

НАУКА и ТЕХНИКА

Международный
научно-технический журнал



Science
and Technique V. 16, No 5
(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

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

Машиностроение

- Филонов И. П., Козерук А. С., Мальпика Д. Л.,
Филонова М. И., Кузнецик В. О.,
Диас Гонсалес Р. О.**
Математическое моделирование
технологического оборудования
для обработки оптических деталей 367
- Данильчик С. С., Шелег В. К.**
Оптимальные параметры асимметричных
колебаний инструмента для стружкодробления
при точении вязких конструкционных сталей ... 376
- Вершина Г. А., Быстренков О. С.**
Способы организации рабочего процесса
газодизельного двигателя 383
- Алексеев Ю. Г., Королев А. Ю., Паршутто А. Э.,
Нисс В. С.**
Электролитно-плазменная обработка
при нестационарных режимах в условиях
высокоградиентного электрического поля 391
- Минченя В. Т., Савченко А. Л., Минченя Н. Т.**
Оценка механических характеристик
эндопротезов сосудов 400

CONTENTS

Mechanical Engineering

- Filonov I. P., Kozeluk A. S., Malpika D. L.,
Filonova M. I., Kuznechik V. O.,
Dias Gonsalez R. O.**
Mathematical Simulation
of Technological Equipment
for Processing of Optical Parts 367
- Danilchik S. S., Sheleh V. K.**
Optimal Parameters of Asymmetrical
Oscillations of Tool for Chip Crushing
while Turning Toughened Structural Steel 376
- Vershina G. A., Bystrenkov O. S.**
Methods for Organization of Working Process
for Gas-Diesel Engine 383
- Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Parshuto A. E.,
Niss V. S.**
Electrolyte-Plasma Treatment
under Non-Stationary Modes
in High-Gradient Electric Field 391
- Minchenya V. T., Savchenko A. L., Minchenya N. T.**
Assessment of Mechanical Characteristics
of Vascular Endo-Prostheses 400

Артюхина Н. К., Пероса Л., Самбрано Л. Афокальные системы, составленные из зеркальных внеосевых параболоидов	407
Чумаченко И. В., Давидич Ю. А., Галкин А. С., Давидич Н. В. Оценка качества перевозки пассажиров городским транспортом при различном количестве транспортных средств, работающих на маршруте	415
Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. В., Асташинский, В. М., Храмцов П. П., Черник М. Ю., Углов В. В., Шиманский В. И., Черенда Н. Н., Соболевский С. Б. Многослойные композиционные плазменные покрытия на элементах экранной защиты на основе диоксида циркония	422
Карпунин И. И. Щелочная варка древесины в присутствии хинона и его влияние на качество целевого продукта, используемого для производства упаковки	432
Доля К. В. Формализация гравитационной модели для расчета параметров междугородних пассажирских корреспонденций	437
Капский Д. В., Касьяник В. В., Евтух А. В., Капцевич О. А. Оценка эффективности движения транспортных потоков на основе обработки навигационных данных о движении транспортных средств	444

Artiukhina N. K., Perosa L., Zambrano L. Afocal Systems Formed by Mirror Off-Axis Paraboloid	407
Chumachenko I. V., Davidich Yu. A., Galkin A. S., Davidich N. V. Quality Assessment of Passenger Transportation by Urban Transport while Using Various Number of Fixed-Route Transport Facilities	415
Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Hramtsov P. P., Cernik M. Y., Uglov V. V., Chimanskiy V. I., Cerenda N. N., Sobolewski S. B. Multilayer Composite Plasma Coatings on Screen Protection Elements Based on Zirconium Dioxide	422
Karpunin I. I. Alkaline Wood Pulping with Quinone Presence and its Influence on Quality of Desired Product Used for Packing Production	432
Dolya C. V. Gravity Model Formalization for Parameter Calculation of Intercity Passenger Transport Correspondence	437
Kapskiy D. V., Kasyanik V. V., Evtuh A. V., Kaptsevich O. A. Evaluation of Transport Flow Efficiency on the Basis of Traffic Movement Data	444

**Главный редактор
Борис Михайлович Хрусталеv**

Редакционная коллегия

*В. В. БАБИЦКИЙ (Белорусский национальный
технический университет, Минск, Республика
Беларусь),*
*В. Г. БАШТОВОЙ (Белорусский национальный тех-
нический университет, Минск, Республика Бе-
ларусь),*
*А. В. БЕЛЫЙ (Физико-технический институт На-
циональной академии наук Беларуси, Минск,
Республика Беларусь),*
*В. П. БОЙКОВ (Белорусский национальный техни-
ческий университет, Минск, Республика Бе-
ларусь),*
*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 тех-
нический университет, Минск, Республика Бе-
ларусь),*

**Editor-in-Chief
Boris M. Khroustalev**

Editorial Board

*V. V. BABITSKY (Belarusian National Technical Uni-
versity, 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 Univer-
sity, 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 Uni-
versity, Minsk, Republic of Belarus),*

К. В. ДОБРЕГО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
 П. И. ДЯЧЕК (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
 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),

K. V. DOBREGO (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
 P. I. DYACHEK (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
 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 (Национальная академия наук 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 (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. Guryanchyk

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 29.09.2017. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 150 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

Математическое моделирование технологического оборудования для обработки оптических деталей

Доктора техн. наук, профессора И. П. Филонов¹⁾, А. С. Козерук¹⁾, асп. Д. Л. Мальпика¹⁾, кандидаты техн. наук, доценты М. И. Филонова¹⁾, В. О. Кузнецик¹⁾, магистрант Р. О. Диас Гонсалес¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

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

Реферат. Описана функциональная схема станка для одновременной абразивной обработки линз с пологими высокоточными исполнительными поверхностями, позволяющего гибко и в широких пределах управлять процессом формообразования посредством изменения таких наладочных параметров, как частота вращения инструментов и заготовки, величина амплитуды колебательных движений инструментов, их диаметров и количество двойных ходов в минуту. В процессе обработки на данном станке рабочее усилие направлено по нормали к обрабатываемой поверхности, в результате чего представляется возможным ускорить процесс формообразования оптических деталей, что способствует уменьшению локальных погрешностей на их исполнительных поверхностях. Рассмотрена структура исполнительного механизма станка, сообщаящего переносное движение инструментам, состоящего из вращательных и поступательных кинематических пар, образующих шарнирный четырехзвенник, кривошип которого является ведущим звеном. Угол поворота этого звена выбран в качестве обобщенной координаты исполнительного механизма. Установлена связь между обобщенной координатой и положениями звеньев исполнительного механизма станка, позволившая получить аналитическую зависимость между движениями входного и выходного звеньев механизма с учетом его кинематической передаточной функции, представляющей собой отношение угловой скорости выходного звена к угловой скорости входного. На основе анализа геометрических параметров возвратно-вращательного движения верхнего звена предложенного станка получено выражение для расчета длины шатуна исполнительного механизма, которая обеспечивает симметричное положение центра упомянутого звена относительно оси симметрии нижнего звена. Поскольку в станке для двусторонней обработки линз величина амплитуды колебательного движения выходного звена исполнительного механизма регулируется посредством изменения длины его входного звена (кривошипа), установлена аналитическая связь между этими геометрическими параметрами, дающая возможность целенаправленно изменять интенсивность обработки в центральной или краевой зоне детали в зависимости от технологической наследственности заготовки с точки зрения распределения по ее поверхности подлежащего съему припуска.

Ключевые слова: технологическое оборудование, исполнительный механизм, линза, абразивная обработка, математическое моделирование

Для цитирования: Математическое моделирование технологического оборудования для обработки оптических деталей / И. П. Филонов [и др.] // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 5. С. 367–375. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-367-375

Mathematical Simulation of Technological Equipment for Processing of Optical Parts

I. P. Filonov¹⁾, A. S. Kozeruk¹⁾, Y. L. Malpica¹⁾, M. I. Filonova¹⁾, V. O. Kuznechik¹⁾, R. O. Dias Gonzalez¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper describes a functional scheme of a machine-tool for simultaneous abrasive machining of lenses with shallow high-accuracy executive surface. The machine-tools permits flexibly and within long range to control shape-forma-

Адрес для переписки
Козерук Альбин Степанович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 22,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-74-91
kipp@bntu.by

Address for correspondence
Kozeruk Albin S.
Belarusian National Technical University
22 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-74-91
kipp@bntu.by

tion process through changing such adjustment parameters as tool and rough workpiece frequency rotation, amplitude value of tool oscillatory motion, their diameters and number of double strokes per minute. While using the given machine-tool for machining process an operating force is directed along normal to the working surface and due to this there is a possibility to accelerate a shape-formation process of optical parts that leads to reduction of local errors on their executive surfaces. The paper considers a structure of the executive machine-tool mechanism which transfers translational motion to the tools and consists of rotational and rectilinear kinematic pairs forming a four-bar linkage and its crank is a guide link. A turning angle of the link is selected as a generalized coordinate of the executive mechanism. A relationship between the generalized coordinates and link positions of the executive machine-tool mechanism has been established in the paper and it permits to obtain analytical dependence between motions of input and output mechanism links with due account of its kinematic transfer function which represents in itself a ratio of angular output link speed to an angular velocity of the input link. An analysis of geometric parameters for backward-rotational motion of the top link in the proposed machine-tool has made it possible to obtain an expression to calculate a rod length of the executive mechanism which ensures symmetrical center position of the above-mentioned link relative to a symmetry axis of the bottom link. As an amplitude value of oscillatory motion for an output link in the executive mechanism is regulated in the machine-tool for two-sided lens machining while changing length of its input link (crank) an analytical relationship has been established between these geometric parameters and the relationship provides a possibility purposefully to change a machining intensity in the central or edge zone of a part according to technological blank heredity in the context of allowance which is to be removed and which is distributed along its surface.

Keywords: technological equipment, executive mechanism, lens, abrasive processing, mathematical simulation

For citation: Filonov I. P., Kozeluk A. S., Malpika D. L., Filonova M. I., Kuznechik V. O., Dias Gonzalez R. O. (2017) Mathematical Simulation of Technological Equipment for Processing of Optical Parts. *Science and Technique*. 16 (5), 367–375. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-367-375 (in Russian)

Введение

По существующей технологии обработки оптических деталей (в том числе линз) в условиях свободного притирания их поочередно закрепляют за исполнительные поверхности на металлическое приспособление с помощью наклеенного вещества (наиболее часто с помощью наклеенной смолы специального состава). Из-за различных температурных коэффициентов линейного расширения металла, смолы и стекла происходит деформация заготовки оптической детали, что в конечном итоге приводит к возникновению несимметричных и поэтому некомпенсируемых локальных погрешностей на ее обработанной поверхности. Во избежание отмеченного предложен способ одновременной двусторонней обработки линз [1], исключаяющей их крепление за рабочие поверхности, и станок для реализации этого способа [2]. Станок состоит из двух секций, каждая из которых обеспечивает независимое и гибкое регулирование ее наладочных параметров в широких пределах при закреплении заготовки линзы за боковую нерабочую поверхность.

Станок для двусторонней обработки линз

Принципиальная схема станка для одновременной двусторонней обработки линз приведена на рис. 1. Станок работает следующим образом. Линзу 7 неподвижно закрепляют в сепаратор 6, на ее исполнительные поверхности устанавли-

вают инструмент 8 и верхний инструмент 10 и последовательно включают приводы вращения 4, 30, 31, 9, 11. Крутящий момент от первого из них через вал 3, ведущее 2 и ведомое 5 зубчатые колеса и сепаратор 6 вызывает вращение линзы, а крутящий момент от приводов вращения 30 и 31 через валы инструментов 28 и 29 сообщает вращение инструменту 8 и верхнему инструменту 10.

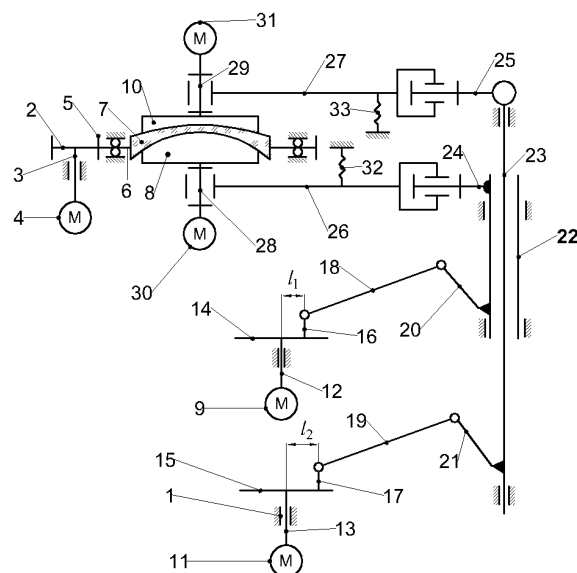


Рис. 1. Кинематическая схема станка для двусторонней обработки линз

Fig. 1. Kinematic scheme of machine-tool for two-sided lens processing

Крутящие моменты от приводов вращения 9 и 11 соответственно через входной вал 12 и до-

полнительный входной вал 13, дополнительный кривошипный диск 14 и кривошипный диск 15, палец 16 и дополнительный палец 17, шатуны 18 и 19, рычаги 20 и 21, вал штанги 22 и дополнительный вал штанги 23, штанги 24 и 25, вращающиеся части штанги 26 и 27, валы инструментов 28 и 29 вызывают возвратно-вращательное перемещение инструмента 8 и верхнего инструмента 10 по исполнительным поверхностям линзы.

При управлении величиной съема припуска в той или иной зоне исполнительных поверхностей линзы в процессе ее обработки производят независимое регулирование следующих наладочных параметров станка: скорости вращения линзы; амплитуды возвратно-вращательных перемещений инструмента 8 и верхнего инструмента 10 по поверхностям линзы, что достигается регулированием расстояний l_1 и l_2 между осями симметрии пальца 16 и дополнительного пальца 17, с одной стороны, и соответственно входного вала 12 и дополнительного входного вала 13, с другой стороны; количества двойных ходов в минуту инструмента 8 и верхнего инструмента 10, что обеспечивается изменением скорости вращения входного вала 12 и дополнительного входного вала 13 соответственно; скорости вращения инструментов и рабочего усилия посредством изменения жесткости пружин 32 и 33 [3].

Звенья 14 и 15, 18 и 19, 20 и 21 образуют плоские механизмы, называемые кривошипно-шатунными или шарнирными четырехзвенниками [4]. При этом кривошипы 14, 15 являются ведущими звеньями и их удобно выбрать в качестве входных. Если известен закон движения кривошипа в виде функции $\varphi_2 = \varphi_2(t)$, где φ_2 — угол поворота кривошипа, то остальные звенья будут двигаться вполне определенным образом, зависящим от $\varphi_2(t)$. Таким образом, угол φ_2 однозначно определяет положение звеньев шарнирного четырехзвенника и поэтому может быть выбран в качестве обобщенной координаты этого механизма.

Механизмы шарнирных четырехзвенников работают следующим образом. Вращательное движение кривошипов 14 и 15 через шатуны 18 и 19 преобразуются в возвратно-вращательное движение звеньев 20 и 21 и рычагов (штанг) 26 и 27. Последние через поводки 28 и 29 вы-

зывают возвратно-вращательные перемещения инструментов 8 и 10 относительно линзы.

Отличительной особенностью предлагаемого станка по сравнению с классическим технологическим оборудованием аналогичного назначения является то, что при его реализации рабочее усилие направлено по нормали к обрабатываемой поверхности. Такая схема обработки обеспечивается тем, что штанги 24, 25, установленные с возможностью качания в вертикальной плоскости, снабжены вращающейся их частью 26, 27. Пространственное движение последних задается формой обрабатываемой поверхности детали, по которой скользит инструмент, копируя ее [5] и через валы инструментов 28, 29 наклоняя вращающиеся части штанг. Эти элементы, находясь в нагруженном состоянии благодаря действию пружин 32, 33, и обеспечивают гарантированное направление рабочего усилия по нормали (по радиусу) обрабатываемой сферической поверхности. Такая обработка позволяет ускорить процесс формообразования оптических деталей и способствует уменьшению локальных погрешностей на их исполнительных поверхностях, что следует из экспериментальных результатов, представленных на рис. 2.

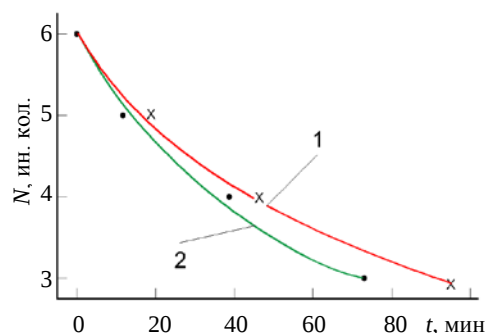


Рис. 2. Зависимость количества интерференционных колец Ньютона от времени полирования по схеме с направлением рабочего усилия по вертикали (1) и по нормали (2) к обрабатываемой поверхности

Fig. 2. Dependence of interference Newton's ring number on polishing time period according to scheme with operating force direction vertically (1) and normally (2) in respect of the machined surface

Эксперименты сводились к полированию вогнутой поверхности линзы $R = 50,34$ мм, изготовленной из оптического стекла марки К8, пенополиуретановым полировальником по клас-

сической схеме с направлением рабочего усилия по вертикали и с направлением его по нормали к обрабатываемой поверхности [6].

Точность обработки контролировали по количеству N интерференционных колец Ньютона, возникавших в воздушном промежутке между обрабатываемой и эталонной поверхностями. В качестве последней использовали так называемое пробное стекло.

Исходное количество интерференционных колец составляло $N = 6$. Полирование проводили до получения $N = 3$. Такая форма детали достигалась за 96 мин при обработке по классической схеме с вертикальным направлением рабочего усилия (рис. 2, кривая 1) и за 74 мин при его направлении по нормали (рис. 2, кривая 2). При этом локальная погрешность ΔN в первом случае составляла 0,4, а во втором 0,3 ширины интерференционного кольца.

Особенности формообразования прецизионных поверхностей в условиях свободного притирания

В соответствии с гипотезой Ф. Престона, величина съема материала в произвольно выбранной точке заготовки при ее обработке в условиях свободного притирания пропорциональна скорости скольжения притирающихся поверхностей, давлению в зоне контакта и времени формообразования [7]. Эти параметры в свою очередь определяются геометрическими, кинематическими и динамическими параметрами технологического оборудования и режимами его работы. Для финишной обработки прецизионных сферических поверхностей деталей характерно сложное распределение относительных скоростей скольжения и давления в зоне контакта. Неодинаково для различных зон сопряженных поверхностей и время обработки, что обусловлено выходом верхнего звена за край нижнего. В результате съем припуска с заготовки и изнашивание инструмента также происходят неравномерно [8]. Поэтому аналитическое определение формы обработанной поверхности детали и изношенной рабочей поверхности инструмента является сложной задачей, решение которой необходимо начинать с установления геометрических и кинематических

связей используемого технологического оборудования в процессе его математического моделирования.

Математическое описание геометрических и кинематических связей станка

При обработке в условиях свободного притирания для определения скорости скольжения v , входящей в формулу Ф. Престона, необходимо учитывать линейные скорости всех движений, совершаемых деталью и инструментом. Одно из таких движений – возвратно-вращательное перемещение инструментов 8 и 10, осуществляемое штангами 26 и 27 соответственно (рис. 1). Следовательно, закон колебательных движений последних определяет закономерность возвратно-вращательного перемещения инструментов 8 и 10. Поэтому установим аналитическое выражение, характеризующее положение штанги в горизонтальной плоскости.

Поскольку звенья 20, 22 и 28, а также 21, 23 и 29 (рис. 1) в процессе обработки не изменяют своего положения друг относительно друга и их можно рассматривать как одно звено, то для описания движения штанг 26 и 27 достаточно исследовать работу шарнирного четырехзвенника 1–15–19–21 или 1–14–18–20. Введем в рассмотрение векторы $\vec{l}_1$, $\vec{l}_2$, $\vec{l}_3$, $\vec{l}_4$ и $\vec{s}$, как это показано на рис. 3.

Для любого положения исследуемого механизма справедливы векторные равенства:

$$\vec{l}_1 + \vec{l}_2 = \vec{s}; \quad (1)$$

$$\vec{l}_3 + \vec{l}_4 = \vec{s}, \quad (2)$$

где $\vec{l}_1 - \vec{l}_4$ – длина соответствующих звеньев шарнирного четырехзвенника; $\vec{s}$ – переменный по модулю вспомогательный вектор, определяющий положение точки B' .

Из анализа рис. 1, 3 следует, что отклонение штанг 26 и 27 в горизонтальной плоскости от начального положения на угол φ_5 происходит синхронно с изменением положения звеньев 20 и 21, определяемого углом φ_4 , т. е. $\varphi_5 \sim \varphi_4$.

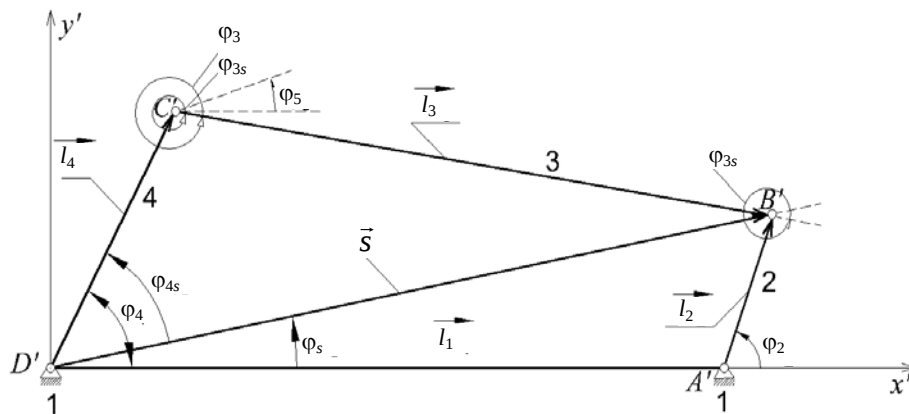


Рис. 3. Шарнирный четырехзвенник исполнительного механизма

Fig. 3. Four-bar linkage of executive mechanism

Будем учитывать, что φ_4 зависит от угла φ_2 , определяющего положение входного звена 2 (рис. 1, звенья 14 и 15). Причем при $\varphi_2 = 0$ $\varphi_4 \neq 0$. Последнее неравенство выполняется также в случае, когда $l_2 \rightarrow 0$, т. е. отсутствует движение всех звеньев станка и $\varphi_5 = 0$. Значение, которое принимает при этом φ_{4s} , в большинстве случаев составляет 90° ($\varphi_{4s} = 90^\circ$) [9]. Тогда ранее записанное тождество $\varphi_5 \sim \varphi_4$ можно представить в виде равенства

$$\varphi_5 = \varphi_4 - \varphi_{4s}. \quad (3)$$

Определим угол φ_4 . Из рис. 3 видно, что

$$\varphi_4 = \varphi_{4s} + \varphi_s. \quad (4)$$

Из треугольника $B'C'D'$ на рис. 3 можно записать

$$\varphi_{4s} = \arccos \frac{l_4^2 + s^2 - l_3^2}{2l_4s}, \quad (5)$$

а для определения угла φ_s спроецируем равенство (2) на оси координат x' и y' неподвижной системы координат с началом в точке D' :

$$l_1 + l_2 \cos \varphi_2 = s \cos \varphi_s; \quad (6)$$

$$l_2 \sin \varphi_2 = s \sin \varphi_s. \quad (7)$$

Учитывая (6) и (7), получим

$$\operatorname{tg} \varphi_s = \frac{l_2 \sin \varphi_2}{l_1 + l_1 \cos \varphi_2}, \quad (8)$$

а из треугольника $D'A'B'$ следует, что

$$s = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 + 2l_1l_2 \cos \varphi_2}. \quad (9)$$

Найдем геометрические параметры возвратно-вращательного движения инструментов 8 и 10. Это движение определяется перемещением центра C их рабочей поверхности. Положение радиус-вектора $\vec{l}_{OC}$ рассматриваемого центра в горизонтальной плоскости будем характеризовать углом ψ_C (рис. 4).

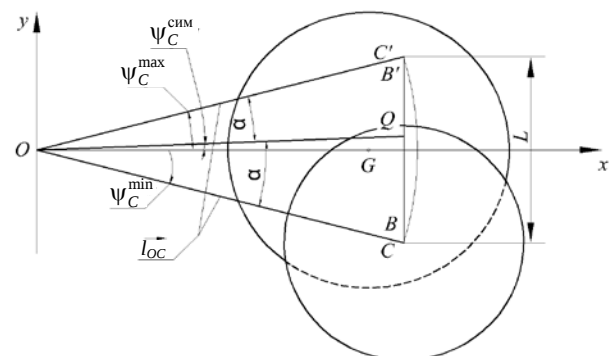

 Рис. 4. Траектория возвратно-вращательного движения центра C рабочей поверхности верхнего звена

 Fig. 4. Trajectory of backward-rotational motion of centre C in working surface of top link

В процессе обработки этот вектор и штанги 26, 27 (рис. 1) расположены в одной вертикальной плоскости, следовательно

$$\psi_C = \varphi_5. \quad (10)$$

Из рис. 4 видно, что геометрическими параметрами возвратно-вращательного движения

верхнего звена являются углы $\psi_C^{\text{сим}}$, ψ_C^{max} , ψ_C^{min} , определяющие положение его оси симметрии в крайних точках траектории L . Согласно (10) и (3), для нахождения этих углов достаточно вычислить $\varphi_4^{\text{сим}}$, φ_4^{max} , φ_4^{min} , которые характеризуют возвратно-вращательное движение звеньев 20, 21.

Как следует из рис. 5, 6, звено 4, а значит, и верхнее звено, занимают крайние положения, тогда как звенья 2 и 3 лежат на одной прямой.

Нетрудно заметить, что чем меньше длина кривошипа l_2 , тем меньше диапазон изменения угла φ_4 . При $l_2 \rightarrow 0$ φ_4 стремится к $\varphi_4^{\text{сим}}$, и если принять $l_2 = 0$, то механизм станет неподвижным, и φ_4 будет равным $\varphi_4^{\text{сим}}$, как это показано на рис. 7, из которого следует, что

$$\cos \varphi_4^{\text{сим}} = \frac{l_4^2 + l_1^2 - l_3^2}{2l_4l_1}. \quad (11)$$

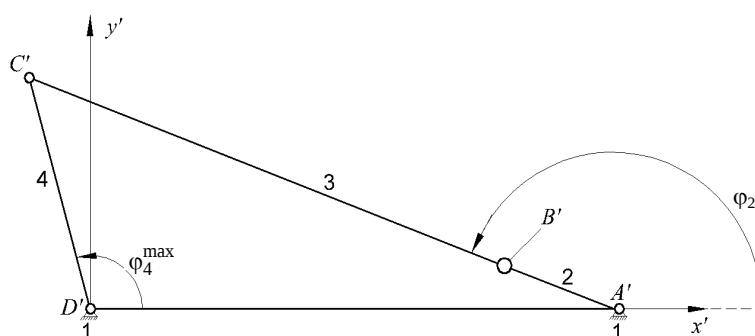


Рис. 5. К определению угла φ_4^{max}

Fig. 5. For determination of angle φ_4^{max}

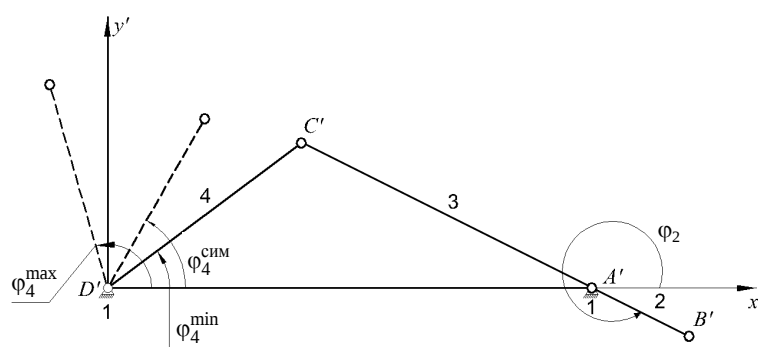


Рис. 6. К определению угла φ_4^{min}

Fig. 6. For determination of angle φ_4^{min}

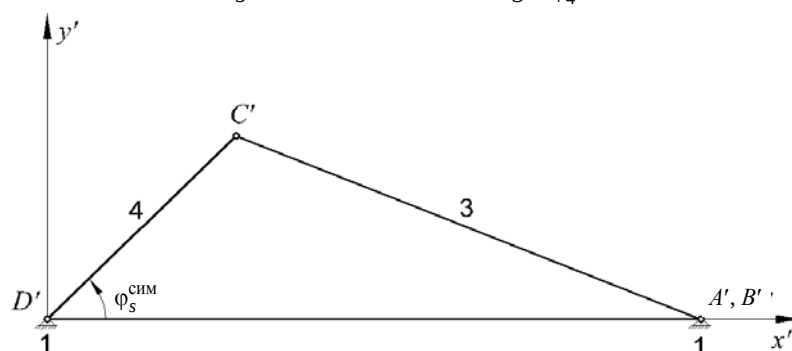


Рис. 7. К определению угла $\varphi_4^{\text{сим}}$

Fig. 7. For determination of angle $\varphi_4^{\text{сим}}$

Углы $\varphi_4^{\text{сим}}$ и $\varphi_4^{\text{мин}}$ определим из рис. 4, 5 соответственно:

$$\cos \varphi_4^{\text{max}} = \frac{l_1^2 + l_4^2 - (l_2 + l_3)^2}{2l_1l_4}; \quad (12)$$

$$\cos \varphi_4^{\text{min}} = \frac{l_1^2 + l_4^2 - (l_3 - l_2)^2}{2l_1l_4}. \quad (13)$$

Таким образом, выражения (10)–(13) и (3) позволяют определить предельные и средние значения углов φ_4 , φ_5 и ψ_C .

