maksanova L. A. (2005) *High-Molecular Compounds and Materials on their Basis Which are Applied in Food Industry*. Moscow, Publishing House “Kolos”. 213 (in Russian).
3. Avérous L., Pollet E. (2012) *Environmental Silicate Nano-Biocomposites. Green Energy and Technology*. London, Springer-Verlag. 450. DOI: 10.1007/978-1-4471-4108-2.
4. Zaikov E. (Translation) (2006) *Polymer Films*. Saint-Petersburg, Professiya Publ. 352 (in Russian).
5. Malloy R. A. (2010) *Plastic Part Design for Injection Molding*. 2<sup>nd</sup>. Cincinnati, Hanser Publications. 472. DOI: 10.3139/9783446433748.fm.
6. Shvarts O., Ebeling F. V., Furt B. (2005) *Recycling of Plastic Materials*. Saint-Petersburg, Professiya Publ. 320 (in Russian).
7. State Standard 14.004–83 (1983) Technological Preparation of Production. Terms and Definitions of Basic Notions. Moscow, Publishing House of Standards. 8 (in Russian).
8. State Standard 3.1109–82 (1982) Unified System of Technological Documentation. Terms and Definitions of Basic Notions. Moscow, Publishing House of Standards. 18 (in Russian).
9. State Standard 23004–78 (1978) Mechanization and Automation of Technological Processes in Mechanical Engineering and Instrumentation. Moscow, Publishing House of Standards. 25 (in Russian).
10. Ponomareva V. T., Likhacheva N. N., Tkachik Z. A. (2002) *Abroad Application of Plastic Material Waste. Plastic Masses* [Plastic Masses], (5), 44–48 (in Russian).

Received: 10.06.2016

Accepted: 29.08.2016

Published online: 30.01.2017

DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-57-67

УДК 656.13.08

## Обоснование мероприятий по повышению качества и безопасности дорожного движения на магистральной улице районного значения в г. Минске

Инженеры В. Н. Кузьменко<sup>1)</sup>, Д. В. Мозалевский<sup>1)</sup>, А. В. Коржова<sup>1)</sup>, А. С. Красильникова<sup>1)</sup>, Н. С. Ермакова<sup>1)</sup>, Н. В. Киселевич<sup>1)</sup>, Е. Н. Горелик<sup>1)</sup>, И. К. Гамульский<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017  
Belarusian National Technical University, 2017

**Реферат.** В статье приведены результаты исследования условий и интенсивности движения транспортных и пешеходных потоков, результаты расчетов уровня загрузки по объектам, расположенным на ул. Макаенка в г. Минске. Объекты образуют район транспортной застройки, в котором предусмотрена реконструкция магистральной улицы районного значения с учетом развивающейся инфраструктуры, жилой застройки и устройством многофункционального комплекса с торговым, развлекательным, оздоровительным и деловым центрами. Кроме того, планируется строительство двухуровневой подземной парковки и двухуровневой развязки на перекрестке улицы Филимонова и проспекта Независимости в связи с возрастанием транспортной нагрузки на прилегающей близлежащей улично-дорожной сети. Выполнены анализ существующей организации дорожного движения, а также расчет распределения существующего и перспективного уровней загрузки движением после внедрения соответствующих мероприятий по повышению качества и безопасности дорожного движения. Осуществлено определение уровней загрузки на улично-дорожной сети с учетом интенсивности движения транспортных потоков для оценки различных вариантов организации дорожного движения. Разработаны варианты транспортной планировки узлов и организации движения, а также светофорного регулирования (в том числе с учетом координированного пропуска транспортных средств). Все это будет способствовать повышению качества и безопасности дорожного движения на исследуемой улице с учетом дальнейшего развития района, уплотнения сложившейся застройки улицы Макаенка и увеличения ее транспортного значения в улично-дорожной сети города Минска.

**Ключевые слова:** дорожное движение, организация дорожного движения, безопасность, условия движения, светофорное регулирование, светофорные объекты, координированное регулирование

**Для цитирования:** Обоснование мероприятий по повышению качества и безопасности дорожного движения на магистральной улице районного значения в г. Минске / В. Н. Кузьменко [и др.] // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 1. С. 57–67. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-57-67

## Justification of Measures to Improve Quality and Road Safety at Regional Arterial Street in Minsk

V. N. Kuzmenko<sup>1)</sup>, D. V. Mozalevsky<sup>1)</sup>, A. V. Korzhova<sup>1)</sup>, A. S. Krasilnikova<sup>1)</sup>, N. S. Yermakova<sup>1)</sup>, N. V. Kiselevich<sup>1)</sup>, Ye. N. Gorelik<sup>1)</sup>, I. K. Gamulsky<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The paper presents results pertaining to investigations of traffic conditions and intensity of traffic and pedestrian flows, calculations on loading level of objects located in the Makayonka Street, Minsk. The objects constitute transport regional development which presupposes reconstruction of regional arterial street with due account of infrastructure improvement, residential construction and construction of multi-purpose complex with shopping, entertainment, wellness and

### Адрес для переписки

Кузьменко Василий Николаевич  
Белорусский национальный технический университет  
ул. Я. Коласа, 12,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 292-77-81  
2927781@gmail.com

### Address for correspondence

Kuzmenko Vasily N.  
Belarusian National Technical University  
12 Ya. Kolasa str.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 292-77-81  
2927781@gmail.com

business centers. In addition to this it is planned to construct a two-level underground parking, a two-level interchange at intersection of the Filimonova Street and Nezavisimosty Avenue due to an increase of traffic load at adjacent neighboring street and road network. An analysis on the current traffic management and calculation for distribution of the existing and prospective traffic load levels after implementation of appropriate measures to improve quality as a whole and road safety as well has been carried out in the paper. Determination of loading levels for a street and road network has been carried out while taking into account an intensity of traffic flows in order to evaluate various options for road traffic organization. Variants for planning of road junctions, road traffic organization and traffic signalization (including coordinated passing of transport facilities) have been developed in the paper. All this will contribute to improvement of quality and road safety in the investigated street with due consideration of further development of the region and overbuilding of the existing housing system in the Makayonka Street and increase of its transport importance in the Minsk street and road network.

**Keywords:** road traffic, traffic management, safety, road traffic conditions, traffic signalization, traffic lights, coordinated regulation

**Forcitation:** Kuzmenko V. N., Mozalevsky D. V., Korzhova A. V., Krasilnikova A. S., Yermakova N. S., Kiselevich N. V., Gorelik Ye. N., Gamulsky I. K. (2017) Justification of Measures to Improve Quality and Road Safety at Regional Arterial Street in Minsk. *Science and Technique*. 16 (1), 57–67. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-57-67 (in Russian)

В дорожном движении участвует каждый гражданин нашей страны, и от качества этого важнейшего социально-производственного процесса зависит благосостояние не только каждого человека, но и государства в целом [1–3]. Однако сегодня роль организации дорожного движения сводится к расстановке дорожных знаков и нанесению дорожной разметки, что не соответствует современным реалиям. Поэтому государство терпит огромные потери, сопоставимые с потерей 8 % ВВП [3–5].

На стадии проектных решений при разработке генеральных планов и планов детального проектирования отдельных районов застройки первоначально нужно учитывать требования организации дорожного движения. Это будет способствовать устойчивому развитию транспортных систем города [3, 6–8]. Именно поэтому необходимо любое решение по организации дорожного движения оптимизировать [9, 10]. При разработке организации дорожного движения следует предусматривать работы по оценке его качества и разрабатывать соответствующие проектные рекомендации [11, 12].

В процессе реконструкции ул. Макаенка в г. Минске схему организации дорожного движения выполняли с учетом уширения ул. Макаенка, строительства новых и реконструкции существующих светофорных объектов. Разрабатывались схемы временной организации дорожного движения на период проведения работ по реконструкции ул. Макаенка и прокладки коммуникаций, а также схемы пофазного движения и расчетных таблиц функционирования КТС с технологией управления и планами координированного регулирования

по ул. Макаенка. Исследования условий движения, анализ аварийности и измерение интенсивности движения транспортных и пешеходных потоков выполнены в феврале – апреле 2014 г.

Схемой по организации дорожного движения предусмотрена реконструкция светофорных объектов на пересечении пр-та Независимости – ул. Макаенка и ул. Макаенка – ул. Парниковой из-за уширения ул. Макаенка. Кроме того, запланировано устройство новых светофорных объектов в районе Республиканского экологического центра и Белтелерадиокомпания. При строительстве светофорных объектов необходимо предусмотреть понижение бортового камня до «нуля» в зоне выхода пешеходов с тротуара на проезжую часть для движения по пешеходному переходу.

Схема организации дорожного движения на перекрестке пр-та Независимости и ул. Макаенка представлена на рис. 1. На данном перекрестке выполнена реконструкция светофорного объекта из-за уширения ул. Макаенка. На основании схемы организации дорожного движения и исследуемой транспортно-пешеходной нагрузки скорректированы схемы пофазного движения и диаграммы переключения светофорной сигнализации. Схема пофазного движения представлена на рис. 2.

Светофорный объект работает в регулируемом режиме круглосуточно: с 7:00 до 23:00 – в режиме КУ (координированное управление), а с 23:00 до 7:00 – в режиме РП (регулируемая программа). Диаграмма регулирования может изменяться в зависимости от параметров

транспортно-пешеходной нагрузки и режимов координированного регулирования. На светофорном объекте применена пятифазная схема регулирования. Продолжительность цикла регулирования в локальном режиме составляет 84 с. В первой фазе осуществляется движение транспорта по пр-ту Независимости со стороны ул. Толбухина и пешеходов через ул. Макаенка, а также правоповоротного транспорта по ул. Волгоградской и пр-ту Независимости

со стороны ул. Филимонова. Во второй фазе происходит движение транспорта в прямом направлении по пр-ту Независимости и движение правоповоротного транспорта на всех входах. В третьей фазе осуществляется движение по ул. Волгоградской и ул. Макаенка, а также правоповоротного транспорта по пр-ту Независимости. Выполнение левых поворотов по ул. Волгоградской и ул. Макаенка происходит в режиме просачивания.

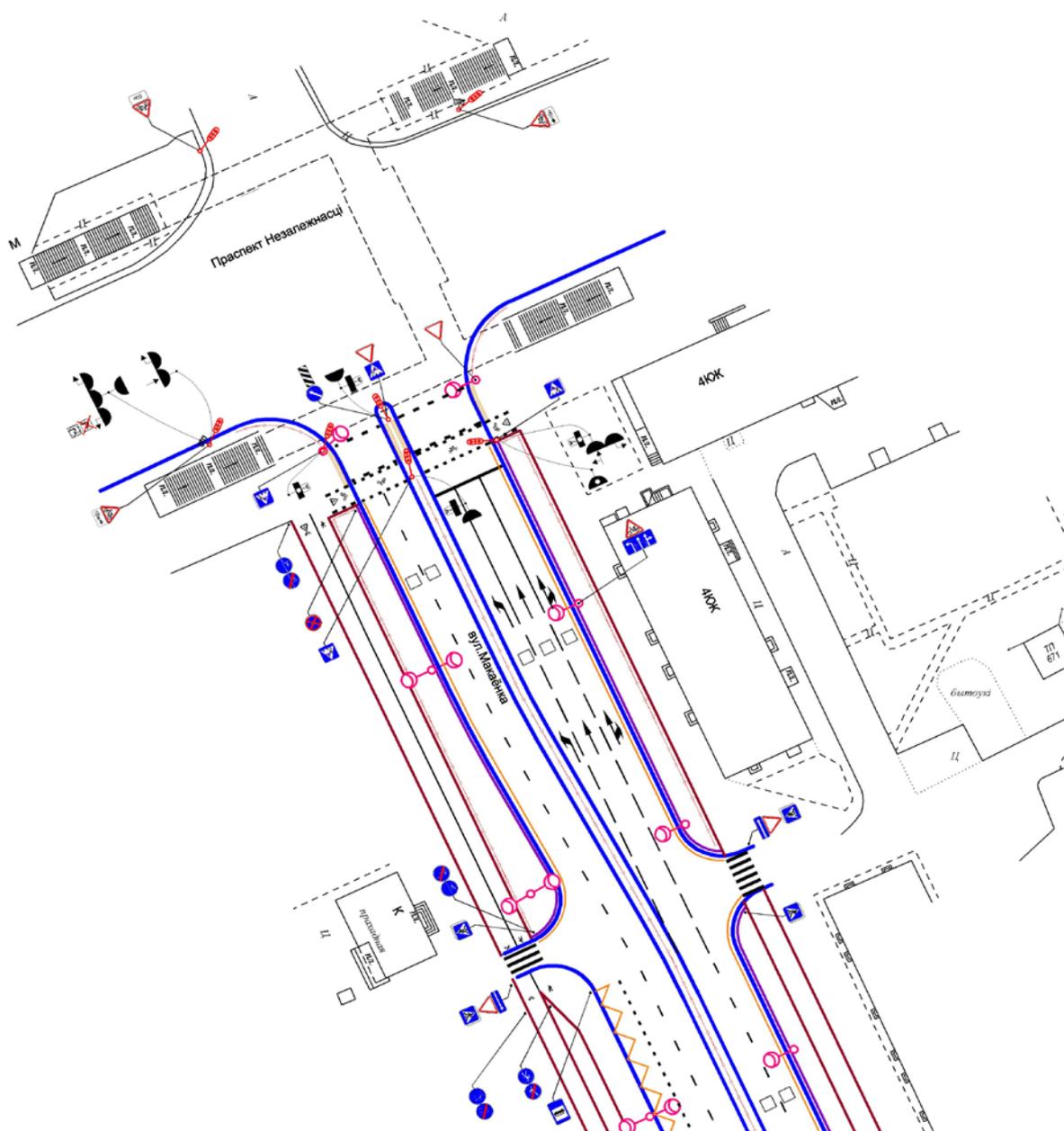


Рис. 1. Схема организации дорожного движения в зоне перекрестка пр-т Независимости – ул. Макаенка (светофорное регулирование № 1)

Fig. 1. Scheme of road traffic organization in the zone of Nezavisimosti Avenue – Makayonka Street crossroads (traffic signalization No 1)

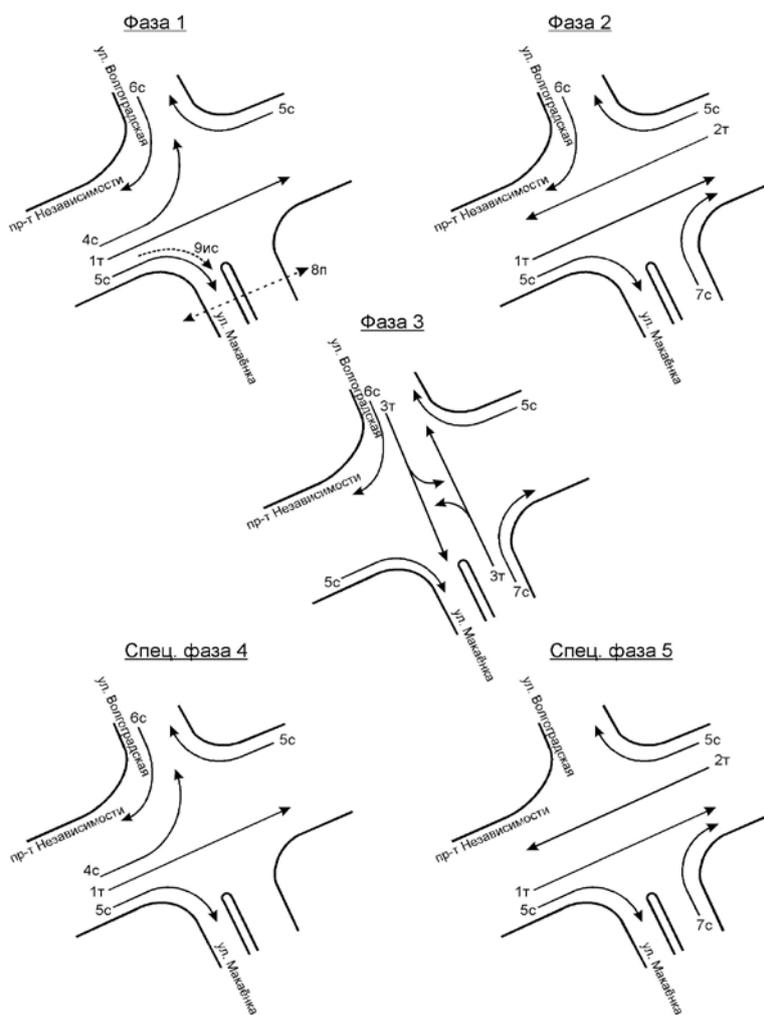


Рис. 2. Схема пофазного движения в зоне перекрестка ул. Волгоградская – пр-т Независимости – ул. Макаенка

Fig. 2. Scheme of single-phase traffic in the zone of Volgogradskaya Street – Nezavisimosty Avenue – Makayonka Street crossroads

Переход пешеходами проезжей части пр-та Независимости и ул. Волгоградской осуществляется через подземные пешеходные переходы. При возможности переключения в дорожном контроллере направления 5С (правоповоротное направление с пр-та Независимости на ул. Макаенка) на 10С реализуется иная схема пофазного движения (в первой фазе исключается правоповоротное направление по пр-ту Независимости со стороны ул. Филимонова).

На основании разработанной схемы организации дорожного движения, диаграммы светофорного регулирования, схемы пофазного движения, а также по результатам экспериментальных исследований на объекте рассчитан прогнозируемый уровень загрузки после внедрения предлагаемых мероприятий. Диаграмма

существующего и прогнозируемого уровней загрузки на светофорном объекте представлена на рис. 3.

По сравнению с существующей организацией дорожного движения прогнозируется снижение уровня загрузки после проведения реконструкции ул. Макаенка. Дальнейшее уменьшение уровня загрузки по ул. Макаенка приведет к увеличению уровней загрузки по пр-ту Независимости и ул. Волгоградской, которые и так в пиковые часы превышают предельные значения по отдельным направлениям.

Схема организации дорожного движения на светофорном объекте № 2 (ул. Макаенка, 8, пешеходное вызывающее устройство (ПВУ) – заезд к Республиканскому экологическому центру) представлена на рис. 4. На данном участке улицы запроектирован регулируемый пешеходный переход.