Выясним условия, при которых возвратно-вращательное движение верхнего звена будет симметричным относительно оси x , проходящей через центр G рабочей поверхности нижнего звена. Согласно рис. 4, это условие запишется в виде $\psi_C^{\text{сим}} = 0$ или, с учетом (10) и (3), $\psi_4^{\text{сим}} = \varphi_{45}$. Тогда, принимая во внимание (11), получим

$$l_3 = \sqrt{l_1^2 + l_4^2 - 2l_1l_4 \cos \varphi_{45}}. \quad (14)$$

Установим связь между величиной штриха и длиной кривошипа. Проекция на горизонтальную плоскость расстояния между крайними положениями центра шарика поводка является геометрическим наладочным параметром и называется длиной штриха L . В рычажных станках величина L регулируется посредством изменения длины l_2 кривошипа, следовательно, необходимо установить аналитическую связь между этими геометрическими параметрами. Из рис. 3:

$$\psi_C^{\text{max}} = \psi_C^{\text{сим}} + \arcsin \frac{L}{2l_{OC}};$$

$$\psi_C^{\text{min}} = \arcsin \frac{L}{2l_{OC}} - \psi_C^{\text{сим}}.$$

Аналогичные равенства можно записать и для угла φ_4 :

$$\varphi_4^{\text{max}} = \varphi_4^{\text{сим}} + \arcsin \frac{L}{2l_{OC}}; \quad (15)$$

$$\varphi_4^{\text{min}} = \arcsin \frac{L}{2l_{OC}} - \varphi_4^{\text{сим}}.$$

Учитывая зависимости (12) и (15), определим выражение для l_2

$$l_2 = \sqrt{l_4^2 + l_1^2 - 2l_1l_4 \cos \left(\varphi_4^{\text{сим}} + \arcsin \frac{L}{2l_{OC}} \right)} - l_3. \quad (16)$$

Установим кинематические связи исполнительного механизма рычажного станка, для чего, исходя из рис. 2, запишем векторное равенство

$$\vec{l}_1 + \vec{l}_2 = \vec{l}_3 + \vec{l}_4. \quad (17)$$

Спроецировав это равенство на ось $D'x'$ и продифференцировав его по обобщенной координате φ_2 , после введения обозначений:

$$i_{32} = \frac{d\varphi_3}{d\varphi_2}; \quad i_{42} = \frac{d\varphi_4}{d\varphi_2}$$

получим

$$l_2 \sin \varphi_2 = l_3 \sin \varphi_3 i_{32} + l_4 \sin \varphi_4 i_{42}. \quad (18)$$

Величины i_{32} и i_{42} равны отношениям угловых скоростей ω_3 и ω_4 к угловой скорости ω_2 входного звена:

$$i_{32} = \frac{d\varphi_3}{d\varphi_2} = \frac{d\varphi_3/dt}{d\varphi_2/dt} = \frac{\omega_3}{\omega_2};$$

$$i_{42} = \frac{d\varphi_4}{d\varphi_2} = \frac{d\varphi_4/dt}{d\varphi_2/dt} = \frac{\omega_4}{\omega_2}.$$

Величина i_{42} в рассматриваемом случае есть отношение угловой скорости выходного звена к угловой скорости входного и, следовательно, является кинематической передаточной функцией исполнительного механизма станка.

Если систему координат $D'x'y'$ повернуть по часовой стрелке на угол ω_3 , то углы ω_2 , ω_3 и ω_4 , отсчитываемые от положительного направления оси $D'x'$, уменьшатся на эту же величину, и (18) примет вид

$$l_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_3) = l_4 \sin(\varphi_4 - \varphi_3) i_{42},$$

откуда

$$i_{42} = \frac{l_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_3)}{l_4 \sin(\varphi_4 - \varphi_2)}. \quad (19)$$

Таким образом, если известен закон движения входного звена $\omega_2 = \omega_2(t)$, то законы вращательных движений звеньев 20, 21 и радиус-вектора $\vec{I}_{OC}$ центра C рабочей поверхности верхнего звена будут иметь вид [10]:

$$\omega_4(t) = i_{42}\omega_2(t); \quad (20)$$

$$\omega_5(t) = \dot{\psi}_C. \quad (21)$$

В заключение рассмотрим движение центра C рабочей поверхности инструментов 8 и 10. Вектор $\vec{V}_C$ линейной скорости этого центра определяется как векторное произведение вектора его угловой скорости $\dot{\psi}_C$ и радиус-вектора $\vec{I}_{OC}$, т. е.

$$\vec{V}_C = \dot{\psi}_C \times \vec{I}_{OC}. \quad (22)$$

Поскольку в системе координат $Oxyz$ векторы $\dot{\psi}_C$ и $\vec{I}_{OC}$ имеют проекции $\dot{\psi}_C = (0 \ 0 \ \dot{\psi}_C)^T$ и $\vec{I}_{OC} = (l_{OC} \cos \psi_C \ l_{OC} \sin \psi_C \ 0)^T$, раскрыв векторное произведение (22)

$$\begin{aligned} \dot{\psi}_C \times \vec{I}_{OC} &= \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 0 & 0 & \dot{\psi}_C \\ l_{OC} \cos \psi_C & l_{OC} \sin \psi_C & 0 \end{vmatrix} = \\ &= -\dot{\psi}_C l_{OC} \sin \psi_C \vec{i} + \dot{\psi}_C l_{OC} \cos \psi_C \vec{j}, \end{aligned}$$

получим вектор

$$\vec{V}_C = (-\dot{\psi}_C l_{OC} \sin \psi_C \ \dot{\psi}_C l_{OC} \cos \psi_C \ 0)^T, \quad (23)$$

модуль которого

$$V_C = \dot{\psi}_C l_{OC}. \quad (24)$$

ВЫВОДЫ

1. Предложенный станок для одновременной двусторонней обработки оптических деталей со сферическими поверхностями позволяет

по меньшей мере в два раза снизить затраты времени на изготовление линз, повысить их качество за счет исключения температурной деформации заготовок на стадии блокировки поочередно за каждую из исполнительных поверхностей, что имеет место в классической технологии односторонней обработки и может быть положен в основу создания энерго- и ресурсосберегающего, экологически чистого производства оптико-электронных приборов.

2. Выполненное математическое моделирование созданного станка для двусторонней обработки линз с тонким центром позволило установить связь между обобщенной координатой его исполнительного механизма и положениями звеньев этого механизма, на основе которой получена аналитическая зависимость величины амплитуды колебательного движения выходного звена упомянутого механизма от длины его входного звена, что дает возможность рассчитать с помощью ЭВМ наиболее выгодные режимы обработки оптических деталей с учетом характера распределения припуска на обработку по исполнительным поверхностям заготовок.

3. Выполненные экспериментальные исследования полирования линз по схеме, когда рабочее усилие направлено по нормали к обрабатываемой поверхности, показали, что такая обработка позволяет ускорить процесс формообразования оптических деталей и способствует уменьшению локальных погрешностей на их исполнительных поверхностях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Способ одновременной двусторонней обработки деталей со сферическими поверхностями: пат. 7911 Респ. Беларусь, МПК В 24В 13/00 / А. С. Козерук, И. П. Филонов; дата публ. 30.04.2006.
2. Станок для одновременной двусторонней обработки линз с кривыми вогнутыми поверхностями: пат. 10726 Респ. Беларусь, МПК В 24В 13/00 / А. С. Козерук, И. П. Филонов, А. А. Сухоцкий, В. Ф. Климович, Е. С. Таболина; дата публ. 30.06.2008.
3. Филонов, И. П. Управление формообразованием прецизионных поверхностей деталей машин и приборов / И. П. Филонов, Ф. Ф. Климович, А. С. Козерук. Минск: ДизайнПРО, 1995. 208 с.

4. Артоболевский, И. И. Теория механизмов и машин / И. И. Артоболевский. 4-е изд. М.: Наука, 1988. 639 с.
 5. Бардин, А. Н. Технология оптического стекла / А. Н. Бардин. М.: Высш. шк., 1963. 519 с.
 6. Сулим, А. В. Производство оптических деталей / А. В. Сулим. М.: Высш. шк., 1969. 303 с.
 7. Preston, E. W. The Theory and Design Plate Glass Polishing Machines / E. W. Preston // *Journal of the Society Technology*. 1927. No 11. P. 214–256.
 8. Козерук, А. С. Формообразование прецизионных поверхностей / А. С. Козерук. Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1997. 176 с.
 9. Козерук, А. С. Управление формообразованием прецизионных поверхностей деталей машин и приборов на основе математического моделирования / А. С. Козерук. Минск, 1997. 317 с.
 10. Исследование кинематических закономерностей процесса двусторонней обработки двояковыпуклых оптических деталей / А. С. Козерук [и др.] // *Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук*. 2008. № 2. С. 26–31.
 - Поступила 22.12.2016
 - Подписана в печать 27.01.2017
 - Опубликована онлайн 29.09.2017
- REFERENCES
1. Kozeruk A. S., Filonov I. P. (2006) *Method for Simultaneous Two-Sided Machining of Parts with Spherical Surface*: Patent Republic of Belarus No 7911 (in Russian).
 2. Kozeruk A. S., Filonov I. P., Sukhotsky A. A., Klimovich V. F., Tabolina E. S. (2008). *Machine-Tool for Simultaneous Two-Sided Processing of Lenses with Steep Concave Surface*: Patent Republic of Belarus No 10726 (in Russian).
 3. Filonov I. P., Klimovich V. F., Kozeruk A. S. (1995). *Control Over Shape-Formation of Precision Surface of Machine and Device Parts*. Minsk, DizaynPRO Publ. 208 (in Russian).
 4. Artobolevsky I. I. (1988). *Theory of Mechanisms and Machines*. 4th Edition. Moscow, Nauka Publ. 639 (in Russian).
 5. Bardin A. N. (1963). *Technology of Optical Glass*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 519 (in Russian).
 6. Sulim A. V. (1969). *Production of Optical Parts*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 303 (in Russian).
 7. Preston E. W. (1927). The Theory and Design Plate Glass Polishing Machines. *Journal of the Society Technology*, (11), 214–256.
 8. Kozeruk A. S. (1997). *Shape-Formation of Precision Surfaces*. Minsk, Publishing House “VUZ-UNITI”. 176 (in Russian).
 9. Kozeruk A. S. (1997). *Control Over Shape-Formation of Precision Surface of Machine and Device Parts on the Basis of Mathematical Simulation*. Minsk. 317 (in Russian).
 10. Kozeruk A. S., Sukhotskii A. A., Klimovich V. F., Filonova M. I. (2008) Investigation of Kinematics Regularities in Two-Sided Processing of Concavo-Convex Optical Parts. *Vesti Natsyional'nai Akademii Navuk Belarusi. Ser. Fizika-Tekhnichnykh Navuk = Proceedings of National Academy of Science of Belarus. Series of Physical and Technical Sciences*, (2), 26–31 (in Russian).

Received: 22.12.2016

Accepted: 27.01.2017

Published online: 29.09.2017

Оптимальные параметры асимметричных колебаний инструмента для стружкодробления при точении вязких конструкционных сталей

Канд. техн. наук С. С. Данильчик¹⁾, чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. В. К. Шелег¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

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

Реферат. На основе анализа различных методов дробления стружки в процессе токарной обработки конструкционных сталей предложен метод точения с асимметричными колебаниями режущего инструмента, позволяющий обеспечить устойчивое дробление сливной стружки и снизить шероховатость обработанных поверхностей. Асимметричные колебания характеризуются коэффициентом асимметрии цикла колебаний, их частотой и амплитудой и дополнительно сообщаются инструменту в процессе точения. Рассмотрена кинематика точения конструкционных сталей с наложением на традиционную схему резания направленных асимметричных колебаний режущего инструмента, создаваемых кулачковой системой. На основе использования рядов Фурье получено уравнение движения инструмента с асимметричными колебаниями. Определено влияние амплитуды и частоты колебательного движения инструмента на процесс дробления сливной стружки. С целью уменьшения негативного влияния амплитуды колебаний на процесс резания и качество обработанных поверхностей обработку следует проводить с минимальной ее величиной. В этом случае необходимо обеспечить оптимальное отношение частоты колебаний инструмента к частоте вращения заготовки. Выведена формула для определения этого отношения в зависимости от коэффициента асимметрии цикла колебаний и числа полных циклов колебаний за один оборот заготовки. Установлено, что теоретическая величина минимальной амплитуды колебаний инструмента равна половине величины подачи инструмента за один оборот заготовки. При несоблюдении оптимального отношения частоты колебаний инструмента к частоте вращения заготовки для дробления стружки требуется увеличивать амплитуду колебаний, что может привести к повышению шероховатости обработанных поверхностей.

Ключевые слова: вибрационное резание, стружкодробление, шероховатость, асимметричные колебания, коэффициент асимметрии

Для цитирования: Данильчик, С. С. Оптимальные параметры асимметричных колебаний инструмента для стружкодробления при точении вязких конструкционных сталей / С. С. Данильчик, В. К. Шелег // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 5. С. 376–382. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-376-382

Optimal Parameters of Asymmetrical Oscillations of Tool for Chip Crushing while Turning Toughened Structural Steel

S. S. Danilchik¹⁾, V. K. Sheleh¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republik of Belarus)

Abstract. A turning method with asymmetric oscillations of cutting tool has been proposed on the basis of the analysis of various methods for chip crushing in the process of structural steel lathe turning and the method makes it possible to ensure a stable crushing of discharge chips and to reduce roughness of the machined surfaces. Asymmetric vibrations are characterized by an asymmetry coefficient of the oscillation cycle, their frequency and amplitude and they are additionally transferred to the tool during the turning process. Kinematics of structural steel turning with imposition of directed asymmetric cutting tool oscillations created by a cam system on traditional cutting scheme has been considered in the paper. An equation of tool motion with asymmetric oscillations has been obtained on the basis of Fourier Series. An influence of the oscillatory tool motion amplitude and frequency on the process of discharge chip crushing has been determined in the paper. In order to reduce a negative influence of the oscillation amplitude on the cutting process and quality of machined surfaces machining must

Адрес для переписки

Шелег Валерий Константинович
Белорусский национальный технический университет
ул. Б. Хмельницкого, 9,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-74-54
metech@bntu.by

Address for correspondence

Sheleh Valery K.
Belarusian National Technical University
9 B. Hmelnitzkogo str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-74-54
metech@bntu.by

be carried out with its minimum value. In this case it is necessary to ensure an optimum ratio of the tool oscillation frequency to the rotational speed of a workpiece. A formula has been derived for determination of this ratio according to a coefficient of oscillation cycle asymmetry and number of complete oscillation cycles per one revolution of the workpiece. It has been established that a theoretical value of the minimum tool oscillation amplitude is equal to half of the tool feed value per one revolution of the workpiece. If the optimum ratio of the tool oscillation frequency to workpiece rotation frequency has not been observed for chip crushing it is necessary to increase oscillation amplitude that may lead to an increase of roughness on machined surfaces.

Keywords: vibration cutting, chip crushing, roughness, asymmetric oscillations, coefficient of asymmetry

For citation: Danilchuk S. S., Sheleh V. K. (2017) Optimal Parameters of Asymmetrical Oscillations of Tool for Chip Crushing while Turning Toughened Structural Steel. *Science and Technique*. 16 (5), 376–382. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-376-382 (in Russian)

Наряду с многочисленными методами и способами дробления сливной стружки при токарной обработке применяется вибрационное точение, кинематика которого широко освещена в научной литературе [1–6]. Основано оно на использовании при точении гармонических колебаний, которые сообщаются инструменту или заготовке. Вибрационное точение эффективно при обработке конструкционных углеродистых и легированных сталей в широком диапазоне режимов резания. Однако оно сопровождается периодическим изменением толщины среза. Максимальное значение толщины среза при вибрационном точении с колебаниями, направленными вдоль осевой подачи инструмента, вдвое больше, чем при обычном точении, что приводит к увеличению шероховатости обработанных поверхностей.

Предложенный авторами метод точения с асимметричными колебаниями инструмента отличается от вибрационного точения различными временными промежутками движения резца в течение цикла колебаний в направлении подачи и обратном направлении [7, 8]. Форма траектории движения инструмента относительно заготовки зависит от коэффициента асимметрии цикла этих колебаний, который можно представить в виде

$$\xi = \frac{a}{b}, \quad (1)$$

где a , b – части оборота заготовки, соответствующие движению инструмента в направлении подачи (врезание) и обратном (отвод) в течение цикла.

Развертки траектории движения инструмента при обработке заготовки диаметром d приведены на рис. 1. Тонкими красными линиями показана траектория движения инструмента при обычном точении с подачей S_0 . Жирные линии синего цвета означают траекторию движения резца при точении с колебаниями. На рис. 1а представлена

траектория движения инструмента с гармоническими колебаниями, коэффициент асимметрии цикла которых $\xi = 1$ ($a = b$). В этом случае точки контакта траекторий движения инструмента, полученных за два последовательных оборота заготовки, располагаются на одной линии, параллельной оси заготовки. При этом максимальная величина расстояния между траекториями движения инструмента на двух последовательных оборотах заготовки $\Delta_{\max} = 2S_0$, что приводит к увеличению высоты гребешков микронеровности и соответственно шероховатости обработанных поверхностей. При точении с асимметричными колебаниями (рис. 1б, с) точки контакта траекторий движения инструмента на двух последовательных оборотах заготовки смещаются друг относительно друга. И чем больше коэффициент асимметрии отличается от единицы, тем больше будет смещение точек контакта. Это позволяет уменьшить максимальное расстояние $\Delta_{\max}$, следовательно, и высоту гребешков микронеровности.

Исследования авторов посвящены определению оптимальных параметров колебательного движения инструмента с асимметричным циклом, обеспечивающего гарантированное дробление стружки, к которым относятся амплитуда и частота колебаний. Для определения таких параметров рассмотрим траекторию движения инструмента в процессе точения. Она получается путем суммирования траектории движения с постоянной подачей и траектории, обусловленной колебаниями. Поэтому путь, пройденный инструментом вдоль оси заготовки, можно представить в виде суммы

$$X = \frac{\omega_3}{2\pi} S_0 + f(x), \quad (2)$$

где ω_3 – угол поворота заготовки; $f(x)$ – дополнительное перемещение резца в результате его колебательных движений.

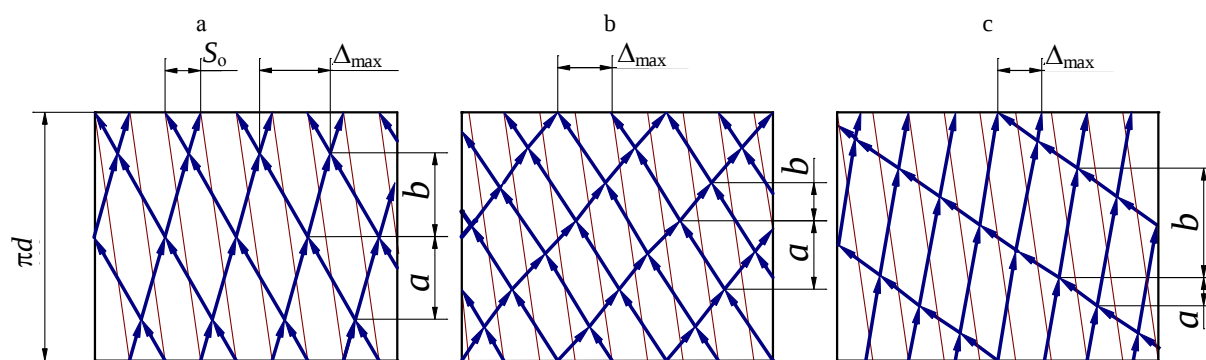


Рис. 1. Развертки траектории движения инструмента при точении с колебаниями инструмента:

a – $a = b$; b – $a > b$; c – $a < b$

Fig. 1. Expansion of tool motion trajectory in case of turning with tool vibrations:

a – $a = b$; b – $a > b$; c – $a < b$

Первое слагаемое суммы в (2) описывает движение с постоянной продольной подачей, а второе – колебательное движение инструмента. В связи с тем, что в асимметричном цикле колебаний инструмента промежутки времени для выполнения периодов врезания и отвода различны, движение инструмента в сторону подачи и обратную сторону задается разными функциями. При этом функции, описывающие траекторию движения как в сторону подачи, так и в обратную сторону, могут быть различными: линейная, синусоидальная, параболическая или другая. Однако с целью упрощения способа реализации этих движений и выполняемых расчетов принимаем линейную траекторию перемещения в цикле колебаний. Эти колебания можно обеспечить кулачком, профиль которого выполнен по спирали Архимеда. Такие колебания с помощью ряда Фурье могут быть записаны одним уравнением, для чего цикл движения инструмента следует рассматривать как периодическую функцию $f(x)$ с периодом 2π (рис. 2), которую можно определить в пределах периода следующим образом:

$$f(x) = -\left(\frac{2\pi A}{x_2} + \frac{2Ax}{x_2}\right) \text{ при } -\pi \leq x \leq -\frac{x_1}{2};$$

$$f(x) = \frac{2Ax}{x_1} \text{ при } -\frac{x_1}{2} \leq x \leq \frac{x_1}{2}; \quad (3)$$

$$f(x) = -\frac{2Ax}{x_2} + \frac{2\pi A}{x_2} \text{ при } \frac{x_1}{2} \leq x \leq \pi,$$

где x_1, x_2 – части периода, приходящиеся на врезание инструмента в заготовку и отвод соответственно, т. е. $x_1 + x_2 = 2\pi$, при этом отношение x_1 к x_2 есть коэффициент асимметрии цикла колебаний ξ .

При преобразовании функции $f(x)$ в ряд Фурье она примет вид [9]

$$f(x) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{8A}{k^2 x_1 x_2} \sin \frac{kx_1}{2} \sin kx. \quad (4)$$

Для того чтобы подставить значение функции $f(x)$ в (2), целесообразно значение аргумента x в формуле (4) выразить через угол поворота заготовки ω_3 следующим образом:

$$x = \omega_3 \frac{f}{n},$$

где f – частота колебательных движений инструмента; n – частота вращения заготовки.

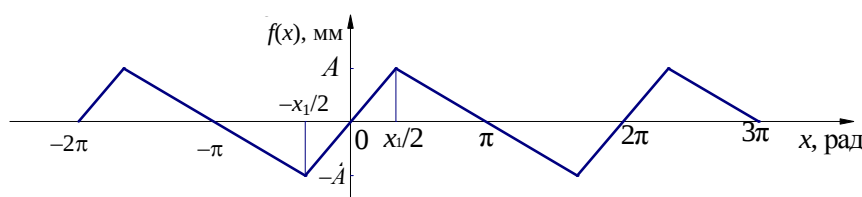


Рис. 2. Периодическая функция колебательного движения инструмента

Fig. 2. Periodic function of tool oscillatory motion

Тогда траекторию движения инструмента относительно заготовки в процессе точения с асимметричными колебаниями можно описать выражением

$$X = \frac{\omega_3}{2\pi} S_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{8A}{k^2 x_1 x_2} \sin \frac{kx_1}{2} \sin \left(k\omega_3 \frac{f}{n} \right). \quad (5)$$

Если положение инструмента в момент совершения заготовкой ω_3 оборотов определяется выражением (5), то его положение в момент, когда заготовка совершила на один оборот меньше, определится как

$$X' = \frac{\omega_3 - 2\pi}{2\pi} S_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{8A}{k^2 x_1 x_2} \sin \frac{kx_1}{2} \times \sin \left(k(\omega_3 - 2\pi) \frac{f}{n} \right),$$

а расстояние между траекториями движения инструмента на двух последовательных оборотах заготовки Δ рассчитывается как разность X и X' :

$$\Delta = X - X' = S_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{16A}{k^2 x_1 x_2} \sin \frac{kx_1}{2} \times \cos \left(k(\omega_3 - \pi) \frac{f}{n} \right) \sin \left(k\pi \frac{f}{n} \right) \right\}. \quad (6)$$

Расстояние Δ периодически изменяет свою величину от минимального до максимального значения и наоборот. Для определения экстремальных значений величины Δ продифференцируем (6) по углу поворота заготовки ω_3

$$\frac{d\Delta}{d\omega_3} = \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{16A}{k^2 x_1 x_2} \sin \frac{kx_1}{2} \times \left(-\sin \left(k(\omega_3 - \pi) \frac{f}{n} \right) k \frac{f}{n} \right) \sin \left(k\pi \frac{f}{n} \right) \right\}.$$

Приравняем производную к нулю и получим

$$\sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{16A}{k^2 x_1 x_2} \sin \frac{kx_1}{2} \times \left(-\sin \left(k(\omega_3 - \pi) \frac{f}{n} \right) k \frac{f}{n} \right) \sin \left(k\pi \frac{f}{n} \right) \right\} = 0.$$

Выполнение данного равенства возможно в случаях, когда:

1) $\sin \frac{kx_1}{2} = 0$, что выполняется при $\frac{x_1}{2} = m\pi$, где $m = 0, 1, 2, 3, \dots$. Отсюда следует, что

$x_1 = 2m\pi$, а это противоречит условию $x_1 + x_2 = 2\pi$;

2) $\sin \left(k\pi \frac{f}{n} \right) = 0$, что выполняется при $\pi \frac{f}{n} = m\pi$, где $m = 0, 1, 2, 3, \dots$. Из этого требования следует, что $f/n = m$, т. е. отношение частоты колебаний инструмента к частоте вращения заготовки будет равно нулю, что говорит об отсутствии колебаний инструмента, или целому числу. При этом траектории движения инструмента на всех оборотах заготовки параллельны, и дробление стружки происходить не будет, так как образуется стружка постоянной толщины;

3) $\sin \left(k(\omega_3 - \pi) \frac{f}{n} \right) = 0$. Из этого случая следует, что

$$(\omega_3 - \pi) \frac{f}{n} = m\pi. \quad (7)$$

Подставив значение (7) в уравнение (6), получим формулу для расчета экстремальных значений расстояния между траекториями движения инструмента на двух последовательных оборотах заготовки Δ в виде

$$\Delta = S_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{16A}{k^2 x_1 x_2} \sin \frac{kx_1}{2} \cos km\pi \sin \left(k\pi \frac{f}{n} \right) \right\}. \quad (8)$$

Если в (8) второе слагаемое имеет положительное значение, то расстояние между траекториями движения инструмента на двух последовательных оборотах заготовки будет максимальным ($\Delta_{\max}$), если отрицательное – то минимальным ($\Delta_{\min}$). Таким образом, экстремальные значения расстояния между траекториями движения инструмента на двух последовательных оборотах заготовки Δ зависят от подачи S_0 , амплитуды A , величин периодов, приходящихся на врезание инструмента в заготовку x_1 и отвод x_2 , и отношения частоты колебаний инструмента к частоте вращения заготовки f/n . Как ранее отмечалось, отношение x_1/x_2 есть ξ . Значит, величина Δ зависит от коэффициента асимметрии.

Влияние разных факторов на экстремальные значения расстояния Δ различно. Из (8), видно, что при увеличении подачи S_0 минимальное $\Delta_{\min}$ и максимальное $\Delta_{\max}$ значения растут. С увеличением амплитуды колебаний A макси-

мальное значение $\Delta_{\max}$ увеличивается, а минимальное $\Delta_{\min}$ уменьшается. Изменение экстремальных значений Δ от величин x_1 и x_2 рассмотрим на примере графиков рис. 3, построенных с использованием (8) для исходных данных: $S_0 = 0,4$ мм/об, $A = 0,2$ мм. Значения x_1 и x_2 взаимосвязаны, так как $x_1 + x_2 = 2\pi$. Поэтому на графиках представлена зависимость экстремальных значений Δ от x_1 . Из рис. 3 видно, что зависимости $\Delta_{\max}$ и $\Delta_{\min}$ от x_1 и x_2 имеют различный характер при разных отношениях f/n . Так, например, для $x_1 = 2$ радианы $\Delta_{\max}$ и $\Delta_{\min}$ будут иметь меньшие значения при $f/n = 1,6$, чем при $f/n = 1,4$, а при $x_1 = 4$ радианы, наоборот, большие.

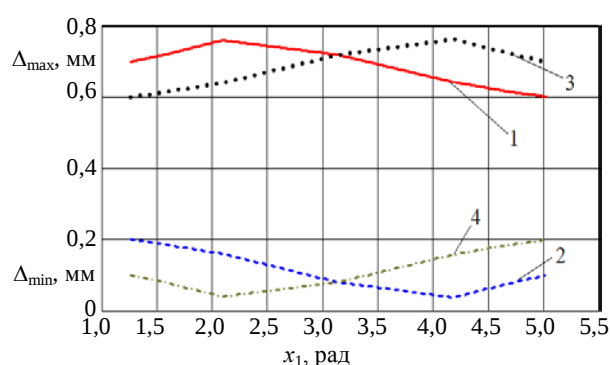


Рис. 3. Зависимости экстремальных значений расстояния между траекториями движения инструмента на двух последовательных оборотах заготовки от x_1 : 1 – $\Delta_{\max}$ при $f/n = 1,4$; 2 – $\Delta_{\min}$ при $f/n = 1,4$; 3 – $\Delta_{\max}$ при $f/n = 1,6$; 4 – $\Delta_{\min}$ при $f/n = 1,6$

Fig. 3. Dependencies of extreme distance values between trajectories of tool motion on two consecutive workpiece rotations on x_1 : 1 – $\Delta_{\max}$ at $f/n = 1,4$; 2 – $\Delta_{\min}$ at $f/n = 1,4$; 3 – $\Delta_{\max}$ at $f/n = 1,6$; 4 – $\Delta_{\min}$ at $f/n = 1,6$

Это означает, что для определенных значений x_1 и x_2 цикла колебаний, а следовательно, и для соответствующего им коэффициента асимметрии ξ необходимо подбирать оптимальное отношение частоты колебаний инструмента к частоте вращения заготовки f/n . Оптимальным отношением f/n для стружкодробления будет то, при котором минимальное значение расстояния $\Delta_{\min}$ между траекториями движения инструмента на двух последовательных оборотах заготовки будет иметь нулевое значение при минимальной амплитуде колебаний, как показано на рис. 4.

На рис. 4 ломаными линиями 0–5 и 5'–10 показаны траектории движения резца на двух последовательных оборотах заготовки с пода-

чей S_0 и амплитудой колебаний A при обработке поверхности диаметром d . Минимальная амплитуда колебаний обусловлена тем, что касание траекторий происходит по вершинам 1 и 7, 3 и 9 и т. д. При этом инструмент за один оборот заготовки выполняет z полных циклов колебания, а при выполнении $(z + 1)$ -го цикла, переходящего на следующий оборот, траектории движения инструмента соприкасаются (точки 1 и 7). На следующий оборот переходит часть цикла колебаний, равная величине a , на первом же обороте остается часть цикла, равная b . В этом случае можно записать равенство

$$z(a + b) + b = 1. \quad (9)$$

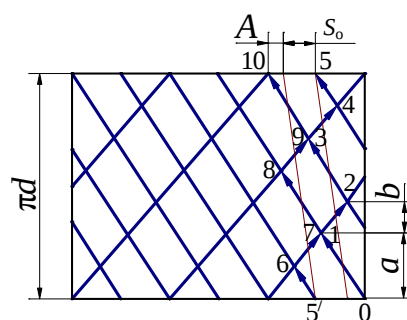


Рис. 4. Развертка траектории движения инструмента при точении с асимметричными колебаниями

Fig. 4. Expansion of tool motion trajectory when turning with asymmetrical oscillations

Таким образом, за один оборот заготовки инструмент совершит z полных циклов колебания и часть цикла, соответствующую периоду отвода инструмента. Из выражения (9) с учетом (1) можно определить необходимые значения a и b цикла колебаний:

$$a = \frac{\xi}{z(\xi + 1) + 1}; \quad b = \frac{1}{z(\xi + 1) + 1}. \quad (10)$$

Для обеспечения необходимых параметров цикла колебаний a и b согласно (10) требуется согласовать частоту колебаний инструмента f с частотой вращения заготовки n , чтобы

$$\frac{f}{n} = \frac{1}{a + b}. \quad (11)$$

Подставив в выражение (11) значения a и b из (10), получим зависимость отношения f/n от коэффициента асимметрии цикла колебаний инструмента в виде

$$\frac{f}{n} = z + \frac{1}{\xi + 1}. \quad (12)$$

Например, для точения с коэффициентом асимметрии цикла колебаний инструмента $\xi = 3$ и числом полных циклов за один оборот заготовки $z = 1$ оптимальным отношением частоты колебаний к частоте вращения заготовки f/n по формуле (12) будет 1,25. При другом отношении между элементами стружки образуются перемычки $\Delta_{\min}$, которые затрудняют процесс стружкодробления. Так, на рис. 5 представлена развертка траектории движения инструмента с $f/n = 1,5$. В этом случае для дробления стружки необходимо увеличивать амплитуду A до величины, при которой Δ периодически будет принимать нулевые значения. Однако при этом расстояние между траекториями движения инструмента на двух последовательных оборотах заготовки $\Delta_{\max}$ будет увеличиваться, что может привести к повышению шероховатости обработанной поверхности.

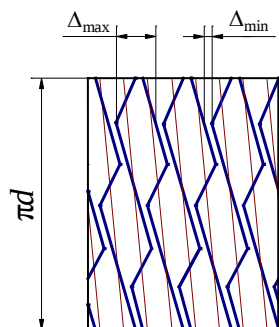


Рис. 5. Развертка траектории движения инструмента при $f/n = 1,5$

Fig. 5. Expansion of tool motion trajectory for $f/n = 1.5$

Для определения необходимой для стружкодробления минимальной амплитуды колебаний инструмента из (8), приравняв Δ к нулю, получим формулу

$$A = - \frac{S_0 x_1 x_2}{16 \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{1}{k^2} \sin \frac{kx_1}{2} \cos k\pi \sin \left(k\pi \frac{f}{n} \right) \right)}.$$

В этом выражении $\cos k\pi$ может иметь два значения: (+1) и (-1). Амплитуда A может также получаться с положительным и отрицательным знаками, что означает направления колебательного движения инструмента – в сторону подачи или в противоположную сторону. Поэтому для расчета величины амплитуды можно использовать формулу в виде

$$A = \left| \frac{S_0 x_1 x_2}{16 \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{1}{k^2} \sin \frac{kx_1}{2} \sin \left(k\pi \frac{f}{n} \right) \right)} \right|. \quad (13)$$

Расчеты по выражению (13) с учетом значения отношения f/n из (12) показали, что теоретическая минимальная амплитуда колебаний инструмента, обеспечивающая уменьшение $\Delta_{\min}$ до нуля, равна

$$A_{\min} = \frac{S_0}{2}.$$

При задании колебаний кулачком коэффициент асимметрии цикла обеспечивается его профилем, выполненным в виде сопряженных ветвей двух спиралей Архимеда: возрастающей с углом θ_a и ниспадающей с углом θ_b , угловое соотношение между которыми устанавливается равным принятому в цикле колебаний отношению периода врезания к периоду отвода резца, причем $\theta_a + \theta_b = 360^\circ$ [10]. Отношение частоты колебаний инструмента к частоте вращения заготовки f/n устанавливается частотой вращения кулачка. Величина хода кулачка определяется исходя из величины максимальной амплитуды колебаний инструмента и конструктивных параметров устройства для точения с вибрациями.

ВЫВОДЫ

1. Асимметричные колебания инструмента характеризуются различными временными промежутками движения резца в течение цикла колебаний, т. е. коэффициентом асимметрии цикла. При точении с колебаниями, направленными вдоль подачи инструмента, коэффициент асимметрии можно представить в виде

$$\xi = \frac{a}{b},$$

где a , b – части оборота заготовки, соответствующие движению инструмента в направлении подачи (врезание) и обратном направлении (отвод) в течение цикла.

2. Расстояние между траекториями движения инструмента при точении с асимметричными колебаниями Δ на двух последовательных оборотах заготовки периодически принимает экстремальные значения $\Delta_{\min}$ и $\Delta_{\max}$. Для обеспечения гарантированного стружкодробления необходимо установить такую амплитуду колебаний, чтобы минимальное расстояние $\Delta_{\min}$ принимало нулевое значение, в результате чего стружка будет перерезаться.

3. При точении с асимметричными колебаниями инструмента необходимо увязать между собой величину коэффициента асимметрии

цикла колебаний и их частоту. Каждому коэффициенту асимметрии цикла колебаний соответствует отношение частоты колебаний инструмента к частоте вращения заготовки f/n , обеспечивающее стружкодробление при минимальной амплитуде колебаний инструмента, равной половине подачи на оборот S_0 . Оптимальное отношение частоты колебаний инструмента к частоте вращения заготовки рассчитывается в зависимости от числа полных циклов колебаний инструмента z за один оборот заготовки и коэффициента асимметрии цикла колебаний ξ по формуле

$$\frac{f}{n} = z + \frac{1}{\xi + 1}.$$

При несоблюдении этого условия требуется для дробления стружки увеличивать амплитуду колебаний, что может привести к повышению шероховатости обработанных поверхностей.

ЛИТЕРАТУРА

- Ахметшин, Н. И. Вибрационное резание металлов / Н. И. Ахметшин, Э. М. Гоц, Н. Ф. Родиков; под ред. К. М. Рагульска. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1987. 80 с.
- Захаров, Ю. Е. Полезные вибрации в машиностроении / Ю. Е. Захаров, В. Т. Гарбузюк. Тула: Приокское кн. изд-во, 1970. 112 с.
- Подураев, В. Н. Обработка резанием с вибрациями / В. Н. Подураев. М.: Машиностроение, 1970. 350 с.
- Коновалов, Е. Г. Осциллирующее точение / Е. Г. Коновалов, А. В. Борисенко. Минск: Изд-во АН БССР, 1960. 32 с.
- Мансырев, И. Г. Методы дробления сливной стружки в процессе резания / И. Г. Мансырев, А. А. Смирнов, И. И. Козарь. Л.: ЛДНТП, 1983. 20 с.
- Богословский, Н. В. Кинематическое дробление стружки при точении труднообрабатываемых сталей / Н. В. Богословский, Т. И. Иващенко // Пути повышения эффективности обработки материалов резанием в машиностроении: материалы краткосроч. науч.-техн. семинара, 13–14 мая / Общество «Знание»; под ред. Ю. М. Зубарева. Л., 1991. С. 47–48.
- Данильчик, С. С. Кинематика точения с наложением асимметричных колебаний инструмента / С. С. Данильчик, В. К. Шелег // Наука и техника. 2013. № 4. С. 16–21.
- Способ обработки резанием с кинематическим дроблением стружки заготовки из вязкого металла или сплава: пат. 19193 Респ. Беларусь, МПК В 23В 25/02 / В. И. Молочко, С. С. Данильчик; дата публ. 30.06.2015.
- Молочко, В. И. Математическая модель вибрационного точения с асимметричным циклом колебаний / В. И. Молочко, С. С. Данильчик // Наука – образованию, производству, экономике: материалы пятой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2007 г.: в 2 т. / Белор. нац. техн. ун-т; редкол.: Б. М. Хрусталева [и др.]. Минск, 2007. Т. 2. С. 250–252.
- Данильчик, С. С. Расчет конструктивных параметров кулачка для асимметричного вибрационного точения / С. С. Данильчик // Наука – образованию, производству, экономике: материалы четвертой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2006 г.: в 2 т. / Белор. нац. техн. ун-т; редкол.: Б. М. Хрусталева [и др.]. Минск, 2006. Т. 2. С. 177–179.

Поступила 19.04.2017

Подписана в печать 23.06.2017

Опубликована онлайн 29.09.2017

REFERENCES

- Akhmetshin N. I., Gots E. M., Rodikov N. F. Ragul'skis K. M. (ed.). (1987). *Vibratory Cutting of Metals*. Leningrad, Mashinostroenie Publ., Leningrad Branch. 80 (in Russian).
- Zakharov Yu. E., Garbuziuk V. T. (1970) *Useful Vibration in Mechanical Engineering*. Tula, Priokskoe Publishing House. 112 (in Russian).
- Poduraev V. N. (1970) *Cutting with Vibrations*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 350 (in Russian).
- Kononov E. G., Borisenko A. V. (1960) *Oscillating Turning*. Minsk, Publishing House of the Academy of Sciences of Byelorussian SSR. 32 (in Russian).
- Mansyrev I. G., Smirnov A. A., Kozar I. I. (1983) *Methods of Crushing Flow Chips During Cutting Process*. Leningrad, Leningrad House of Science and Technology Promotion. 20 (in Russian).
- Bogoslovsky N. V., Ivashchenko T. I. (1991) Kinematic Chip Breaking while Turning Hard-to-Machine Steel. Zubarev Yu. M. (ed.). *Puti Povysheniya Effektivnosti Obrabotki Materialov Rezaniem v Mashinostroenii: Materialy Kratkosroch. Nauch.-Tekhn. Seminara* [Ways to Improve Efficiency of Material Machining while Using Cutting in Mechanical Engineering. Proceedings of Short-Term Scientific and Technical Workshop, May 13–14]. Leningrad, 47–48 (in Russian).
- Danilchik S. S., Sheleg V. K. (2013) Turning Kinematics with Imposition of Asymmetric Tool Vibrations. *Nauka i Tekhnika* = Science and Technique, (4), 16–21 (in Russian).
- Molochko V. I., Danilchik S. S. (2015) *Method of Machining by Cutting with Kinematic Crushing of Chip of Billet from Viscous Metal or Alloy*. Patent Republic of Belarus No 19193 (in Russian).
- Molochko V. I., Danilchik S. S. (2007) Mathematical Model of Vibratory Turning with Asymmetric Cycle of Oscillations. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike: Materialy Pyatoi Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. T. 2* [Science for Education, Industry, Economics: Proceedings of 5th International Scientific and Technical Conference. Vol. 2]. Minsk, Belarusian National Technical University, 250–252 (in Russian).
- Danilchik S. S. (2006) Calculation of Design Parameters of Cam for Asymmetric Vibratory Turning. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike: Materialy Chetvertoi Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. T. 2* [Science for Education, Industry, Economics: Proceedings of 4th International Scientific and Technical Conference. Vol. 2]. Minsk, Belarusian National Technical University, 177–179 (in Russian).

Received: 19.04.2017

Accepted: 23.06.2017

Published online: 29.09.2017

DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-383-390

УДК 621.43

Способы организации рабочего процесса газодизельного двигателя

Канд. техн. наук, доц. Г. А. Вершина¹⁾, асп. О. С. Быстренков¹⁾¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017

Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. За последние десятилетия сокращение выбросов загрязняющих веществ стало одним из основных направлений для дальнейшего развития двигателестроения. Решение таких задач привело к внедрению каталитических систем доочистки, новых технологий впрыска топлива, технологии регулируемых фаз газораспределения, регулируемой системы турбонаддува и в последнее время – даже системы переменной степени сжатия двигателя. Применение газового топлива, в частности газодизельного процесса, может стать одним из средств по снижению загрязнения атмосферного воздуха токсичными веществами и удовлетворению растущих экологических норм. В связи с этим был проведен анализ способов организации рабочего процесса газодизельного двигателя. Показаны параметры, влияющие на характер протекания газодизельного процесса, приведены график удельного суммарного расхода теплоты от доли запальной порции дизельного топлива и зависимость показателей газодизеля от угла опережения впрыска запальной порции дизельного топлива. Приведена современная топливная система газодизельного двигателя ГД-243. Газодизельный двигатель обладает более совершенными экологическими характеристиками, чем двигатели, работающие на дизельном топливе или бензине. По данным Европейской ассоциации газомоторных транспортных средств, существенное снижение выбросов достигается при уровне замещения 50 % дизельного топлива газовым (метаном), при этом есть тенденция к еще большему их уменьшению. Для широкого использования газового топлива как топлива для газодизельного процесса необходимы организации нового рабочего процесса, улучшение топливной аппаратуры, совершенствование стратегий впрыска и управления подачей топлива. По проведенному анализу предложен способ организации рабочего процесса многоконтурного двигателя. Подана заявка на патент.

Ключевые слова: газодизельный двигатель, газовое топливо, дизельное топливо, рабочий процесс, выбросы вредных веществ, угол опережения впрыска, запальная порция дизельного топлива, предкамера

Для цитирования: Вершина, Г. А. Способы организации рабочего процесса газодизельного двигателя / Г. А. Вершина, О. С. Быстренков // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 5. С. 383–390. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-383-390

Methods for Organization of Working Process for Gas-Diesel Engine

G. A. Vershina¹⁾, O. S. Bystrenkov¹⁾¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Over the past few decades reduction in pollutant emissions has become one of the main directions for further development of engine technology. Solution of such problems has led to implementation of catalytic post-treatment systems, new technologies of fuel injection, technology for regulated phases of gas distribution, regulated turbocharger system and, lately, even system for variable compression ratio of engine. Usage of gaseous fuel, in particular gas-diesel process, may be one of the means to reduce air pollution caused by toxic substances and meet growing environmental standards and regulations. In this regard, an analysis of methods for organization of working process for a gas-diesel engine has been conducted in the paper. The paper describes parameters that influence on the nature of gas diesel process, it contains graphics of specific total heat consumption according to ignition portion of diesel fuel and dependence of gas-diesel indices on advance angle for ignition portion injection of the diesel fuel. A modern fuel system of gas-diesel engine ГД-243 has been demonstrated in the paper. The gas-diesel engine has better environmental characteristics than engines running on diesel fuel or gasoline. According

Адрес для переписки

Вершина Георгий Александрович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-76-64
oup@bntu.by

Address for correspondence

Vershina Georgy A.
Belarusian National Technical University
65 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-76-64
oup@bntu.by

to the European Natural & bio Gas Vehicle Association a significant reduction in emissions is reached at a 50%-substitution level of diesel fuel by gas fuel (methane) and in such a case there is a tendency towards even significant emission decrease. In order to ensure widespread application of gaseous fuel as fuel for gas-diesel process it is necessary to develop a new working process, to improve fuel equipment, to enhance injection strategy and fuel supply control. A method for organization of working process for multi-fuel engine has been proposed on the basis of the performed analysis. An application has been submitted for a patent.

Keywords: gas-diesel engine, gas fuel, diesel fuel, working process, emissions of harmful substances, injection advance angle, ignition portion of diesel fuel, combustion pre-chamber

For citation: Vershina G. A., Bystrenkov O. S. (2017) Methods for Organization of Working Process for Gas-Diesel Engine. *Science and Technique*. 16 (5), 383–390. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-383-390 (in Russian)

Введение

Загрязнение атмосферного воздуха токсичными веществами является важной проблемой для большинства стран. В особенности данная проблема характерна для крупных городов с большим количеством автомобильного транспорта, так как на автомобилях в качестве силового агрегата используется двигатель внутреннего сгорания (ДВС). Рост токсичных выбросов двигателей внутреннего сгорания создает неприемлемую экологическую обстановку для окружающей атмосферы, которая ухудшается с течением времени. В связи с ростом количества автомобилей в крупных городах в местах сосредоточения автомобильного транспорта концентрация в воздухе вредных веществ, выбрасываемых с отработавшими газами, нередко превышает санитарные нормы в 15–30 раз [1, 2]. Прогнозы указывают на то, что дальнейшее увеличение количества автомобилей, а также других силовых установок с ДВС без эффективных природоохранных мероприятий недопустимо с экологической точки зрения. Поэтому перед двигателестроением стоит задача резкого уменьшения вредных выбросов с отработавшими газами.

Решение таких задач привело к внедрению каталитических систем доочистки, новых технологий впрыска топлива, технологии регулируемых фаз газораспределения, регулируемой системы турбонаддува и в последнее время – даже системы переменной степени сжатия двигателя. Такие технические решения в сочетании с электронным управлением в состоянии удовлетворить все более жесткие нормы выбросов, введенные законодательством.

Однако в силу того что отработавшие газы двигателей внутреннего сгорания, работающих на газовом топливе, значительно менее токсич-

ны, чем выбросы бензиновых и дизельных двигателей, применение газового топлива, в частности газодизельного процесса, может стать одним из средств по снижению загрязнения атмосферного воздуха токсичными веществами и удовлетворению растущих экологических норм.

Основная часть

По основному признаку – способу воспламенения – газодизели относятся к двигателям с принудительным воспламенением, так же как двигатели с воспламенением от искры (имеется в виду, что запальная порция дизельного топлива воспламеняется от сжатия и далее воспламеняет газовое топливо). Однако рабочий процесс в газодизелях отличается от рабочего процесса в двигателях с искровым зажиганием специфическими особенностями, связанными в первую очередь с заменой электрической искры в качестве источника зажигания порцией воспламеняющего дизельного топлива.

В газодизеле мощность источника зажигания значительно больше, чем в двигателях с искровым зажиганием. Кроме того, рабочая смесь поджигается не в одной точке у холодной стенки, а в центре заряда по поверхности распространения факела. Благодаря этому одна из важных положительных особенностей газодизельного процесса – значительное расширение границ возможного обеднения рабочей смеси.

Одним из способов является способ (рис. 1) [3–9], когда газовое топливо к двигателю поступает через регулятор давления (газовый редуктор), который поддерживает давление газа на некотором постоянном уровне, и затем через смеситель, где газ смешивается в нужной пропорции с воздухом. Регулирование количества газозооушной смеси, направляющейся к

цилиндрам двигателя, может осуществляться либо с помощью управляемой дроссельной заслонки, либо клапаном или золотником, что характерно для мощных многоцилиндровых двигателей, когда смеситель ставят на каждый цилиндр (а не общий на весь двигатель). В конце такта сжатия дизельное топливо через форсунку впрыскивается в нагретую газозоудшную смесь и, воспламенившись, зажигает ее.

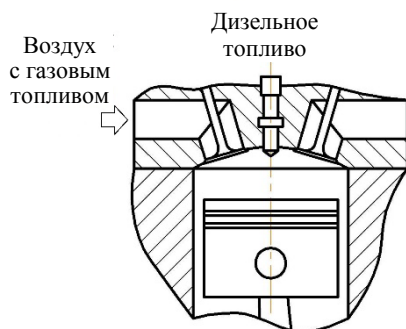


Рис. 1. Газодизель с одной форсункой для подачи дизельного топлива

Fig. 1. Gas-diesel engine with one injector for supplying diesel fuel

Данный способ позволяет существенно снизить объем отработавших газов, улучшает экологические показатели двигателей, уменьшает токсичность и дымность выхлопа и содержание в нем твердых частиц (сажи) благодаря чистоте газового топлива и обеднению рабочей смеси. Однако из-за обеднения смеси газодизель теряет до 6 % мощности, снижаются его динамические качества.

Другой способ реализации данного процесса (рис. 2) заключается в том, что воздух сжимается в цилиндре двигателя и газовое топливо впрыскивают в сжатый воздух через инжектор в конце такта сжатия [4]. Второй инжектор вводит пусковое топливо в камеру сгорания. Давление и температура внутри камеры являются достаточными для обеспечения самовоспламенения пускового топлива, которое в свою очередь воспламеняет газозоудшную смесь.

Двигатели данного типа требуют наличия двух отдельных инжекторов (один для газа и один для пускового топлива), более того, вспомогательное оборудование, которое необходимо установить рядом с двигателем для подачи двух видов топлива в каждый инжектор, делает двигатель значительно более сложным и доро-

гостоящим по сравнению с обычным дизельным двигателем.

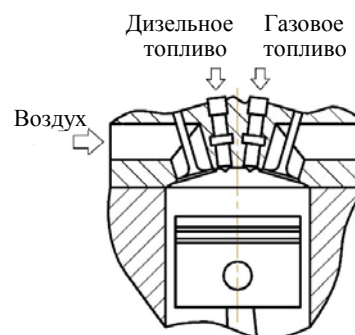


Рис. 2. Газодизель с двумя форсунками для подачи дизельного и газового топлива

Fig. 2. Gas-diesel engine with two injectors for supplying diesel and gas fuel

Также существует способ (рис. 3), который применяется обычно в мощных стационарных и судовых дизелях, работающих в узких диапазонах скоростных и нагрузочных режимов, где расход запальной дозы топлива составляет 5–10 % подачи топлива при номинальном режиме работы дизеля [3]. Такой расход может быть достигнут только при использовании специальной аппаратуры с уменьшенными размерами плунжера насоса. Поэтому на таких двигателях устанавливают по два комплекта насосов и форсунок.

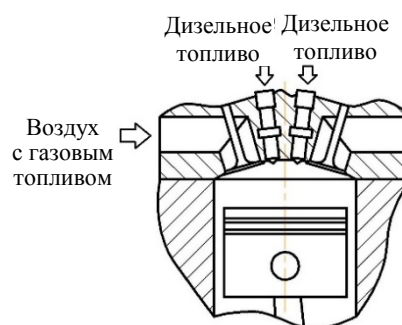


Рис. 3. Газодизель с двумя форсунками для подачи дизельного топлива

Fig. 3. Gas-diesel engine with two injectors for supplying diesel fuel

На газодизельных двигателях также может применяться форкамерно-факельное зажигание (рис. 4). Предкамера является предварительной камерой сгорания, объем которой составляет около 30 % от общего объема основной камеры сгорания. Назначением данного

решения выступают улучшение наполнения цилиндров, более эффективная организация газовых потоков в основной камере, а также повышение качества смесеобразования. В этом случае запальная порция дизельного топлива впрыскивается в форкамеру или вихрекамеру, где происходит его самовоспламенение. Предкамера (вихрекамера) соединяется с основной камерой специальными сопловыми каналами, через которые в основную камеру прорывается пламя. От контакта с ними смесь воздуха и газового топлива, находящаяся в основной камере сгорания, также воспламеняется.

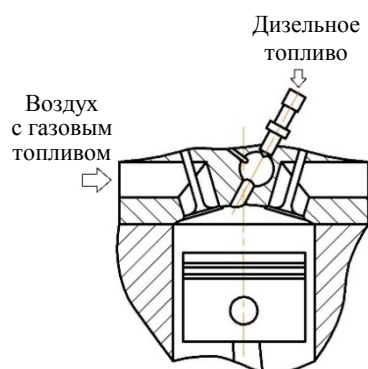


Рис. 4. Газодизель с предкамерой
Fig. 4. Gas-diesel engine with pre-chamber

На характер газодизельного процесса существенное влияние оказывают два параметра [3]:

1) доля теплоты, вводимой с воспламеняющим жидким топливом, $q_{ж} = Q_{ж}/(Q_{г} + Q_{ж})$, где $Q_{ж}$ – теплота, внесенная с жидким топливом; $Q_{г}$ – теплота, внесенная с газом;

2) угол опережения впрыска дизельного топлива θ .

Влияние $q_{ж}$ на показатели рабочего процесса определяют зависимости (рис. 5), полученные на одноцилиндровой установке. Минимально допустимую дозу воспламеняющего дизельного топлива при каждой нагрузке определяли как границу устойчивой работы двигателя, характеризовавшуюся резким увеличением неидентичности последовательных рабочих циклов и появлением пропусков воспламенения.

Минимальная доза воспламеняющего дизельного топлива увеличивается с уменьшением нагрузки как по абсолютной ($G_{ж}$), так и по относительной ($q_{ж}$) величине – при 100%-й

нагрузке достаточно было 5 % воспламеняющего дизельного топлива для обеспечения устойчивой работы газодизеля, а при 25%-й нагрузке для этого потребовалось уже $q_{ж} = 18$ %. При этом необходимая подача дизельного топлива возросла с 1,70 до 4,15 кг/ч.

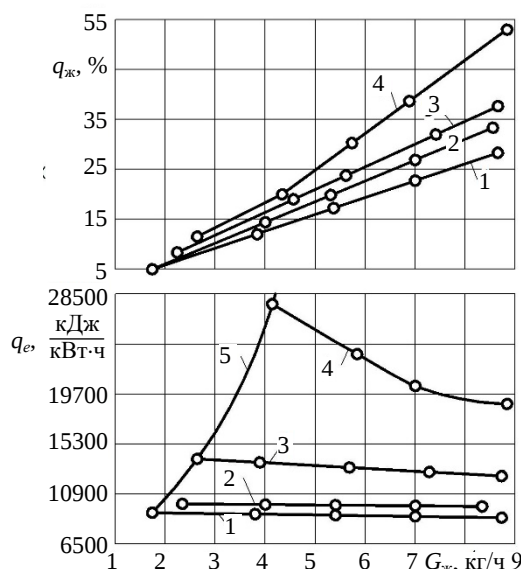


Рис. 5. Зависимость удельного суммарного расхода теплоты от доли запальной порции дизельного топлива:
1 – 100 % N_e ; 2 – 75 % N_e ; 3 – 50 % N_e ; 4 – 25 % N_e ; 5 – q_{emin}

Fig. 5. Dependence of total heat consumption rate on diesel fuel amount in ignition portion:
1 – 100 % N_e ; 2 – 75 % N_e ; 3 – 50 % N_e ; 4 – 25 % N_e ; 5 – q_{emin}

С увеличением $q_{ж}$ наблюдается уменьшение удельного расхода теплоты q_e , незначительного при больших нагрузках и более существенного при малых. Другие параметры рабочего процесса (максимальное давление цикла, температура выхлопных газов и пр.) мало зависят от $q_{ж}$.

Влияние на показатели газодизельного процесса угла θ опережения впрыска воспламеняющего топлива определяют приведенные на рис. 6 зависимости. Удельный расход теплоты q_e уменьшается при увеличении угла θ – заметно при малых нагрузках и незначительно при больших. Однако применению оптимальных углов опережения впрыска при больших нагрузках препятствует значительное повышение максимального давления цикла и скорости нарастания давления на участке сгорания до P_{max} , что объясняется уже отмеченным увеличением задержки воспламенения при переходе от дизельного процесса к газодизельному.

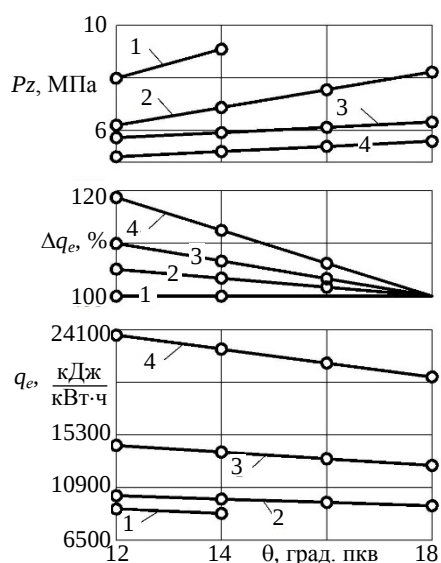


Рис. 6. Зависимость показателей газодизеля от угла опережения впрыска запальной порции дизельного топлива: 1 – 100 % N_e ; 2 – 75 % N_e ; 3 – 50 % N_e ; 4 – 25 % N_e

Fig. 6. Dependence of gas-diesel engine indices on injection advance angle of diesel fuel ignition portion: 1 – 100 % N_e ; 2 – 75 % N_e ; 3 – 50 % N_e ; 4 – 25 % N_e

Приведенные данные указывают на целесообразность изменения доли воспламеняющего топлива $q_{ж}$ и угла θ опережения впрыска при регулировании нагрузки газодизеля. Однако это

представляет значительные технические трудности даже на современных двигателях с электронным управлением впрыска топлива.

Современное конструктивное исполнение системы газодизельного двигателя можно рассмотреть на примере газодизеля ГД-243.

Газодизель ГД-243 предназначен для тракторов сельскохозяйственного назначения, коммунального хозяйства, дорожной и строительной техники [10]. На нем установлена современная топливная система (рис. 7), которая состоит из двух топливных систем для подачи газового и дизельного топлива.

Газодизельный двигатель способен работать как по газодизельному циклу, так и на чистом дизельном топливе. В газодизельном режиме в качестве газомоторного топлива используются компримированный природный газ (метан) и запальная доза дизельного топлива. При этом замещение дизельного топлива газом достигает до 70 % на режиме номинальной мощности.

Компримированный природный газ хранится в баллонах, установленных на технике, под давлением до 20 МПа. Баллоны оснащаются вентилями с автоматическим противопожарным клапаном. Газ из баллонов под давлением 20 МПа поступает в двухступенчатый редуктор высокого давления. Редуктор понижает давление газа с 20 МПа до 2–4 бар.