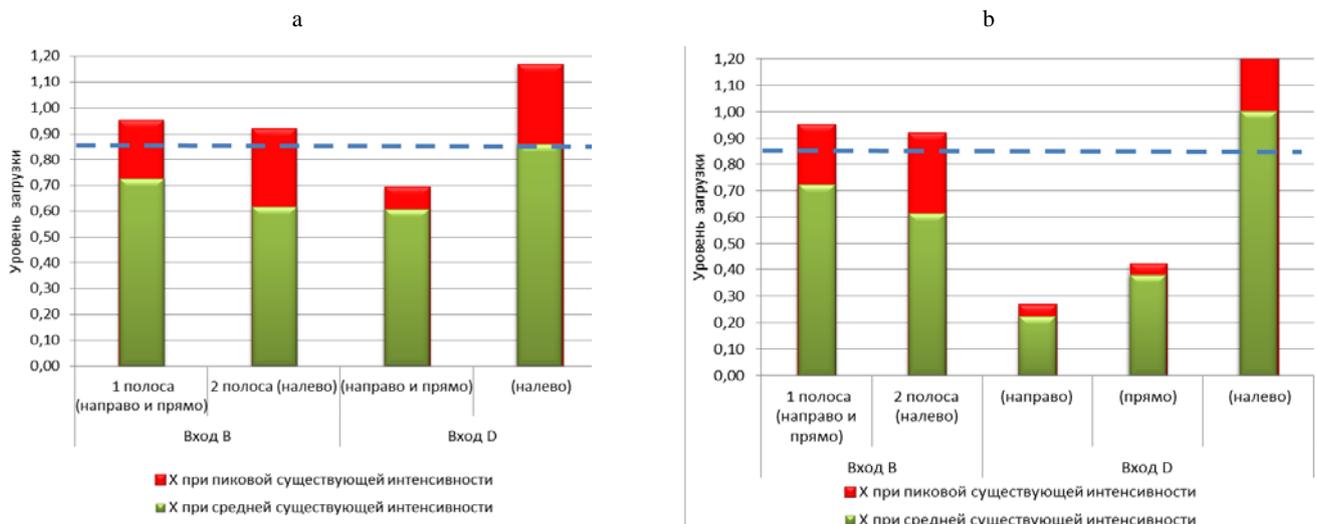


Рис. 3. Существующий (а) и прогнозируемый (б) уровни загрузки (светофорное регулирование № 1)

Fig. 3. Existing (a) and forecasting (b) levels of loading (traffic signalization No 1)

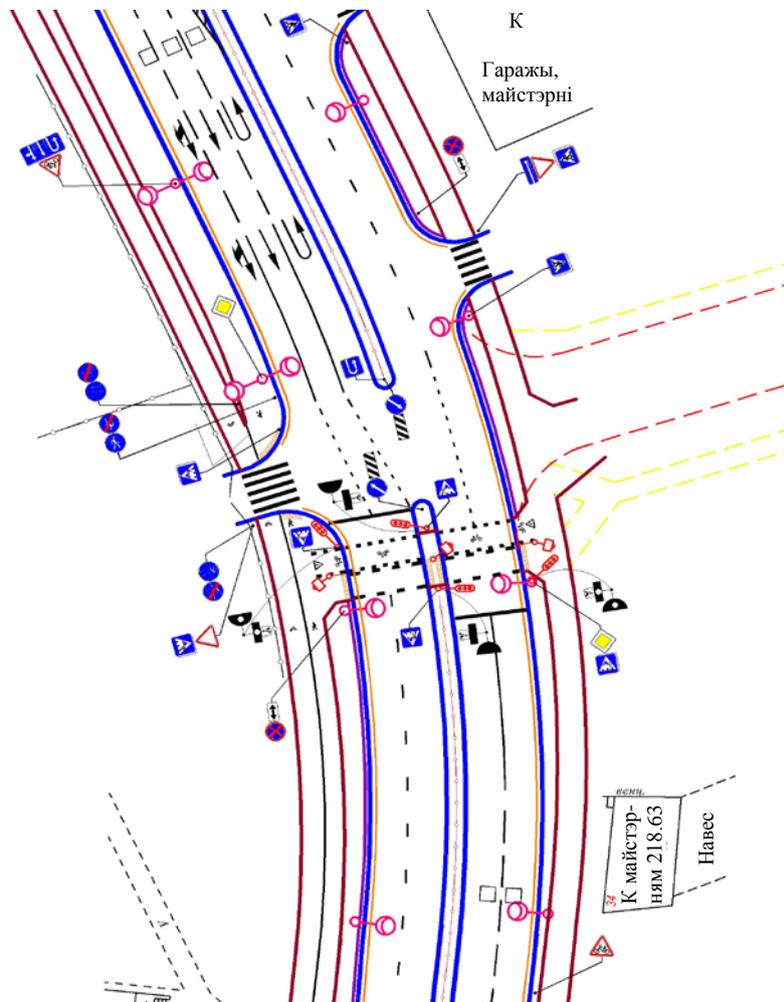


Рис. 4. Схема организации дорожного движения в зоне перекрестка ул. Макаенка, 8 (пешеходное вызывающее устройство).  
Заезд к экологическому центру (светофорное регулирование № 2)

Fig. 4. Scheme of road traffic organization in the zone of Makayonka Street, 8 crossroads (Pedestrian calling device).  
Driving to ecological centre (traffic signalization No 2)

В перспективе после строительства связующего участка дорожной сети от ул. Филимонова до ул. Макаенка этот светофорный объект будет реконструирован в регулируемый четырехсторонний перекресток. Схема пофазного движения представлена на рис. 5.

На светофорном объекте применена двухфазная схема регулирования. Минимальная продолжительность цикла регулирования в локальном режиме составляет 70 с. Фаза 1 регулирования является основной. В этой фазе разрешено движение транспортных средств по ул. Макаенка. При поступлении сигнала от ПВУ вызывается вторая фаза регулирования (порядок фаз 1–2–1). Фаза 2 включает только после отработки минимальной длительности фазы 1. В фазе 2 разрешено движение пешехо-

дов, движение транспорта – запрещено. Переход пешеходами проезжей части ул. Макаенка осуществляется в один этап через разделительную полосу.

На основании разработанной схемы организации дорожного движения, диаграммы светофорного регулирования, схемы пофазного движения, а также по результатам экспериментальных исследований на объекте рассчитан прогнозируемый уровень загрузки после внедрения предлагаемых мероприятий. Диаграмма прогнозируемого уровня загрузки на светофорном объекте № 2 представлена на рис. 6.

Даже при увеличении интенсивности движения в два раза уровень загрузки не превысит значений 0,6–0,7 при отсутствии припаркованных автомобилей.

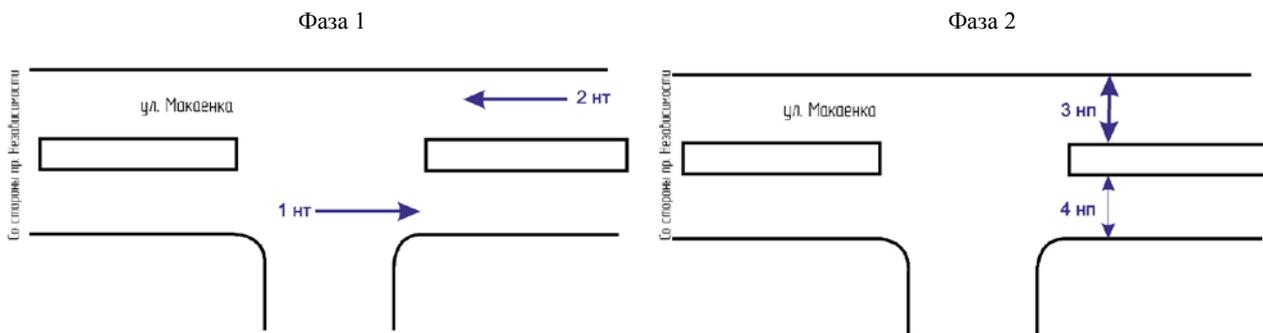


Рис. 5. Схема пофазного движения в зоне перекрестка ул. Макаенка, 8

Fig. 5. Scheme of single-phase traffic in the zone of Makayonka Street, 8 crossroads

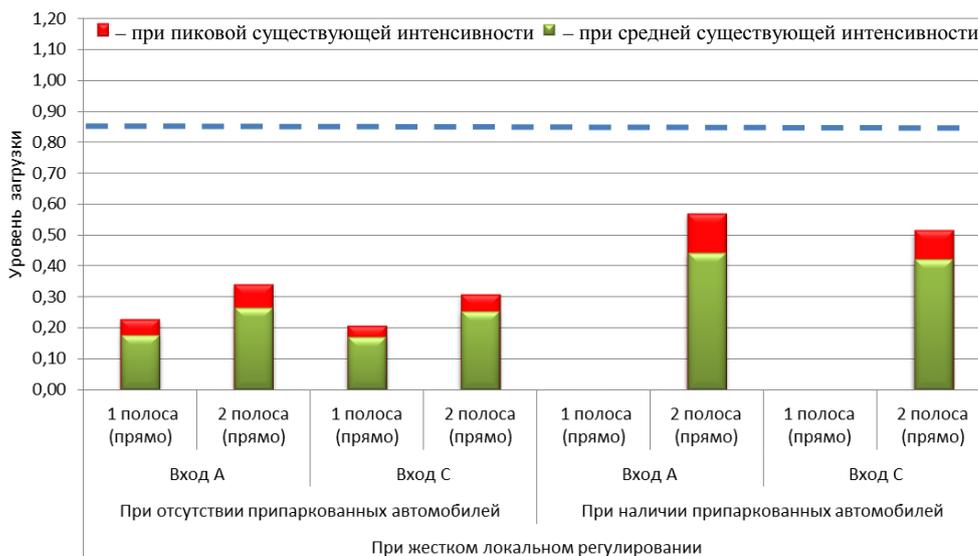


Рис. 6. Прогнозируемый уровень загрузки для светофорного объекта № 2

Fig. 6. Forecasting level of loading for traffic signalization No 2

Схема организации дорожного движения на светофорном объекте возле РУП «Белтелерадиокомпания» представлена на рис. 7. На данном участке улицы запроектирован регулируемый пешеходный переход. В перспективе после строительства жилого микрорайона этот светофорный объект будет реконструирован в регулируемый трехсторонний перекресток.

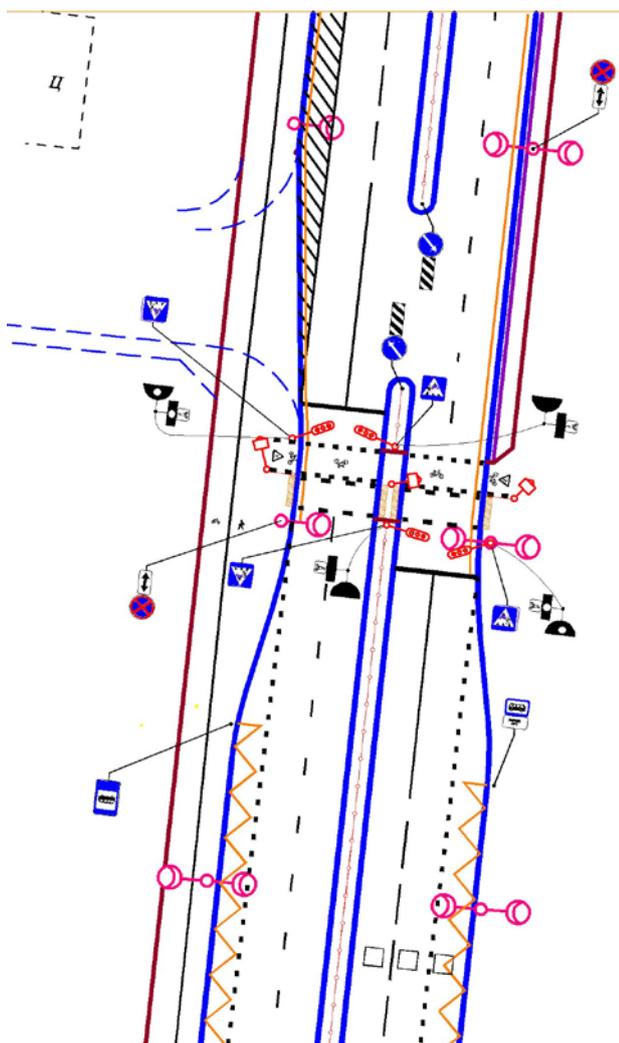


Рис. 7. Схема организации дорожного движения в зоне перекрестка ул. Макаенка, 9 (пешеходное вызывающее устройство).

Белтелерадиокомпания (светофорное регулирование № 3)

Fig. 7. Scheme of road traffic organization in the zone of Makayonka Street, 9 crossroads (Pedestrian calling device).  
Belteleradiocompany (traffic signalization No 3)

Диаграмма прогнозируемого уровня загрузки на светофорном объекте № 3 представлена на рис. 8. Даже при увеличении интенсивности движения в два раза уровень загрузки не пре-

высит значений 0,6–0,7 при отсутствии припаркованных автомобилей.

Схема организации дорожного движения на перекрестке ул. Макаенка – ул. Парниковой представлена на рис. 9. На данном перекрестке выполнена реконструкция существующего светофорного объекта. В момент выдачи проектной документации светофорный объект еще не был введен в строй, и движение через перекресток осуществлялось в нерегулируемом режиме.

На основании схемы организации дорожного движения и исследуемой транспортно-пешеходной нагрузки разработаны схемы пофазного движения и диаграммы переключения светофорной сигнализации. Схема пофазного движения приведена на рис. 10.

Светофорный объект работает в регулируемом режиме круглосуточно: с 7:00 до 23:00 – в режиме КУ, а с 23:00 до 7:00 – в режиме МГР (местное гибкое регулирование с учетом сигналов от индуктивных рамок). Диаграмма регулирования может изменяться в зависимости от параметров транспортно-пешеходной нагрузки и режимов координированного регулирования.

На светофорном объекте применена трехфазная схема регулирования. Продолжительность цикла регулирования в локальном режиме составляет 84 с. В фазе 1 осуществляется движение транспорта по ул. Макаенка со стороны пр-та Независимости и пешеходов через ул. Парниковую со стороны Детской железной дороги, а также правоповоротного транспорта по ул. Парниковой со стороны ул. Филимонова. В фазе 2 происходит движение транспорта по ул. Макаенка, за исключением левоповоротного транспорта со стороны пр-та Независимости, и движение пешеходов вдоль ул. Макаенка. В фазе 3 осуществляется движение по ул. Парниковой, а также движение пешеходов через ул. Макаенка со стороны Детской железной дороги. Выполнение левых поворотов по ул. Парниковой и ул. Макаенка со стороны Детской железной дороги происходит в режиме просачивания.

На основании разработанной схемы организации дорожного движения, диаграммы светофорного регулирования, схемы пофазного движения, а также по результатам экспериментальных исследований на объекте рассчитан прогнозируемый уровень загрузки после внедрения предлагаемых мероприятий.

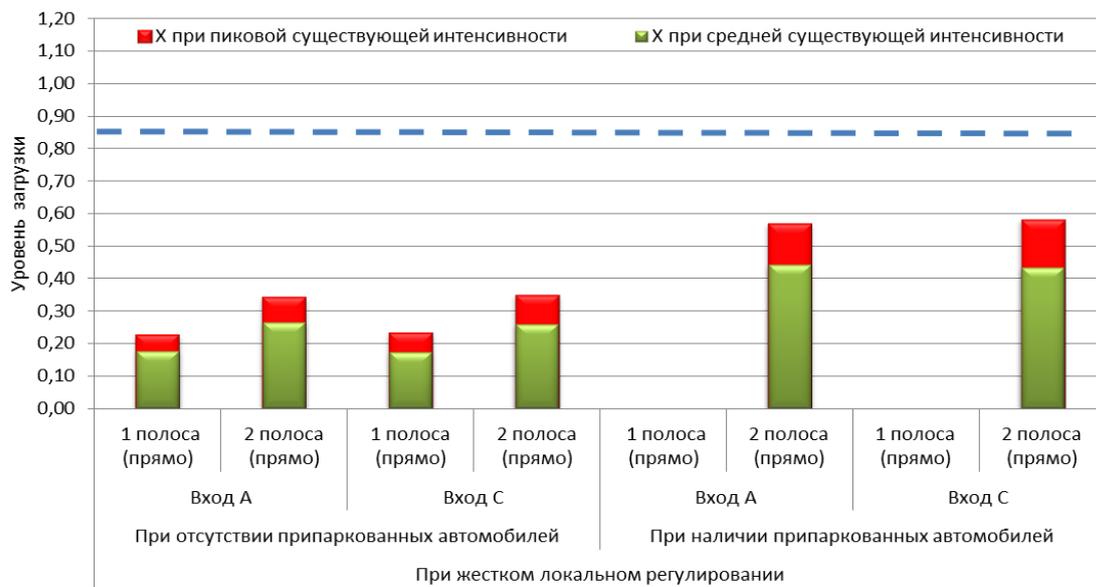


Рис. 8. Прогнозируемый уровень загрузки для светофорного объекта № 3

Fig. 8. Forecasting level of loading for traffic signalization No 3

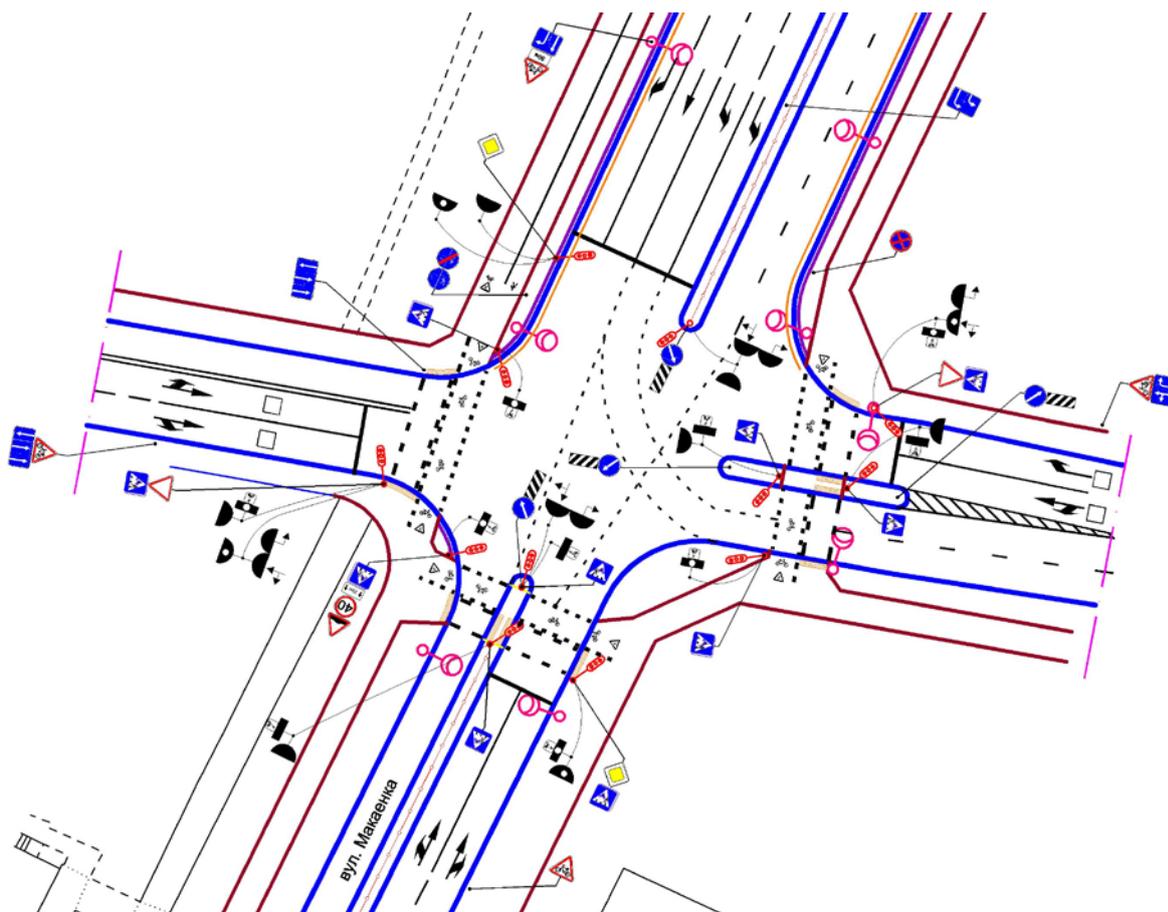


Рис. 9. Схема организации дорожного движения в зоне перекрестка ул. Макаенка – ул. Парниковой для светофорного объекта № 4