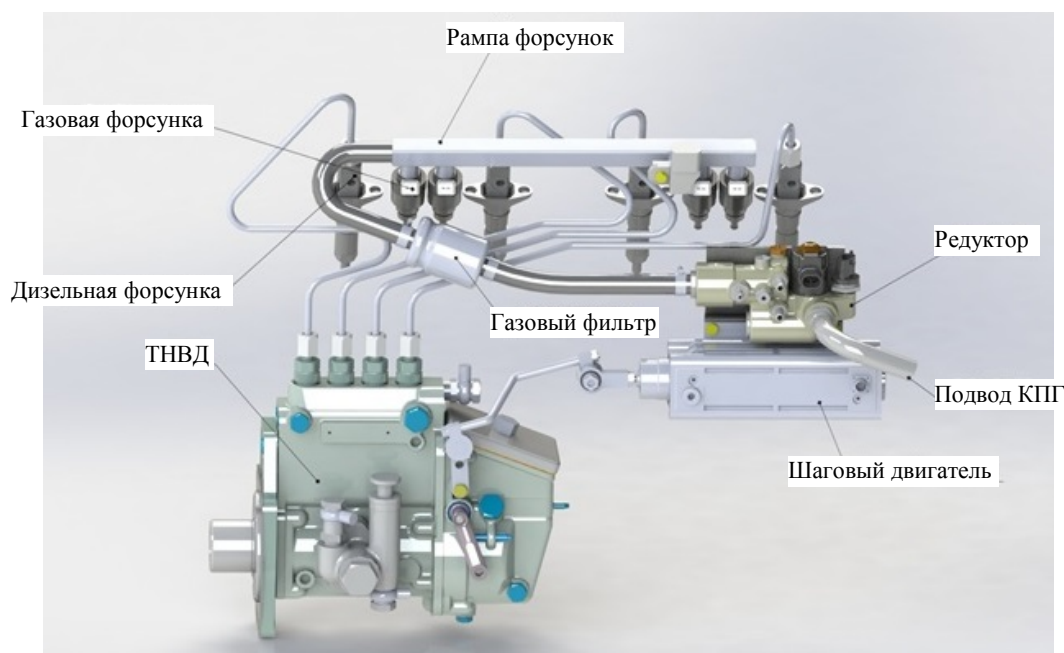


Рис. 7. Топливная аппаратура газодизельного двигателя ГД-243

Fig. 7. Fuel injection equipment of gas-diesel engine ГД-243

Из редуктора газ через газовый фильтр поступает в газовую рампу. Редуктор высокого давления поддерживает постоянное давление в рампе на уровне до 4 бар.

На рычаге управления подачей топлива ТНВД через специальный механизм смонтирован датчик положения рейки ТНВД, который следит за положением рейки при задании водителем (механиком) желаемой частоты вращения коленчатого вала.

Ограничение подачи топлива производится шаговым двигателем путем воздействия на рейку ТНВД через рычаг останова. Управление происходит за счет ограничения хода рейки ТНВД.

Пуск газодизеля производится только в дизельном режиме. Перевод в газодизельный режим осуществляется водителем (механиком) при помощи специальной кнопки переключения видов топлива, установленной в кабине трактора (транспортного средства). Перевод дизеля в газодизельный режим газа происходит только после достижения температуры охлаждающей жидкости 38–40 °С. Для этого редуктор высокого давления оснащен датчиком температуры ОЖ и соединен с системой охлаждения газодизеля для исключения замерзания редуктора от перепада давления газа.

Управление подачей газа осуществляется при помощи электронного блока управления (ЭБУ) за счет времени открытия газовой форсунки.

Для точного дозирования количества подаваемого газа на газодизеле установлены:

- датчик частоты вращения коленчатого вала;
- датчик положения распредвала.

На газодизельном двигателе устанавливается модифицированный ТНВД-004, отличающийся от штатного ТНВД наличием механизма установки запальной дозы (МУЗД). МУЗД предназначен для ограничения подачи дизельного топлива при работе двигателя в газодизельном режиме, а также для автоматического регулирования подачи газа в двигатель с помощью штатного регулятора частоты вращения.

В газодизельном режиме, так же как и в дизельном, регулятор осуществляет всережимное регулирование частоты вращения.

По проведенному анализу подана заявка на патент. Задача, на решение которой направлено заявленное изобретение, заключается в сниже-

нии общего выброса вредных веществ с отработавшими газами, а также в повышении надежности и долговечности двигателя.

Технический результат достигается применением газового топлива наряду с бензином и дизельным топливом и возможностью управления составом рабочей смеси (соотношением воздуха, бензина, газового и дизельного топлива) на различных режимах работы двигателя, управлением начала впрыска, его продолжительностью и режимами работы систем впрыска.

Применение предкамерного способа смесеобразования приведет к более низкому, чем у двигателей с непосредственным впрыском, максимальному давлению сгорания и уменьшению жесткости работы, что, в свою очередь, повысит надежность и долговечность двигателя. Конструктивный способ реализации данного изобретения приведен на рис. 8.

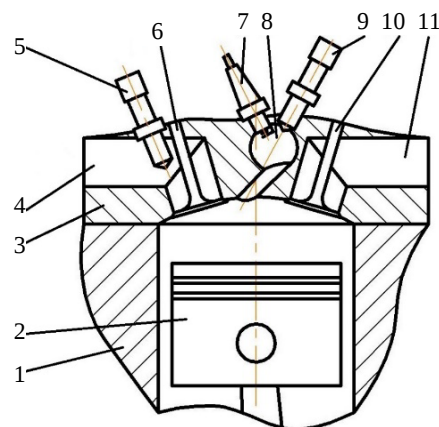


Рис. 8. Конструктивная реализация способа

Fig. 8. Constructive implementation of method

На блок цилиндров 1 устанавливается головка блока цилиндров 3. В цилиндре двигателя находится поршень 2, который через шатун соединен с коленчатым валом двигателя (не показаны). В головке блока цилиндров 3 находятся впускной канал 4 и впускной клапан 6, предназначенные для подачи рабочей смеси в цилиндр двигателя, а также выпускной канал 11 и выпускной клапан 10, предназначенные для отвода отработавших газов из цилиндра двигателя. Форсунка 5 установлена в головке блока цилиндров 3 таким образом, чтобы ее распылитель располагался во впускном канале над впускным клапаном. Форсунка 9 уста-

навливается таким образом, чтобы ее распылитель находился в форкамере 8. Форкамера соединена узким каналом с цилиндром двигателя. Также в форкамеру устанавливается свеча зажигания 7.

При движении поршня вниз (такт впуска) через открывшийся впускной клапан из впускного канала в цилиндр двигателя поступают газозоудная смесь и бензин, впрыскиваемый форсункой 5. При движении поршня вверх впускной клапан закрывается и рабочая смесь начинает сжиматься в цилиндре двигателя (такт сжатия). Запальная порция дизельного топлива впрыскивается в форкамеру форсункой 9. Воспламенившееся в форкамере дизельное топливо, расширяясь, проходит через канал, соединяющий форкамеру и цилиндр двигателя, и воспламеняет рабочую смесь в цилиндре двигателя (в конце такта сжатия). Рабочая смесь, сгорая, расширяется и заставляя поршень двигаться вниз (рабочий ход). При дальнейшем движении поршня открывается выпускной клапан 10, и отработавшие газы через выпускной канал 11 выходят из цилиндра двигателя (такт выпуска). Момент впрыска дизельного топлива и бензина, продолжительность и схема впрыска в зависимости от режима работы двигателя задаются электронным блоком управления (не показан). Также на отдельных режимах двигатель может работать без дизельного топлива, тогда рабочая смесь будет состоять из газового топлива, бензина и воздуха. В этом случае рабочая смесь воспламеняется от свечи зажигания. На некоторых режимах двигатель может работать по газодизельному процессу. Количество газового топлива и воздуха может регулироваться различными способами (управляемая дроссельная заслонка и др.).

Обсуждение результатов

Двигатель, работающий в газодизельном режиме, обладает более совершенными экологическими характеристиками, чем двигатель, работающий на дизельном топливе. Однако

степень уменьшения эмиссии экологических вредных веществ сильно зависит от режима работы двигателя и степени замещения дизельного топлива газовым.

По данным Европейской ассоциации газомоторных транспортных средств, при уровне замещения 50 % дизельного топлива газовым (метаном) достигается существенное снижение выбросов (рис. 9), при этом есть тенденция к еще большему их уменьшению [11].

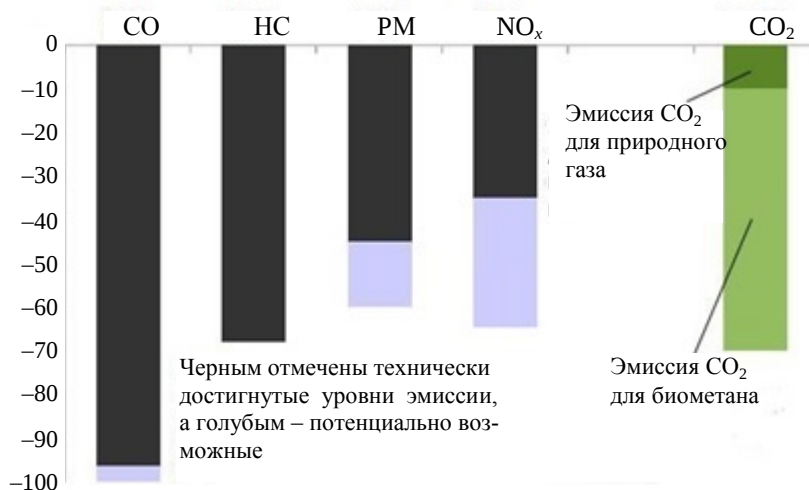


Рис. 9. Диаграмма снижения выбросов

Fig. 9. Diagram of emission reduction

Поскольку основной заряд газовый, а горючая смесь готовится не непосредственно в цилиндре, а на некотором удалении от него, газодизелю присуща некоторая инерционность, его реакция на манипуляции педалью газа запаздывает. Чем ближе к цилиндру инжектируется газовый заряд, тем лучше реакция двигателя. В идеале газ должен впрыскиваться непосредственно в цилиндр, причем несколькими форсунками для оптимального смесеобразования.

ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ способов организации рабочего процесса газодизельного двигателя, конструктивных особенностей топливной аппаратуры современного газодизельного двигателя. Намечены проблемы и дальнейшие направления для развития и совершенствования газодизельного двигателя.

2. Для продвижения газового топлива как топлива для двигателей необходимы организа-

ции нового рабочего процесса, улучшение топливной аппаратуры, совершенствование стратегий впрыска и управлением подачей топлива.

3. По проведенному анализу предложен способ организации рабочего процесса много-топливного двигателя, подана заявка на патент.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горбунов, В. В. Токсичность двигателей внутреннего сгорания / В. В. Горбунов, Н. Н. Патрахальцев. М.: Изд-во РУДН, 1998. 214 с.
2. Жегалин, О. И. Снижение токсичности автомобильных двигателей / О. И. Жегалин, П. Д. Лупачев. М.: Транспорт, 1985. 120 с.
3. Генкин, К. И. Газовые двигатели / К. И. Генкин. М.: Машиностроение, 1977. 196 с.
4. Газовый двигатель: пат. № 2369754. Рос. Федерации / Мария Бюсвеен, Терье Алмос, Роберт Йоргенсен, Фроде Квинге; дата публ. 10.10.2009.
5. Самоль, Г. И. Газобаллонные автомобили / Г. И. Самоль, И. И. Гольдблат. М.: Автотрансиздат, 1961. 142 с.
6. Демьянов, Л. А. Многотопливные двигатели / Л. А. Демьянов, С. К. Сарафанов. М.: Воениздат, 1968. 104 с.
7. Генкин, К. И. Газовые двигатели / К. И. Генкин. М.: Машгиз, 1962. 116 с.
8. Газобаллонные автомобили / Е. Г. Григорьев [и др.]; под общ. ред. И. А. Хороманской. М.: Машиностроение, 1989. 216 с.
9. Коллеров, Л. К. Газовые двигатели поршневого типа / Л. К. Коллеров. Л.: Машиностроение, 1968. 248 с.
10. Газодизель ГД-243: Дополнение к руководству по эксплуатации 243-0000100РЭ (дизели Д-243, Д-245 и их модификации). Введ. 11.12.2014. Минск: ОАО «УКХ «ММЗ». 12 с.
11. Газодизель. Чистая энергия [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://ce-fund.ru/node/56>.

Поступила 09.06.2017

Подписана в печать 15.08.2017

Опубликована онлайн 29.09.2017

REFERENCES

1. Gorbunov V. V., Patrakhaltsev N. N. (1998) *Toxicity Level of Internal-Combustion Engine*. Moscow, Russian University of Peoples' Friendship. 214 (in Russian).
2. Zhegalin O. I., Lupachiov P. D. (1985) *Reduction of Automobile Engine Toxicity*. Moscow, Transport Publ. 120 (in Russian).
3. Genkin K. I. (1977) *Gas Engines*. Moscow, Mashinostroyenie Publ. 196 (in Russian).
4. Bysveen M., Almås T., Jørgensen R., Kvinge F. (2009) *Gas Engine*. Patent Russian Federation No 2369754 (in Russian).
5. Samol G. I., Goldblat I. I. (1961) *Compressed-Gas Vehicles*. Moscow, Publishing House "Avtotransizdat". 142 (in Russian).
6. Demianov L. A., Sarafanov S. K. (1968) *Multifuel Engines*. Moscow, Publishing House "Voenizdat". 104 (in Russian).
7. Genkin K. I. (1962) *Gas Engines*. Moscow, Publishing House "Mashgiz". 116 (in Russian).
8. Grigor'ev E. G., Kolubaev B. D., Erokhov V. I., Zubarev A. A., Khoromanskaya I. A. (1989) *Compressed-Gas Vehicles*. Moscow, Mashinostroyenie Publ. 216 (in Russian).
9. Kollerov L. K. (1968) *Gas Engines of Piston-Type*. Leningrad, Mashinostroyenie Publ. 248 (in Russian).
10. Minsk Motor Plant (2014) ГД-243-Gas-Diesel: 243-0000100РЭ-Operational Manual Supplement (Diesels Д-243, Д-245 and their Modifications). Minsk. 12 (in Russian).
11. Gas-Diesel. *Clean Energy*. Available at: <http://www.ce-fund.ru/node/56> (in Russian).

Received: 09.06.2017

Accepted: 15.08.2017

Published online: 29.09.2017

DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-391-399

УДК 621.9.047.7

Электролитно-плазменная обработка при нестационарных режимах в условиях высокоградиентного электрического поля

Канд. техн. наук, доц. Ю. Г. Алексеев¹⁾, канд. техн. наук А. Ю. Королев¹⁾, инж. А. Э. Паршута¹⁾,
канд. техн. наук, доц. В. С. Нисс¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

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

Реферат. Электролитно-плазменная обработка получила широкое распространение в промышленности в качестве альтернативы традиционным химическим, электрохимическим и механическим методам повышения качества поверхности изделий из металлических материалов. Преимуществами такой обработки являются высокая интенсивность сглаживания микронеровностей, применение в качестве электролитов растворов солей низкой концентрации, возможность обработки изделий сложной формы. Основной недостаток метода – высокая энергоемкость, поэтому метод можно отнести в его классическом виде к энергоемкому производству. Возможным методом снижения энергоемкости является обработка в нестационарных режимах, которые возникают в переходной зоне между коммутационным и устойчивым процессом электролитно-плазменной обработки и характеризуются периодическим образованием устойчивой парогововой оболочки и переходом к электрохимическому процессу. В статье приводятся результаты исследования влияния высокоградиентного электрического поля при нестационарных режимах электролитно-плазменной обработки на энергетические параметры процесса и характеристики обрабатываемой поверхности. Установлено, что высокоградиентное электрическое поле оказывает существенное влияние на снижение удельной потребляемой мощности, что объясняется уменьшением потерь в электролите и влиянием поля на образование и поддержание парогововой оболочки. В результате исследования влияния высокоградиентного электрического поля при нестационарных режимах электролитно-плазменной обработки на характеристики поверхностного слоя установлено, что значительная импульсная плотность тока в зоне преимущественно электрохимической обработки приводит к селективному травлению поверхности и образованию характерного микрорельефа поверхности с развитой пористой микроструктурой с размерами пор от 0,3 до 2,5 мкм. Наиболее выраженная пористая микроструктура обеспечивается при напряжении 270–300 В и величине добавочной индуктивности 3,2 мГн.

Ключевые слова: электролитно-плазменная обработка, парогововая оболочка, поверхность, индуктивность, пористая структура

Для цитирования: Электролитно-плазменная обработка при нестационарных режимах в условиях высокоградиентного электрического поля / Ю. Г. Алексеев [и др.] // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 5. С. 391–399. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-391-399

Electrolyte-Plasma Treatment under Non-Stationary Modes in High-Gradient Electric Field

Yu. G. Aliakseyeu¹⁾, A. Yu. Korolyov¹⁾, A. E. Parshuto¹⁾, V. S. Niss¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Electrolyte-plasma treatment has become widespread in industry as an alternative to traditional chemical, electrochemical and mechanical methods for surface quality improvement of products made of metallic materials. Advantages

Адрес для переписки

Королев Александр Юрьевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 24,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-25-98
korolyov129@gmail.com

Address for correspondence

Korolyov Aleksandr Yu.
Belarusian National Technical University
24 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-25-98
korolyov129@gmail.com

electrolyte-plasma treatment are a high intensity of microroughness smoothing, application of low concentration salt solutions as electrolytes, possibility to machine workpieces that have complex shape. The main disadvantage of this method is high power consumption, so the method can be considered in its classical form as to the power-consuming industry. A possible method for reduction of power consumption is treatment in unsteady modes that arise in a transition zone between a switching and stable electrolyte-plasma treatment process and it is characterized by periodic formation of a stable vapor-gas shell and a transition to an electrochemical process. The paper presents results of investigations for the influence of a high-gradient electric field under unsteady electrolyte-plasma treatment modes on energy parameters of the process and characteristics of the treated surface. It has been established that a high-gradient electric field has a significant effect on the decrease in specific power consumption and it is explained by a decrease in electrolyte losses and influence of the field on formation and maintenance of the vapor-gas shell. As a result of the investigations for an influence of a high-gradient electric field being in unsteady EPT modes on characteristics of the surface layer it has been determined that a significant impulse current density in the zone of predominantly electrochemical treatment leads to a selective etching of the surface and formation of a characteristic micro relief of the surface with a developed porous microstructure having pore sizes from 0.3 to 2.5 microns. The most pronounced porous microstructure has been provided at a voltage of 270–300 V and an additional inductance of 3.2 mH.

Keywords: electrolytic-plasma treatment, vapor-gas shell, surface, inductance, porous structure

For citation: Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Parshuto A. E., Niss V. S. (2017) Electrolyte-Plasma Treatment under Non-Stationary Modes in High-Gradient Electric Field. *Science and Technique*. 16 (5), 391–399. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-391-399 (in Russian)

Введение

Один из прогрессивных методов повышения качества поверхности металлических изделий – электролитно-плазменная обработка (ЭПО), которая широко используется для полирования, удаления заусенцев и очистки изделий медицинского назначения, декоративных изделий, деталей машин и приборов, а также для повышения физико-механических и химических свойств поверхности [1–3], подготовки поверхности для нанесения покрытий [4]. Другими направлениями применения технологии ЭПО являются: размерная обработка ответственных длинномерных изделий [5–7], полирование и очистка внутренних поверхностей длинномерных трубчатых изделий [8], обработка поверхности с целью удаления инородных включений и снижения плотности дислокаций [9, 10].

ЭПО имеет ряд существенных преимуществ перед традиционными методами механического, электрохимического и химического полирования:

- возможность получения зеркальной поверхности с высотой микронеровностей вплоть до $Ra = 0,01$ мкм;
- высокую экологическую безопасность по сравнению с классическим электрохимическим полированием за счет применения электролитов на основе водных растворов солей общей концентрацией не более 5 % [11];
- повышение коррозионной стойкости поверхности [12, 13];
- возможность обработки деталей и изделий сложной формы.

Основной недостаток метода – высокая энергоемкость. Плотность мощности в процессе обработки может достигать 300 Вт/см^2 , поэтому метод можно отнести в его классическом виде к энергоемкому производству. В результате предварительных исследований установлено, что возможным методом снижения энергоемкости является обработка в нестационарных режимах, которые возникают в переходной зоне между коммутационным и устойчивым процессом ЭПО и характеризуются периодическим образованием устойчивой парогазовой оболочки и переходом к электрохимическому процессу. Кроме того, анализ процессов, протекающих в парогазовой оболочке, показал, что величина градиента напряженности электрического поля также может оказывать значительное влияние на энергетические характеристики процесса ЭПО (при обычных условиях градиент электрического поля составляет $(6–7) \cdot 10^4 \text{ В/м}$).

Цель данной работы – моделирование переходных электрических процессов и исследование влияния высокоградиентного электрического поля при нестационарных режимах на энергетические параметры ЭПО и состояние поверхностного слоя обрабатываемого материала.

Оборудование для выполнения исследований

Для проведения экспериментальных исследований влияния высокоградиентного элект-

рического поля при нестационарных режимах ЭПО на энергетические параметры и характеристики поверхностного слоя спроектирована электролитическая ячейка, представленная на рис. 1. Ячейка содержит обрабатываемый образец 1 (пруток из стали 12Х18Н10Т диаметром 1,8 мм), резьбовую втулку 2 из фторопласта, анодный резервуар 3 из стали 12Х18Н10Т, изолятор-отбойник 4 из фторопласта, электрод-катод 5, патрубок для подачи электролита 6 и клеммы для подключения рабочего напряжения – катод 7 и анод 8. Канал 9 обеспечивает подачу электролита в электрод-катод. Площадь обрабатываемой поверхности составляет $0,95 \text{ см}^2$, при этом напряженность электрического поля у поверхности исследуемой детали до $13,5 \cdot 10^4 \text{ В/м}$.

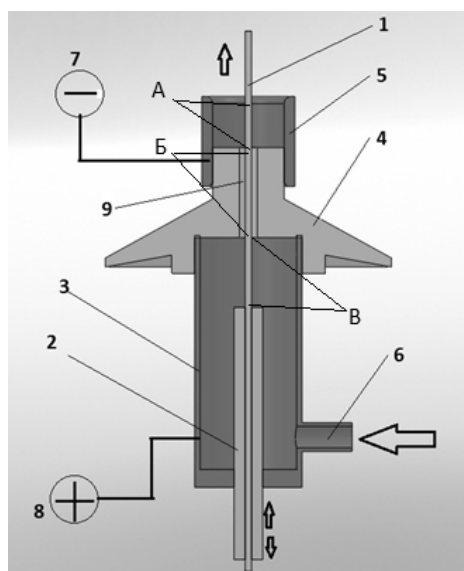


Рис. 1. Ячейка для экспериментальных исследований

Fig. 1. Cell for experimental studies

Зона А имеет положительную поляризацию относительно электрода-катада, и у поверхности детали образуется парогазовая оболочка, приводящая к полированию поверхности А. Зона Б защищена от обработки изолятором-отбойником. Регулировкой размеров зоны В втулкой можно перевести устойчивый режим ЭПО в нестационарный аperiодический режим в нижней части зоны А, приводящий к протеканию импульсного электрохимического процесса, вызывающего интенсивный сьем металла в этой зоне.

Ячейка работает следующим образом. Электроды 7 и 8 подключаются к соответствующим полюсам источника питания напряжением 240–320 В. Через патрубок подается электролит – 4–8%-й водный раствор сульфата аммония температурой 40–80 °С.

Схема основана на использовании выпрямителя ДЕЗ-230-50 и трехфазного автотрансформатора, позволяющего регулировать постоянное выходное напряжение выпрямителя в пределах 0–320 В при токе нагрузки до 50 А. Для выбора различных значений индуктивностей $L1-L3$ применены выключатели $S3-S5$. Номинал емкости $C1$ составлял 4 мкФ. Добавочная индуктивность изменялась в диапазоне 0–3L с шагом 1L ($L = 1,6 \text{ мГн}$). Для контроля и регистрации электрических режимов процесса использовали запоминающий цифровой осциллограф С8-46/1.

Электронно-микроскопические фотографии поверхности образцов после ЭПО при нестационарных режимах в условиях высокоградиентного электрического поля были сделаны с помощью сканирующего электронного микроскопа Vega Tescan.

Методы исследования

Для анализа энергетических параметров электрических процессов в электролитической ячейке при ЭПО в высокоградиентном электрическом поле рассмотрена схема с включенным в нее нелинейным сопротивлением R N-типа [14], аналогичным характеристике нелинейного сопротивления парогазовой оболочки при ЭПО (рис. 2).

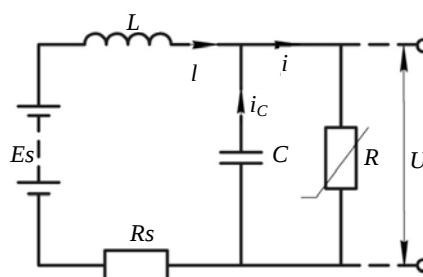


Рис. 2. Эквивалентная схема электролитно-плазменной обработки

Fig. 2. Equivalent circuit of electrolytic-plasma treatment (EPT)

Рассматриваемая система содержит нелинейное сопротивление R , описывающее пове-

дение парогазовой оболочки при ЭПО, подключенное через выходное сопротивление R_s к источнику постоянного технологического напряжения E_s . Значения E_s и R_s задают исходную точку работы ячейки на N -образной вольтамперной характеристике (ВАХ) процесса ЭПО в условиях высокоградиентного электрического поля. От выбора этой точки и параметров реактивных элементов (в реальном источнике питания – $L = 4,8$ мГн и $C = 4$ мкФ) зависит режим работы ячейки. Ниже рассмотрены аналитические исследования переходных процессов работы цепи с различными технологическими режимами (установкой рабочего напряжения E_s в диапазоне 240–320 В). Поведение данной схемы при $E_s = \text{const}$ описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{di}{dt} = \frac{E_s - iR - u}{L}; \quad (1)$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{i - I(u)}{C}. \quad (2)$$

Для решения этой нелинейной системы использовали программный пакет Mathematica 9 [15], имеющий для дифференциальных уравнений встроенную функцию системы NDSolve с выводом результатов в графической форме. Программный пакет Mathematica 9 позволяет найти решение указанной выше системы в виде временных зависимостей тока $i(t)$ в цепи R_s – L , напряжения $u(t)$ на нелинейном сопротивлении R и значение потребляемой мощности с использованием подпрограмм решения методом Рунге – Кутты. Решение находится при начальных условиях $i(0) = 0$ и $u(0) = 0$, начиная с момента времени $t = 0$. Это позволяет, не меняя методики моделирования цепи, задавать любые N -образные ВАХ.

Для моделирования нужно иметь непрерывную вольтамперную характеристику, описываемую полиномиальной интерполяцией, выполняемой с помощью встроенной функции Interpolation при степени полинома, равной 4. Экспериментальные данные для интерполяции снимались при изменении рабочего напряжения в диапазоне 0–320 В, при рабочей температуре электролита (водного раствора сульфата аммония) 40 и 80 °С и концентрации электролита 4 и 8 %. Вольтамперная характеристика, построенная по результатам интерполяции, представлена на рис. 3.

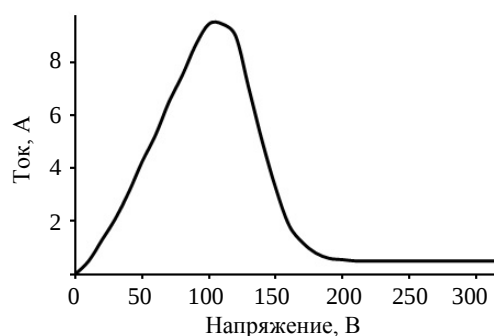


Рис. 3. Вольтамперная характеристика процесса электролитно-плазменной обработки в высокоградиентном электрическом поле при температуре электролита 40 °С и концентрации 4 %
Fig. 3. Current-voltage characteristic of EPT process in high-gradient electric field at electrolyte temperature of 40 °С and concentration of 4 %

Результаты и обсуждение

По результатам моделирования получены графики, описывающие поведение электрических параметров процесса (потребляемой мощности, напряжения на ячейке, напряжения источника питания, тока) при различном рабочем напряжении и температуре электролита. В качестве примера на рис. 4 приведены результаты моделирования при температуре электролита 80 °С, концентрации 8 % и напряжении 320 В.

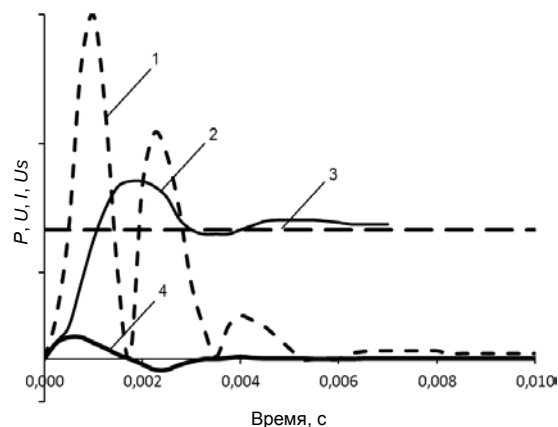


Рис. 4. Переходные процессы электрических режимов электролитно-плазменной обработки в высокоградиентном электрическом поле при температуре электролита 80 °С, концентрации 8 % и напряжении 320 В: 1 – потребляемая мощность P , Вт; 2 – напряжение на ячейке U , В; 3 – напряжение источника питания U_s , В; 4 – ток I , А
Fig. 4. Transient processes of electric modes for EPT in high-gradient electric field at temperature of 80 °С, concentration of 8 % and voltage of 320 V: 1 – power consumption P , W; 2 – voltage on cell U , V; 3 – power supply voltage U_s , V; 4 – current I , A

Результаты испытаний показывают, что даже незначительное изменение параметров одной и той же цепи в источнике питания ЭПО способно существенно изменить режимы ее работы. На основании полученных данных построены зависимости, характеризующие изменение амплитудного значения мощности и мощности в установившемся режиме от напряжения источника питания (рис. 5, 6).