Fig. 9. Scheme of road traffic organization in the zone of Makayonka Street – Parnikovaya Street crossroads for traffic signalization No 4

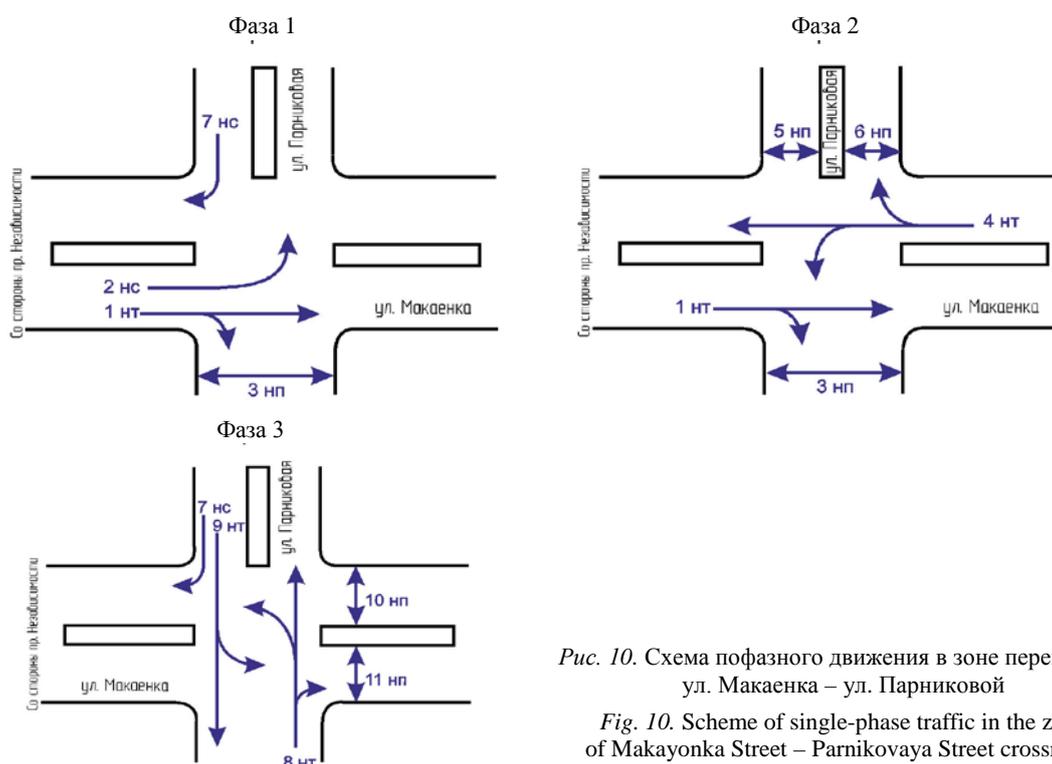


Рис. 10. Схема пофазного движения в зоне перекрестка ул. Макаенка – ул. Парниковой

Fig. 10. Scheme of single-phase traffic in the zone of Makayonka Street – Parnikovaya Street crossroads

Диаграммы прогнозируемого уровня загрузки для существующей и прогнозируемой интенсивности движения на светофорном объекте № 4 представлены на рис. 11, 12.

После введения в строй проектируемого жилого микрорайона необходимо скорректировать диаграмму регулирования для оптимального регулирования.

Светофорные объекты работают в регулируемом режиме круглосуточно: с 7:00 до 23:00 – в режиме КУ в соответствии с разработанными планами координации по времени суток, а с 23:00 до 7:00 – в режиме РП или МГР. Диаграммы регулирования могут изменяться в зависимости от параметров транспортно-пешеходной нагрузки и режимов координированного регулирования.

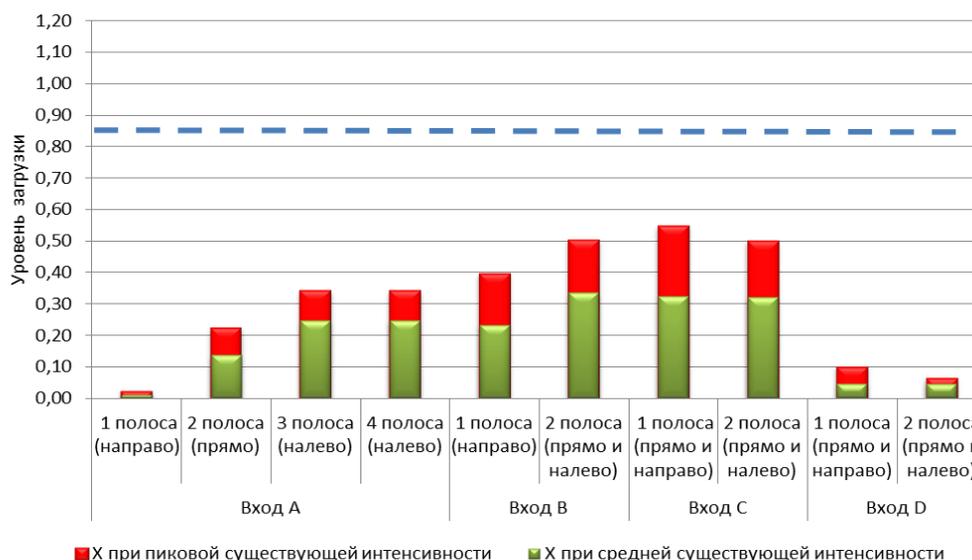


Рис. 11. Прогнозируемый уровень загрузки для существующей интенсивности движения (светофорное регулирование № 4)

Fig. 11. Forecasting level of loading for existing traffic intensity (traffic signalization No 4)

Монтаж светофоров предусмотрен на металлических колонках и выносных светофорных колонках, которые устанавливаются на расстоянии 1 м от края бордюрного камня, а также на опорах освещения. Вид и расположение светофорных колонок могут корректироваться специализированным монтажно-

эксплуатационным предприятием (СМЭП), которое будет производить монтажные работы. В соответствии с ГОСТ 25695–91 проектом предусмотрено применение транспортных светофоров типа Т1 и пешеходных светофоров типов П1 и П2 светодиодного исполнения.

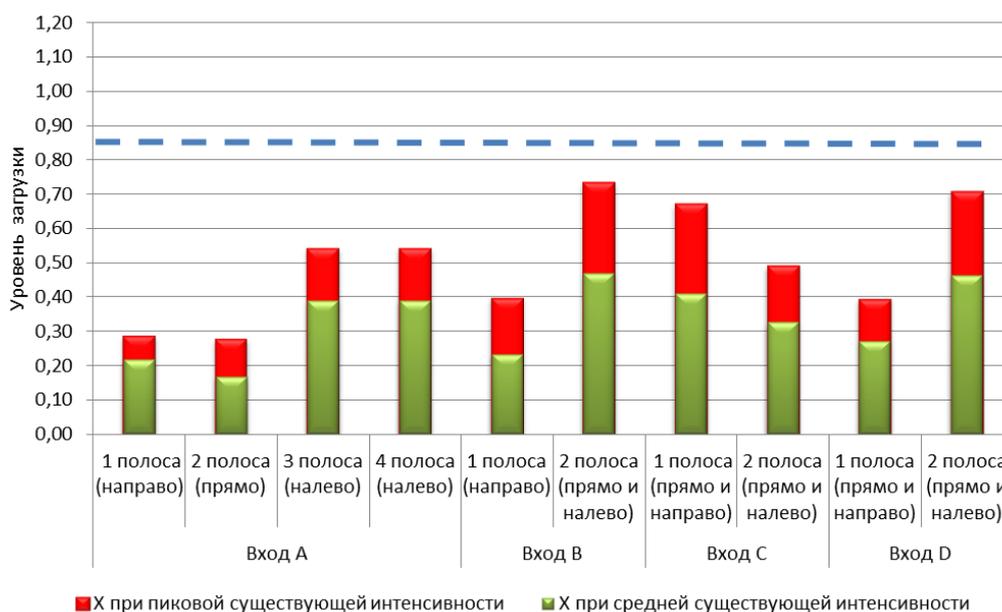


Рис. 12. Прогнозируемый уровень загрузки для прогнозируемой интенсивности движения (светофорное регулирование № 4)

Fig. 12. Forecasting of loading level for existing traffic intensity (traffic signalization No 4)

### ВЫВОДЫ

1. В результате проведенного анализа существующей транспортно-пешеходной нагрузки, особенностей существующей организации дорожного движения и условий движения, а также с учетом расчета распределения перспективной интенсивности движения транспорта проектируемого объекта и разработки схем распределения интенсивности движения транспортных потоков по улично-дорожной сети предложены планировочные и организационно-управленческие решения, предусматривающие устройство светофорных объектов и соответствующую организацию дорожного движения для безопасного и комфортного движения транспортных и пешеходных потоков.

2. На всех регулируемых пешеходных переходах предусмотрено устройство полос для движения велосипедистов. Выделение полос для велосипедистов осуществляется с помощью дорожных знаков, дорожной разметки. Для повышения безопасности движения пешеходов

и транспорта предусмотрено устройство разделительной полосы. Для предотвращения выхода пешеходов на проезжую часть вне пешеходных переходов планируется установка ограничивающих пешеходных ограждений вдоль ул. Макаенка на разделительной полосе.

3. С целью повышения пропускной способности проектируемых светофорных объектов предусмотрено устройство дополнительных полос для левоповоротного и перспективного правоповоротного транспорта. Для эффективной работы светофорного объекта разработаны схемы пофазного движения, диаграммы переключения светофорной сигнализации и параметры временных уставок. Для координированного управления светофорными объектами, расположенными по ул. Макаенка, разработана технология управления с учетом устройства детекторов транспорта. На всех светофорных объектах предусмотрена установка устройств звукового оповещения для пешеходных светофоров.

4. С целью разработки технологии управления и организации системного подхода к управлению светофорным объектом предусмотрено устройство детекторов транспорта (индуктивных рамок). Они обеспечивают формирование исходных данных для технологических алгоритмов управления, в том числе данных о моментах прохождения транспортными средствами контролируемого детектором сечения улицы. Установка детекторов транспорта предусмотрена на подходе к светофорному объекту на расстоянии около 40 м по каждой полосе. Вид индуктивных детекторов транспорта может корректироваться СМЭП Мингорисполкома, которое будет производить монтажные работы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Врубель, Ю. А. Водителю о дорожном движении / Ю. А. Врубель, Д. В. Капский. 3-е изд., дораб. Минск: БНТУ, 2010. 139 с.
2. Капский, Д. В. Прогнозирование аварийности в дорожном движении / Д. В. Капский. Минск: БНТУ, 2008. 243 с.
3. Капский, Д. В. Методология повышения безопасности дорожного движения в городских очагах аварийности: в 2 т. / Д. В. Капский. Минск: БНТУ, 2013. Т. 1. 282 с.
4. Постановление расширенного заседания коллегии Министерства транспорта Российской Федерации от 24.10.2012 № 3 [Электронный ресурс] // Министерство транспорта Российской Федерации. Режим доступа: [http://www.mintrans.ru/documents/detail.php?ELEMENT\\_ID=19402](http://www.mintrans.ru/documents/detail.php?ELEMENT_ID=19402). Дата доступа: 14.02.2015.
5. Врубель, Ю. А. Опасности в дорожном движении / Ю. А. Врубель, Д. В. Капский. М.: Новое знание, 2013. 244 с.
6. Ваксман, С. А. Моделирование ДТП – градостроительный аспект / С. А. Ваксман, Л. И. Сverdlin // Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах: сб. докл. Шестой междунар. конф. СПб.: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2004. С. 305–307.
7. Трофименко, Ю. В. Транспортное планирование: формирование эффективных транспортных систем крупных городов / Ю. В. Трофименко, М. Р. Якимов. М.: Логос, 2013. 464 с.
8. Ваксман, С. А. Принципы разработки и содержание КСОД столичного города (на примере Минска) / С. А. Ваксман, Ф. Г. Глик, Д. В. Капский // Наука – образованию, производству, экономике: материалы Седьмой междунар. науч.-техн. конф.: в 3 т. Минск: БНТУ, 2009. Т. 2. С. 267–268.
9. Капский, Д. В. Транспорт в планировке городов / Д. В. Капский, А. В. Коржова, С. В. Скирковский. Минск: БНТУ, 2015. 144 с.
10. Врубель, Ю. А. Определение потерь в дорожном движении / Ю. А. Врубель, Д. В. Капский, Е. Н. Кот. Минск: БНТУ, 2006. 240 с.
11. Свидетельство от 17.09.2010 № 222 о регистрации компьютерных программ в Национальном центре интеллектуальной собственности / Д. В. Капский, Д. В. Мозалевский, М. К. Мирошник, А. В. Коржова, В. Н. Кузьменко, А. С. Полховская, Е. Н. Костюкович.
12. Улицы населенных пунктов. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-3.03-227–2010 (02250). Введ. 01.07.2011. Минск: Минстройархитектуры, 2011. 46 с.

Поступила 06.11.2015

Подписана в печать 11.01.2016

Опубликована онлайн 30.01.2017

## REFERENCES

1. Vruble Yu. A., Kapskiy D. V. (2010) *To Driver about Road Traffic*. Minsk, Belarusian National Technical University. 139 (in Russian).
2. Kapskiy D. V. (2008) *Accident Forecasting in Road Traffic*. Minsk, Belarusian National Technical University. 243 (in Russian).
3. Kapskiy D. V. (2013) *Methodology for Improvement of Road Traffic Safety in Urban Accident Clusters. Vol. 1*. Minsk, Belarusian National Technical University. 282 (in Russian).
4. Decree of Panel Enlarged Meeting of Ministry of Transport of Russian Federation dated 24.10.2012, No 3. *Ministry of Transport of Russian Federation*. Available at: [http://www.mintrans.ru/documents/detail.php?ELEMENT\\_ID=19402](http://www.mintrans.ru/documents/detail.php?ELEMENT_ID=19402). (Accessed 14 Februar 2015) (in Russian).
5. Vruble Yu. A., Kapskiy D. V. *Dangerous Situations in Road Traffic*. Moscow, Novoe Znanie Publ. 244 (in Russian).
6. Vaksman S. A., Sverdlin L. I. (2004) Simulation of Road Traffic Accidents – Urban Planning Aspect. *Organizatsiia i Bezopasnost Dorozhnogo Dvizheniia v Krupnykh Gorodakh: Sb. Dokl. Shestoi Mezhdunar. Konf.* [Organization and Safety of Road Traffic in Large Cities: Book of Reports of the 6<sup>th</sup> International Conference]. Saint-Petersburg, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 305–307 (in Russian).
7. Trofimenko Yu. V., Yakimov M. R. (2013) *Transport Planning: Formation of Efficient Transport Systems in Large Cities*. Moscow, Logos Publ. 464 (in Russian).
8. Vaksman S. A., Glik F. G., Kapskiy D. V. (2009) Principles of Development and Content of Complex Scheme of Road Traffic Organization for Capital City (Minsk as an Example). *Nauka – Obrazovaniiu, Proizvodstvu, Ekonomike. Materialy 7 Mezhdunarodnoi Nauchno-Tekhnicheskoi Konferentsii. T. 2* [Science to Education, Industry, Economics. Proceedings of 7<sup>th</sup> International Science and Technical Conference. Vol. 2]. Minsk, Belarusian National Technical University, 267–268 (in Russian).
9. Kapskiy D. V., Korzhova A. V., Skirkovsky S. V. (2015) *Transport in Urban Planning*. Minsk, Belarusian National Technical University. 144 (in Russian).
10. Vruble Yu. A., Kapskiy D. V., Kot E. N. (2006) *Determination of Losses in Road Traffic*. Minsk, Belarusian National Technical University. 240 (in Russian).
11. Kapskiy D. V., Mozalevsky D. V., Miroshnik M. K., Korzhova A. V., Kuzmenko V. N., Polkhovskaya A. S., Kostukovich E. N. (2010) Certificate Dated 17.09.2010 No 222 on Registration of Computer Programs at National Center of Intellectual Property (in Russian, Unpublished).
12. ТКП 45-3.03-227–2010 (02250) (2011). Streets of Urban Areas. Constructional Design Standards. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction. 46 (in Russian).

Received: 06.11.2015

Accepted: 11.01.2016

Published online: 30.01.2017

## Повышение стойкости крановых рельсов при использовании плазменной дискретной поверхностной обработки

Докт. техн. наук, проф. С. С. Самогутин<sup>1)</sup>, инж. В. А. Гагарин<sup>1)</sup>, канд. техн. наук, доц. В. А. Мазур<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Приазовский государственный технический университет (г. Мариуполь, Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2017  
Belarusian National Technical University, 2017

**Реферат.** В ходе эксплуатации кранов происходит интенсивное изнашивание крановых колес и рельсов. Поэтому повышение работоспособности этих деталей актуально. Перспективным направлением является поверхностная обработка высококонцентрированными потоками энергии: лазерным лучом, плазменной струей. Предлагается применять градиентную поверхностную плазменную обработку с целью повышения работоспособности крановых рельсов. Для проведения исследований на крановые рельсы наносили упрочненные зоны при разных режимах обработки. Микротвердость измеряли как на поверхности, так и по глубине на специально изготовленных шлифах. Приведены результаты исследования влияния плазменного поверхностного упрочнения на износостойкость крановых рельсов. Изменение параметров плазменной обработки (ток, скорость перемещения плазмотрона, расход плазмообразующего газа аргона) позволяет получать требуемые твердость и структуру стали, а выбор оптимального расположения упрочненных зон дает возможность существенно повысить износо- и трещиностойкость. Плазменная закалка способствует получению структуры высокодисперсного мартенсита преимущественно пластинчатой морфологии и более высокой твердости по сравнению с закалкой токами высокой частоты или наплавкой. Испытаниями на износостойкость углеродистых сталей установлено, что плазменная поверхностная обработка в 2–3 раза снижает интенсивность абразивного изнашивания по сравнению с исходным состоянием. Достаточно резкая граница между упрочненными и неупрочненными участками благоприятно влияет на работоспособность деталей в условиях действия динамических нагрузок, способствуя торможению трещин при переходе из твердого в мягкий металл. Для углеродистых и низколегированных рельсовых сталей плазменное упрочнение по достигаемым свойствам может эффективно заменить закалку токами высокой частоты или наплавку. Установлен диапазон режимов плазменной обработки, который позволяет получить поверхностный слой с определенным комплексом эксплуатационных свойств.

**Ключевые слова:** кран, рельс, плазменная струя, структура, упрочненный слой, твердость

**Для цитирования:** Самогутин, С. С. Повышение стойкости крановых рельсов при использовании плазменной дискретной поверхностной обработки / С. С. Самогутин, В. А. Гагарин, В. А. Мазур // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 1. С. 68–72. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-68-72

## Improvement of Crane Rail Hardness while Using Plasma Discrete Surface Treatment

S. S. Samotugin<sup>1)</sup>, V. A. Haharin<sup>1)</sup>, V. A. Mazur<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Pryazovskyi State Technical University (Mariupol, Ukraine)

**Abstract.** Crane wheels and rails are subjected to intensive wear in the process of operation. For this reason improvement of operating capability for these components is considered as a problem of great importance. A promising direction in this regard is surface treatment by highly concentrated energy flows such as laser beams or plasma jets. The paper proposes to use gradient plasma surface treatment with the purpose to improve operating capability of crane rails. While carrying out investigations hardened zones have been deposited on crane rails under different treatment modes. Microhardness has been measured both on the surface and in depth while using custom-made microsections. The paper presents results of the investigations for

### Адрес для переписки

Гагарин Владимир Александрович  
Приазовский государственный технический университет  
ул. Университетская, 7,  
87500, г. Мариуполь, Донецкая обл., Украина  
Тел.: +380 985 54-82-13  
Gagarin\_v\_a@ukr.net

### Address for correspondence

Haharin Vladimir A.  
Pryazovskyi State Technical University  
7 Universitetskaya str.,  
87500, Mariupol, Donetsk Province, Ukraine  
Tel.: +380 985 54-82-13  
Gagarin\_v\_a@ukr.net

plasma surface hardening influence on wear resistance of crane rails. Change of plasma surface treatment parameters (current, plasma torch movement speed, argon gas flow rate) allows to obtain the required steel hardness and structure and selection of optimal location for the hardened zones makes it possible significantly to improve wear- and crack resistance. Plasma surface hardening contributes to obtain a fine-grained martensite structure mainly with lamellar morphology and higher hardness rate in comparison with induction hardening or overlaying. Wear tests of carbon steels have revealed that plasma surface treatment reduces abrasive wear rate by 2–3 times in comparison with the initial state. Rather sharp boundary between hardened and non-hardened portions has a positive effect on the performance of parts under dynamic loads, contributing to crack stopping during the transition from solid to soft metal. According to the obtained properties plasma surface hardening can efficiently substitute induction hardening or overlaying for carbon and low alloy rail steels. The mode range for plasma surface treatment that allows to obtain a surface layer with specific complex of operational properties has been determined in the paper.

**Keyword:** crane, rails, plasma jet, structure, hardened layer, hardness

**For citation:** Samotugin S. S., Naharin V. A., Mazur V. A. (2017) Improvement of Crane Rail Hardness while Using Plasma Discrete Surface Treatment. *Science and Technology*, 16 (1), 68–72. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-68-72 (in Russian)

## Введение

Одно из наиболее перспективных направлений развития современного производства – нанесение упрочняющих покрытий с использованием интенсивных технологий обработки материалов высококонцентрированными источниками нагрева (ВКИН) – лазерным и электронным лучами, плазменной струей. Высокая плотность мощности и возможность регулирования продолжительности воздействия при использовании данных источников нагрева позволяют получить свойства материала, недоступные для известных способов. К перспективным областям применения поверхностного упрочнения ВКИН относится повышение работоспособности контактных поверхностей пары «рельс – колесо» [1, 2]. Из методов поверхностной обработки ВКИН плазменная модификация является наиболее экономичной, доступной и производительной [3].

Крановые колеса – одни из основных и наиболее нагруженных элементов ходовой части крана, непосредственно взаимодействующих с путем. Колесная пара совершает сложные пространственные перемещения, а колесо проскальзывает по рельсу, и возникают значительные поперечные силы между гребнем колеса и рабочей гранью наружного рельса. Это приводит к повышенному боковому износу рельсов и гребней колес, нарушению геометрии, соответственно к сокращению сроков службы и увеличению расходов на их эксплуатацию.

В основе сопротивления стале-трибологическому нагружению в условиях сухого трения с проскальзыванием лежит прочность поверхностного слоя металла. Определяющим фактором при этом является локальная характеристика прочности – твердость стали. Одно из важных эксплуатационных свойств – соот-

ношение твердости колесной и рельсовой сталей.

Основная проблема при эксплуатации упрочненных покрытий – их разрушение и отслоение (отколы). Как правило, износостойкие покрытия из-за высокой хрупкости не используют ресурс работы полностью. Как отмечено в [4], повышение адгезионной прочности покрытий не обеспечивает решение данной проблемы, так как в сочетании с высокой твердостью и хрупкостью это приводит к дополнительному охрупчиванию и разрушению основного металла задолго до исчерпания его ресурса. В результате возникает острая необходимость формирования нового научного направления в трибологическом материаловедении, связанного с управлением поведением материалов за счет создания структурно неоднородных (регулярных) покрытий методами термического упрочнения, наплавки, напыления, осаждения [5].

Применительно к развитию методов поверхностного термического упрочнения наиболее перспективным направлением получения покрытий с макрогетерогенной регулярной структурой является нанесение упрочняющих покрытий градиентного строения с чередующимися по определенной закономерности твердыми и пластичными участками. Заменив сплошной слой покрытия на прерывистый с мозаично-дискретной структурой, можно преодолеть хрупкость – основной недостаток сверхтвердых поверхностных структур. Благодаря дискретности структуры ограничиваются рост напряжений и процесс трещинообразования, что многократно повышает прочность и долговечность покрытий, полностью исключая их когезионное растрескивание и адгезионное отслоение. Такой подход позволяет обеспечить необходимые физико-механические свойства рабочего слоя, реализовать нужные условия

трения, а также минимизировать износ упрочненных изделий [6]. С учетом специфики работы контактной поверхности «рельс – колесо» нанесение упрочняющих покрытий градиентного строения можно считать наиболее оптимальным.

Изучение характера разрушения разрывных армированных (дискретноупрочненных) образцов [7] показало, что чередование упрочненных и необработанных участков – это барьер на пути развивающейся трещины. На диаграммах нагружения появляется характерный участок перехода от хрупкого разрушения к пластичному с торможением движения трещины, а в изломе возникают характерные элементы типа «губ среза». Эффект торможения трещины при переходе из упрочненной зоны в исходный металл установлен и при динамическом разрушении широкого круга сталей и сплавов после плазменного поверхностного упрочнения [3, 8].

### Методы исследований

Для определения глубины и твердости закаленного слоя провели плазменное упрочнение головки рельса. Технические требования ограничивают твердость рельса для предупреждения хрупкого разрушения при эксплуатации, поэтому целью исследования являлось получение рекомендуемой твердости (48–54 HRC) [2] при максимальной ширине и глубине упрочненной зоны.

В изучаемых образцах плазменную поверхность закалку производили по ширине головки рельса. Закаленная зона располагалась в центре пробы. Для изучения строения и определения глубины закаленного слоя в поперечном сечении изготавливали микрошлифы. На образцах измеряли микротвердость по глубине закаленного слоя. Также определяли микроструктуру основного металла образцов.

В образце № 1 закаленный слой шириной 29,2 мм выполняли за три прохода, он имел глубину 1,76–1,88 мм. Обработку плазмой в образце № 2 осуществляли за два прохода с расстоянием 1,0 мм между ними. Ширина закаленной зоны 13,0 мм, глубина 0,9 мм. На образце № 3 закалку выполняли за несколько проходов. Закаленный участок имел ширину 22,0 мм, полученную за два прохода, глубину – 2,0–2,3 мм. В местах перекрытия проходов выявлена зона термического влияния.

При измерении микротвердости по толщине закаленного слоя установлено, что в образцах № 1, 2 твердость закаленной зоны составляла 610–800 HV (55–60 HRC). В образце № 3 получены неоднородные значения микротвердости. На поверхности образца в местах наложения упрочненных зон твердость металла была 226–240 HV (22–24 HRC), в зоне термического влияния – 285–320 HV (30–35 HRC), в упрочненной зоне – 502–587 HV (48–52 HRC).

Дискретное строение рабочей поверхности детали при упрочнении может быть получено с нанесением твердых и мягких участков в виде параллельных полос (рис. 1а), перекрестной насечки (рис. 1б), когда локальные мягкие участки имеют ограниченную конфигурацию квадрата (при перпендикулярном перекрестном движении плазматрона) или ромба (при не перпендикулярном перекрестном движении). Возможно получение дискретного строения упрочненного слоя с нанесением упрочненных зон в виде круга (рис. 1в), эллипса, треугольника и т. п. В этом случае между поверхностью детали и плазматроном располагается защитный экран из тугоплавкого материала с отверстиями заданной формы.

При упрочнении железнодорожных рельсов и колес может быть реализован способ упрочнения только скруглений – самых нагруженных участков (рис. 2).

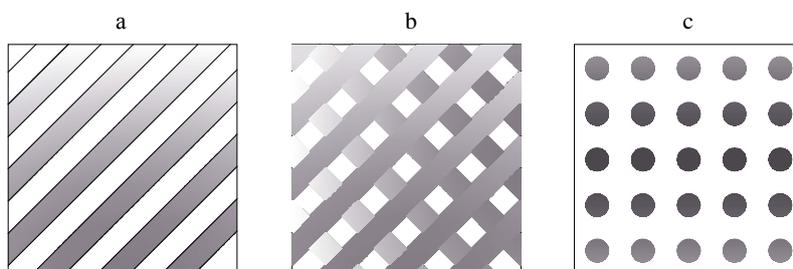


Рис. 1. Дискретное строение рабочей поверхности детали с нанесением упрочненных зон в виде: а – параллельных полос; б – перекрестной насечки; с – круга; темные и светлые участки – соответственно твердые и мягкие участки

Fig. 1. Discrete structure of working area for piece with deposition of hardened zones in the form of: a – parallel strips; b – cross cut; c – circle; dark and highlight sections – correspondingly hard and soft sections

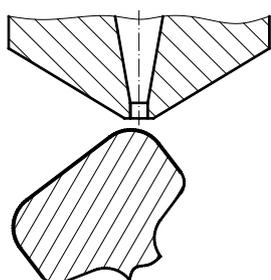


Рис. 2. Пример реализации плазменной градиентной модификации скругления головки рельса

Fig. 2. Example of rail head rounding while realizing plasma gradient modification

Для получения мартенсита в сплавах железа с углеродом в температурном интервале минимальной устойчивости аустенита скорость охлаждения должна превышать критическую, которая для большинства сталей находится в интервале 50–200 °C/с. Основной отличительной особенностью плазменной поверхностной закалки является достижение очень высоких значений скорости нагрева и охлаждения – до 10<sup>6</sup> °C/с [3]. Многократное увеличение скорости охлаждения не приводит к образованию новых фаз и структур; при плазменной закалке в стали имеются те же фазы и структуры, что и при обычной закалке: мартенсит, остаточный аустенит, карбиды. Однако существенно изменяются их параметры: увеличиваются степень дисперсности, плотность дислокаций, степень тетрагональности мартенсита. Это обуславливает получение более высокой степени упрочнения (большей твердости), чем при объемной закалке.

В результате единичного воздействия (прохода) плазменной струи на поверхности стали образуется упрочненная зона (так называемая зона плазменного воздействия – ЗПВ), которая состоит из закаленной и переходной зон. ЗПВ имеет форму сегмента окружности, что вызвано нормальным (гауссовским) распределением

мощности плазменной струи по площади пятна нагрева. Размеры ЗПВ и ее составляющих и характер изменения твердости в ЗПВ зависят, кроме режима обработки, от состава стали и исходного состояния [4]. При обработке без оплавления поверхности глубина ЗПВ составляет 2,5–3,5 мм, ширина – в пределах 10–15 мм.

Между ЗПВ и исходным металлом имеется достаточно резкая граница (рис. 3), что благоприятно влияет на работоспособность упрочненных деталей в условиях действия динамических нагрузок, способствуя торможению трещин при переходе из твердого в мягкий металл [3].

Исследования микроструктуры рельсовой стали в исходном состоянии (поставки) после объемной закалки в печи и плазменной закалки показали (рис. 4), что в исходном состоянии сталь М76 имеет структуру пластинчатого перлита (рис. 4а), а после объемной закалки при стандартных температурах приобретает достаточно высокую твердость и структуру крупноигольчатого мартенсита (рис. 4б). Плазменная закалка приводит к получению структуры высокодисперсного мартенсита преимущественно пластинчатой морфологии (рис. 4с) и более высокой твердости по сравнению с объемной закалкой (табл. 1) [3–10].

Испытаниями на износостойкость углеродистых сталей установлено [3, 9], что плазменная поверхностная модификация способствует снижению интенсивности абразивного изнашивания по сравнению с исходным состоянием в 2–3 раза, а по сравнению с объемной закалкой – на 20–30 %. При этом сохраняется достаточно высокая стойкость к зарождению и развитию трещин при действии динамических нагрузок. Лабораторные испытания были подтверждены в условиях производства при эксплуатации упрочненных по предложенной технологии рельсов.

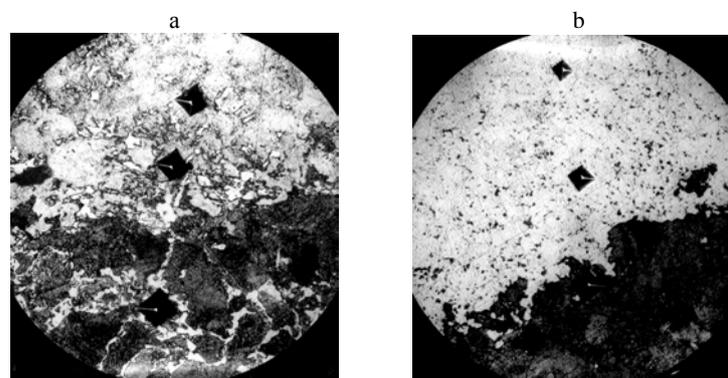


Рис. 3. Микроструктура переходной зоны при плазменной модификации сталей (×400): а – 50ХН; б – М76

Fig. 3. Microstructure of transition zone under plasma modification of steel (×400): a – 50XH; b – M76

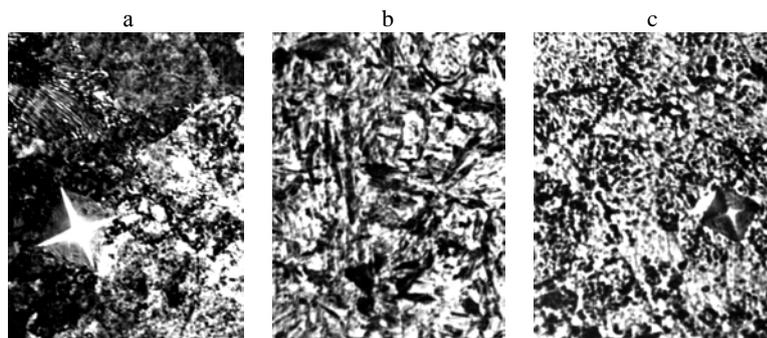


Рис. 4. Микроструктура рельсовой стали М76 (×1000):

- а – в исходном состоянии;
- б – после объемной закалки;
- с – после плазменной закалки

Fig. 4. Microstructure of rail steel M76 (×1000): а – initial state; б – after volumetric quenching; с – after plasma quenching

### ВЫВОДЫ

1. Эффективным методом повышения несущей способности контактных поверхностей рельсов в условиях ударно-абразивного воздействия является плазменная поверхностная модификация с нанесением упрочненного слоя градиентного (дискретного) строения с чередующимися по определенной зависимости твердыми и мягкими участками.

2. Обработка углеродистых сталей высококонцентрированной плазменной струей обеспечивает получение упрочненного слоя с высокодисперсной мартенситной структурой. Твердость упрочненного слоя больше в 2–3 раза по сравнению с исходным состоянием и на 20–30 % – по сравнению с объемной закалкой.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Петров, С. В. «Скорая помощь» для железных дорог / С. В. Петров // Мир техники и технологий. 2005. № 2. С. 40–42.
2. Упрочнение боковых граней головок железнодорожных рельсов электронно-лучевой обработкой в воздушной среде / В. А. Батаев [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. 2002. № 12. С. 14–18.
3. Самотугин, С. С. Плазменное упрочнение инструментальных материалов / С. С. Самотугин, Л. К. Лещинский. Донецк: Новый мир, 2002. 383 с.
4. Ляшенко, Б. А. Упрочнение поверхностей металлов покрытиями дискретной структуры с повышенной адгезионной и когезионной стойкостью / Б. А. Ляшенко, Ю. А. Кузема, М. С. Дигам. Киев: Препринт ИПП АН УССР, 1984. 57 с.
5. Технологические основы нанесения упрочняющих покрытий дискретного строения на изделия из чугуна / С. С. Самотугин [и др.] // Научные проблемы современной металлургии: сб. науч. тр. Мариуполь: ПГТУ, 2007. С. 162–172.
6. Ляшенко, Б. А. Упрочняющие покрытия дискретной структуры / Б. А. Ляшенко, А. Я. Мовшович, А. И. Долматов // Технологические системы. 2001. № 4. С. 17–25.
7. Подгайский, М. С. Термическое армирование проката / М. С. Подгайский // Металловедение и термическая обработка металлов. 1992. № 10. С. 20–23.
8. Сафонов, Е. Н. Закалка поверхностного слоя деталей машин плазменной дугой прямого действия / Е. Н. Сафонов, И. С. Дружинин, Н. В. Орлова // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 9. С. 23–29.
9. Ананьев, А. М. Исследование износостойкости материалов крановых рельсов и колес / А. М. Ананьев, В. А. Коротков // Вестник машиностроения. 2011. № 8. С. 35–37.
10. Особенности структуры поверхностных слоев металла бандажей железнодорожных колес после плазменной

обработки / Л. И. Маркашова [и др.] // Автоматическая сварка. 2005. № 1. С. 22–25.

Поступила 03.03.2016

Подписана в печать 05.09.2016

Опубликована онлайн 30.01.2017

### REFERENCES

1. Petrov S. V. (2005) “Emergency Response” for Railways. *Mir Tekhniki i Tekhnologii* [World of Technique and Technology], (2), 40–42 (in Russian).
2. Bataev V. A., Bataev A. A., Golkovskii M. G., Ostromenskii P. I., Korotaev B. V. (2002) Lateral Edge Strengthening of Rail Heads by Electron-Beam Machining in Air. *Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov* [Metal Science and Heat Treatment of Metals], (12), 14–18 (in Russian).
3. Samotugin S. S., Leshchynski L. K. (2002) *Plasma Hardening of Tool Materials*. Donetsk, Novy Mir Publ. 383 (in Russian).
4. Lyashenko B. A., Kuzema Yu. A., Digam M. S. (1984) *Hardening of Metal Surfaces by Coatings Having Discrete Structure with High Adhesive and Cohesive Resistance*. Kiev, Preprint of Institute for Problems of Strength – Academy of Sciences of the Ukrainian Soviet Socialist Republic. 57 (in Russian).
5. Samotugin S. S., Lyashenko B. A., Samotugina Iu. S., Haharin V. A. (2007) Technological Fundamentals for Deposition of Hardening Coatings Having Discrete Structure on Cast Iron Products. *Nauchnye Problemy Sovremennoi Metallurgii: Sb. Nauch. Tr.* [Scientific Problems of Modern Metallurgy. Collection of Scientific Papers]. Mariupol, Pryazovskiy State Technical University, 162–172 (in Russian).
6. Lyashenko B. A., Movshovich A. Ya., Dolmatov A. I. (2001) Hardening Coatings Having Discrete Structure. *Tekhnologicheskiye Sistemy* [Technological Systems], (4), 17–25 (in Russian).
7. Podgaisky M. S. (1992) Thermal Reinforcement of Rolled Products. *Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov* [Metal Science and Heat Treatment of Metals], (10), 20–23 (in Russian).
8. Safonov E. N., Druzhinin I. S., Orlova N. V. (2010) Hardening of Surface Layer in Machine Parts by Plasma Arc of Direct Action. *Uprochnyayushchie Tekhnologii i Pokrytiya* [Hardening Technologies and Coatings], (9), 23–29 (in Russian).
9. Ananiev A. M., Korotkov V. A. (2011) Investigations on Material Durability of Crane Rails and Wheels. *Vestnik Mashinostroyeniya* [Mechanical Engineering Bulletin], (8), 35–37 (in Russian).
10. Markashova L. I., Grigorenko G. M., Valevich M. L., Petrov S. V. (2005) Specific Features of Metal Surface Layer Structure in Tread Bands of Railway Wheels after Plasma Treatment. *Avtomaticheskaya Svarka* [Automatic Welding], (1), 22–25 (in Russian).