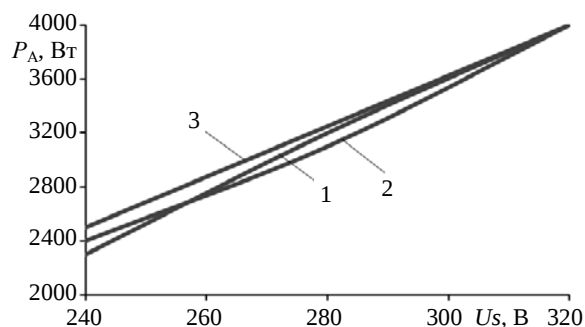


Рис. 5. Зависимость амплитудного значения мощности электролитно-плазменной обработки от напряжения источника питания в высокоградиентном электрическом поле при температуре T , °C: 1 – 40; 2 – 60; 3 – 80

Fig. 5. Dependence of amplitude value for EPT power on voltage of power supply in high-gradient electric field: 1 – $T = 40$ °C; 2 – $T = 60$ °C; 3 – $T = 80$ °C

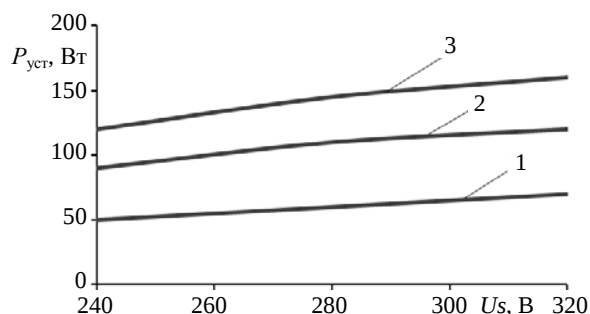


Рис. 6. Зависимость мощности электролитно-плазменной обработки в установившемся режиме от напряжения источника питания в высокоградиентном электрическом поле при температуре T , °C: 1 – 40; 2 – 60; 3 – 80

Fig. 6. Dependence of EPT power in steady state on voltage of power source in high-gradient electric field: 1 – $T = 40$ °C; 2 – $T = 60$ °C; 3 – $T = 80$ °C

Анализ зависимостей, представленных на рис. 5, 6, показывает, что максимальная мощность, потребляемая ячейкой в начальный период времени, после подачи напряжения достигает 2,3–4,2 кВт/см², а мощность в установившемся режиме ЭПО – 50–140 Вт/см².

Перегрузка по мощности составляет 40–50 раз, что указывает на необходимость повышенного внимания к надежности всех составляющих элементов электрической схемы источника питания ЭПО.

Сравнение удельной мощности ЭПО в низко- и высокоградиентном электрических полях при ЭПО показывает существенное снижение удельной потребляемой мощности (рис. 7) с 280 до 160 Вт/см² при 45 °C и с 120 до 70 Вт/см² при 80 °C. Такое снижение мощности при ЭПО можно объяснить уменьшением потерь в электролите и влиянием высокоградиентного электрического поля на образование и поддержание паргазовой оболочки.

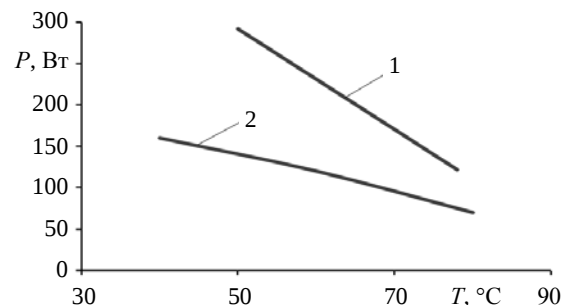


Рис. 7. Сравнение удельной мощности электролитно-плазменной обработки в: 1 – низкоградиентном; 2 – высокоградиентном полях

Fig. 7. Comparison of specific power for EPT field: 1 – low-gradient field; 2 – high-gradient field

В качестве примера на рис. 8 представлены результаты моделирования переходного процесса при нестационарных режимах ЭПО в высокоградиентном электрическом поле при температуре электролита 40 °C и концентрации 4 %.

Рассмотрение диаграмм переходных процессов при нестационарных режимах показывает наличие существенного броска тока в начальной стадии процесса при непосредственном контакте электролита поверхности детали с последующим установлением режима колебаний тока и напряжения. Такой режим существенно зависит от величины индуктивности, включенной последовательно с электролитической ячейкой.

Для определения энергии, выделяющейся в ячейке в нестационарном режиме, анализировались осциллограммы тока при различных режимных параметрах процесса – напряжения

питания, концентрации электролита и величины добавочной индуктивности. Пример осциллограммы, полученной при добавочной индуктивности $1L$, напряжении 240 В , концентрации электролита 4% и температуре 40°C , представлен на рис. 9.

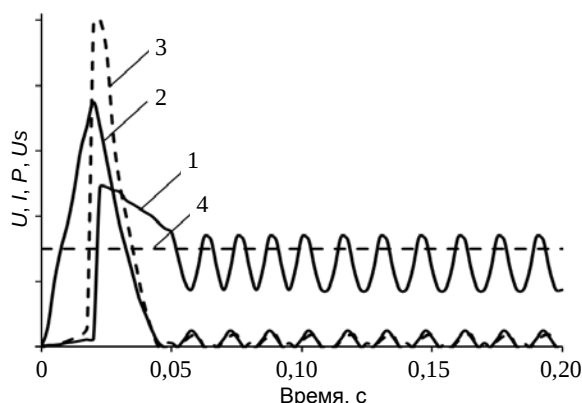


Рис. 8. Диаграмма переходного процесса при нестационарных режимах электролитно-плазменной обработки в высокоградиентном электрическом поле:

- 1 – напряжение на ячейке U , В; 2 – ток I , А;
- 3 – потребляемая мощность P , Вт;
- 4 – напряжение источника питания U_s , В

Fig. 8. Diagram of transient process for unsteady EPT modes in high-gradient electric field:

- 1 – voltage on cell U , V; 2 – current I , A;
- 3 – power consumption P , W; 4 – power supply voltage U_s , V

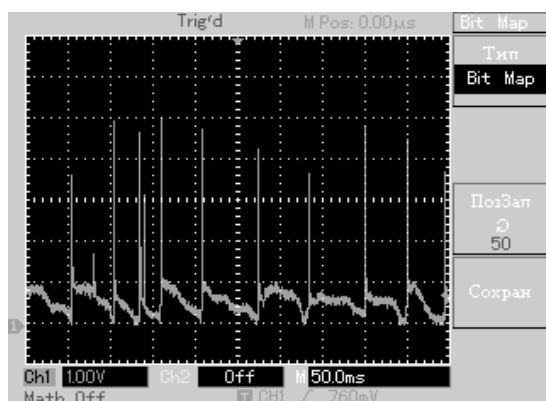


Рис. 9. Осциллограмма тока при электролитно-плазменной обработке в высокоградиентном электрическом поле при добавочной индуктивности $3L$, напряжении 300 В , концентрации электролита 4% и температуре 40°C (разрешение по току – $2,5\text{ А/дел}$)

Fig. 9. Oscillogram of current during EPT in high-gradient electric field with $3L$ additional inductance, voltage of 300 В , electrolyte concentration of 4% and temperature of 40°C (current resolution 2.5 A/div)

Оценка полученных экспериментальных осциллограмм показала существенное влияние

величины добавочной индуктивности на характер протекания тока через парогазовую оболочку при нестационарных режимах обработки. Для анализа энергетических параметров ЭПО при нестационарных режимах обработки выбирали длительность одного кадра осциллограммы в 500 мс и оценивали количество и амплитуду импульсов тока, свидетельствующих о возникновении нестационарного режима ЭПО с кратковременным переходом в стадию электрохимического процесса. Результаты измерения энергии, выделяющейся в ячейке, представлены на рис. 10.

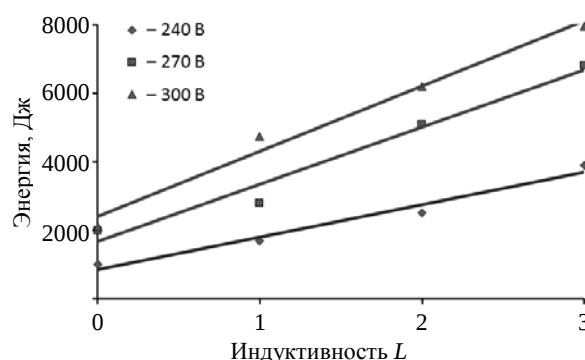


Рис. 10. Энерговыведение в ячейке в зависимости от значения рабочего напряжения и величины добавочной индуктивности

Fig. 10. Energy liberation in cell according to operating voltage and additional inductance values

Анализ полученных результатов показывает, что потребляемая ячейкой энергия повышается с увеличением индуктивности. Так, рост индуктивности от 0 до $4,8\text{ мГн}$ приводит к повышению потребляемой энергии от $0,96$ – $2,25$ до $3,84$ – $7,98\text{ кДж}$. Это связано с перераспределением энергии в электрохимическую составляющую процесса ЭПО.

Все образцы, обработанные в высокоградиентном электрическом поле при нестационарных режимах, имели типичное распределение зон изменения внешнего вида поверхности (рис. 11): 1 – катодная зона; 2 – зона скопления пузырьков водорода в верхней части катодной зоны; 3 – зона разделительной перегородки из фторопласта; 4 – зона преимущественно электрохимической обработки; 5 – зона преимущественно ЭПО; 6 – переходная зона между поверхностью электролита и воздухом; 7, 8 – необрабатываемые зоны.

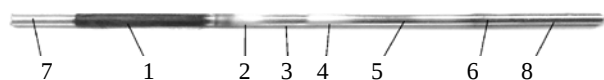


Рис. 11. Характерные зоны обработки образцов

Fig. 11. Typical processing zones for samples

Для зон обработки 4 и 5 выполняли анализ морфологии и микропрофиля обработанной поверхности с помощью сканирующей электронной микроскопии. Установлено существ-

венное отличие обработанной поверхности в зонах 4 и 5, что объясняется различным характером процессов, протекающих в этих зонах. Поверхность образцов в зоне 5 имеет сглаженный микропрофиль и характеризуется наличием нежелательных питтингов (рис. 12).

Поверхность образцов в зоне 4 имеет развитую пористую структуру с размерами пор от 0,3 до 2,5 мкм (рис. 13).

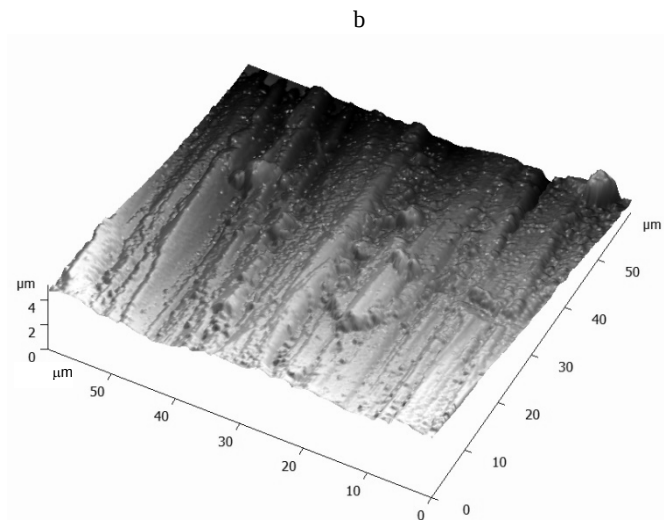
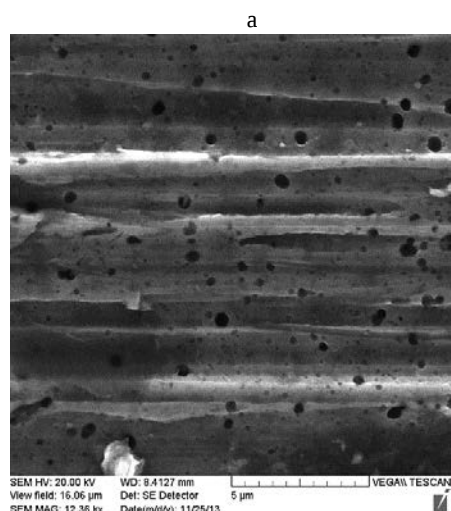


Рис. 12. Поверхность зоны 5 образца, полученного при добавочной индуктивности 3L, напряжении 240 В, концентрации электролита 8 % и температуре 40 °С: а – морфология поверхности; б – микропрофиль поверхности

Fig. 12. Zone-5 surface of sample obtained with 3L additional inductance, 240 V voltage, 8 % electrolyte concentration and 40 °C temperature: a – surface morphology; b – surface microprofile

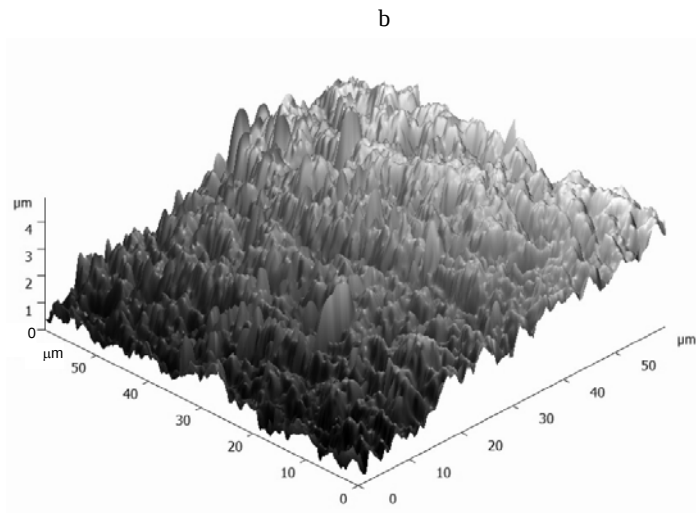
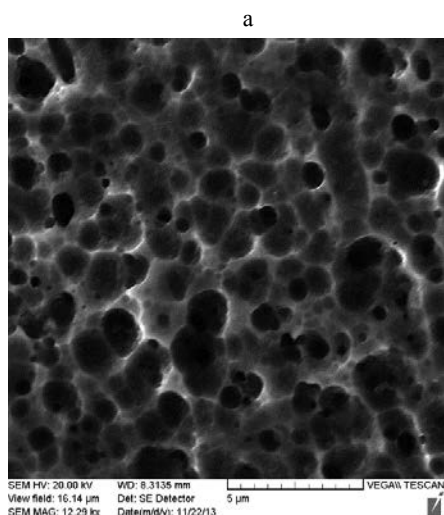


Рис. 13. Поверхность зоны 4 образца, полученного при добавочной индуктивности 2L, напряжении 270 В, концентрации электролита 4 % и температуре 40 °С: а – морфология поверхности; б – микропрофиль поверхности

Fig. 13. Zone-4 surface of sample obtained with 2L additional inductance, 270 V voltage, 4 % electrolyte concentration and 40 °C temperature: a – surface morphology; b – surface microprofile

Наличие развитой поверхности в зоне 4 можно объяснить значительной электрохимической составляющей процесса съема, возникающей из-за близости этой зоны к перегородке и повышенной скорости электролита, снижающей толщину парогазовой оболочки и повышающей вероятность прямого контакта электролита с поверхностью образца. Значительная импульсная плотность тока в зоне 4 (выше средних значений в пять раз, согласно осциллограмме на рис. 9) приводит к селективному травлению поверхности и образованию характерного микрорельефа поверхности. Наиболее выражен этот процесс при напряжении 270–300 В и величине добавочной индуктивности 2L (3,2 мГн).

Формирование пористой структуры в высокоградиентном поле может быть эффективно при подготовке поверхности для нанесения покрытий с целью повышения их адгезии, для удержания лекарственных средств на изделиях медицинского назначения, а также для повышения остеоинтеграции имплантатов.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что высокоградиентное электрическое поле при электролитно-плазменной обработке оказывает существенное влияние на снижение удельной потребляемой мощности, что объясняется уменьшением потерь в электролите и влиянием высокоградиентного электрического поля на образование и поддержание парогазовой оболочки. Удельная мощность при обработке в высокоградиентном поле по сравнению с низкоградиентным снижается с 280 до 160 Вт/см² при температуре электролита 45 °С и с 120 до 70 Вт/см² при температуре электролита 80 °С.

2. В результате исследований влияния высокоградиентного электрического поля на энергетические параметры при нестационарных режимах электролитно-плазменной обработки установлено, что потребляемая ячейкой энергия повышается с увеличением индуктивности. Это связано с перераспределением энергии в электрохимическую составляющую процесса электролитно-плазменной обработки. Так, повышение индуктивности от 0 до 4,8 мГн приво-

дит к росту потребляемой энергии от 0,96–2,25 до 3,84–7,98 кДж.

3. В результате исследования влияния высокоградиентного электрического поля при нестационарных режимах электролитно-плазменной обработки на качественные характеристики поверхностного слоя установлено, что значительная импульсная плотность тока в зоне преимущественно электрохимической обработки приводит к селективному травлению поверхности и образованию характерного микрорельефа поверхности с развитой пористой микроструктурой с размерами пор от 0,3 до 2,5 мкм. Наиболее выраженная пористая микроструктура обеспечивается при напряжении 270–300 В и величине добавочной индуктивности 3,2 мГн.

ЛИТЕРАТУРА

1. Физико-механические свойства и электрополирующие процессы в материалах, находящихся в мощных электростатических и электромагнитных полях: отчет о НИР (заключ.) / Белорус. нац. техн. ун-т; рук. А. А. Кособуцкий. Минск, 2004. 61 с. № ГР 20022618.
2. Aliakseyeu, Yu. Electrolyte-Plasma Treatment of Metal Materials Surfaces / Yu. Aliakseyeu, A. Korolyov, A. Bezyazychnaya // CO-MAT-TECH-2006: Proceeding of the Abstracts 14 International Scientific Conference, Slovak University of Technology, 19–20 oct. 2006. Slovakia, Trnava. P. 6.
3. Plasma Electrolytic Polishing – an Overview of Applied Technologies and Current Challenges to Extend the Polishable Material Range / K. Nestler [et al.] // Proceedings of the 18th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM XVIII), 8–22 Apr. 2016, Tokyo, Japan, Procedia CIRP 42 (2016). P. 503–507.
4. Vacuum Deposited Polymer and DLC Multilayer Coatings on Austenitic Steel, Structure and Tribotechnical Properties in Physiological Solution / V. P. Kazachenko [et al.] // International Conference on Industrial Tribology. India: Bangalore, 2006. P. 55.
5. Особенности процессов размерной обработки металлических изделий электролитно-плазменным методом / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Литье и металлургия. 2005. № 4. С. 188–195.
6. Модель размерного съема материала при электролитно-плазменной обработке цилиндрических поверхностей / Ю. Алексеев [и др.] // Наука и техника. 2012. № 3. С. 3–6.
7. Комбинированная технология изготовления гибких ультразвуковых концентраторов-инструментов / Ю. Г. Алексеев [и др.]; под общ. ред. Б. М. Хрусталева. Минск: БНТУ, 2015. 203 с. ISBN 978-985-550-702-5.
8. Электролитно-плазменная обработка внутренних поверхностей трубчатых изделий / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Наука и техника. 2016. Т. 15, № 1. С. 61–68. DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-1-61-68.

9. Исследование влияния промежуточной электролитно-плазменной обработки в процессе деформационного упрочнения волочением на прочностные характеристики стали 12X18H9 / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Вестник ПГУ. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. 2012. № 11. С. 85–90.
10. Исаевич, Л. А. Исследование процесса получения высокопрочной проволоки из стали 12X18H10T волочением с электролитно-плазменной обработкой поверхности / Л. А. Исаевич, Ю. Г. Алексеев А. Ю. Королев // Вестник БНТУ. 2005. № 6. С. 30–33.
11. Surface Properties of the Stainless Steel X10 CrNi 18/10 after Application of Plasma Polishing in Electrolyte / D. Vaňa [et al.] // International Journal of Modern Engineering Research (IJMER). 2013. Vol. 3, Iss. 2. P. 788–792. ISSN: 2249-6645.
12. Семченко, Н. И. Коррозионное поведение аустенитных нержавеющей сталей после электролитно-плазменного полирования / Н. И. Семченко, А. Ю. Королев // IV Междунар. симп. по теоретич. и прикл. плазмохимии, 13–18 мая 2005 г., Иваново, Россия: сб. тр. Иваново: Ивановский гос. хим.-технол. ун-т., 2005. Т. 2. С. 406–409.
13. Влияние электролитно-плазменной обработки на структуру и свойства поверхностного слоя стали 12X18H10T / И. В. Фомихина [и др.] // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2008. № 3. С. 24–29.
14. Калашников, С. Г. Электричество / С. Г. Калашников. М.: Наука, 1985. 576 с.
15. Дьяконов, В. П. *Mathematica 5/6/7. Полное руководство* / В. П. Дьяконов. М.: «ДМК Пресс», 2009. 624 с.
16. Поступила 18.04.2017
17. Подписана в печать 21.06.2017
18. Опубликовано онлайн 29.09.2017

REFERENCES

1. Kosobutsky A. A. (2004) *Physical and Mechanical Properties and Electro-Polishing Processes in Materials Being in Strong Electrostatic and Electromagnetic Fields*. Research Report (Final). No ГР 20022618. Minsk, Belarusian National Technical University. 61 (in Russian, Unpublished).
2. Aliakseyeu Yu., Korolyov A., Bezyazychnaya A. (2006) Electrolyte-Plasma Treatment of Metal Materials Surfaces. *CO-MAT-TECH-2006: Proceeding of the Abstracts 14 International Scientific Conference, Slovak University of Technology, 19–20 oct. 2006*. Slovakia, Trnava, 6.
3. Nestler K., Böttger-Hiller F., Adamitzki W., Glowa G., Zeidler H., Schubert A. (2016) Plasma Electrolytic Polishing – an Overview of Applied Technologies and Current Challenges to Extend the Polishable Material Range. *Procedia CIRP*, 42, 503–507. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.240.
4. Kazachenko V. P. [et al.]. (2006) Vacuum Deposited Polymer and DLC Multilayer Coatings on Austenitic Steel, Structure and Tribotechnical Properties in Physiological Solution. *International Conference on Industrial Tribology*. India, Bangalore, 55.
5. Alekseev Yu. G., Kosobutskii A. A., Korolev A. Yu., Niss V. S., Kucheryavyi V. D., Povzhik A. A. (2005) Peculiar Features in Dimensional Processing of Metal Products while Using Electrolytic-Plasma Method. *Litio i Metallurgiya = Foundry and Metallurgy*, (4), 188–195 (in Russian).
6. Alekseev Yu., Korolev A., Parshuta A., Niss V. (2012) Model for Metal Removal in Electrolyte-Plasma Treatment of Cylindrical Surfaces. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (3), 3–6 (in Russian).
7. Alekseev Yu. G., Korolev A. Yu., Minchenya V. T., Niss V. S., Parshuta A. E., Khrustalev B. M. (2015) *Combined Technology for Manufacturing of Flexible Ultrasonic Tool Concentrators*. Minsk, Belarusian National Technical University. 203 (in Russian).
8. Alekseev Yu. G., Korolev A. Yu., Niss V. S., Parshuta A. E. (2016) Electrolytic-Plasma Treatment of Inner Surfaces in Tubular Products. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 15 (1), 61–68 (in Russian). DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-1-61-68.
9. Alekseev Y., Isaevich L., Korolev A., Niss V. (2012) The effect of Electrolyte-Plasma Treatment in the Process of Deformative Hardening by Drawing on Strength Properties of Steel 12X18H9. *Vestnik PGU. Seriya B. Promyshlennost'. Prikladnye Nauki = Vestnik of PSU Series B. Industry. Applied Sciences*, (11), 85–90 (in Russian).
10. Isaevich L. A., Alekseev Yu. G., Korolev A. Yu. (2005) Investigation of Process Pertaining to Production of High-Strength Wire from 12X18H10T-Steel while Using Drawing with Electrolytic-Plasma Surface Treatment. *Vestnik BNTU [Bulletin Belarusian National Technical University]*, (6), 30–33 (in Russian).
11. Vaňa D., Podhorský Š., Hurajt M., Hanzen V. (2013) Surface Properties of the Stainless Steel X10 CrNi 18/10 after Application of Plasma Polishing in Electrolyte. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, 3 (2), 788–792.
12. Semchenko N. I., Korolev A. Yu. (2005) Corrosion Behavior of Austenitic Stainless Steel after Electrolyte-Plasma Polishing. *IV Mezhdunar. Simp. po Teoretich. i Prikl. Plazmokhimii, 13–18 maya 2005 g., Ivanovo, Rossiya: sb. tr. T. 2 [4th International Symposium on Theoretical and Applied Plasma Chemistry, May 13–18, 2005. Ivanovo, Russia: Collection of Research Papers. Vol. 2]. Ivanovo, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, 406–409 (in Russian).*
13. Fomikhina I. V., Litovskaya Yu. O., Alekseev Yu. G., Korolev A. Yu., Niss V. S. (2008) Influence of Electrolytic-Plasma Treatment on Structure and Properties in Surface Layer of Authentic Stainless 12X18H10T-Steel. *Vestsi Natsionalnoy Akademii Navuk Belarusi. Ser. Fiz.-Tekhn. Navuk = Bulletin of National Academy of Science of Belarus. Series of Physical and Technical Sciences*, (3), 24–29 (in Russian).
14. Kalashnikov S. G. (1985) *Electricity*. Moscow, Nauka Publ. 576 (in Russian).
15. Diakonov V. P. (2009) *Mathematica 5/6/7. Complete Guide*. Moscow, Publishing House “DMK Press”. 624 (in Russian).

Received: 18.04.2017

Accepted: 21.06.2017

Published online: 29.09.2017

Оценка механических характеристик эндопротезов сосудов

Канд. техн. наук, проф. В. Т. Минченя¹⁾,
кандидаты техн. наук, доценты А. Л. Савченко¹⁾, Н. Т. Минченя¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

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

Реферат. Один из перспективных материалов для изготовления специальных эндопротезов и других изделий – никелид титана, обладающий эффектом памяти формы. Особенностью эндопротезов сосудов является необходимость обеспечения требуемой жесткости при температуре от 15 до 42 °С. Установлено, что никелид титана способен обеспечить требуемую жесткость, но она зависит от режимов предварительной термообработки. Поэтому важно установить связь между жесткостью проволоки из никелида титана и режимами его предварительной термообработки для заданного температурного интервала. Целью работы является создание устройств, позволяющих оценивать радиальную и изгибную жесткость элементов, получаемых гибкой из нитиноловой проволоки для изготовления различных изделий медицинского назначения, в том числе эндопротезов сосудов – стентов и стент-графтов, фильтров-ловушек. Для измерения нагрузки использованы лабораторные цифровые весы и специально разработанный динамометр на основе цилиндрической прорезной пружины и индуктивного преобразователя перемещения. Предложены варианты устройств для контроля радиальной жесткости эндопротезов кровеносных сосудов, а также для контроля изгибной жесткости элементов эндопротезов и проволоки для их изготовления. Разработанные устройства позволяют оценивать механические характеристики образцов в нужных температурных условиях. Внедрение разработанных средств позволило выполнять оперативный контроль радиальной и изгибной жесткости элементов внутрисосудистых эндопротезов как в условиях научных исследований, так и в ходе технологического процесса их изготовления. В настоящее время устройства используются для уточнения режимов термообработки нитиноловой проволоки различных производителей при изготовлении эндопротезов сосудов.

Ключевые слова: стент, стент-графт, фильтр-ловушка, нитинол, никелид титана, проволока, радиальная жесткость, изгибная жесткость, термообработка, деформация, динамометр, измеритель деформации

Для цитирования: Минченя, В. Т. Оценка механических характеристик эндопротезов сосудов / В. Т. Минченя, А. Л. Савченко, Н. Т. Минченя // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 5. С. 400–406. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-400-406

Assessment of Mechanical Characteristics of Vascular Endo-Prostheses

V. T. Minchenya¹⁾, A. L. Savchenko¹⁾, N. T. Minchenya¹⁾

¹⁾Belarusian National State University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Titanium nickelide (nitinol) is one of prospective materials for production of special endo-prostheses and other parts and characterized with effect of shape memory. A specific feature of vascular endo-prostheses is the necessity to provide the required rigidity within the temperature interval from 15 to 42 °C. It has been established that titanium nickelide is able to provide the required rigidity but it depends on preliminary heat treatment parameters. So, it is important to determine relations between rigidity of titanium nickelide wire and its preliminary heat treatment parameters for the given temperature interval. The aim of the work is to create devices that allow to estimate radial and flexural rigidity of elements made of flexible nitinol wire for manufacturing various medical products, including endo-prostheses of vessels – stents and stent grafts, filter traps. Laboratory digital scales and a specially developed dynamometer based on a cylindrical slotted spring and inductive displacement transducer have been used for measuring a load. The paper proposes possible variants of device designs used to monitor radial rigidity of blood vessel endo-prostheses, as well as to control flexural rigidity of endo-prosthesis elements and wire for their manufacture. The developed devices allow us to evaluate mechanical characteristics of samples under the desired temperature conditions. An introduction of the developed devices has permitted to carry out an operative control

Адрес для переписки

Минченя Владимир Тимофеевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 22,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-40-81
v.minchenya@bntu.by

Address for correspondence

Minchenya Vladimir T.
Belarusian National Technical University
22 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-40-81
v.minchenya@bntu.by

on radial and flexural stiffness of intravascular endo-prostheses elements both under conditions of research investigations and during technological process of their manufacture. Currently, the devices are used to specify heat treatment regimes for nitinol wire from various manufacturers while manufacturing vascular endo-prostheses.

Keywords: stent, stent graft, filter trap, nitinol, titanium nickelide, wire, radial rigidity, bending rigidity, heat treatment, deformation, dynamometer, deformation meter

For citation: Minchenya V. T., Savchenko A. L., Minchenya N. T. (2017) Assessment of Mechanical Characteristics of Vascular Endo-Prostheses. *Science and Technique*. 16 (5), 400–406. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-400-406 (in Russian)

Введение

В настоящее время в Республике Беларусь имеется и все возрастает потребность в расходных материалах для сосудистой хирургии. Это связано с ростом сердечно-сосудистых патологий и появлением новых методик их лечения, использующих специальные эндопротезы и другие изделия, выполненные из никелида титана (нитинола), – стенты, стент-графты, клапансодержащие стенты, фильтры-ловушки и др. [1]. Особенностью стент-графтов и саморасширяющихся стентов является использование нитинола, который обладает эффектом памяти формы [2]. Все эти изделия представляют достаточно сложные по форме пространственные структуры, получаемые гибкой из проволоки с применением дополнительных операций сварки, соединения пластическим деформированием с помощью трубок [3–7]. На настоящий момент такие изделия в Республике Беларусь практически не производятся, а иностранные образцы имеют крайне высокую стоимость, что делает операции с их использованием недоступными широким массам пациентов. Разработка технологии формообразования нитиноловых структур позволит внедрить их в производство импортозамещающих аналогов медицинских изделий.