Received: 03.03.2016

Accepted: 05.09.2016

Published online: 30.01.2017

DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-73-82

УДК 629.3.014

## Анализ эффективности использования накопителей энергии на тракторе с электромеханической трансмиссией

Канд. техн. наук, доц. Ч. И. Жданович<sup>1)</sup>, инж. Н. В. Калинин<sup>1)</sup><sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)© Белорусский национальный технический университет, 2017  
Belarusian National Technical University, 2017

**Реферат.** Для сравнения работы трактора с электромеханической трансмиссией при установке накопителей и без них использовали зависимость момента на его колесах от теоретической скорости движения при работе тягового асинхронного электродвигателя на номинальном и предельно возможном режимах. Также были рассмотрены графики зависимости потребляемой тяговым асинхронным электродвигателем активной мощности и ее потерь от теоретической скорости движения трактора. При работе тягового асинхронного электродвигателя трактора без использования накопителей момент на колесах трактора ограничен: максимально возможным моментом электродвигателя при данной частоте питающего напряжения; максимальным значением мощности двигателя внутреннего сгорания, которая может быть передана тяговому асинхронному электродвигателю; сцеплением колес с опорной поверхностью. При работе тягового асинхронного электродвигателя трактора с использованием накопителей есть возможность кратковременно потребить мощность без учета второго ограничения, поскольку может быть использована мощность не только двигателя внутреннего сгорания, но и запасенная в накопителях энергии. Произведено сравнение характеристик при работе трактора как только на высшей передаче, так и на всех передачах (их две). Для всех возможных случаев (работа с накопителями и без них только на высшей передаче, работа с накопителями и без них при использовании всех передач) проанализирована работа трактора 5-го класса на различных операциях: пахоте, севе, культивации, бульдозерных работах, транспортном режиме. При этом использовали оборудование, агрегируемое с трактором 5-го класса.

**Ключевые слова:** момент, высшая передача, первая передача, режим работы, теоретическая скорость, тяговый асинхронный электродвигатель, активная мощность, коэффициенты приспособляемости

**Для цитирования:** Жданович, Ч. И. Анализ эффективности использования накопителей энергии на тракторе с электромеханической трансмиссией / Ч. И. Жданович, Н. В. Калинин // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 1. С. 73–82. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-73-82

## Efficiency Analysis of Energy Accumulating Mechanism for Tractor with Electromechanical Transmission

Ch. I. Zhdanovich<sup>1)</sup>, N. V. Kalinin<sup>1)</sup><sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** Dependence of tractor wheel torque on theoretical tractor motion speed has been used for comparison of tractor operation with electromechanical transmission with installation of energy accumulating mechanism and without its installation. In this case a traction asynchronous electric motor is operating under nominal and limit conditions. The paper also considers dependence diagrams of actual input power for the traction asynchronous electric motor and its losses due to theoretical tractor motion speed. Tractor wheel torque is limited during the operation of the traction asynchronous electric motor with energy accumulating mechanisms by the following factors: maximum electric motor torque at the given frequency of supply voltage; maximum value of internal combustion motor output which can be transferred to the traction asynchronous electric motor; grip of the wheels. During the operation of the traction asynchronous electric motor with energy accumulating

### Адрес для переписки

Жданович Чеслав Иосифович  
Белорусский национальный технический университет  
ул. Я. Коласа, 12,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-95-96  
trak\_atf@bntu.by

### Address for correspondence

Zhdanovich Cheslav I.  
Belarusian National Technical University  
12 Ya. Kolasa str.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 293-95-96  
trak\_atf@bntu.by

mechanisms there is a possibility for short power consumption without regard to the second limitation because it is possible to use power not only of internal combustion motor but also the power which is stored in the energy accumulating mechanisms. Comparison of characteristics has been made when a tractor is operating at high gear and when it is operating at all gears (that is two gears). Operation of the 5<sup>th</sup> class tractors has been analyzed for all possible cases (operation with energy accumulating mechanisms and without the mechanisms while being operated at all gears) and various types of work: tilling, sowing, cultivation, bulldozing work, transport mode. In this case equipment has been used which is aggregated with the 5<sup>th</sup> class tractor.

**Keywords:** torque, high gear, low gear, operation mode, theoretical speed, traction asynchronous electric motor, actual power, adaptability coefficients

**For citation:** Zhdanovich Ch. I., Kalinin N. V. (2017) Efficiency Analysis of Energy Accumulating Mechanism for Tractor with Electromechanical Transmission. *Science and Technology*, 16 (1), 73–82. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-73-82 (in Russian)

## Введение

Согласно [1, с. 15], тяговые качества двигателя оцениваются коэффициентами приспособляемости  $k_m$  (равен отношению максимального момента двигателя внутреннего сгорания (ДВС) к моменту ДВС при максимальной мощности) и снижения частоты вращения  $k_w$  (равен отношению оборотов ДВС при максимальной мощности к оборотам ДВС при максимальном моменте). С увеличением  $k_m$  повышаются способность трактора преодолевать возросшее сопротивление движению без перехода на низшую передачу и производительность агрегата по форсированию перегрузки, уменьшается степень снижения скорости [1, с. 15].

Обозначим:  $M_n$  – момент тягового асинхронного электродвигателя (ТАД) при номинальном скольжении в любой точке характеристики;  $M_{max}$  – то же ТАД при критическом скольжении в любой точке характеристики;  $M_{nn}$  – то же при номинальном скольжении, номинальном напряжении  $U_n$  и номинальной частоте  $f_{1n}$  питающего напряжения. Для ТАД при  $U_n$  и  $f_{1n}$  момент  $M_{max}$  может быть развит примерно в 2–3 раза больше  $M_{nn}$  в зависимости от конструкции конкретного ТАД. Если смотреть работу ТАД при отклонении от частоты питающего напряжения при предельном режиме работы [2], то видно, что момент  $M_{nn}$  может быть превышен в достаточно широком диапазоне питающих частот напряжения. Соответственно на достаточно большом участке характеристики ТАД может быть обеспечен довольно большой запас по моменту.

Однако если, например, при  $f_{1n}$  обеспечивать перегрузку по моменту, то ТАД должен развить большую мощность, чем при обеспечении момента  $M_{nn}$ . Согласно [3], максимальная мощность ТАД может быть ограничена мощностью ДВС: чтобы развить ТАД момент  $M_{max}$ , в 2–3 ра-

за больший  $M_{nn}$  при  $f_{1n}$ , ТАД должен развить значительно большую мощность, чем требуется для обеспечения  $M_{nn}$ . Откуда взять дополнительную мощность? Для этого можно использовать накопители энергии, которые способны подзарядиться при рекуперативном торможении либо при неполной загрузке генератора. Согласно [2], в каждой точке момент  $M_n$  и максимально возможный момент могут принимать различные величины, отличные от своих значений при  $f_{1n}$ , что также может повлиять на тяговые качества трактора и его тягово-скоростные свойства, поскольку при определенных значениях частоты питающего напряжения  $f_1$  максимально возможный момент может оказаться даже меньше  $M_{nn}$ .

Проанализируем, позволит ли использование накопителей улучшить тяговые качества трактора и его тягово-скоростные свойства без использования коробки передач. Возьмем трактор 5-го класса, аналогичный 3023, с такими же ТАД и ДВС, как и в [3], и проведем расчеты согласно методикам [3–5] для различных режимов работы трактора 5-го класса [6, с. 69]. Сравним работу трактора с накопителями и без них. Разница при расчете с использованием накопителей в том, что не учитывается момент по мощности, обеспечиваемой ДВС, в то время как без применения накопителей он учитывается.

## Работа трактора при использовании только высшей передачи

График зависимости  $M_k(v_T)$  ( $M_k$  – момент на колесах трактора,  $v_T$  – теоретическая скорость движения трактора) при использовании только одной передачи с накопителями представлен на рис. 1а, без накопителей – на рис. 1б. График построен по методике [5] при коэффициенте сцепления  $\varphi_{сц} = 0,6$  и передаточном отношении трансмиссии 35,57, как для высшей передачи [3].

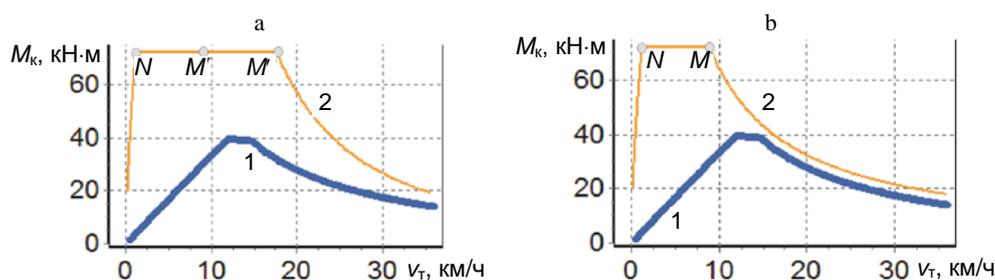


Рис. 1. Зависимость работы трактора при работе на высшей передаче: а – при использовании накопителей; б – без использования накопителей; 1 – номинальный режим; 2 – предельный режим

Fig. 1. Dependence of tractor operation at high gear: а – with accumulating mechanism; б – without accumulating mechanism; 1 – nominal mode; 2 – limit mode

Из рис. 1 видно, что:

а) использование накопителей при включенной высшей передаче не позволяет увеличить максимальный момент в диапазоне малых скоростей (рис. 1а, слева от точки  $N$ ) при работе на предельном режиме ТАД, потребляемая мощность и потери ТАД будут одинаковыми (рис. 2а, б, кривые 2, 3 совпадают на участке  $AB$ ); это вызвано тем, что максимальный момент на колесах в диапазоне малых частот питающего напряжения ограничен возможностями ТАД;

б) график при работе на номинальном режиме будет одинаковым при использовании и без использования накопителей (рис. 1, кривые 1), потребляемая мощность и потери мощности ТАД также будут одинаковыми (рис. 2, кривые 3);

в) использование накопителей позволяет увеличить момент на колесах при движении на скоростях более 8 км/ч с превышением номи-

нального режима работы ТАД, причем момент по сцеплению может быть достигнут до скорости 17 км/ч (рис. 1а, кривая 2, участок  $NM'$ ), в то время как без накопителей – до скорости 8 км/ч (рис. 1б, кривая 2, участок  $NM$ ); это вызвано тем, что ТАД при превышении определенной частоты питающего напряжения может значительно превысить номинальный момент в том случае, если будет возможность получить дополнительную мощность (рис. 2а, кривая 1), а без использования накопителей энергии максимальная потребляемая мощность ТАД ограничена возможностями ДВС (рис. 2а, кривая 2). Однако увеличение потребляемой мощности будет сопровождаться значительным повышением потерь мощности, потребляемой ТАД (рис. 2б, кривые 1, 2): согласно расчетам, до семи раз. Это значит, что длительная работа ТАД в таком режиме недопустима.

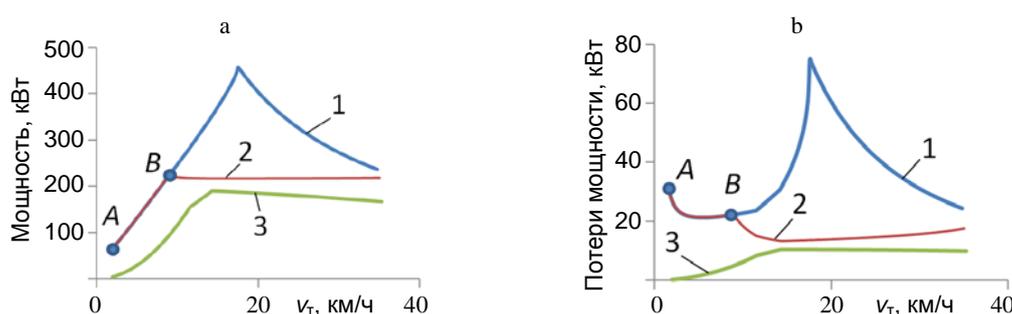


Рис. 2. Потребляемая тяговым асинхронным электродвигателем активная мощность (а) и ее потери (б) при работе трактора на высшей передаче:

- 1 – при использовании накопителей на предельном режиме работы электродвигателя;
- 2 – при ограничении потребляемой мощности электродвигателя по максимальной мощности двигателя внутреннего сгорания; 3 – при номинальном режиме работы электродвигателя

Fig. 2. Active power consumed by traction asynchronous electric motor (а) and active power losses (б) during tractor operation at high gear: 1 – while using accumulating mechanisms under limit mode of electric motor operation; 2 – while limiting the consumed power of electric motor according to maximum power of internal combustion engine; 3 – at nominal operating mode of electric motor

### Работа трактора с использованием двух передач

График характеристики при работе трактора на двух передачах без использования накопителей [3] приведен на рис. 3.

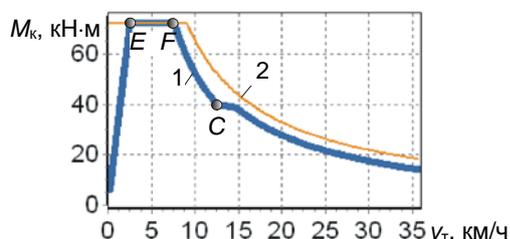


Рис. 3. Характеристика трактора без накопителей с использованием двух (1-й, 2-й) передач:  $C$  – точка переключения передач;  $EF$  – участок характеристики, на котором тяговый асинхронный электродвигатель развивает момент, меньше номинального (обозначения 1, 2 – на рис. 1)

Fig. 3. Characteristic of tractor without accumulating mechanisms while using two (1, 2) gears:  $C$  – point of gear change;  $EF$  – segment of characteristic when traction asynchronous electric motor is developing a torque which is less than nominal (symbols 1, 2 – in fig. 1)

По методике [5] построим характеристику (рис. 4) при установленных накопителях энергии с использованием того же диапазона частот подаваемого на обмотку статора ТАД напряжения и тех же передаточных чисел механической части трансмиссии (35,57 – на высшей и 103,00 – на первой передаче), которые были подобраны для работы без накопителей энергии в [3], и сравним с характеристикой на рис. 3. Как видно, при тех же диапазонах использования законов регулирования, что и в [3], получится провал кривой момента  $KD'C'$  на предельной характеристике, т. е. момент по сцеплению на участке кривой  $C'K$  не сможет быть реализован при разгоне с первой передачи, поскольку на участке  $KD'$  момент упадет. Выход из такой ситуации – увеличить число передач (что сделает установку накопителей нецелесообразной), либо при работе на предельной характеристике увеличить частотный диапазон работы ТАД на высшей передаче и уменьшить на первой (рис. 5). При этом диапазон работы на номинальной характеристике следует оставить таким же, как и на рис. 3, 4, поскольку при использовании измененного частотного диапазона на высшей передаче получится провал кривой при работе на номинальном режиме (рис. 5): момент на колесах будет

уменьшаться на участке  $HC$  с понижением скорости, а при переключении с первой передачи на высшую резко упадет (с точки  $D$  до точки  $C'$ ). При возрастании сцепного веса и коэффициента сцепления провал  $KD'C'$  (рис. 4) будет еще увеличиваться; придется расширять частотный диапазон в сторону малых частот напряжения, вследствие чего увеличится и длина отрезка  $CH$  (рис. 5).

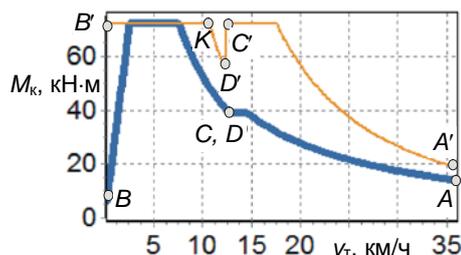


Рис. 4. Характеристика трактора при использовании накопителей:  $C, C'$  – точка включения высшей передачи;  $D, D'$  – точка выключения первой передачи;  $AC, A'C'$  – участки кривых, соответствующие работе на первой передаче;  $BD, B'D'$  – то же на высшей передаче

Fig. 4. Characteristic of tractor while using accumulating mechanisms:  $C, C'$  – points of high gear start;  $D, D'$  – points of 1<sup>st</sup> gear shut-down;  $AC, A'C'$  – curved sections corresponding to operation at 1<sup>st</sup> gear;  $BD, B'D'$  – the same at high gear

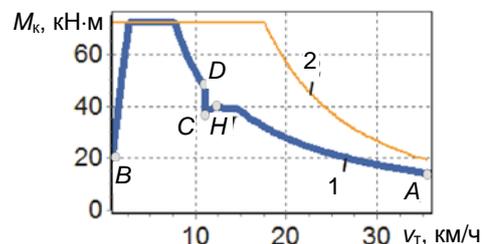


Рис. 5. Характеристика трактора с двухскоростной коробкой передач при использовании накопителей с измененным диапазоном частот напряжения тягового асинхронного электродвигателя (обозначения 1, 2 – на рис. 1)

Fig. 5. Characteristic of tractor with two-speed transmission while using accumulating mechanisms with changed voltage frequency range of traction asynchronous electric motor (symbols 1, 2 – in fig.1)

При малых скоростях движения трактора момент на колесах (рис. 3–5), потребляемая ТАД мощность (рис. 6, отрезок  $AB$  кривых 1, 2) и ее потери (рис. 7) будут одинаковы при установке и без установки накопителей. В случае превышения определенной скорости трактора, соответствующей точке  $B$  на рис. 6, ТАД может

дать больший момент, чем без использования накопителей, потребив при этом больше мощности (рис. 6), что, в свою очередь, приведет к значительному увеличению потерь на первой (рис. 7, кривая 2) и высшей (рис. 7, кривая 1) передачах по сравнению с работой без использования накопителей (рис. 7, кривая 3). В номинальном режиме момент на колесах при работе с накопителями может быть таким же (рис. 4) или даже несколько меньшим на определенном участке характеристики (рис. 5), чем при работе без накопителей (рис. 3).

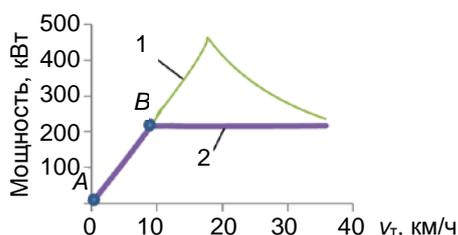


Рис. 6. График активной мощности, потребляемой тяговым асинхронным электродвигателем, в зависимости от скорости движения трактора при работе на предельном режиме электродвигателя и использовании двух передач: 1 – при работе с накопителями; 2 – без накопителей

Fig. 6. Diagram of active power consumed by traction asynchronous electric motor according to tractor speed while being operated at limit mode of electric motor and while using two gears: 1 – with accumulating mechanisms; 2 – without accumulating mechanisms

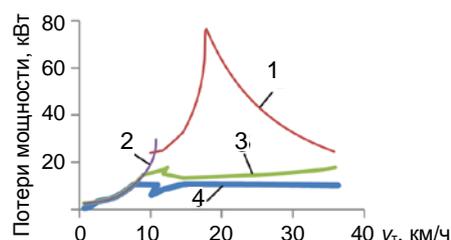


Рис. 7. График потерь мощности при работе трактора на двух передачах: 1, 2 – с накопителями на предельном режиме (1 – на высшей передаче, 2 – на первой); 3 – без накопителей на предельном режиме; 4 – на номинальном режиме

Fig. 7. Diagram of power losses in the process of tractor operation at two gears: 1, 2 – with accumulating mechanisms at limit mode (1 – at high gear, 2 – at 1<sup>st</sup> gear); 3 – without accumulating mechanisms at limit mode; 4 – at nominal mode

### Работа трактора и тягового асинхронного электродвигателя на различных операциях с накопителями и без них

Работа трактора на транспортном режиме. Для работы с тяжелым прицепом массой 33 т [7] без использования накопителей энергии рассчитаем требуемые значения  $M_k$  при различных значениях коэффициента сопротивления качению  $f_c$ : для грунтовой дороги, залежи, стерни и асфальта [8, с. 150]. Результаты сведены в табл. 1.

Таблица 1

Требуемые значения  $M_k$  при движении трактора с прицепом полной массой 33 т при коэффициенте сцепления 0,8

Required values of  $M_k$  when tractor is moving with a trailer having 33 t gross weight and 0.8 adhesion factor

Режим работы	Угол подъема, град.													
	0			1°			2°		3°		5°		6°	
	$M_k$ , кН·м	$v_t$ , км/ч	Запас $M_k$ , кН·м	$M_k$ , кН·м	$v_t$ , км/ч	Запас $M_k$ , кН·м	$M_k$ , кН·м	$v_t$ , км/ч						
Грунтовая дорога ( $f_c = 0,05$ )	21,45	25,27	–	28,97	19,3	–	36,45	15,6	43,93	11,8	58,83	9,2	66,26	8,2
Залежь ( $f_c = 0,08$ )	34,32	16,40	–	41,85	12,1	–	49,33	10,6	56,80	9,4	71,67	7,7	79,07	7,0
Стерня ( $f_c = 0,10$ )	42,90	11,80	–	50,44	10,4	–	57,92	9,3	65,37	8,3	80,23	7,0	87,62	6,4
Асфальт ( $f_c = 0,01$ )	4,29	max	9,60	11,79	max	2,02	19,28	27,7	26,77	20,7	41,71	12,2	49,17	10,6

Скорость, при которой может быть обеспечен момент с сохранением номинального режима, определим по кривой, аналогичной графику на рис. 3 (кривая 1), но с большим значением коэффициента сцепления (увеличим до 0,8). Скорости менее 12,7 км/ч могут обеспечиваться только первой передачей при номинальном режиме; при использовании высшей передачи при скорости менее 12,7 км/ч будет резко падать момент (рис. 1).

Как видно из табл. 1, при качении по ровной асфальтовой дороге остается еще более чем двукратный запас момента. Причем запас момента будет увеличиваться при снижении скорости менее максимальной (рис. 3, кривая 1). При качении по асфальту с уклоном  $5^\circ$  уже потребуется включать первую передачу, чтобы сохранить номинальный режим работы ТАД; если использовать накопители и работать на высшей передаче, то при качении по асфальту с превышением номинального режима работы ТАД требуемый момент при уклоне  $5^\circ$  будет обеспечен на скорости 24,3 км/ч, а при  $6^\circ$  – на 21,6 км/ч, в то время как при тех же условиях без накопителей – на скоростях 15,7 и 13,2 км/ч соответственно.

При качении по стерне (табл. 1) даже на ровной поверхности момент в номинальном режиме работы ТАД не может быть обеспечен при работе на высшей передаче, т. е. придется использовать первую передачу. При качении по грунтовой дороге с сохранением номинального режима работы ТАД может возникнуть необходимость использовать первую передачу уже на подъеме в  $3^\circ$ , а при качении по залежи – на подъеме в  $1^\circ$ . Таким образом:

- для работы на транспортном режиме использование только высшей передачи может оказаться недостаточным при соблюдении номинального режима работы ТАД, а установка накопителей не влияет на номинальный режим работы ТАД при включенной высшей передаче; также установка накопителей не влияет на минимальную скорость движения, при которой будет обеспечен момент по сцеплению (точка *N* начала обеспечения момента по сцеплению в установившемся режиме работы ТАД будет одинаковой на рис. 1а, б);

- момент по сцеплению в процессе движения на высшей передаче может быть обеспечен при превышении номинального режима работы ТАД в обоих случаях: и при установке накопителей, и без установки накопителей; при установке накопителей он будет обеспечен при большей скорости движения, однако потери также будут больше (рис. 1, 2);

- при равномерном движении по ровной асфальтовой поверхности без накопителей даже на максимальной скорости с тяжелым прицепом остается более чем двукратный запас по моменту на колесах при номинальном режиме работы ТАД; т. е. может быть обеспечен разгон до данной скорости движения на номинальном режиме без установки накопителей.

*Работа трактора на пахоте и бульдозерных работах.* Сравнение работы трактора на пахоте и бульдозерных работах будем проводить для следующих четырех случаев:

1) только на высшей передаче с накопителями (рис. 1а);

2) при использовании всех передач (их две) с накопителями (для предельного режима – рис. 5, кривая 2; для номинального режима – рис. 4, график *AB*);

3) при использовании всех передач (две) без накопителей (рис. 3);

4) только на высшей передаче без накопителей (рис. 1б).

Для бульдозерных работ требуемая скорость трактора составит 2,5–4,0 км/ч [9, с. 19], для пахоты при работе: с плугом ппо.9.30/45 – до 8,0–11,0 км/ч, с плугом ппн.8.30/50 – до 7,0–10,0 км/ч [10].

Для работы на пахоте и на бульдозерных работах необходимо, чтобы трактор мог развить максимально возможный момент по сцеплению. По графикам видно, что для всех случаев момент по сцеплению при предельном установившемся режиме работы ТАД может быть достигнут только начиная с определенной скорости движения, а на самых минимальных скоростях он достигнут не будет (ТАД не сможет дать требуемый для этого момент при малых оборотах). Произведем расчет по [5], при какой минимальной теоретической скорости  $v_t$  трактор сможет развить момент по сцеплению при

предельном установившемся режиме работы ТАД для значений коэффициента сцепления  $\varphi_{\text{сц}}$  колес с опорной поверхностью 0,6 и 0,8 при эксплуатационной (12800 кг) и максимальной (18000 кг) массе трактора. Данные расчета приведены в табл. 2. Результаты при использовании и без использования накопителей будут одинаковы.

Таблица 2

**Значения минимальной скорости движения трактора, при которых он сможет развить момент на колесах, равный моменту по сцеплению**  
**Values of minimum speed for tractor movement when tractor can develop wheel torque which is equal to adhesion torque**

Масса трактора, кг	$\varphi_{\text{сц}}$	Число передач			
		1	2	1	2
		$v_{\text{тmin}}$ , км/ч		$f_1$ , Гц	
12800	0,6	1,56	0,16	10	3
12800	0,8	2,54	0,21	16	4
18000	0,6	2,86	0,20	18	4
18000	0,8	4,61	0,32	27	6

Как видно из табл. 2, при наличии двух передач трактор при подобранных передаточных числах (случаи 2, 3) может развить момент, равный моменту по сцеплению, уже при теоретической скорости 0,32 км/ч даже при максимальной загрузке и большом  $\varphi_{\text{сц}}$ . В то время как при использовании только высшей передачи (случаи 1, 4) при тех же условиях трактор может развить максимальный момент только при теоретической скорости 4,61 км/ч. То есть при скорости бульдозерных работ 2,5–4,0 км/ч в случаях 1 и 4 момент по сцеплению может быть не обеспечен; если момент по сцеплению в диапазоне 2,5–4,0 км/ч будет обеспечен при определенных условиях, то отсутствие возможности обеспечить его на более низких скоростях движения трактора в установившемся режиме работы ТАД могут привести к сложности трогания с места с заглубленным отвалом, а также потери мощности будут в несколько раз больше (рис. 2б, отрезок АВ кривых 1, 2), чем при номинальном режиме работы ТАД (рис. 2б, кривая 3).

Расчеты показывают, что момент по сцеплению при номинальном режиме работы ТАД для случаев 2, 3 будет обеспечен начиная с теоретической скорости 2,56 км/ч при  $\varphi_{\text{сц}} = 0,6$  (рис. 3, точка E) и 3,39 км/ч при  $\varphi_{\text{сц}} = 0,8$ , однако при работе с превышением номинального режима работы ТАД в диапазоне до 2,56 км/ч при  $\varphi_{\text{сц}} = 0,6$  потери мощности (рис. 7, кривая 2) не будут больше, чем максимальные потери в номинальном (рис. 7, кривая 4) режиме работы ТАД; аналогично в диапазоне до 3,39 км/ч при  $\varphi_{\text{сц}} = 0,8$  (рис. 8).

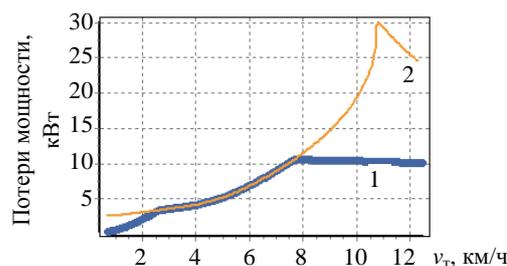


Рис. 8. График потерь мощности тяговым асинхронным электродвигателем при работе на первой передаче с передаточным отношением 103 и  $\varphi_{\text{сц}} = 0,8$  в режиме работы: 1 – номинальном; 2 – предельном  
 Fig. 8. Diagram of power losses by traction asynchronous electric motor while being operated at 1<sup>st</sup> gear with transmission ratio 103 and  $\varphi_{\text{сц}} = 0.8$  at operating modes: 1 – nominal; 2 – limit

По графикам рис. 1 видно, что при работе на пахоте в случаях 1, 4 трактор не сможет развить момент по сцеплению при номинальном режиме работы ТАД. При обеспечении момента по сцеплению с превышением номинального режима работы ТАД для скорости 7,62 км/ч, соответствующей точке F (рис. 3) при  $\varphi_{\text{сц}} = 0,6$ , потери мощности будут в 2,18 раза больше, чем для случаев 2, 3 при номинальном режиме ТАД для той же скорости. Таким образом, для работы на пахоте и бульдозерных работах случаи 1, 4 неприемлемы.

Теперь сравним случаи 2 и 3. Для случаев 2 и 3 кривая  $M_{\text{к}}(v_{\text{т}})$  при работе на номинальном режиме будет совершенно одинаковой, а момент по сцеплению при работе на предельном режиме может быть развит при одной и той же минимальной скорости (табл. 2), т. е. случай 2 при бульдозерных работах и работе на пахоте не дает преимуществ перед случаем 3.

*Работа трактора с посевным агрегатом.* Расчет проведем для работы с посевным агрегатом [11] согласно методике [12, с. 124–125]. Рассчитаем силу сопротивления орудия  $R_{\text{мн}}$ ,

силу сопротивления движению трактора  $F_k$  и суммарную силу сопротивления движению трактора с орудием при севе  $F_{k\Sigma}$  ( $f_c = 0,18$ ) [8, с. 150]. Результаты расчета сведены в табл. 3.

Таблица 3

**Расчет силы сопротивления орудия и суммарной силы сопротивления движению трактора для различных углов уклона местности**  
**Calculation of tool resistance force and total resistance force to tractor movement for various angles of surface slope**

Показатель	Угол уклона, град.				
	0	1°	6°	12°	20°
$R_{MH}$ , кН	10,595	12,649	22,900	35,070	42,957
$F_k$ , кН	22,602	24,790	35,603	48,215	64,186
$F_{k\Sigma}$ , кН	33,197	37,439	58,503	83,285	107,143

Как видно из табл. 3, при угле уклона 6° требуемая сила тяги трактора может оказаться примерно равной силе тяги по сцеплению при  $\varphi_{сц} = 0,5$  (таким будет  $\varphi_{сц}$  для посевных работ согласно [8, с. 150]). Если уклон опорной поверхности 0–1° с кратковременным уклоном до 6°, то установка накопителей может обеспечить возможность движения трактора с постоянной максимальной для сева скоростью 18 км/ч [11]: при подъеме до 6° будет достигаться момент по сцеплению за счет использования энергии накопителей, а при спуске до 6° – запасаться энергия в накопителях. Однако при длительных уклонах 6° это невозможно, поскольку требуется большая емкость накопителей, и будет сильный нагрев ТАД.

*Работа трактора с культиватором.* При работе с культиватором типа [13], согласно расчету по [14, с. 37] и [12], требуемый момент в номинальном режиме работы ТАД при углах подъема до 5°–6° может быть обеспечен и при работе на высшей передаче, а на предельном режиме работы без накопителей есть возможность развить момент по сцеплению до рабочей скорости (рис. 1б, точка М). В результате установки накопителей момент может быть кратковременно увеличен уже за пределами диапазона скоростей работы на культивации (рис. 1а, участок ММ'), т. е. нет смысла в установке накопителей. То же и при работе на первой передаче (рис. 3–5).

**Возможность использования тягового асинхронного электродвигателя или двигателя внутреннего сгорания меньшей мощности при установке накопителей**

Использование ТАД меньшей мощности приведет к тому, что упадет скорость работы трактора на пахоте при номинальном режиме работы ТАД: точка F (рис. 3), показывающая максимальную скорость, при которой может быть достигнут момент по сцеплению с соблюдением номинального режима работы ТАД, сместится влево, а значит, упадет и максимально возможный момент по сцеплению. Использование ДВС меньшей мощности также приведет к снижению скорости работы трактора на пахоте, поскольку в этом случае момент, полученный при номинальном режиме ТАД, не будет обеспечен мощностью ДВС, а продолжительное время работать от накопителя энергии трактор не сможет. На рис. 3 момент на колесах при работе на предельном режиме (кривая 2), ограниченном мощностью ДВС, будет немного выше, чем момент при работе ТАД на номинальном режиме (кривая 1). Однако уменьшать мощность ДВС до такого значения, чтобы обе кривые совпали, не следует, поскольку нужен определенный запас мощности ДВС на привод вспомогательных агрегатов, а также часть мощности ДВС используется для системы охлаждения ТАД.

**ВЫВОДЫ**

1. Использование накопителей энергии для трактора 5-го класса с электромеханической трансмиссией не изменяет кривую зависимости момента на колесах трактора от скорости движения трактора при номинальном режиме работы тягового асинхронного электродвигателя при тех же передаточных числах.
2. При малых оборотах тягового асинхронного электродвигателя, соответствующих регулированию в диапазоне низких частот питающего напряжения, использование накопителей энергии не увеличивает максимальный момент на колесах (и при работе только на высшей передаче, и при работе с двумя передачами), если допустить превышение номинального режима работы тягового асинхронного электродвигателя.

ля. Это объясняется ограничением максимального момента на колесах по сцеплению, а на совсем малых оборотах — возможностями тягового асинхронного электродвигателя. При работе на высшей передаче трактор может развить на колесах максимально возможный момент по сцеплению и без использования накопителей; это будет при несколько меньшей скорости движения, чем если использовать накопители, а номинальный режим работы электродвигателя будет превышен в обоих случаях.

3. Использование накопителей энергии не дает возможности исключить коробку передач из трансмиссии, поскольку в этом случае не будет обеспечен требуемый момент на пахоте при номинальном режиме работы тягового асинхронного электродвигателя. При работе на транспорте режиме с использованием тяжелого прицепа по асфальтовому покрытию без уклона имеется более чем двукратный запас момента без использования накопителей при номинальном режиме работы электродвигателя, т. е. трактор может разогнаться до максимальной скорости и без использования накопителей. Возможность обеспечения момента по сцеплению на высшей передаче без использования накопителей позволит преодолевать кратковременно увеличенное дорожное сопротивление для транспортного режима на высшей передаче. При качении по поверхности с большим сопротивлением качению может возникнуть необходимость работать на первой передаче в целях уменьшения потерь мощности тяговым асинхронным электродвигателем.

4. Возможности использовать тяговый асинхронный электродвигатель или двигатель внутреннего сгорания меньшей мощности установка накопителей не дает, поскольку в этом случае будет снижена скорость работы трактора на пахоте. Накопители энергии могут при определенных условиях обеспечить равномерную скорость движения при севе, равную максимальному установленному значению для работающих с трактором 5-го класса посевных агрегатов. Таким образом, применение накопителей энергии не дает преимуществ при работе трактора 5-го класса на пахоте и бульдозерных работах и практически не дает преимуществ при работе на транспортном режиме; опреде-

ленные преимущества использования накопителей могут быть при посевных работах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Анилович, В. Я. Конструирование и расчет сельскохозяйственных тракторов / В. Я. Анилович, Ю. Т. Водолаженко. М.: Машиностроение, 1976. 456 с.
2. Жданович, Ч. И. Выбор способа регулирования тягового асинхронного электродвигателя трактора и построение механической характеристики / Ч. И. Жданович, Н. В. Калинин // Наука и техника. 2015. № 3. С. 60–64.
3. Жданович, Ч. И. Определение передаточных отношений механической части электромеханической трансмиссии трактора / Ч. И. Жданович, Н. В. Калинин // Наука и техника. 2016. Т. 15, № 1. С. 29–36.
4. Жданович, Ч. И. Зависимость характеристик трактора с механической трансмиссией от температуры обмоток тягового электродвигателя / Ч. И. Жданович, Н. В. Калинин // Проблемы проектирования и развития тракторов, мобильных машин, городского электротранспорта: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 60-летию кафедры «Тракторы» БНТУ, Минск, 23–24 нояб. 2013 г. / редкол.: В. П. Бойков, Ч. И. Жданович. Минск: БНТУ, 2013. С. 60–67.
5. Жданович, Ч. И. Определение максимального момента на колесах трактора с электромеханической трансмиссией / Ч. И. Жданович, Н. В. Калинин // Проблемы проектирования и развития тракторов, мобильных машин, городского электротранспорта: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 60-летию кафедры «Тракторы» БНТУ, Минск, 23–24 нояб. 2013 г. / редкол.: В. П. Бойков, Ч. И. Жданович. Минск: БНТУ, 2013. С. 54–59.
6. Тракторы. Дипломное проектирование / А. Ф. Андреев [и др.]; под общ. ред. В. В. Бутько. Минск: Вышэйш. шк., 1985. 160 с.
7. Монолитный прицеп тридем rponag T682 [Электронный ресурс] // ООО «АгроВектор» (г. Нижний Новгород). 2012. Режим доступа: [http://agrovektor.ru/mebel/monolitnyj\\_pricep\\_tridem\\_t682\\_21\\_tonna.html](http://agrovektor.ru/mebel/monolitnyj_pricep_tridem_t682_21_tonna.html). Дата доступа: 24.04.2013.
8. Тракторы: теория / В. В. Гуськов [и др.]; под общ. ред. В. В. Гуськова. М.: Машиностроение, 1988. 376 с.
9. Холодов, А. М. Землеройно-транспортные машины / А. М. Холодов, В. В. Ничке, Л. В. Назаров. Харьков: Вища шк., 1982. 192 с.
10. Создание на РУП «Минский тракторный завод» многокорпусных плугов для высокопроизводительной обработки почвы [Электронный ресурс] // Министерство промышленности Республики Беларусь. Режим доступа: <http://www.minprom.gov.by/innovacia?ID=25>. Дата доступа: 04.02.2013.
11. Агрегат почвообрабатывающий посевной многофункциональный АППМ-6 [Электронный ресурс] // Миннойтовский ремонтный завод. 2013. Режим доступа: <http://www.mrz.by/catalog/products-catalog/agregat-appm-6.html>. Дата доступа 22.04.2013.