Для получения качественных изделий медицинского назначения из никелида титана следует учитывать упруго-механические характеристики материала, проявляющиеся как при термообработке, так и при эксплуатации. Правильный выбор режимов термообработки позволит получить достаточную для доставки по месту использования пластичность в предварительном состоянии (до установки в кровеносный сосуд) и высокую упругость в рабочем состоянии, т. е. при температуре внутри сосуда живого объекта.

С учетом этого задачей настоящего исследования является разработка приспособлений, позволяющих оценить упруго-механические

характеристики изделий, в том числе при различных температурах.

Контроль радиальной жесткости стентов и стент-графтов

Стент-графт – система внутрисосудистого эндопротеза, включающая протез сосуда (графт) и закрепленный в нем пружинный каркас (стент) (рис. 1). Используется при лечении аневризм аорты.



Рис. 1. Стент-графт E-vita

Fig. 1. E-vita stent graft

Ранее было разработано устройство для оценки радиальной жесткости нитинолового каркаса стент-графта [8], схема которого показана на рис. 2.

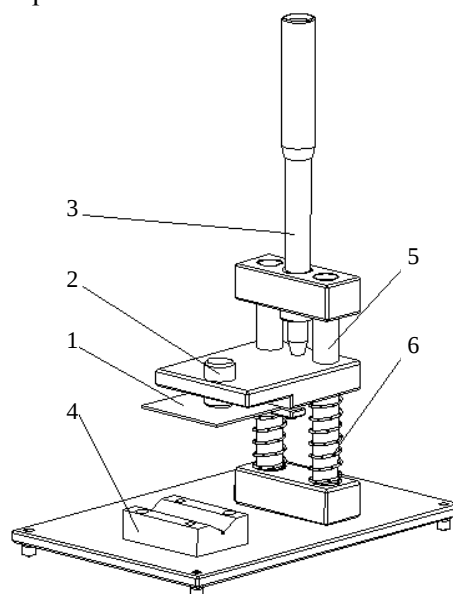


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Fig. 2. Scheme of experimental device

При испытаниях стент-графт помещается на призму 4 и сжимается плоской пружиной 1 до определенного диаметра. По прогибу пружины, который измеряется датчиком перемещения 2, можно получить силу, необходимую для сжатия, либо зависимость силы от сжатого диаметра. Вертикальное перемещение плоской пружины по направляющим 5 осуществляется с помощью микровинта 3. В целом это позволяет оценить жесткость нитинола. Недостатком описанной конструкции является достаточно высокая трудоемкость градуировки. Кроме того, трудно определить действительную жесткость самих опорных элементов и оценить остаточный гистерезис образца, хотя наличие электрического датчика перемещения позволяет автоматизировать процесс измерений. Поэтому для установления влияния геометрических параметров, температуры предварительного отжига нитинола, температуры окружающей среды на радиальную жесткость кольцевых элементов нами предложена усовершенствованная конструкция устройства, которая представлена на рис. 3.

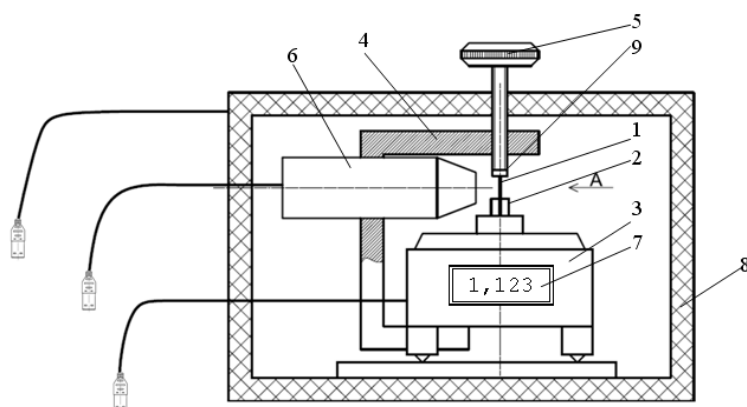


Рис. 3. Усовершенствованная схема экспериментальной установки

Fig. 3. Improved scheme of experimental device

В данном устройстве кольцо из нитинола 1 укладывается в прозрачный держатель 2, состоящий из двух плоскопараллельных пластинок и призматической опоры. Держатель установлен на платформе цифровых лабораторных весов 3, связанных с персональным компьютером. К основанию весов прикреплен кронштейн 4, в котором установлены винт 5 с керамической вставкой 9, изготовленной из материала с минимальной теплопроводностью, и цифровой микроскоп USB Digital Microscope 6,

который связан с персональным компьютером через USB-порт. Измерительное устройство помещается в термостатированную камеру 8 со встроенными системами охлаждения и нагрева, в которой с помощью специального электронного терморегулятора устанавливалась заданная температура. Измерение радиальной жесткости кольцевых элементов из нитинола осуществляется при трех значениях температуры: 15; 36,6 и 42 °С. Такие значения температуры выбраны для трех характерных случаев: 1 – при имплантации стент-графта его охлаждают до температуры ниже 15 °С, при которой жесткость нитинола минимальна; 2 – нормальная температура человека 36,6 °С, в этих условиях элементы из нитинола саморасширяются; 3 – повышенная температура тела человека при заболеваниях, которая может подниматься до 42 °С, и радиальная жесткость стент-графта при этой температуре должна быть максимальной. Следует заметить, что все применяемые в устройстве приборы, по паспортным данным, могут работать в этом диапазоне температур.

В процессе измерения жесткости кольца винтом 5 задается нагрузка, которая контролируется по индикатору 7 цифровых весов, и измеряется деформация кольца с помощью цифрового микроскопа по калиброванной шкале на экране монитора (рис. 3). Цифровой микроскоп снабжен специальным программным обеспечением для обработки полученной информации. При измерении производится захват изображения и при перемещении кольца от приложенной нагрузки на выходе отображаются значения перемещений в долях миллиметра от начального состояния.

После снятия нагрузки определяется величина остаточной деформации.

Такая конструкция позволяет легко и оперативно получать зависимость деформации кольца от приложенной радиальной нагрузки и температуры окружающей среды. Результаты испытаний, полученные с помощью разработанного устройства, могут быть использованы для оптимизации режимов отжига деталей из нитинола с целью получения заданной жесткости при температурах 15; 36,6 и 42 °С.

Для оценки работоспособности устройства был проведен ряд предварительных экспериментов. Полученные зависимости жесткости кольцевых элементов из нитинола в зависимости от температуры окружающей среды для колец с различными режимами предварительного отжига (400; 450 и 500 °C в течение 15 мин) представлены на рис. 4.

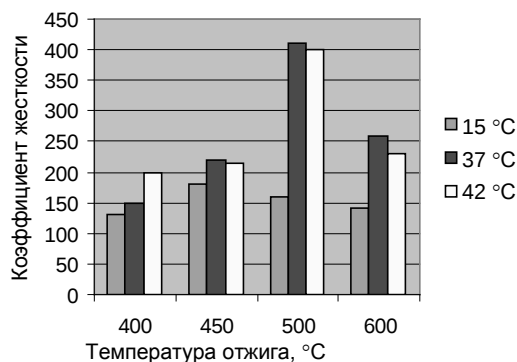


Рис. 4. Результаты экспериментов

Fig. 4. Experimental results

Известно, что оптимальным вариантом является сохранение кольцевым изделием жесткости в диапазоне температур от 36,6 до 42 °C и его минимально возможная жесткость при температуре 15 °C. Как видно из полученных результатов (рис. 4), оптимальная жесткость нитиноловой проволоки для требуемых условий соответствует температуре отжига 500 °C.

Контроль изгибной жесткости нитиноловой проволоки

Многие внутрисосудистые изделия, например фильтры-ловушки (рис. 5), представляют собой комбинацию незамкнутых проволоочных элементов. В этих случаях целесообразно контролировать изгибную жесткость элементов.

Разработанное устройство для нагружения и измерения деформации проволоки и волновода позволяет задавать измерительную нагрузку и измерять деформацию изделия. Контролируемый элемент устанавливается в текстолитовые втулки 1 (рис. 6) для исключения радиального смещения в процессе контроля. При этом элемент укладывается на ножи 2, закрепленные на держателе 3, являющиеся опорами при деформировании.

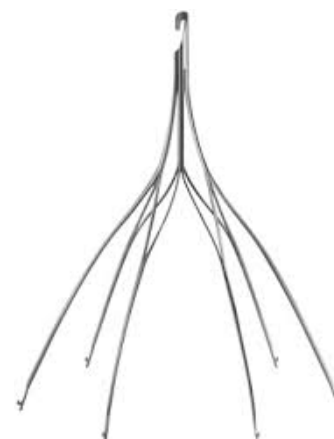


Рис. 5. Фильтр-ловушка

Fig.5. Filter trap

Устройство способно контролировать изделия с разной жесткостью. В центре деформируемого участка к элементу прикладывается измерительная нагрузка микрометрическим винтом 4 через пружинный динамометр на основе цилиндрической прорезной пружины 5. Деформация пружины измеряется бесконтактным дифференциальным индуктивным датчиком, состоящим из катушек 6 индуктивности и якоря 7 из набора трех втулок. Ферромагнитная втулка 8 располагается между двумя алюминиевыми втулками 9. В исходном положении (при отсутствии нагрузки) ферромагнитная втулка располагается таким образом, что мостовая схема, в которую включены катушки, находится в равновесии. При появлении нагрузки пружина деформируется, вызывая смещение ферромагнитной втулки. Как результат, в измерительной диагонали моста появляется сигнал, пропорциональный приложенной нагрузке. Пружина с установленными на ней элементами может перемещаться в отверстии корпуса 10 и предохраняется от проворота пальцем 11, который также служит для ручного арретирования динамометра. Динамометр опирается на контролируемый элемент стержневой вставкой 12, а нагрузка на динамометр передается от микрометрического винта через шарик 13. Деформация участка изделия определяется как разность заданной измерительной деформации (задается с помощью микрометрического винта и отсчитывается по его шкале) и деформации пружины динамометра. Жесткость участка изделия определяется как частное от деления нагрузки на деформацию участка волновода.

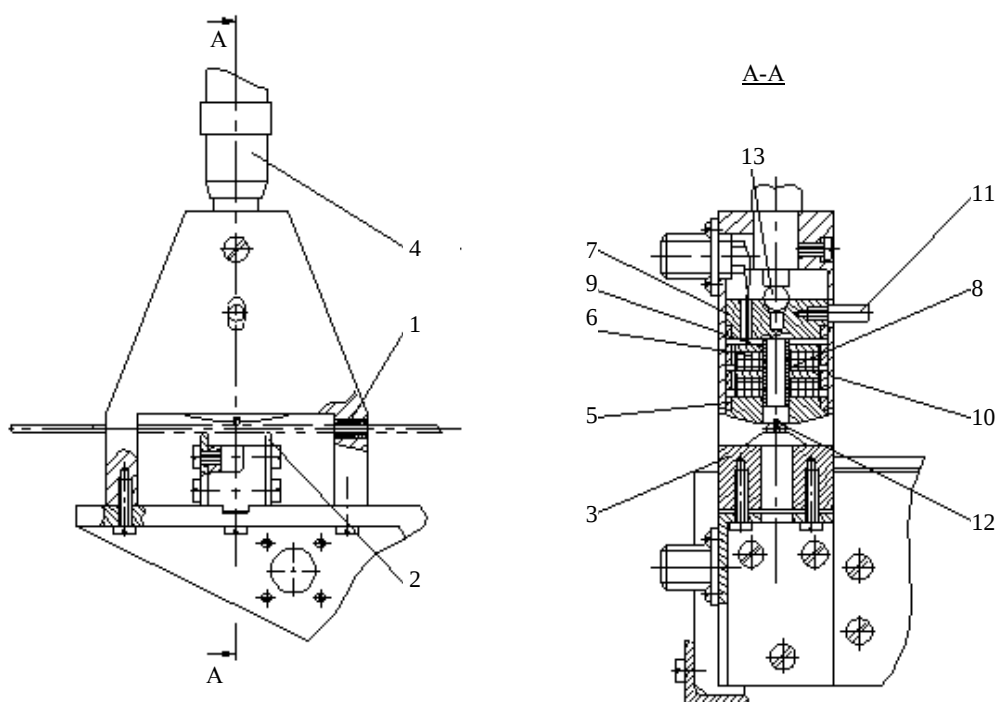


Рис. 6. Устройство для контроля жесткости

Fig. 6. Device for rigidity control

При контроле длинномерных изделий, например, проволоки, перемещение изделия осуществляется шаговым приводом.

Электронная часть состоит из двух модулей – модуля для работы с индуктивным датчиком и модуля управления приводом перемещения (шаговым двигателем) – и позволяет практически полностью автоматизировать процесс контроля, при этом увеличив его точность. Электронная часть устройства подключается к IBM-совместимому компьютеру через последовательный порт RS-232C.

Управление устройством осуществляется посредством специального программного обеспечения, которое написано в системе объектно-ориентированного программирования C++ Builder производства корпорации Borland.

Основными возможностями программы являются:

- управление шаговым двигателем, при этом доступны следующие возможности: изменение направления движения, регулирование скорости движения, задание перемещения с точностью до одного шага;

- работа с датчиком: измерение жесткости и вывод результатов на экран (при этом пра-

вильность работы программы можно проверить по показанию ЖКИ на электронном блоке), графическое представление результатов измерений (в виде графика зависимости жесткости от прилагаемой нагрузки).

При запуске окно программы выглядит, как показано на рис. 7.

Работа с программой начинается с выбора в раскрывающемся списке 1 порта компьютера, с которым будет работать программа. Затем задается скорость перемещения волновода (проволоки) ползунком 2. Число шагов выбираем с помощью ползунка 3. Если количество шагов неважно, то используем поле 4. В окошке 5 отображается количество пройденных шагов. Кнопка 6 служит для добавления одного шага. Затем выбирается направление движения кнопкой 7 и запускается двигатель кнопкой 8. Когда изделие доставлено в зону измерения, производится его нагружение вручную. После нажатия кнопки 9 в окошке 10 появляется результат измерения, а в области 11 начинает строиться график.

После проведения измерений в нескольких точках окно программы имеет вид, показанный на рис. 8.

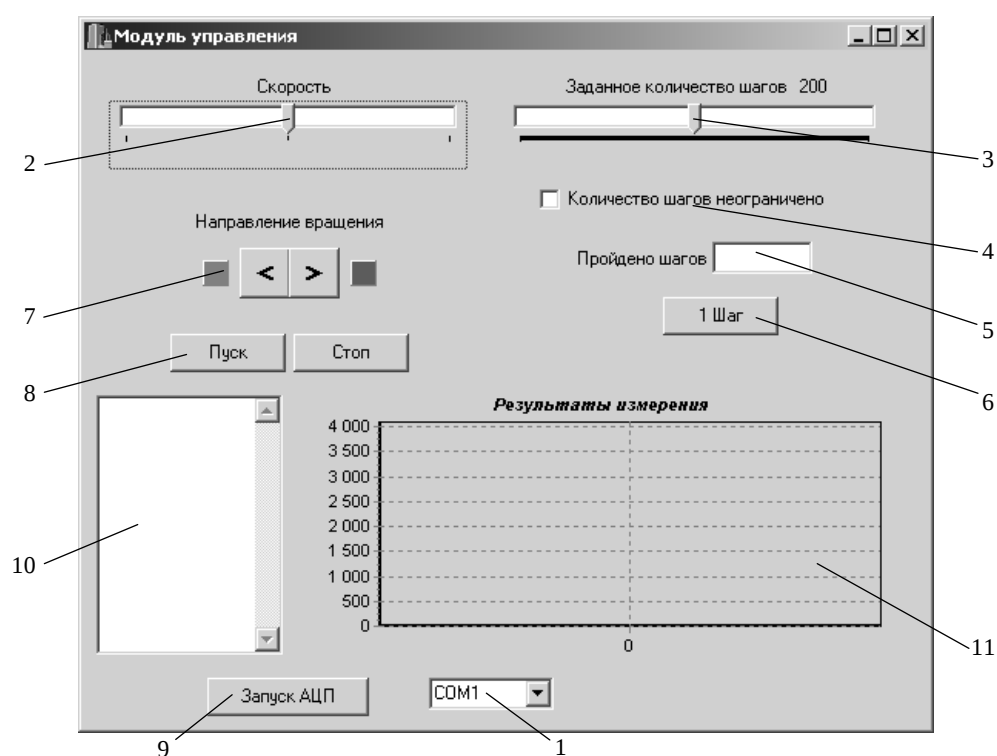


Рис. 7. Вид окна программы при запуске

Fig. 7. View of program window at start

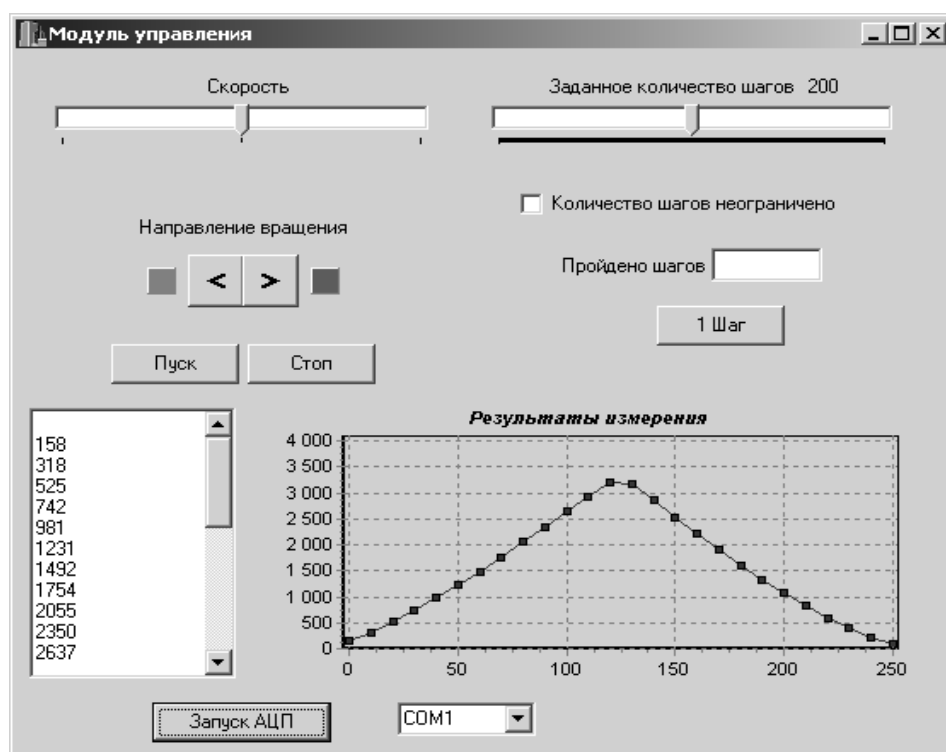


Рис. 8. Вид окна программы после проведения измерений

Fig. 8. View of program window after measurements

Описанный принцип работы был ранее опробован при контроле параметров гибких волноводов [9, 10].

ВЫВОДЫ

1. Применение разработанных устройств позволит выполнять оперативный контроль радиальной и изгибной жесткости элементов внутрисосудистых эндопротезов как в условиях научных исследований, так и в ходе технологического процесса их изготовления. Особенно это важно при получении нитиноловой проволоки от разных производителей.

2. В конечном итоге разработка и исследование технологических процессов обработки нитиноловой проволоки послужат основой для организации выпуска в нашей республике широкой номенклатуры внутрисосудистых эндопротезов с управляемыми свойствами материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Stenting in Cardiac Interventional Practice, Off-Label Versus Approved Indication / D. R. Holmes [et al.] // *Circulation*. 1995. Vol. 92, supp. 1. P. 1–85.
2. Никелид титана. Медицинский материал нового поколения / В. Э. Гюнтер [и др.]. Томск: Изд-во МИЦ, 2006. 296 с.
3. Hodgson, D. E. Using Nitinol Alloys. Shape Memory Applications / D. E. Hodgson, J. W. Brown // Inc. San Jose. 2000. 35 p.
4. Hodgson, D. E. Fabrication, Heat Treatment and Joining of Nitinol Components / D. E. Hodgson // *Proceedings of the International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies SMST-2000* [S. M. Russell]. Pacific Grove, California. P. 11–24.
5. Ming, H. Wu. Fabrication of Nitinol Materials and Components / H. Wu. Ming // *Proceedings of the International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies, Kunming, China, 2001*. P. 285–292. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.394-395.285.
6. Рубаник, В. В. Оптимизация режимов термообработки TiNi проволоки медицинского назначения / В. В. Рубаник, С. Н. Милюкина, В. В. Рубаник (мл.) // Материалы 8-й Междунар. конф. передовой обработки в машиностроении, Болгария, 18–20 июня 2008 г. Кранево, 2008. С. 199–203.
7. Shape Memory Alloy Shape Training Tutorial. A Teacher's Guide to Teaching Shape Memory Alloy Shape Training / L. Case [et al.] // ME559 – Smart Materials and Structures, University of Michigan, 2004.
8. Разработка методики оценки радиальной жесткости эндоваскулярных стент-графтов / В. Т. Минченя [и др.] // Теоретическая и прикладная механика: междунар. науч.-техн. сб. Минск: БНТУ, 2012. Вып. 27. С. 137–141.
9. Комплекс для измерения параметров гибких волноводов / В. Т. Минченя [и др.] // Метрология и приборостроение. 2008. № 4. С. 33–36.
10. Измерительный комплекс для контроля параметров гибких волноводов / Г. Г. Маньшин [и др.] // Проблемы

создания информационных технологий: сб. науч. трудов / под ред. Г. Г. Маньшина. М.: Техполиграф-центр, 2013. Вып. 23. С. 70–75.

Поступила 28.04.2017

Подписана в печать 05.07.2017

Опубликована онлайн 29.09.2017

REFERENCES

1. Holmes D. R., Berger P., Garratt K., Bell M., Bresnahan J. (1995) Stenting in Cardiac Interventional Practice, Off-Label Versus Approved Indication. *Circulation*, 92 (1), 1–85.
2. Gjunter V. E., Hodorenko V. N., Jasenchuk Ju. F., Cherkalkin T. L., Ovcharenko V. V., Klopotov A. A., Dambayev G. C., Sysoljatin P. G., Fomichev N. G., Olesova V. N., Mirgazitov M. Z., Proskurin A. V., Zigan'shin R. V., Polenichkin V. K., Matjunin A. N., Fatjushin M. Ju., Molchanov N. A., Monogenov A. N. (2006) *Titanium Nickelide. Medical Material of New Generation*. Tomsk: "MITs" Publishing House. 296 (in Russian).
3. Hodgson D. E., Brown J. W. (2000) *Using Nitinol Alloys*. Report of Shape Memory Applications Inc. 35.
4. Hodgson D. E. (2000) Fabrication, Heat Treatment and Joining of Nitinol Components. Russell S. M., Pelton A. (eds.) *Proceedings of the International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies SMST-2000*. Pacific Grove, California, 11–24.
5. Ming H. Wu. (2002) Fabrication of Nitinol Materials and Components. *Materials Science Forum*, 394–395, 285–292. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.394-395.285.
6. Rubanik V. V., Milyukina S. N., Rubanik V. V. (Jr) (2008) Optimization of Thermal Treatment Modes for TiNi Wire of Medical Purpose. *Sbornik Dokladov 8-i Mezhdunarodnoi Konferentsii "Avangardnye Mashinostroitel'nye Tekhnologii"*, Bulgariya, 18–20 Iyunya 2008 g. [Collected Presentations, of the 8th International Conference "Avantgarde Engineering Technologies", Bulgaria, June 18–20, 2008]. Kранево, 199–203 (in Russian).
7. Case L., Kreiner Z., Redmond J., Trease B. (2004) *Shape Memory Alloy Shape Training Tutorial. A Teacher's Guide to Teaching Shape Memory Alloy Shape Training*. ME559 – Smart Materials and Structures, University of Michigan. Available at: <http://www-personal.umich.edu/~btrease/share/SMA-Shape-Training-Tutorial.pdf>.
8. Minchenya V. T., Stepanenko D. A., Savchenko A. L., Minchenya N. T., Chigarev A. V., Ostrovskii Yu. P., Shket A. P. (2012) Development of Methodology for Evaluation of Radial Rigidity of Endovascular Stentgrafts. *Teoreticheskaya i Prikladnaya Mekhanika: Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Sb.* [Theoretical and Applied Mechanics: International Scientific and Technical Collection of Works]. Minsk, Belarusian National Technical University, Is. 27, 137–141 (in Russian).
9. Minchenya V. T., Minchenya N. T., Savchenko A. L., Reut I. V. (2008) Complex for Measuring Parameters of Flexible Waveguides. *Metrologiya i Priborostroenie = Metrology and Instrumentation*, (4), 33–36 (in Russian).
10. Man'shin G. G., Minchenya V. T., Adzerikho I. E., Asimov R. M., Minchenya N. T., Savchenko A. L. (2013) Measuring Complex for Control of Flexible Waveguide Parameters. *Problemy Sozdaniya Informatsionnykh Tekhnologii: Sb. Nauch. Trudov* [Problems Pertaining to Development of Information Technologies: Collection of Scientific Works]. Moscow, Publishing House "Tekhnopoligraphsentr", Is. 23, 70–75 (in Russian).

Received: 28.04.2017

Accepted: 05.07.2017

Published online: 29.09.2017

DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-407-414

УДК 535.317

Афокальные системы, составленные из зеркальных внеосевых параболоидов

Докт. техн. наук, доц. Н. К. Артюхина¹⁾, Л. Пероса^{1,2)}, Л. Самбрано^{1,3)}¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),²⁾Университет Якамбу (Баркисимето, Венесуэла),³⁾Андский университет (Мерида, Венесуэла)© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Зеркальные системы позволяют сократить габариты, уменьшить массу прибора при сохранении высокой входной апертуры и обладают рядом других преимуществ. Существенный их недостаток – центральное экранирование входного зрачка – приводит к снижению качества изображения. Проведено исследование афокальных систем, составленных из эксцентрично вырезанных зеркальных параболоидов (внеосевых зеркал), в которых апертурная диафрагма смещена в меридиональной плоскости на определенную величину, а центральная точка поля находится на оптической оси. Базовыми схемами (модулями) для данных композиций приняты канонические системы Мерсенна. Рассмотрены два типа таких систем: видимые увеличения $\Gamma > 0$ и $\Gamma < 0$. Составлены алгоритмы расчета центрированных афокальных систем с двумя и четырьмя отражениями, которые свободны от сферической аберрации, комы, астигматизма при расположении входного зрачка в совмещенных фокальных плоскостях всех параболических зеркал. В квартпараболической схеме из трех зеркал, являющейся сочетанием двух классических телескопических систем Мерсенна, исправлена дополнительно аберрация кривизны изображения. Представлены схемы и результаты расчета. Рассмотрены двухзеркальные схемы с неэкранированным входным зрачком, в которых вся система остается центрированной, а апертурная диафрагма децентрирована на расстояние S_m , соизмеримое с размером диафрагмы. Исследованы афокальные схемы с четырьмя отражениями из внеосевых зеркальных параболоидов и составлен алгоритм расчета, получены формулы связи для сочетания канонических афокальных систем из двух зеркал. Проведено компьютерное моделирование в программных средах Opal и Zemax, составлено основное (базовое) описание двумя альтернативными способами для класса децентрированных систем, получены аберрационные характеристики и схемные решения для телескопических систем без экранирования с двумя и четырьмя отражениями. В целях практического применения в качестве насадок к регистрирующим объективам интерес представляют двухзеркальные афокальные системы небольших кратностей.

Ключевые слова: оптическая техника, зеркальные системы, афокальная схема, коррекция аберрации, качество изображения

Для цитирования: Артюхина, Н. К. Афокальные системы, составленные из зеркальных внеосевых параболоидов / Н. К. Артюхина, Л. Пероса, Л. Самбрано // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 5. С. 407–414. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-407-414

Afocal Systems Formed by Mirror Off-Axis Paraboloid

N. K. Artiukhina¹⁾, L. Perosa^{1,2)}, L. Zambrano^{1,3)}¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),²⁾Universidad Yacambu (Barquisimeto, Venezuela),³⁾Universidad de Los Andes (Merida, Venezuela)

Abstract. Mirror systems make it possible to reduce device dimensions and its weight while preserving high input aperture and these systems are characterized by a number of other advantages. Their significant disadvantage is a central screening

Адрес для переписки

Артюхина Нина Константиновна
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 22,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-62-86
litt@bntu.by

Address for correspondence

Artiukhina Nina K.
Belarusian National Technical University
22 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-62-86
litt@bntu.by

of an entrance pupil that leads to lower image quality. The paper contains description of the investigations on afocal systems formed by eccentrically cut-out mirror paraboloids (off-axis mirrors) where aperture diaphragm is displaced in the meridian plane for a defined value and a central field point is located on the optical axis. The canonic Mersenne systems are accepted as base schemas (modules) for these compositions. The paper considers two types of such systems: visible increases – $\Gamma > 0$ and $\Gamma < 0$. Algorithms for calculation of centered afocal systems with two and four reflections have been written in the paper and the systems are free from spherical aberration, coma, astigmatism when an input pupil is located in superimposed focal planes of all parabolic mirrors. An aberration in curvature image has been additionally corrected in three-mirror quart-parabolic scheme which is a combination of two classical telescopic Mersenne systems. The paper presents schemes and calculation results. Two-mirror schemes with non-screened input pupil have been studied in the paper and in this case all the system remains centered and an aperture diaphragm is decentered for the distance C_m which is commensurable with the diaphragm size. The paper contains description of the investigated afocal schemes with four reflections from off-axis mirror paraboloids, a prepared algorithm for calculation, the obtained formulas for making combination of canonic afocal systems formed by two mirrors. Computer simulation in software environment Opal and Zemax has been carried out in the paper. Basic description has been prepared while using two alternative methods for the class of decentered systems and aberration characteristics and schematic solutions for telescopic systems without screening with two and four reflections have been obtained in the paper. Two-mirror afocal systems with low-powered magnification are of some interest for practical application as accessories for registering object lenses.

Keywords: optical equipment, mirror systems, afocal scheme, aberration correction, image quality

For citation: Artiukhina N. K., Perosa L., Zambrano L. (2017) Afocal Systems Formed by Mirror Off-Axis Paraboloid. *Science and Technique*. 16 (5), 407–414. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-407-414 (in Russian)

Введение

Развитие новых оптико-электронных приборов, решающих разнообразные научно-технические задачи, налагает определенные требования на выбор схемных решений оптики. В настоящее время на передовые позиции выходит зеркальная оптика, так как возросли требования к расширению спектрального диапазона и снижению весовых характеристик оптических систем.

Телескопические системы, называемые также афокальными, применяются не только совместно с глазом наблюдателя. Они являются оптическими системами афокальных насадок к фотокинообъективам, тепlopеленгаторам, оптическим устройствам лазеров. В геодезических приборах для систем фоторегистрации удаленных объектов часто успешно применяют зеркально-линзовые афокальные насадки [1].

Все классические зеркальные системы позволяют сократить габариты, уменьшить массу прибора при сохранении высокой входной апертуры, а также обладают рядом других преимуществ. Однако они имеют существенный недостаток – центральное экранирование входного зрачка, что приводит к снижению качества изображения [2]. Экранирование является результатом расположения оптических элементов. Все центры оптических поверхностей и поле изображения лежат на оптической оси системы, что приводит к уменьшению количества света в плоскости изображения, изменению

распределения энергии в дифракционном пятне и увеличению рассеяния света, вызываемого дифракцией и сопровождаемого уменьшением контраста изображения [3, 4].

Используя децентрировку входного зрачка, поля или центров вращения зеркальных поверхностей системы, можно значительно уменьшить центральное экранирование или совсем его исключить. Но тогда возникают неэлементарные aberrации четных порядков, требующие разработки приемов их устранения [5, 6].

В последние десятилетия начали разрабатываться зеркальные системы без центрального экранирования с высокими оптическими характеристиками и хорошим качеством изображения, но с центрированными компонентами. В таких системах используются прием децентрировки входного зрачка (ДВЗ) и работа внеосевым полем, следствием чего является применение внеосевых частей зеркал [7]. Таким образом, особый интерес представляют расчет зеркальных систем Мерсенна и поиск путей устранения экранирования входного зрачка.

В настоящей работе проводится исследование афокальных насадок, основанных на канонической системе Мерсенна, с неэкранированным входным зрачком. Использование систем из двух конфокальных параболических зеркал в астрономических зеркальных объективах рассматривалось в [8]. Композиции можно эффективно применять как в качестве самостоятельных децентрированных систем, так и в составе сложных (спектральных приборов [9], адаптив-

ной оптики, панорамных систем, зеркальных систем для трансформирования лазерных пучков и т. д.). Возможна компоновка телескопической системы из трех конфокальных параболических зеркал (галилеевского и кеплеровского типов) [10]: она решает задачу устранения сферической аберрации, комы, астигматизма и кривизны изображения. Такие схемы можно назвать квартапараболическими [11].

Цель работы – дальнейшее исследование систем Мерсенна, создание афокальных систем без центрального экранирования из эксцентрично вырезанных зеркальных параболоидов, в которых апертурная диафрагма смещена в меридиональной плоскости, но центральная точка поля находится на оптической оси.

Описание базовых модулей и параметрический алгоритм расчета

Двухзеркальные системы Мерсенна представлены на рис. 1а, б.

Составим параметрический алгоритм расчета. При расчете в области аббераций 3-го порядка воспользуемся обозначениями углов и высот нулевого луча, а также показателей преломления и осевых расстояний с учетом правила знаков.

1. Определим условия нормировки, задав углы и высоты нулевого луча:

$$\begin{aligned} f'_1 = -1; h_1 = 1; \alpha_2 = -1; \alpha_1 = \alpha_3 = 0; n_1 = 1; \\ n_2 = -1; n_3 = 1. \end{aligned} \quad (1)$$

2. Введем параметрическое условие для видимого увеличения системы

$$\Gamma = \frac{h_1}{h_2} = \frac{f'_1}{f'_2},$$

где $h_2 = 1 - \alpha_2 d_1$ – приведенная высота нулевого луча на втором зеркале.

3. Конструктивное условие афокальности системы запишем в виде

$$d = f'_1 - f'_2.$$

4. Получим следующую сводку формул для расчета конструктивных данных для двухзеркальной канонической системы Мерсенна:

$$\begin{aligned} r_1 = -2,0; \\ r_2 = -\frac{2}{\Gamma}; \quad d = \frac{1 - \Gamma}{\Gamma}. \end{aligned} \quad (2)$$

5. Вводим учет коэффициента центрального экранирования, который определяется лучом, проходящим по краю второго зеркала на высоте h_2 : $\varepsilon = h_2/h_1$. Для принятых условий нормировки порядка 20 %.

6. Проводим коррекцию в области аббераций 3-го порядка [12] (параметрами при этом являются деформации зеркал, связанные со значением квадрата эксцентриситета поверхностей равенством $\sigma = -e^2$). Для параболической формы зеркал

$$\sigma_1 = \sigma_2 = -1. \quad (3)$$

Каноническая система Мерсенна свободна от сферической аберрации, комы и астигматизма в области Зейделя, однако кривизна изображения принципиально не устранима. Задачу устранения четырех основных монохроматических аббераций можно решить сочетанием двух классических телескопических систем Мерсенна, имеющих увеличения Γ_1 и Γ_2 .

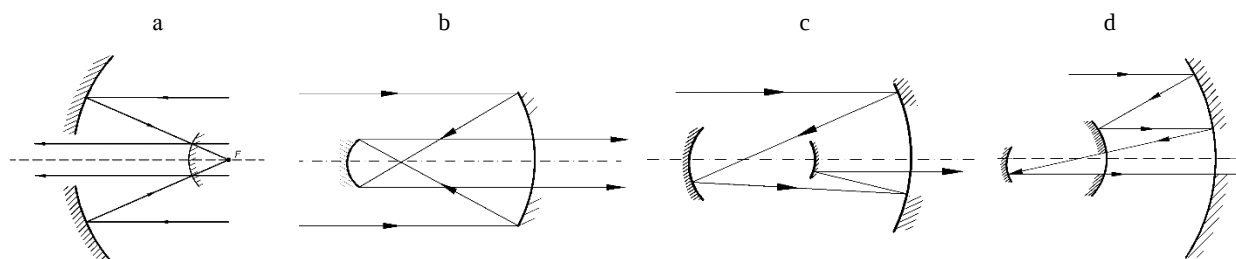


Рис 1. Системы Мерсенна: а, б – двухзеркальная система галилеевского (I тип: $\Gamma > 0$) и кеплеровского (II тип: $\Gamma < 0$) типов; с, д – квартапараболическая система кеплеровского (II тип) и галилеевского (I тип) типов

Fig 1. Mersenne systems: а, б – two-mirror system of Galilean (I type: $\Gamma > 0$) and Kepler (II type: $\Gamma < 0$) types; с, d – quart-parabolic system of Kepler (II type) and Galilean (I type) type

Расчет квартпараболической системы [5] проводят по составленному алгоритму с учетом формулы связи для видимого увеличения всей системы

$$\Gamma = \Gamma_1 \Gamma_2, \quad (4)$$

$$\text{где } \Gamma_1 = \frac{h_1}{h_2}; \quad \Gamma_2 = \frac{h_3}{h_4}.$$

Кривизна поля устраняется при соблюдении условия Петцваля (условие равенства суммы оптических сил всех составляющих зеркал нулю)

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 = 0,$$

которое приводится к виду

$$\Gamma_1^2 - 2\Gamma_1 + \Gamma = 0. \quad (5)$$

Из этого условия видно, что кривизну Петцваля принципиально можно устранить подбором увеличений, т. е. в такой квартпараболической системе зеркал возможны два конструктивных решения (рис. 1с, d).

Двухзеркальные схемы с неэкранированным входным зрачком

Одним из недостатков рассмотренных выше афокальных систем является экранирование центральной части входного зрачка. Телескопические системы без экранирования можно создать на основе эксцентрично вырезанных параболоидов, в которых апертурная диафрагма смещена в меридиональной плоскости, а центральная точка поля находится на оптической оси. В этом случае афокальные системы имеют неэкранированный входной зрачок при $C_m \geq \rho$, где C_m – децентрировка апертурной диафрагмы в меридиональной плоскости; ρ – радиус входного зрачка. Вся система при этом остается центрированной, а диафрагма децентрирована на расстояние, соизмеримое с размером диафрагмы.

Для двухзеркальной системы, составленной из внеосевых параболических зеркал, аналогично (2) получена сводка формул:

$$h_1 = 1; \quad r_1 = -4N; \quad d = 2N \frac{1-\Gamma}{\Gamma};$$

$$h_2 = \frac{1}{\Gamma}; \quad r_2 = -\frac{4N}{\Gamma}. \quad (6)$$

Исходные данные перед началом габаритного расчета – это высота h_1 главного зеркала и величина его относительного отверстия $1:N$, а также значение видимого увеличения Γ телескопической системы. У внеосевого параболоида рассматриваемого типа лишь центральная точка поля является безаберрационной (сферическая aberrация, кома и астигматизм здесь равны нулю), как это следует из формул [12].

Известно, что двухзеркальные системы, в которых апертурная диафрагма децентрирована по одной или двум координатам, обладают в окрестности анастигматической точки свойствами обычной, слегка децентрированной системы, т. е. имеют кому в центре поля, такую же кому, постоянную по всему полю, и линейный астигматизм с характерной ориентацией фокальных линий формул [11]. Этот вывод остается справедливым и в случае «большой децентрировки», когда координаты центра апертурной диафрагмы соизмеримы или даже превышают размеры самой диафрагмы.

Рассчитан ряд афокальных систем с ДЗ, состоящих из двух зеркал, по формулам (6) для следующих действительных величин: $h_1 = 750$ мм; $N = 0,8$; $C_m = 500$ мм; углового поля зрения $2\omega = 2^\circ$; диаметра входного зрачка $D = 500$ мм. Конструктивные данные рассчитанных систем I и II типов для значений видимого увеличения Γ 3^x , 5^x , 10^x и -3^x , -5^x , -10^x приведены в табл. 1.

Таблица 1

Конструктивные параметры (в мм)
двухзеркальной системы при $C_m \neq 0$

Design parameters (in mm)
of two-mirror system at $C_m \neq 0$

Показатель	Увеличение Γ					
	I тип			II тип		
	3^x	5^x	10^x	-3^x	-5^x	-10^x
r_1	-2400	-2400	-2400	-2400	-2400	-2400
r_2	-800	-480	-240	800	480	240
d	-800	-960	-1080	-1600	-1440	-1320

Достоинством двухзеркальных систем с неэкранированным входным зрачком является то, что в них довольно малое виньетирование. В системах II типа виньетирования практически

Таблица 2

Конструктивные параметры квартпараболической системы (в мм) при $C_m \neq 0$

Design parameters of quart-parabolic system (in mm) at $C_m \neq 0$

Показатель	Увеличение Γ			
	I тип		II тип	
	-8^x	-15^x	-8^x	-15^x
r_1	-2400	-2400	-2400	-2400
r_2	-600	-480	1200	800
r_3	-2400	-2400	-2400	-2400
r_4	1200	800	-600	-480
d_1	-900	-960	-1800	-1600
d_2	900	960	1800	1600
d_3	-1800	-1600	-900	-960

ски можно избежать, увеличив диаметры зеркал по наклонным пучкам. В системах I типа наклонные пучки срезаются «центральным» отверстием в главном зеркале. Виньетирование здесь можно полностью устранить, увеличив величину децентрировки C_m .

Максимально возможное угловое поле зрения можно определить из габаритных соотношений для зеркал. Учитывая, что размер промежуточного изображения в плоскости совмещенных фокусов зеркал o' должен быть меньше высоты на втором зеркале $o' \leq h_2$, имеем соотношение для углового поля зрения такой системы

$$\operatorname{tg} \omega \leq \frac{C_m - \rho}{2N\rho\Gamma}. \quad (7)$$

Афокальные схемы с четырьмя отражениями из внеосевых параболоидов

На основе трехзеркальных систем, составленных из конфокально расположенных параболических зеркал с четырьмя отражениями, можно построить афокальные системы с неэкранированным входным зрачком. Для двойных систем Мерсенна с неэкранированным входным зрачком имеем аналогичную (6) сводку формул:

$$\begin{aligned} h_1 &= 1; \quad r_1 = -4N; \quad d_1 = 2N(h_2 - 1); \\ h_2 &= \frac{1}{\Gamma_1}; \quad r_2 = -4h_2N; \quad d_2 = -d_1; \\ h_3 &= h_2; \quad r_3 = -4N; \quad d_3 = -2N \frac{\Gamma - \Gamma_1}{\Gamma}; \\ h_4 &= \frac{1}{\Gamma}; \quad r_4 = -4 \frac{\Gamma_1 N}{\Gamma}. \end{aligned} \quad (8)$$

Имеем в системе Мерсенна, состоящей из трех конфокально расположенных параболических зеркал, двойное отражение от первого зеркала, т. е. третье зеркало подразумевается совпадающим с первым. С использованием сводки формул (8) произведем расчеты систем для следующих действительных величин: $h_1 = 750$ мм; $N = 0,8$; $C_m = 500$ мм, углового поля зрения $2\omega = 2^\circ$; диаметра входного зрачка $D = 500$ мм. Конструктивные данные рассчитанных систем I и II типов для значений видимого увеличения $\Gamma - 8^x$ и -15^x приведены в табл. 2.

Следует отметить, что квартпараболические системы II типа с неэкранированным входным зрачком сложнее систем I типа. В системах I типа происходит срезание наклонного пучка с углом ω оправой второго зеркала. При выполнении условия $o' \leq h'_2$, где h'_2 – высота светового пучка на втором зеркале, определяющая его нижний край, в системах I типа можно избежать виньетирования. При этом величина максимально возможного углового поля зрения определяется из следующего соотношения:

$$\operatorname{tg} \omega \leq \frac{C_m - \rho}{2\Gamma_1 \Gamma N \rho}. \quad (9)$$

Отсюда видно, что чем больше величина C_m , тем меньше виньетирование наклонных пучков в системе. В системах II типа виньетирование наклонных пучков обусловлено действием оправ третьего и четвертого зеркал [11]. Исследование зависимостей (7) и (9) приводит к выводу, что при одном и том же угловом поле зрения виньетирование наклонных пучков в двойной системе без экранирования будет значительно больше, чем в двухзеркальных системах Мерсенна с неэкранированным входным зрачком. Следовательно, реальное угловое поле будет меньше расчетного.

Компьютерное моделирование афокальных схем

Проведены компьютерные расчеты в программных средах Zemax и Oral. Для двухзеркальных систем значения остаточных аберраций, полученные для класса децентрированных систем в ППП Oral, приведены в табл. 3 (АСТ – астигматизм, ДЕФОКУС – дефокусировка, ΔY % – дисторсия). Аберрации малы, но увеличиваются с ростом Γ .

Таблица 3
Аберрационные характеристики двухзеркальной системы для $\Gamma = 3^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ при $C_m = 500$ мм

Aberration characteristics of two-mirror system for $\Gamma = 3^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ at $C_m = 500$ mm

Γ	№	Аберрации			
		поперечные		продольные	
		dx	dy	ДЕФОКУС	АСТ
3°	0	.00000	.00000	-.00438	.00016
	1	.00000	.01029	-.00432	.00022
	2	.01133	-.00013	-.00438	.00017
	3	.00000	-.01112	-.00445	.00009
	4	-.01133	-.00013	-.00438	.00017
		$\Delta Y' \% = -.0276$			
5°	0	.00000	.00000	-.01753	.00098
	1	.00000	.02337	-.01715	.00134
	2	.03012	-.00031	-.01755	.00107
	3	.00000	-.02555	-.01798	.00054
	4	-.03012	-.00031	-.01755	.00107
		$\Delta Y' \% = -.0370$			
10°	0	.00000	.00000	-.10587	.00976
	1	.00000	.08523	-.10220	.01323
	2	.10439	-.00094	-.10602	.01074
	3	.00000	-.10189	-.11028	.00550
	4	-.10439	-.00094	-.10602	.01074
		$\Delta Y' \% = -.0569$			

Результаты компьютерного моделирования двухзеркальной системы без экранирования, выполненные в ППП Zemax, представлены на рис. 2.

При сравнении результатов расчета двухзеркальных систем – канонических с афокальными системами без экранирования – можно сделать вывод, что аберрации децентрировки ничтожно малы. Для расчетного варианта двухзеркальной афокальной системы с децентрированной апертурной диафрагмой при $\Gamma = 5^\circ$ для углового поля зрения $2\omega = 2^\circ$ максимальный угловой размер пятна рассеяния составляет величину порядка $4'$ в плоскости Гаусса. В системе нет виньетирования за счет увеличения световых диаметров зеркал.

Рассчитаем один из вариантов афокальных квартпараболических систем с неэкранированным входным зрачком для углового поля зрения $2\omega = 2^\circ$; $\Gamma = 8^\circ$; $D = 500$ мм; $C_m = 500$ мм. При таких характеристиках система практически безабберационна. Виньетирование происходит за счет нижнего края третьего зеркала, причем световые диаметры остальных зеркал увеличены по наклонным пучкам, величина его составляет 7 % по площади входного зрачка.

В случае систем, составленных из трех параболоидов, значения аберраций, полученные для класса децентрированных систем в ППП Opal, показаны в табл. 4.

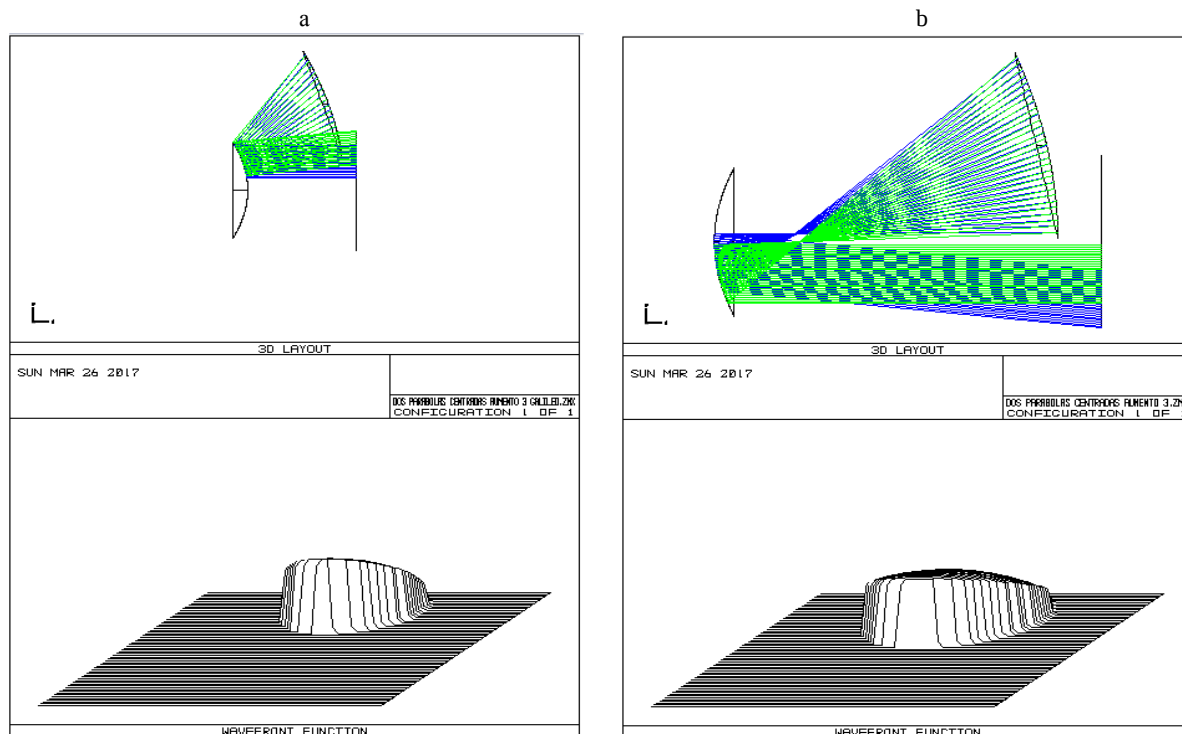


Рис. 2. Моделирование двухзеркальных систем при $C_m = 500$ мм (схема и диаграмма волнового фронта): а – система I типа; б – система II типа

Fig. 2. Simulation of two-mirror systems at $C_m = 500$ mm (scheme and diagram of wavefront): а – system of I type; б – system of II type

Таблица 4

Аберрационные характеристики квартпараболической системы для $\Gamma -8^\circ$ и -15° при $C_m = 500$ ммAberration characteristics of quart-parabolic system for $\Gamma -8^\circ$ and -15° at $C_m = 500$ mm

Γ	№	Аберрации			
		поперечные		продольные	
		dx	dy	ДЕФОКУС	АСТ
-8°	0	.00000	.00000	.00056	.00056
	1	.00000	-.00068	.00083	.00084
	2	-.00018	-.00004	.00056	.00062
	3	.00000	.00041	.00029	.00029
	4	.00018	-.00004	.00056	.00062
$\Delta Y' \% = .0090$					
-15°	0	.00000	.00000	.00176	.00176
	1	.00000	-.00135	.00341	.00344
	2	-.00031	-.00014	.00176	.00240
	3	.00000	.00049	.00013	.00013
	4	-.03012	-.00014	.00176	.00240
$\Delta Y' \% = .0320$					

Результаты компьютерного моделирования квартпараболических систем без экранирования, выполненные в ППП Zemax, представлены на рис. 3.

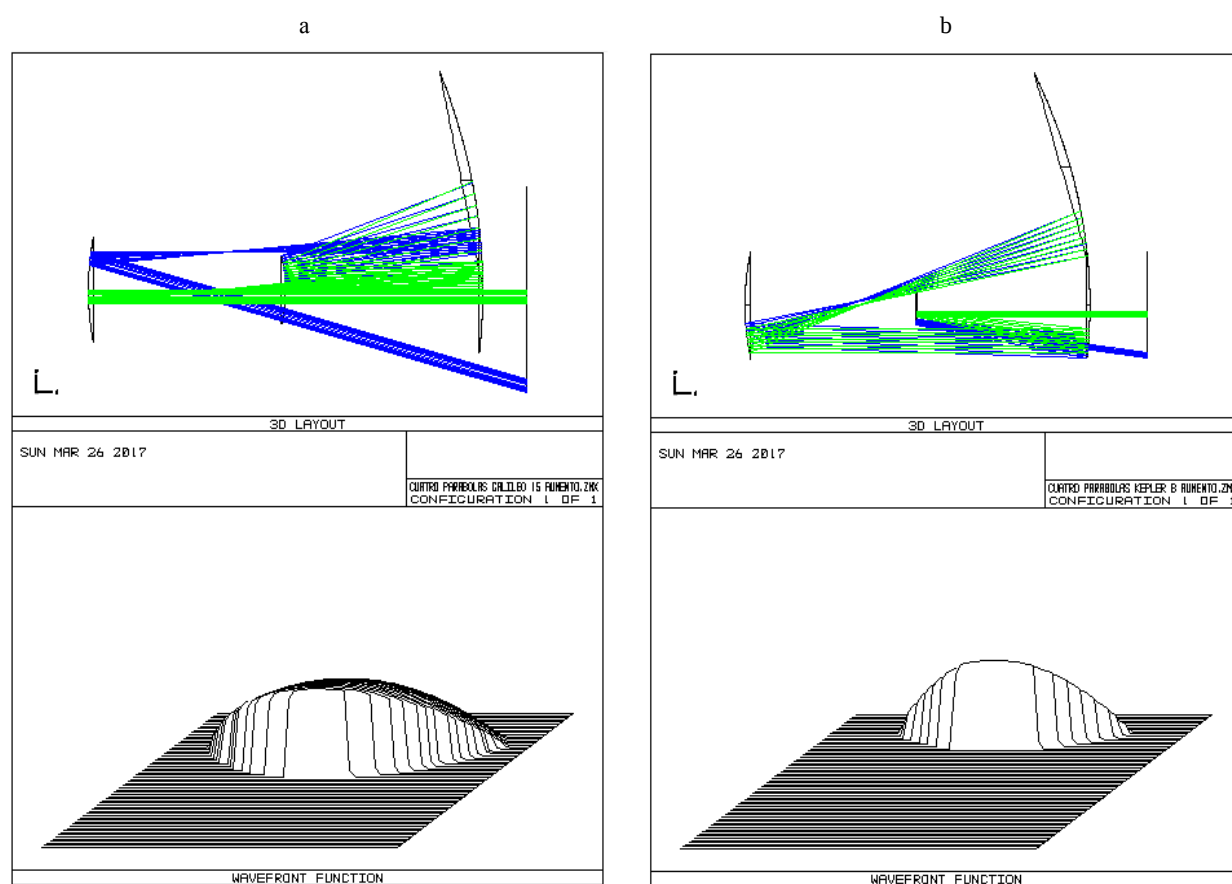


Рис. 3. Моделирование квартпараболических систем при $C_m = 500$ мм (схема и диаграмма волнового фронта):
а – система I типа; б – система II типа

Fig. 3. Simulation of quart-parabolic systems at $C_m = 500$ mm (scheme and diagram of wavefront):
а – system of I type; б – system of II type

ВЫВОДЫ

1. Предложены методики расчета афокальных систем, состоящие из внеосевых зеркал, с апертурной диафрагмой, децентрированной на расстояние C_m , соизмеримое с размером диафрагмы.

2. Установлены и структурно определены инженерные составляющие, включающие средства параметрического синтеза и анализа базовых схем: введение коэффициента, зависящего от величины децентрировки C_m и оптимального соотношения конструктивных параметров. Составлены алгоритмы расчета центрированных афокальных систем с двумя и четырьмя отражениями, которые свободны от сферической аберрации, комы, астигматизма.

3. Разработаны композиции телескопических систем без экранирования с двумя и четырьмя отражениями и проведено их компьютерное моделирование в программных средах Opal и Zemax для углового поля зрения $2\omega = 2^\circ$, диаметра входного зрачка $D = 500$ мм, децентрировки $C_m = 500$ мм при диафрагменном числе главного зеркала $N = 0,8$. Установлено, что аберрации децентрировки ничтожно малы.

4. Предложены формулы расчета для максимально возможного углового поля зрения афокальных систем. Установлены габаритные соотношения для устранения виньетирования.

5. В целях практического применения в качестве насадок к регистрирующим объективам интерес представляют двухзеркальные афокальные системы небольших кратностей. Результаты расчетов и полученные формулы могут быть использованы при проектировании новых зеркальных систем теплового сканирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. La Roche, U. The K400 Super Theodolite / U. La Roche // *Optical Engineering*. 1968. Vol. 7, No 1. P. 23. DOI: 10.1117/12.7971497.
2. Грамматин, А. П. Трехзеркальный объектив телескопа без экранирования / А. П. Грамматин, А. А. Сычева // *Оптический журнал*. 2010. Т. 77, № 1. С. 18–20. DOI: 10.1364/jot.77.000018.
3. Марешаль, А. Структура оптического изображения / А. Марешаль, М. Франсон. М.: Мир, 1964. 295 с.
4. Игнатовский, В. С. Элементарные основы теории оптических приборов / В. С. Игнатовский. СПб.: СПбГИТМО (ТУ), Ива, 2001. 202 с.
5. Cox, A. *System of Optical Design* / A. Cox. London: the Focal Press, 1967. 665 p.
6. Трубки, С. И. Методика расчета зеркальных телескопов без центрального экранирования / С. И. Трубки, Г. И. Лебедева, А. А. Гарбуль // *Оптико-механическая промышленность*. 1988. № 2. С. 21–23.
7. Губель, Н. Н. Аберрации децентрированных систем / Н. Н. Губель. Л.: Машиностроение, 1975. 272 с.

8. Цуканова, Г. И. Длиннофокусные светосильные трехзеркальные объективы / Г. И. Цуканова // *Известия вузов СССР. Приборостроение*. 1971. Т. 14, № 2. С. 92–95.
9. Пейсахсон, И. В. Оптика спектральных приборов на рубеже столетий / И. В. Пейсахсон // *Оптический журнал*. 2002. Т. 69, № 1. С. 21–35. DOI: 10.1364/jot.69.000017
10. Русинов, М. М. Несферические поверхности в оптике: расчет, изготовление и контроль / М. М. Русинов. 4-е изд. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2011. 296 с.
11. Артюхина, Н. К. Квартпараболическая система из трех зеркал / Н. К. Артюхина, Л. Пероса, Л. Самбрано // *Приборостроение-2015: сб. тр. 8-й междунар. науч.-техн. конф.*, г. Минск, 25–27 нояб. 2015 г. Минск: БНТУ, 2015. С. 165–167.
12. Артюхина, Н. К. Теория, методы проектирования и расчет зеркальных систем / Н. К. Артюхина. Минск: БНТУ, 2009. 309 с.