12. Свиричевский, Б. С. Эксплуатация машинно-тракторного парка / Б. С. Свиричевский. М.: Госуд. изд-во сельскохоз. лит-ры, 1958. 660 с.
13. Культиватор паровой КП-9 [Электронный ресурс] // Минойтовский ремонтный завод. 2013. Режим доступа: <http://www.mrz.by/state/AA:navID.131/AC:-1.180003630783/>. Дата доступа: 22.04.2013.
14. Машиностроение: энциклопед. справ.: в 15 т. / редкол.: Е. А. Чудаков (гл. ред.) [и др.]. М.: Гос. науч.-техн. изд-во машиностроит. лит-ры, 1948. Т. 12. Раздел четвертый. Конструирование и расчет машин. 716 с.

Поступила 17.10.2016

Подписана в печать 20.12.2016

Опубликована онлайн 30.01.2017

#### REFERENCES

1. Anilovich V. Ya., Vodolazhchenko Yu. T. (1976) *Designing and Calculation of Agricultural Tractors*. Moscow, Mashinostroyeniye. 456 (in Russian).
2. Zhdanovich Ch. I., Kalinin N. V. (2015) Selection of Method for Regulation of Tractor Propulsion Asynchronous Electric Motor and Construction of Mechanical Characteristics. *Nauka i Tekhnika* [Science and Technique], (3), 60–64 (in Russian).
3. Zhdanovich Ch. I., Kalinin N. V. (2016) Determination of Transmission Gear Ratio in Mechanical Part of Tractor Electro-Mechanical Transmission. *Nauka i Tekhnika* [Science and Technique], 15 (1), 29–36 (in Russian). DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-1-29-36.
4. Zhdanovich Ch. I., Kalinin N. V. (2013) Characteristics Dependence of Tractor with Mechanical Transmission on Temperature of Windings in Propulsion Electric Engine. *Problemy Proektirovaniia i Razvitiia Traktorov, Mobilnykh Mashin, Gorodskogo Elektrotransporta: Mater. Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Posviashch. 60-letiiu Kafedry «Traktory» BNTU* [Problems in Designing and Development of Tractors, Mobile Machines, Urban Electric Transport: Proceedings of International Scientific and Technical Conference devoted to 60<sup>th</sup> Anniversary of “Tractors” Department at the Belarusian National Technical University]. Minsk, Belarusian National Technical University, 60–67 (in Russian).
5. Zhdanovich Ch. I., Kalinin N. V. (2013) Determination of Maximum Moment on Wheels of Tractor with Electric and Mechanical Transmission. *Problemy Proektirovaniia i Razvitiia Traktorov, Mobilnykh Mashin, Gorodskogo Elektrotransporta: Mater. Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Posviashch. 60-letiiu Kafedry «Traktory» BNTU* [Problems in Designing and Development of Tractors, Mobile Machines, Urban Electric Transport: Proceedings of International Scientific and Technical Conference Devoted to 60<sup>th</sup> Anniversary of “Tractors” Department at the Belarusian National Technical University], Minsk, Belarusian National Technical University, 54–59 (in Russian).
6. Andreev A. F., Atamanov Iu. E., Budko V. V., Boikov V. P., Vasilev V. T., Kabanov V. I., Lefarov A. Kh., Masiuk S. K. (1985) *Tractors. Graduation Design Engineering*. Minsk, Vysheishaya Shkola. 160 (in Russian).
7. Monolithic Trailer of T682 Tridem Pronar Model. *JSC “AgroVektor” (Nizhny Novgorod)*. 2012. Available at: [http://agrovektor.su/mebel/monolitnyj\\_pricep\\_tridem\\_t682\\_21\\_tonna\\_html](http://agrovektor.su/mebel/monolitnyj_pricep_tridem_t682_21_tonna_html). (Accessed 24 April 2013) (in Russian).
8. Guskov V. V., Velev N. N., Atamanov Iu. E., Bocharov N. F., Ksenevich I. P., Solonskii A. S. (1988) *Tractors: Theory*. Moscow, Mashinostroyeniye. 376 (in Russian).
9. Kholodov A. M., Nichke V. V., Nazarov L. V. (1982) *Earthmoving and Transport Machines*. Kharkov, Vyscha Shkola Publ. 192 (in Russian).
10. Development of Multibottom Ploughs for High-Efficiency Soil Treatment at RUE “Minsk Tractor Works”. *Ministry of Industry of the Republic of Belarus*. Available at: <http://www.minprom.gov.by/innovacia?ID=25>. (Accessed: 4 Februar 2013) (in Russian).
11. Multi-Functional Tillage and Seeding Machine. *Minoytovsky Repair Plant*. Favailable at: <http://www.mrz.by/catalog/products-catalog/agregat-appm-6.html>. (Accessed 22 April 2013) (in Russian).
12. Svirshchevsky B. S. (1958) *Operation of Machine and Tractor Fleet*. Moscow, State Publishing House of Agricultural Literature. 660 (in Russian).
13. Field Cultivator КП-9. *Minoytovsky Repair Plant*. Available at: <http://www.mrz.by/state/AA:navID.131/AC:-1.180003630783/>. (Accessed 22 April 2013) (in Russian).
14. Tchudakov E. A. (ed.), Aleksandrov V. I., Badylkes I. S., Vasilenko I. F., Veinberg B. S., Gladkov N. G., Gorbunov M. P., Grossman R. I., Dollezhai N. A., Zvolinskii N. P., Ziablov V. A., Martens L. K. (1948) *Mechanical Engineering. Encyclopedic Reference Book. Vol. 12. 4<sup>th</sup> Section. Designing and Calculation of Machines*. Moscow, State Scientific Publishing House of Mechanical Engineering Literature. 716 (in Russian).

Received: 17.10.2016

Accepted: 20.12.2016

Published online: 30.01.2017

DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-83-88

УДК 629.114.2.001.2

## Исследование процесса взаимодействия ведущих колес трактора с грунтовой поверхностью

Докт. техн. наук, проф. В. В. Гуськов<sup>1)</sup>, асп. А. А. Дзёма<sup>1)</sup>, студ. А. С. Колола<sup>1)</sup>, студ. Р. Ю. Макаренко<sup>1)</sup>, Н. И. Зезетко<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

<sup>2)</sup>ОАО «Минский тракторный завод» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017  
Belarusian National Technical University, 2017

**Резюме.** В статье отражены результаты исследования процесса взаимодействия ведущего колеса с грунтовой поверхностью, приведена методика оптимизации системообразующих параметров последнего. Указанный процесс отличается рядом особенностей от процесса качения колеса по твердой поверхности. Грунтовая поверхность представляет собой смесь песчаных и глинистых частиц вместе с растительными остатками и обладает рядом физико-механических свойств, основным из которых является сопротивление почв сжатию и сдвигу. Процесс сжатия определяет глубину колеи и сопротивление движению, а процесс сдвига – сцепные свойства колеса и его касательную силу тяги. При выполнении исследований использованы законы сжатия и сдвига, предложенные профессором В. В. Кацыгиным, как наиболее адекватно отображающие реальные процессы. Движение ведущего колеса по грунтовой поверхности сопровождается буксованием. Выяснено, что наибольшая сила тяги колеса образуется не при стопроцентном буксовании, как считали до сих пор, а при 45–60 % в зависимости от категории почв. Разработанные с учетом этого обстоятельства интегральные уравнения дают возможность рассчитать тягово-сцепные качества ведущих колес проектируемого колесного трактора и оценить его тяговые, скоростные и экономические свойства. Разработана методика оптимизации системообразующих параметров колесного движителя проектируемого трактора, таких как конструктивная и сцепная массы, ширина, диаметр и давление воздуха в шине. Предложенная методика внедрена в практику проектирования колесных тракторов в ОАО «Минский тракторный завод».

**Ключевые слова:** трактор, ведущие колеса, тягово-сцепное качество, грунтовая поверхность

**Для цитирования:** Исследование процесса взаимодействия ведущих колес трактора с грунтовой поверхностью / В. В. Гуськов [и др.] // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 1. С. 83–88. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-83-88

## Investigation of Process Pertaining to Interaction of Tractor Driving Wheels with Ground Surface

V. V. Guskov<sup>1)</sup>, A. A. Dzioma<sup>1)</sup>, A. S. Kolola<sup>1)</sup>, R. Yu. Makarenko<sup>1)</sup>, N. I. Zezetko<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>2)</sup>OJSC “Minsk Tractor Works” (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The paper presents results of investigations on the process pertaining to interaction of a driving wheel with ground surface and describes methodology for optimization of backbone parameters. The mentioned process has some specific differences in comparison with the process of wheel rolling along hard surface. Ground surface is represented by mixture of sandy and clay particles with plant residues and it has a number of physical and mechanical properties. The main of these properties is resistance of soil against compression and displacement. Compression process determines a track depth and resistance to motion and displacement process determines wheel gripping property and its tangential traction force. While executing the

### Адрес для переписки

Гуськов Валерий Владимирович  
Белорусский национальный технический университет  
ул. Я. Коласа, 12,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-95-96  
trak\_atf@bntu.by

### Address for correspondence

Guskov Valeriy V.  
Belarusian National Technical University  
12 Ya. Kolasa str.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 293-95-96  
trak\_atf@bntu.by

investigations laws of compression and displacement proposed by Prof. V. V. Katsygin as the most adequate reflection of actual processes have been used in the paper. Motion of the driving wheel along ground surface is accompanied by its slipping. It has been determined that the maximum wheel traction force is formed not with 100% slipping as it was supposed until present but the value has been obtained at 45–60 % slipping according to soil category. The developed integral equations with due account of the aspect make it possible to calculate road hold characteristics of driving wheels of the designed wheel tractor and evaluate its traction, speed and economic characteristics. Methodology has been developed for optimization of backbone parameters of wheeled running gear in the designed tractor such as design mass and adhesion weight, width, diameter and air pressure in a tire. The proposed methodology has been introduced in designing practice of wheeled tractors at OJSC “Minsk Tractor Works”.

**Keywords:** tractor, driving wheels, road-hold characteristic, ground surface

**For citation:** Guskov V. V., Dzioma A. A., Kolola A. S., Makarenko R. Yu., Zezetko N. I. (2017) Investigation of Process Pertaining to Interaction of Tractor Driving Wheels with Ground Surface. *Science and Technology*, 16 (1), 83–88. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-83-88 (in Russian)

### Введение

Взаимодействие ведущего колеса с грунтовой поверхностью представляет сложный процесс, обусловливаемый разнообразным структурным составом грунтовой поверхности (категориями грунта – глина, песок, снег и т. д.), физическими свойствами (влажность, плотность и т. д.) и сопротивлением грунтов смятию и сдвигу, а также параметрами колеса и приложенными силами и моментами. При взаимодействии ведущего колеса с естественной поверхностью грунтов возникают процессы смятия и сдвига, в результате чего появляются движущая сила (касательная сила тяги  $F_k$ ) и момент сопротивления движению за счет смятия грунта опорной поверхностью колеса и образования колеи.

Авторами статьи исследованы зависимости, определяющие движущую силу и силу сопротивления движению за счет образования колеи.

### Активные и реактивные силы и моменты, приложенные к ведущему колесу

Рассмотрим схему приложения активных и реактивных сил и моментов [1–4] к ведущему колесу, движущемуся по горизонтальной поверхности грунта в неустановившемся режиме при приложении к оси колеса крутящего момента  $M_k$ , нормальной нагрузки  $G$  и реактивной силы  $F_{кр}$  от остова машины. В соответствии с рис. 1, крутящий момент  $M_k$ , подводимый к оси ведущего колеса, относительно точки  $O$  определяется по формуле

$$M_k = X \cdot r_d + Y \cdot c \pm M_{ин}, \quad (1)$$

где  $X$  – горизонтальная составляющая (движущая сила) реакции грунта;  $Y$  – вертикальная составляющая реакции грунта, равная вертикальной приложенной нагрузке;  $M_{ин}$  – момент инерции вращающихся масс;  $r_d$ ,  $c$  – координаты

приложения реакции грунта;  $r_d$  – динамический радиус колеса.

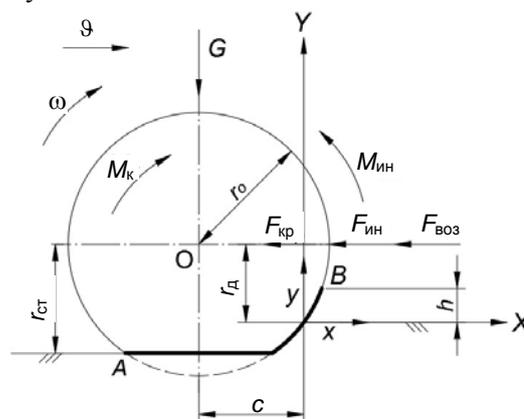


Рис. 1. Схема активных и реактивных сил, приложенных к ведущему колесу

Fig. 1. Scheme of active and reactive forces exerted to driving wheel

Выражение (1) – уравнение моментов, показывающее, что крутящий момент, подводимый к оси ведущего колеса,  $M_k$  равен сумме трех моментов:

момента от движущей силы  $X \cdot r_d$ ;

сопротивления  $Y \cdot c$ , образующегося за счет смятия грунта движителем и создания колеи;

момента инерции  $M_{ин} = I \frac{d\omega}{dt}$ , возникающего

при неравномерном относительном движении ( $I$  – момент инерции масс;  $\omega$  – угловая скорость).

Если разделить (1) на динамический радиус колеса  $r_d$ , то получим тяговый баланс ведущего колеса

$$\frac{M_k}{r_d} = X + Y \frac{c}{r_d} + \frac{M_{ин}}{r_d}, \quad (2)$$

где  $\frac{M_k}{r_d}$  – касательная сила тяги;  $X$  – движущая

сила;  $Y = G$  – нормальная нагрузка;  $\frac{c}{r_d} = f$  –

коэффициент сопротивления качению;  $Y \frac{c}{r_d} = F_{\text{спр}}$  – сила сопротивления качению, возникающая за счет смятия грунта движителем и образования колеи;  $\frac{M_{\text{ин}}}{r_d}$  – инерционная сила, возникающая за счет относительного движения.

Баланс сил ведущего колеса имеет вид

$$F_k = X + F_{\text{спр}} + \frac{M_{\text{ин}}}{r_d}. \quad (3)$$

В свою очередь

$$X = F_{\text{кр}} + F_{\text{ин}} + F_{\text{воз}}, \quad (4)$$

где  $F_{\text{кр}}$  – реакция от остова машины;  $F_{\text{ин}} = m \frac{dv}{dt}$  – сила инерции при постоянном движении ( $m$  – масса колеса;  $v$  – скорость поступательного движения);  $F_{\text{воз}}$  – аэродинамическое сопротивление.

После подстановки (3) в (4) тяговый баланс примет вид

$$F_k = F_{\text{кр}} + F_{\text{ин}} + F_{\text{воз}} + F_{\text{спр}} + \frac{M_{\text{ин}}}{r_d}. \quad (5)$$

Умножив правую и левую части уравнения (5) на скорость поступательного движения  $v$ , получим баланс мощности, подводимой к ведущему колесу:

$$P_k = P_{\text{кр}} + P_{\text{ин}} + P_{\text{воз}} + P_{\text{спр}} + P_{\omega},$$

где  $P_{\text{спр}}$  – мощность, идущая на преодоление сопротивления движению за счет образования колеи;  $P_{\text{воз}}$  – то же сопротивление воздуху;  $P_{\text{ин}}$ ,  $P_{\omega}$  – мощности, преобразуемые в энергию поступательного и вращательного движений;  $P_{\text{кр}}$  – оставшаяся мощность, расходуемая на выполнение полезной работы.

Согласно (5), мощность, подводимая к оси ведущего колеса, равна сумме мощностей, идущих на преодоление.

Проведенный авторами анализ процесса взаимодействия ведущего колеса с грунтовой поверхностью достаточно полный и отвечает реальным условиям, описанным в [3, 5]. Поэтому для исследования данного процесса используем зависимости, предложенные В. В. Гуськовым.

### Сила сопротивления качению

Для определения силы сопротивления качению  $F_{\text{спр}}$  за счет образования колеи существует много зависимостей. Самая простая из них –

$F_{\text{спр}} = fG$ , однако она не позволяет проводить оптимизацию системообразующих параметров колеса, таких как: оптимальная  $G_{\text{опт}}$  и предельная  $G_{\text{lim}}$  нагрузки, диаметр  $D$ , ширина  $b$  и давление воздуха  $P_w$ , коэффициент полезного действия колеса и ряд других параметров. По предложению [6, 7], силу сопротивления качению  $F_{\text{спр}}$  целесообразно определять из условий движения ведомого колеса (рис. 2).

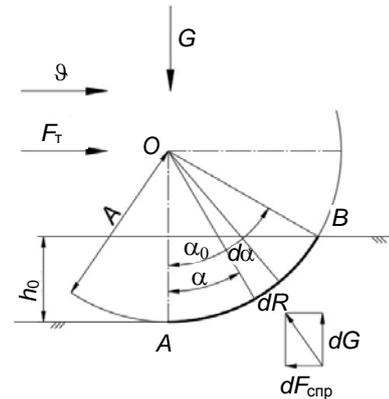


Рис. 2. Схема взаимодействия ведомого колеса с грунтовой поверхностью

Fig. 2. Scheme of interaction for driven wheel with soft surface

При этом принимаются следующие допущения.

1. Элементарные нормальные реакции грунта  $dR$  направлены перпендикулярно опорной поверхности колеса и определяются законом, предложенным в [2], а именно:

$$\sigma = \sigma_0 \text{th} \frac{k}{\sigma_0} h, \quad (6)$$

где  $\sigma$  – напряжение смятия;  $\sigma_0$  – несущая способность грунтовой поверхности;  $k$  – коэффициент объемного смятия;  $h$  – глубина колеи.

2. Длина сложной опорной поверхности, согласно гипотезе М. Г. Беккера [2], замещается поверхностью жесткого колеса диаметром  $D_{\text{пр}}$  (рис. 3), определяемым по формуле

$$D_{\text{пр}} = D_0 + \frac{h_{\text{ш}}}{h} (D_0 - 2h - h_{\text{ш}}), \quad (7)$$

где  $D_0$  – номинальный диаметр реального колеса;  $h_{\text{ш}}$  – деформация шины под влиянием нормальной нагрузки;  $h$  – глубина колеи.

Поскольку в (7) имеются две неизвестные ( $h$  и  $h_{\text{ш}}$ ), то в [3] предложена эмпирическая формула, учитывающая влияние нормальной нагрузки  $G$  и сжатия грунта  $\sigma_0$ :

$$D_{np} = D_0 \left( 1 + \frac{10G}{\sigma_0 D_0} \right). \quad (8)$$

Многочисленные эксперименты [2] подтвердили адекватность этой формулы условиям процесса взаимодействия реального колеса с грунтовой поверхностью.

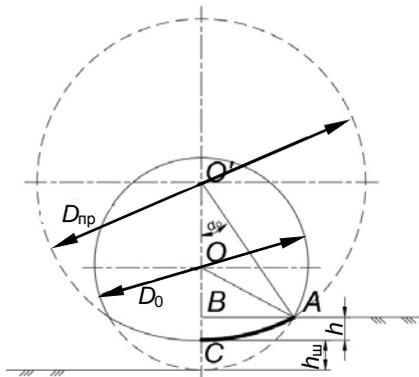


Рис. 3. Замена диаметра эластичного колеса  $D_0$  диаметром жесткого колеса  $D_{np}$

Fig. 3. Change of elastic wheel diameter  $D_0$  by rigid gear diameter  $D_{np}$

3. Колесо движется по горизонтальной поверхности в установившемся режиме. Как показали расчеты, указанные допущения не снижают их точность и адекватность реальным условиям (возможная ошибка – не более 5 %). При схеме, приведенной на рис. 2, и принятых допущениях [5, 8] сила сопротивления качению  $F_{сnp}$  и глубина  $h$  колеи определяются из следующих уравнений:

$$F_{сnp} = \int_0^{h_0} b \sigma_0 \operatorname{th} \left( \frac{k}{\sigma_0} r_{np} \ln \left( \frac{r_{np} - h}{r_{np} - h_0} \right) \right) dh; \quad (9)$$

$$G = \int_0^{h_0} b \sigma_0 \frac{r_{np} - h}{\sqrt{2r_{np} h - h^2}} \operatorname{th} \left( \frac{k}{\sigma_0} r_{np} \ln \left( \frac{r_{np} - h}{r_{np} - h_0} \right) \right) dh, \quad (10)$$

где  $b$  – ширина колеса;  $r_{np}$  – приведенный радиус колеса,  $r_{np} = \frac{D_{np}}{2}$ .

Приведенные уравнения не подлежат точному аналитическому решению. Поэтому для упрощения таких решений принимали ряд допущений, которые позволяли проводить расчеты по следующим формулам:

$$F_{сnp} = 0,5G \sqrt[3]{\frac{G}{kbD_{np}^2}};$$

$$h = \sqrt[3]{\frac{G^2}{k^2 b^2 D_{np}}}.$$

Однако расчеты по этим формулам давали значительные расхождения с реальными значениями. Поэтому авторы разработали новый алгоритм расчета (9) и (10), заключающийся в следующем. Вначале методом постепенного приближения  $h_j \rightarrow h_0$  при заданном  $G$  (задавались различные значения  $h$  – в пределах до  $h_0$ ) решали уравнение (10), которое заканчивали при значении  $h$ , соответствующем  $G$ . Затем из (9) определяли  $F_{сnp}$ . Решение этих уравнений представлено на рис. 4 для условий движения реального колеса (шина 18.4L-30;  $D_0 = 1,52$  м;  $b_0 = 0,47$  м;  $P_w = 14$  кПа) по горизонтальной поверхности стерни суглинка нормальной влажности ( $W = 18\%$ ;  $\sigma_0 = 2,18 \cdot 10^6$ ;  $k = 0,057 \cdot 10^6$  Н/м<sup>3</sup>).

На графике рис. 4 представлены зависимости  $F_{сnp}$  и  $h$  от нормальной нагрузки, которые позволяют оптимизировать параметры ведущего колеса, т. е. определить при заданных размерах оптимальную  $G_{opt}$  и максимальную  $G_{lim}$  нагрузки.

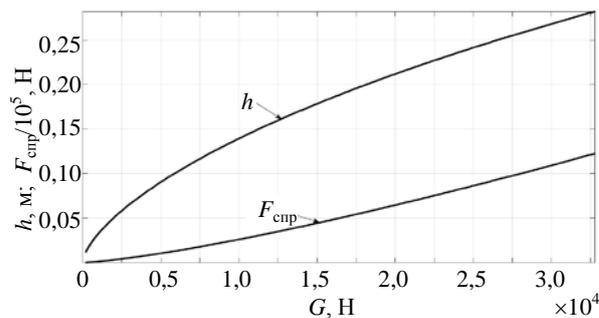


Рис. 4. Зависимость  $F_{сnp}$  и  $h$  от  $G$

Fig. 4. Dependence of  $F_{сnp}$  and  $h$  on  $G$

### Касательная сила тяги

Как было указано ранее, касательная сила тяги  $F_k$  равна сумме реакций  $X$  грунта (рис. 1), направленных в сторону движения колеса, т. е. она является потенциальной движущей силой, которую может развить ведущее колесо при заданных условиях движения. Для определения  $F_k$  существует много математических зависимостей, наиболее простая из которых –  $F_k = \varphi G$ , где  $\varphi$  – коэффициент сцепления колеса с опорной поверхностью. Коэффициент  $\varphi$  зависит от механического состава и структуры грунта, его физических свойств, сопротивления грунта сдвигу и срезу, а также от параметров колеса. Чтобы определить  $F_k = f(G, D, b, M_k, \dots, W, \sigma_0, k, k_\tau)$ , воспользуемся схемой и уравнениями, предложенными в [8–10], которые позволяют оценить влияние каждого из перечисленных факторов на  $F_k$  (рис. 5).

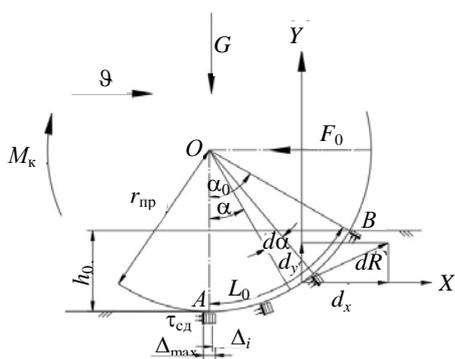


Рис. 5. Схема взаимодействия ведущего колеса с грунтом

Fig. 5. Scheme of interaction for driving wheel with ground

В основе этой методики лежит положение о том, что сдвиг и срез грунтовых кирпичей, зажатых между грунтозацепами, происходят постепенно, т. е. от первого  $\Delta_1$  до последнего  $\Delta_i$ , и зависят от буксования колеса  $\delta$ . Наибольшие сдвиг и срез грунтового кирпича происходят при выходе последнего из зацепления, при этом он равен  $\Delta_{\max} = \delta L_{\text{пр}}$ , где  $L_{\text{пр}}$  – приведенная опорная часть колеса, т. е. линия AB на рис. 5.

При расчетах принимали схему рис. 3, когда реальное колесо заменяется жестким с приведенным диаметром  $D_{\text{пр}}$

$$L_{\text{пр}} = r_{\text{пр}} \arctg \sqrt{\frac{2r_{\text{пр}}h - h^2}{r_{\text{пр}} - h}} + \sqrt{2r_{\text{пр}}h}. \quad (11)$$

Тогда  $F_{\text{к}}$  определяли при помощи (11)–(13):

$$F_{\text{к}} = \int_0^{\alpha_0} br_{\text{пр}} f_{\text{ск}} q_x \cos \alpha \left( 1 + \frac{f_{\text{н}}}{\text{ch} \frac{br_{\text{пр}} \alpha}{k_{\tau}}} \right) \text{th} \left( \frac{br_{\text{пр}} \alpha}{k_{\tau}} \right) d\alpha; \quad (12)$$

$$G = \int_0^{\alpha_0} br_{\text{пр}} f_{\text{ск}} q_x \sin \alpha \left( 1 + \frac{f_{\text{н}}}{\text{ch} \frac{br_{\text{пр}} \alpha}{k_{\tau}}} \right) \text{th} \left( \frac{br_{\text{пр}} \alpha}{k_{\tau}} \right) d\alpha. \quad (13)$$

При этом использовали зависимость между напряжением сдвига  $\tau_{\text{сд}}$  от деформации  $\Delta$ , предложенную в [2]:

$$\tau_{\text{сд}} = f_{\text{ск}} q_x \left( 1 + \frac{f_{\text{н}}}{\text{th} \frac{\Delta}{k_{\tau}}} \right) \text{th} \frac{\Delta}{k_{\tau}}. \quad (14)$$

В уравнениях (11)–(14):  $b$  – ширина колеса;  $r_{\text{пр}}$  – приведенный радиус колеса;  $h$  – глубина колеи;  $\alpha_0$  – угол обхвата опорной поверхности;  $q_x$  – давление колеса на грунт;  $f_{\text{ск}}$ ,  $f_{\text{н}}$  – коэффициент трения скольжения и покоя;  $k_{\tau}$  – то же деформации грунта.

При решении (11)–(14), принимая  $q_x = q_{\text{ср}} = \frac{G}{bL}$ ,  $\Delta = \delta L_{\text{пр}}$ ,  $L_{\text{пр}} = r_{\text{пр}} \alpha_0$  и  $\alpha_0 = \arccos \frac{r_{\text{пр}} - h}{r_{\text{пр}}}$ , получаем упрощенную формулу

$$F_{\text{к}} = \frac{f_{\text{ск}} k_{\tau} G}{\delta L_{\text{пр}}} \left( \text{Inch} \frac{\delta L_{\text{пр}}}{k_{\tau}} - f_{\text{н}} \left( \frac{1}{\text{ch} \frac{\delta L_{\text{пр}}}{k_{\tau}}} - 1 \right) \right). \quad (15)$$

Однако расчеты по (15) приводят к значительным погрешностям. Поэтому более точным решением будет уравнение, в котором  $q_x$  и  $\delta$  изменяются в пределах:

$$q_x \rightarrow 0 \dots q_{\text{max}};$$

$$\delta \rightarrow 0 \dots 1,$$

где  $q_{\text{max}} = 2q_{\text{ср}}$ ;  $q_x = 2q_{\text{ср}} \frac{x}{L_{\text{пр}}}$ ;  $L_{\text{пр}} \rightarrow 0 \dots L_{\text{пр}}$ .

Уравнение (15) примет вид

$$F_{\text{к}} = \int_0^{L_{\text{пр}}} \int_0^{2q_{\text{ср}}} \frac{2bf_{\text{ск}}q_{\text{ср}}x}{L_{\text{пр}}} \left( 1 + \frac{f_{\text{н}}}{\text{ch} \frac{\delta x}{k_{\tau}}} \right) \text{th} \frac{\delta x}{k_{\tau}} dq_x dx. \quad (16)$$

Решение (16) в функции от буксования  $\delta$  при различных нормальных нагрузках при качении колеса 18.4L-30 по горизонтальной поверхности стерни суглинка приведено на рис. 6. При этом  $f_{\text{ск}} = 0,76$ ;  $f_{\text{н}} = 0,78$ .

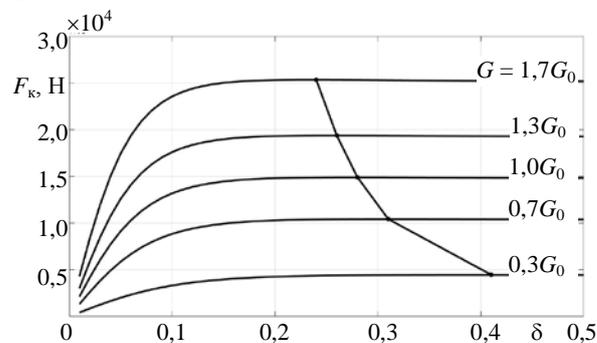

 Рис. 6. Зависимость  $F_{\text{к}}$  от  $\delta$ 

 Fig. 6. Dependence  $F_{\text{к}}$  on  $\delta$ 

Из рис. 6 видно, что максимальная сила тяги  $F_{\text{к}}$  для разной весовой нагрузки  $G_0$  развивается при различном буксовании  $\delta$ : при больших весовых нагрузках буксование меньше, при меньших – больше. Расчетные значения подтверждены результатами испытаний.

### Оптимизация параметров ведущего колеса

Выражения (9), (10), (16) позволяют оценить тягово-сцепные свойства ведущих колес

проектируемого трактора. В качестве критерия оптимизации при выборе параметров колеса и оптимальных и предельных нагрузок использовали коэффициент полезного действия колеса  $\eta_k$

$$\eta_k = \eta_0 \eta_{спр} = (1 - \delta_{F_{кmax}}) \left( 1 - \frac{F_{спр}}{F_{кmax}} \right), \quad (17)$$

где  $\eta_0$  – КПД, учитывающий буксование;  $\delta_{F_{кmax}}$  – буксование при  $F_{кmax}$  (рис. 6);  $F_{кmax}$  – максимальная сила тяги.

При этом можно решать две задачи:

1) при заданных параметрах колеса определить оптимальную  $G_{опт}$  и предельную  $G_{lim}$  нагрузки:

$$\frac{d\eta_k}{dG_{опт}} = 0; \quad \frac{d\eta_k}{dG_{lim}} = 0; \quad (18)$$

2) при заданном значении вертикальной нагрузки  $G$  определить оптимальные параметры колеса

$$\frac{d\eta_k}{d(D, b, P_w)} = 0. \quad (19)$$

Решение первой задачи (уравнение (18)) приведено на рис. 7: при заданных параметрах колеса  $D, b, P_w$  найти оптимальное  $G_{опт}$  и предельное  $G_{lim}$  значения вертикальных нагрузок. Из рис. 7 видно, что для шины 18.4L-30 оптимальная нагрузка составляет  $G_{опт} = 10229$  Н.

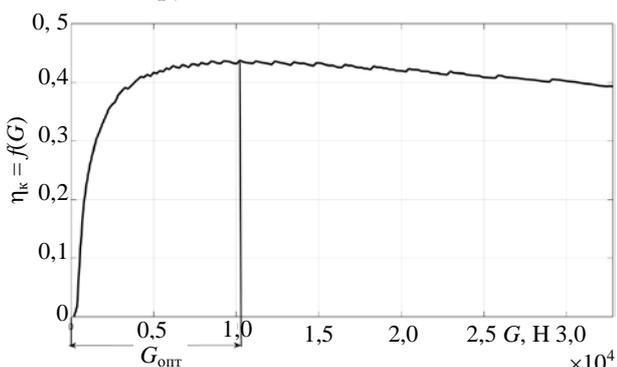


Рис. 7. Определение зависимости  $\eta_k = f(G)$

Fig. 7. Determination of dependence  $\eta_k = f(G)$

### ВЫВОД

1. Полученные уравнения (9), (10), (16) позволяют более точно (адекватно реальным) определить тягово-сцепные свойства ведущих колес проектируемого трактора, а также оптимизировать необходимые параметры колеса при заданной нагрузке или же при заданных

параметрах колеса определить оптимальную и предельную нагрузки. В качестве критерия оптимизации следует принимать коэффициент полезного действия колеса.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Агейкин, Я. С. Проходимость автомобилей / Я. С. Агейкин. М.: Машиностроение, 1981. 232 с.
2. Беккер, М. Г. Введение в теорию систем местность – машина / М. Г. Беккер; пер. с англ. В. В. Гуськова. М.: Машиностроение, 1973. 519 с.
3. Гуськов, В. В. Тракторы. Часть II: Теория / В. В. Гуськов. Минск: Вышэйш. шк., 1977. 384 с.
4. Динамика системы дорога – шина / под общ. ред. А. А. Хачатурова. М.: Машиностроение, 1976. 536 с.
5. Ксиневиц, И. П. Ходовая система почва – урожай / И. П. Ксиневиц, В. А. Скотников, М. И. Ляско. М.: Агропромиздат, 1985. 304 с.
6. Многоцелевые гусеничные и колесные машины. Теория / В. П. Бойков [и др.]; под общ. ред. В. П. Бойкова. Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2012. 543 с.
7. Неймарк, Ю. И. Динамика неголономных систем / Ю. И. Неймарк, Н. А. Фуфаев. М.: Наука, 1967. 520 с.
8. Силаев, А. А. Спектральная теория поддресоривания транспортных машин / А. А. Силаев. М.: Машиностроение, 1971. 241 с.
9. Тракторы: теория / В. В. Гуськов [и др.]; под общ. ред. В. В. Гуськова. М.: Машиностроение, 1988. 376 с.

Поступила 18.05.2016

Подписана в печать 03.11.2016

Опубликована онлайн 30.01.2017

### REFERENCES

1. Ageykin Ya. S. (1981) *Off-Road Capability of Vehicles*. Moscow, Mashinostroyeniye. 232 (in Russian).
2. Bekker M. G. (1969) *Introduction to Terrain-Vehicle Systems*. Michigan, the University of Michigan Press, Ann Arbor. 846.
3. Guskov V. V. (1977) *Tractors. Part II. Theory*. Minsk, Vysheyshaya Shkola. 384 (in Russian).
4. Khachaturov A. A., Afanasev V. L., Vasilev V. S., Goldin G. V., Dodonov B. M., Zhigarev V. P., Koltsov V. I., Iurik V. S., Iakovlev E. I. (1976) *Dynamics of Road – Tire System – the Car – the Driver*. Moscow, Mashinostroyeniye. 536 (in Russian).
5. Ksinevich I. P., Skotnikov V. A., Lyasko M. I. (1985) *Soil – Harvest Propulsion System*. Moscow, Agropromizdat Publ. 304 (in Russian).
6. Boikov V. P., Guskov V. V., Korobkin V. A., Ravino V. V., Uss I. N. (2012) *Multi-Functional Tracked and Wheeled Vehicles. Theory*. Minsk, Novoye Znanie. Moscow, INFRA-M. 543 (in Russian).
7. Neymark Yu. I., Fufaev N. A. (1967) *Dynamics of Non-Holonomic Systems*. Moscow, Nauka. 520 (in Russian).
8. Silaev A. A. (1971) *Spectral Theory of Transport Machine Cushioning*. Moscow, Mashinostroyeniye. 241 (in Russian).
9. Guskov V. V., Velev N. N., Atamanov Iu. E., Bocharov N. F., Ksinevich I. P., Solonskii A. S. (1988) *Tractors: Theory*. Moscow, Mashinostroyeniye. 376 (in Russian).

Received: 18.05.2016

Accepted: 03.11.2016

Published online: 30.01.2017