Поступила 27.03.2017

Подписана в печать 30.05.2017

Опубликована онлайн 29.09.2017

REFERENCES

1. La Roche U. (1968) The K400 Super Theodolite. *Optical Engineering*, 7 (1), 23. DOI: 10.1117/12.7971497.
2. Grammatin A. P., Sycheva A. A. (2010) Three-Mirror Telescope Objective without Screening. *Journal of Optical Technology*, 77 (1), 18–20. DOI: 10.1364/jot.77.000018.
3. Mareshal A., Franson M. (1960) *Diffraction Structure des Images*. Paris. 204.
4. Ignatovsky V. S. (2001) *Elementary Fundamentals on Theory for Optical Devices*. Saint-Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Publishing House "Iva". 202 (in Russian).
5. Cox A. (1967) *System of Optical Design*. London, the Focal Press. 665.
6. Trubko S. I., Lebedeva G. I., Garbul A. A. (1988) Methodology for Calculation of Mirror Telescope without Central Screening. *Optiko-Mekhanicheskaya Promyshlennost* [Optomechanical Industry], (2), 21–23 (in Russian).
7. Gubel N. N. (1975) *Aberrations of Decentered Systems*. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ. 272 (in Russian).
8. Tsukanova G. I. (1971) Long-Focus High-Power Three-Mirror Objectives. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy SSSR. Priborostroyeniye* [Journal of Instrument Engineering], 14 (2), 92–95 (in Russian).
9. Peysakhson I. V. (2002) The Optics of Spectral Devices at the Turn of the Century. *Journal of Optical Technology*, 69 (1), 17–41. DOI: 10.1364/jot.69.000017.
10. Rusinov M. M. (2011) Non-Spheric Surface in Optics: Calculation, Manufacturing and Control. 4th ed. Moscow, LIBROKOM Publ. 296 (in Russian).
11. Artiukhina N. K., Perosa L., Sambrano L. (2015) Quart-Parabolic System with Three-Mirrors. *Priporostroyeniye-2015: sb. tr. 8-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., g. Minsk, 25–27 noyab. 2015 g.* [Instrumentation-2015. Proceedings of 8th International Scientific and Research Conference, Minsk, November 25–27]. Minsk, BNTU, 165–167 (in Russian).
12. Artiukhina N. K. (2009) *Theory, Methods for Designing and Calculation of Mirror Systems*. Minsk, Belarusian National Technical University. 309 (in Russian).

Received: 27.03.2017

Accepted: 30.05.2017

Published online: 29.09.2017

DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-415-421

УДК 656.13

Оценка качества перевозки пассажиров городским транспортом при различном количестве транспортных средств, работающих на маршруте

Доктора техн. наук, профессора И. В. Чумаченко¹⁾, Ю. А. Давидич¹⁾,
канд. техн. наук А. С. Галкин¹⁾, асп. Н. В. Давидич¹⁾

¹⁾Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова (Харьков, Украина)

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

Реферат. Качество услуг, которые предоставляет городской пассажирский транспорт, определяет стандарты жизни жителей страны. Проведенный анализ методов оценки качества транспортного обслуживания пассажиров городским транспортом показал, что для этой оценки целесообразно использовать комплексные показатели. Существующие методы оценки качества городского пассажирского транспорта не полностью учитывают субъективную оценку пассажирами критериев качества обслуживания. Проведенные исследования значимости для пассажиров критериев оценки качества работы городского пассажирского транспорта позволили формализовать значение данной значимости. На этой основе был разработан комплексный показатель качества городского пассажирского транспорта, включающий в себя единичные показатели качества: пешеходной составляющей передвижений, времени ожидания, времени поездки, динамического коэффициента использования вместимости. Определено, что планирование качества перевозки пассажиров возможно с использованием моделирования транспортного процесса. Влияние технологических параметров на параметры качества можно определить с помощью разработанной имитационной модели оценки качества процесса перевозки на маршруте городского пассажирского транспорта. С применением имитационной модели проанализированы закономерности изменения комплексного показателя качества городского пассажирского транспорта в зависимости от количества транспортных средств, работающих на маршруте. Результаты моделирования показали, что изменение количества транспортных средств существенным образом влияет на величину динамического коэффициента использования вместимости транспортного средства, времени ожидания транспортных средств и времени поездки. Это приводит к изменению качества процесса перевозки. Анализ полученных результатов позволил сделать вывод, что для каждого маршрута с определенными параметрами существует такое рациональное количество транспортных средств, которое обеспечивает максимальную эффективность городского пассажирского транспорта при соответствующем качестве. Выявлено, что изменение данного количества транспортных средств с достаточной точностью описывается нелинейным регрессионным уравнением, в котором в качестве независимых переменных используются параметры транспортных средств, пассажиропотока и маршрута.

Ключевые слова: пассажир, транспорт, перевозка, коэффициент качества, фактор, значимость, имитационная модель, количество автобусов, пассажиропоток, длина маршрута

Для цитирования: Оценка качества перевозки пассажиров городским транспортом при различном количестве транспортных средств, работающих на маршруте / И. В. Чумаченко [и др.] // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 5. С. 415–421. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-415-421

Quality Assessment of Passenger Transportation by Urban Transport while Using Various Number of Fixed-Route Transport Facilities

I. V. Chumachenko¹⁾, Yu. A. Davidich¹⁾, A. S. Galkin¹⁾, N. V. Davidich¹⁾

¹⁾O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv (Kharkiv, Ukraine)

Abstract. The quality of services which are offered by urban passenger transport determines a living standard of country's inhabitants. The executed analysis of methods for quality assessment of passenger transportation service by urban transport

Адрес для переписки
Чумаченко Игорь Владимирович
Харьковский национальный университет
городского хозяйства имени А. Н. Бекетова
ул. Маршала Бажанова, 17,
61002, г. Харьков, Украина
Тел.: +38 057 707-31-32
pmkaf@kname.edu.ua

Address for correspondence
Chumachenko Igor V.
O. M. Beketov National University
of Urban Economy in Kharkiv
17 Marshal Bazhanov str.,
61002, Kharkiv, Ukraine
Tel.: +38 057 707-31-32
pmkaf@kname.edu.ua

has shown that it is expedient to use complex indices for such assessment. The existing methods for quality assessment of urban passenger transport do not fully take into account subjective passengers' evaluation of service quality criteria. The investigations conducted with the purpose to estimate significance of quality assessment criteria pertaining to urban passenger transport operation for passengers have made it possible to formalize importance of the given significance. A complex index of urban passenger transport quality has been prepared that includes such isolated quality indicators as pedestrian motion component, waiting time, travel time, dynamic factor of capacity usage. It has been determined that it is possible to plan quality of passenger transportation while using transport process simulation. Influence of technological parameters on quality parameters can be determined with the help of the developed simulation model for quality assessment of transportation process on route of urban passenger transport. While using the simulation model regularities in changing a complex quality index of urban passenger transport have been analyzed according to number of transport facilities operating on route. Simulation results have shown that changes in number of transport facilities significantly exert an influence on the value of dynamic factor of transport facility capacity usage, waiting time for transport facility and time travel. This leads to changes in quality of transportation process. Analysis of the obtained results has permitted to make a conclusion that every route with certain parameters has such rational number of transport facilities that ensures maximum efficiency of urban passenger transport with appropriate quality. It has been revealed that any change in number of transport facilities is described with a reasonable degree of accuracy by a nonlinear regression equation where parameters of transport facilities, passenger traffic flows and route are used as independent variables.

Keywords: passenger, transport, transportation, quality factor, factor, significance, simulation model, number of buses, passenger traffic flow, route length

For citation: Chumachenko I. V., Davidich Yu. A., Galkin A. S., Davidich N. V. (2017) Quality Assessment of Passenger Transportation by Urban Transport While Using Various Number of Fixed-Route Transport Facilities. *Science and Technique*. 16 (5), 415–421. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-415-421 (in Russian)

Введение

Повышение качества пассажирских перевозок в системе городского транспорта является одним из важнейших направлений, поставленных перед потребностями общества в области транспорта [1, 2]. Качество услуг, которые предоставляет городской пассажирский транспорт (ГПТ), определяет стандарты жизни жителей страны. Достижение определенного уровня перевозки пассажиров приводит к увеличению их свободного времени за счет уменьшения затрат времени на передвижение и благоприятно влияет на участие населения во всех сферах общественной жизни страны. При организации транспортного обслуживания качество является одним из основных критериев формирования параметров перевозки. Управление качеством транспортного обслуживания предусматривает определение соответствующих требований к параметрам технологического процесса перевозок пассажиров. При этом нерешенными остаются вопросы разработки показателей для оценки качества перевозок и методов его планирования.

В большинстве ранее проведенных исследований основным показателем качества перевозки пассажиров являлся коэффициент качества. Он определялся как отношение величины затрат времени на поездку при заданных, теоретически абсолютно комфортных условиях по-

ездки и фактических затрат времени на поездку в реальных условиях [3]. Дальнейшее развитие исследований данного направления привело к разработке рекомендаций по определению показателя качества транспортного обслуживания в городах с учетом норматива времени, затрачиваемого пассажиром на поездку; времени, фактически затраченного пассажирами на поездку; нормативного коэффициента наполнения; фактического значения коэффициента наполнения; показателя регулярности движения [4]. При этом исследователи обосновывают возможность использования комплексного или интегрального показателя качества, который учитывает различные факторы обслуживания пассажиров [5].

В [6] комплексным показателем качества услуг по перевозке пассажиров предлагается использовать средневзвешенное значение единичных показателей. Этот подход к определению уровня качества перевозки на маршрутах городского пассажирского транспорта базируется на определении весомости отдельных показателей качества. Данную весомость целесообразно определять с точки зрения пассажира, который является потребителем транспортной услуги. Этот подход основывается на предположении, что качество – это степень соответствия системы обслуживания требованиям, спецификациям и ожиданиям потребителей [7].

Используемые в настоящее время методы оценки качества транспортного обслуживания населения городов не полностью учитывают субъективную оценку пассажирами условий обслуживания [8].

Основная часть

Оценка пассажирами параметров качества транспортного обслуживания была проведена на основе результатов обработки натурных обследований [9]. Из всех факторов, которые пассажиры учитывают при оценке качества транспортного обслуживания, было выделено четыре основных показателя, которые можно использовать при планировании качества городского пассажирского транспорта:

- время пешеходной составляющей транспортных передвижений, включающей подход и отход от остановки;
- время ожидания транспортного средства;
- время поездки;
- динамический коэффициент использования вместимости транспортного средства.

Степень значимости для пассажиров определенных параметров проводили с использованием величины их рангов. Допуская, что максимальное значение коэффициента качества равно единице, рассчитали соответствующие коэффициенты весомости единичных показателей качества при выполнении маршрутной поездки. Вследствие этого комплексный показатель качества городского пассажирского транспорта может иметь следующий вид:

$$K_{\kappa}^{\text{маршр}} = \left(\frac{t_{\text{пш}_{\min}}}{t_{\text{пш}_{\phi}}} \right)^{0,137} \left(\frac{t_{\text{ож}_{\min}}}{t_{\text{ож}_{\phi}}} \right)^{0,262} \times \left(\frac{t_{\text{п}_{\min}}}{t_{\text{п}_{\phi}}} \right)^{0,465} \left(\frac{\gamma_{\text{д}_{\min}}}{\gamma_{\text{д}_{\phi}}} \right)^{0,136}, \quad (1)$$

где 0,137; 0,262; 0,465; 0,136 – коэффициенты весомости единичных показателей качества; $t_{\text{пш}_{\min}}$, $t_{\text{пш}_{\phi}}$ – минимальное и фактическое время пешеходной составляющей транспортного передвижения, мин; $t_{\text{ож}_{\min}}$, $t_{\text{ож}_{\phi}}$ – минимальное и фактическое время ожидания, мин; $t_{\text{п}_{\min}}$, $t_{\text{п}_{\phi}}$ – минимально возможное и фактическое

время поездки, мин; $\gamma_{\text{д}_{\min}}$ – динамический коэффициент использования вместимости при заполнении мест для сидения; $\gamma_{\text{д}_{\phi}}$ – фактический динамический коэффициент использования вместимости транспортного средства.

Планирование качества городского пассажирского транспорта возможно за счет изменения параметров технологического процесса перевозок пассажиров. Вследствие этого для оценки качества процесса перевозок возникает необходимость в определении значения перечисленных параметров при различных вариантах организации транспортного процесса. Для этого можно использовать моделирование процесса перевозок, по результатам которого представляется возможным получение информации о значении независимых переменных в модели (1). Для решения данной задачи была разработана имитационная модель оценки качества процесса перевозки на маршруте ГПТ.

Моделирование процесса перевозки базируется на рассмотрении маршрута городского пассажирского транспорта как совокупности остановочных пунктов и перегонов. Каждый перегон маршрута описывается длиной и скоростью транспортного потока на перегоне. В качестве параметров пассажиропотоков использовали данные о пассажирообмене каждого остановочного пункта. Транспортные средства ГПТ описывались их количеством, вместимостью, удельной мощностью двигателя, количеством дверей и их шириной. При моделировании выполняли математическую формализацию всех процессов, которые происходят при передвижении пассажиров.

Разработанная имитационная модель оценки качества процесса перевозки на маршруте городского пассажирского транспорта позволяет определить закономерности изменения качества обслуживания пассажиров в зависимости от параметров технологического процесса перевозки пассажиров. С ее использованием проведена оценка влияния количества транспортных средств, работающих на маршруте, на качество перевозки пассажиров городским транспортом на существующих маршрутах, основные параметры которых приведены в табл. 1.

Основные параметры маршрутов
Main parameters of routes

Порядковый номер маршрута	Параметр				
	Количество автобусов, ед.	Вместимость, номинальная/мест для сидения, пас.	Средняя длина перегона, км	Пассажиропоток на максимально загруженном перегоне, пас./ч	Длина маршрута, км
1	8	100/28	0,74	830	9,1
2	6	48/22	0,61	540	5,2
3	17	76/23	0,73	1570	8,1
4	10	100/28	0,66	2220	4,6
5	13	41/27	0,71	550	10,1
6	7	48/22	0,45	670	5,3
7	15	76/23	0,75	1870	6,2
8	25	110/28	0,8	3350	8,3
9	35	120/32	0,75	4100	10,2
10	23	140/38	0,60	5300	6,1

С использованием данных параметров был проведен имитационный эксперимент по моделированию функционирования маршрутов при различном количестве транспортных средств. Изменение количества транспортных средств приводит к изменению доходов и расходов транспортных предприятий, стоимостного выражения расходов общества в результате осуществления транспортного процесса и, как следствие, эффективности процесса перевозки городским пассажирским транспортом [10]. Повышение качества перевозочного процесса невозможно рассматривать без учета расходов на достижение требуемой величины качества. В результате было проанализировано изменение показателей эффективности городского пассажирского транспорта. Эффективность ГПТ можно представить следующим образом [10]:

$$E_{\text{ГПТ}} = D_{\text{ГПТ}} - Z_{\text{ГПТ}} - V_3 \rightarrow \max, \quad (2)$$

где $D_{\text{ГПТ}}$ – доход предприятий городского пассажирского транспорта от перевозок пассажиров, грн.; $Z_{\text{ГПТ}}$ – расход предприятий ГПТ на организацию транспортного процесса перевозки, грн.; V_3 – стоимостное выражение затрат общества в результате процесса перевозки, грн.

Результаты моделирования показали, что изменение количества транспортных средств существенным образом влияет на величину динамического коэффициента использования вместимости транспортного средства, време-

ни ожидания транспортных средств и времени поездки. Это приводит к изменению качества процесса перевозки и показателей эффективности (рис. 1, 2).

Анализ полученных результатов позволил сделать вывод, что для каждого маршрута с определенными параметрами существует такое рациональное количество транспортных средств, которое обеспечивает максимальную эффективность городского пассажирского транспорта при соответствующем качестве (табл. 2). Данное количество отличается от фактического, установленного в зависимости от значения пассажиропотока на максимально загруженном перегоне маршрута [3].

Таким образом, использование рационального количества транспортных средств позволяет повысить значение комплексного показателя качества в сравнении с качеством, которое обеспечивает фактическое количество транспортных средств. Дальнейшее повышение качества требует дополнительных финансовых средств для процесса перевозок городского пассажирского транспорта.

На следующем этапе исследования с использованием полученных результатов была разработана модель изменения количества транспортных средств, которое обеспечивает максимальную эффективность ГПТ при соответствующем качестве. Для разработки модели использовали методы корреляционного и регрессионного анализа.

Таблица 2

Фактические и расчетные показатели маршрута
Actual and calculative route indices

Порядковый номер маршрута	Показатель			
	Фактическое количество автобусов, ед.	Существующий показатель качества	Рациональное количество автобусов, ед.	Полученный показатель качества
1	8	0,45	10	0,55
2	6	0,59	7	0,7
3	17	0,54	19	0,62
4	10	0,64	11	0,70
5	13	0,60	15	0,71
6	7	0,57	8	0,65
7	15	0,67	17	0,84
8	25	0,61	26	0,62
9	35	0,55	36	0,57
10	23	0,57	24	0,59

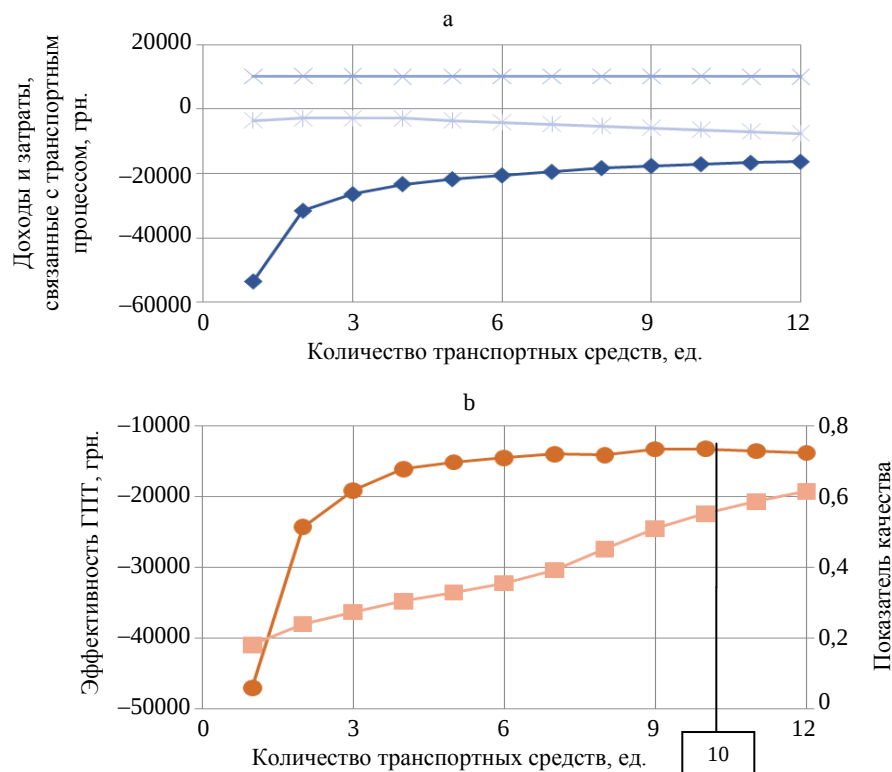


Рис. 1. Изменение показателей эффективности и качества городского пассажирского транспорта (ГПТ) на маршруте 1:

а – доходов и затрат; б – эффективности и качества; $\times$ – доходы предприятий ГПТ, грн.; $\times$ – затраты предприятий ГПТ, грн.; $\diamond$ – стоимостное выражение затрат общества вследствие осуществления процесса перевозки, грн.; $\circ$ – эффективность ГПТ, грн.; $\square$ – комплексный показатель качества ГПТ; 10 – количество транспортных средств, которое обеспечивает максимальную эффективность ГПТ при соответствующем качестве

Fig. 1. Changes in indices on efficiency and quality of urban passenger transport (UPT) on route 1: а – income and expenses; б – efficiency and quality; $\times$ – income of UPT enterprises, UAH; $\times$ – expenses of UPT enterprises, UAH;

$\diamond$ – expression in monetary terms of social costs due to implementation of transportation, UAH; $\circ$ – UPT efficiency, UAH; $\square$ – complex index of UPT quality; 10 – value of transport facility number that ensures maximum UPT efficiency with appropriate quality

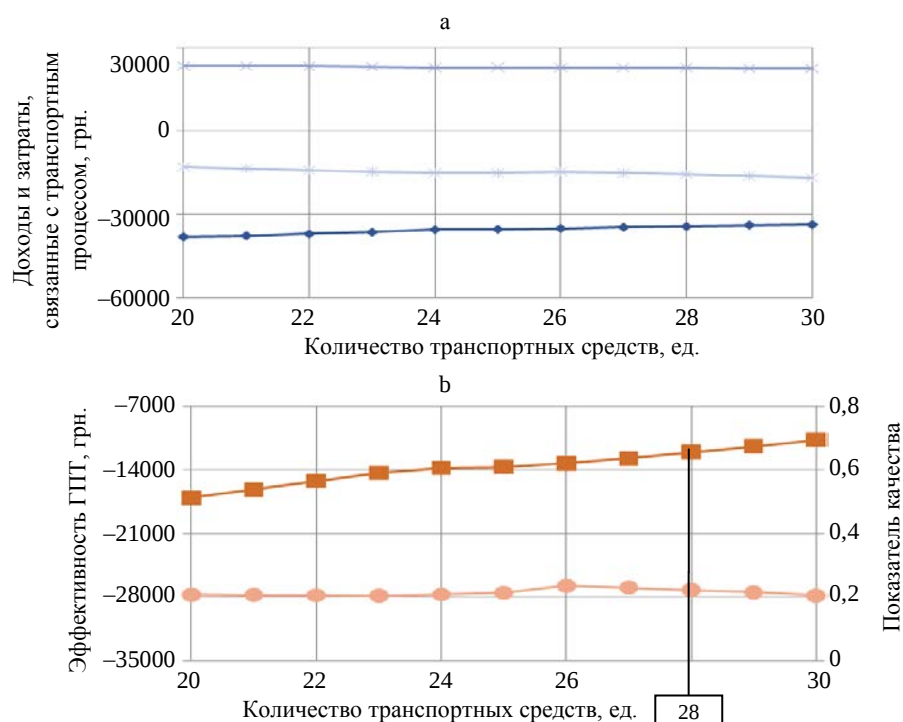


Рис. 2. Изменение показателей эффективности и качества городского пассажирского транспорта (ГПТ) на маршруте 8: а – доходов и затрат; б – эффективности и качества; $\times$ – доходы предприятий ГПТ, грн.; $\blacklozenge$ – затраты предприятий ГПТ, грн.; $\blacklozenge$ – стоимостное выражение затрат общества вследствие осуществления процесса перевозки, грн.; $\bullet$ – эффективность ГПТ, грн.; $\blacksquare$ – комплексный показатель качества ГПТ; 28 – количество транспортных средств, которое обеспечивает максимальную эффективность ГПТ при соответствующем качестве

Fig. 2. Changes in indices on efficiency and quality of urban passenger transport (UPT) on route 8: а – income and expenses; б – efficiency and quality; $\times$ – income of UPT enterprises, UAH; $\blacklozenge$ – expenses of UPT enterprises, UAH; $\blacklozenge$ – expression in monetary terms of social costs due to implementation of transportation, UAH; $\bullet$ – UPT efficiency, UAH; $\blacksquare$ – complex index of UPT quality; 28 – value of transport facility number that ensures maximum UPT efficiency with appropriate quality

На следующем этапе исследования с использованием полученных результатов была разработана модель изменения количества транспортных средств, которое обеспечивает максимальную эффективность городского пассажирского транспорта при соответствующем качестве. Для разработки модели использовали методы корреляционного и регрессионного анализа с применением метода наименьших квадратов для определения характеристики параметров модели, критерия Стьюдента и доверительных коэффициентов регрессии для оценки значимости факторов. Параметры модели приведены в табл. 3, 4.

Модель изменения количества транспортных средств, которое обеспечивает максимальную эффективность ГПТ при соответствующем качестве, выглядит следующим образом:

$$A_p = 0,59A_{\phi}^{1,1} + 0,504\left(\frac{F_{\max}}{q_n}\right)^{0,5} + 0,14l_m^{1,4}. \quad (3)$$

Таблица 3
Пределы измерения факторов модели
Measurement limits for model factor

Фактор	Обозначение, размерность	Граница измерения
Фактическое количество транспортных средств	A_{ϕ} , авт.	1–40
Пассажиропоток на максимально загруженном перегоне	$F_{\max}$, пас./год	540–5300
Номинальная вместимость транспортного средства	q_n , пас.	41–140
Длина маршрута	l_m , км	4,6–10,0

Таблица 4
Характеристика модели
Model characteristics

Фактор	Коэффициент	Стандартная ошибка	Критерий Стьюдента	
			Расчетный	Табличный
A_{ϕ}	0,590	0,026	22,65	2,23
$\frac{F_{\max}}{q_n}$	0,504	0,160	3,15	2,23
l_m	0,140	0,034	4,24	2,23

На следующем этапе проводили статистическую оценку разработанной модели (табл. 5). Результаты расчетов показали, что значение статистических показателей соответствует необходимым пределам.

Таблица 5
Результаты статистической оценки модели
Results of statistical model evaluation

Показатель	Значение
Критерий Фишера: табличный расчетный	3,07 2303,74
Коэффициент множественной корреляции	0,99
Средняя ошибка аппроксимации, %	6,9

Таким образом, использование модели (3) для определения количества транспортных средств для работы на городском маршруте позволяет достичь максимальной эффективности городского пассажирского транспорта.

ВЫВОД

Разработана модель для решения задачи повышения качества транспортного обслуживания населения на маршруте городского пассажирского транспорта. Модель позволяет с учетом параметров маршрута, пассажиропотока и транспортного средства определить количество автобусов для работы на маршруте, которое обеспечивает максимальную эффективность городского пассажирского транспорта при соответствующем качестве транспортного обслуживания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cronin, J. J. Measuring Service Quality: a Reexamination and Extension / J. J. Cronin, S. A. Taylor // *Journal of Marketing*. 1992. No 56 (3). P. 55–68. DOI: 10.2307/1252296.
2. Parasuraman, A. SERVQUAL: a Multiple Item Scale for Measuring Consumer Perceptions of Service Quality / A. Parasuraman, V. A. Zeithaml, L. L. Berry // *Journal of Retailing*. 1988. No 64 (1). P. 12–37.
3. Гудков, В. А. Технология, организация и управление пассажирскими автомобильными перевозками / В. А. Гудков, Л. Б. Миротин; под ред. Л. Б. Миротина. М.: Транспорт, 1997. 312 с.
4. Большаков, А. М. Повышение качества обслуживания пассажиров и эффективности работы автобусов / А. М. Большаков, Е. А. Кравченко, С. Л. Черникова. М.: Транспорт, 1981. 206 с.
5. Тарханова, Н. В. Анализ показателей качества пассажирских перевозок / Н. В. Тарханова // *Совершенствование организации дорожного движения и перевозка пассажиров и грузов: сб. науч. статей Междунауч.-практ. конф. Минск: БНТУ, 2009. С. 33–38.*
6. Beirão, G. Enhancing Service Quality in Public Transport Systems / G. Beirão, J. S. Cabral // *Faculty of Engineering. XII: Urban Transport and the Environment in the 21st Century*. 2006. P. 837–845.

7. Гамула, П. Р. Метрологія, стандартизація, управління якістю і сертифікація / П. Р. Гамула. Львів: Видавн. нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2004. 506 с.
8. Friman, M. Service Supply and Customer Satisfaction in Public Transportation: the Quality Paradox / M. Friman, M. Felleesson // *Journal of Public Transportation*, 2009. Vol. 12, No 4. P. 57–69. DOI: 10.5038/2375-0901.12.4.4.
9. Давідіч, Н. В. Моніторинг впливу параметрів системи міського пасажирського транспорту на якість обслуговування населення / Н. В. Давідіч, І. В. Чумаченко // *Комунальне господарство міст: зб. наук. пр. Сер.: Технічні науки та архітектура*. 2016. Вип. 128. С. 89–93.
10. Доля, В. К. Теоретические основы и методы организации маршрутных автобусных перевозок пассажиров в крупнейших городах / В. К. Доля. М.: МАДИ, 1993. 301 с.

Поступила 12.01.2017

Подписана в печать 17.03.2017

Опубликована онлайн 29.09.2017

REFERENCES

1. Cronin J. J., Taylor S. A. (1992). Measuring Service Quality: a Reexamination and Extension. *Journal of Marketing*, 56 (3), 55–68. DOI: 10.2307/1252296.
2. Parasuraman A. V., Zeithaml A., Berry L. L. (1988) SERVQUAL: a Multiple Item Scale for Measuring Consumer Perceptions of Service Quality. *Journal of Retailing*, 64 (1), 12–37.
3. Gudkov V. A., Mirotn L. B. (1997) Technology, Organization and Management of Passenger Road Transport. Moscow, Transport Publ. 312 (in Russian).
4. Bolshakov A. M., Kravchenko E. A., Tchernikova S. L. (1981) *Improvement of Quality in Service of Passengers and Efficiency of Bus Operation*. Moscow, Transport Publ. 206 (in Russian).
5. Tarkhanova N. V. (2009) Analysis of Quality Indices for Passenger Transportation. *Sovershenstvovanie Organizatsii Dorozhnogo Dvizheniya i Perevozka Passazhirov i Gruzov: Sb. Nauch. Statei Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf.* [Improvement in Organization of Road Traffic and Passenger and Cargo Transportation: Collection of Research Papers – International Scientific and Practical Conference]. Minsk, Belarusian National Technical University, 33–38 (in Russian).
6. Beirão G., Cabral J. S. (2006) Enhancing Service Quality in Public Transport Systems. *Faculty of Engineering. XII: Urban Transport and the Environment in the 21st Century*. 837–845.
7. Gamula P. R. (2004) *Metrology, Standardization, Quality Control and Certification*. Lviv, Publishing House of Lviv Polytechnic National University. 506 (in Ukrainian).
8. Friman M., Felleesson M. (2009) Service Supply and Customer Satisfaction in Public Transportation: the Quality Paradox. *Journal of Public Transportation*, 12 (4), 57–69. DOI: 10.5038/2375-0901.12.4.4.
9. Davidich N. V., Tchumachenko I. V. (2016) Monitoring for Influence of Urban Passenger Transport Parameters on Public Service Quality. *Komunal'ne Gospodarstvo Mist: Zb. Nauk. Pr. Ser.: Tekhnichni Nauki ta Arkhitektura* [Urban Communal Services: Collection of Research Papers. Series: Engineering Sciences and Architecture], (128), 89–93 (in Ukrainian).
10. Dolya V. K. (1993) *Theoretical Principles and Methods for Organization of Express Bus Transportation of Passengers in Large Cities*. Moscow, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University. 301 (in Russian).

Received: 12.01.2017

Accepted: 17.03.2017

Published online: 29.09.2017

Многослойные композиционные плазменные покрытия на элементах экранной защиты на основе диоксида циркония

Канд. техн. наук В. А. Оковитый¹⁾,
чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. Ф. И. Пантелеенко¹⁾, инж. В. В. Оковитый¹⁾,
чл.-кор. НАН Беларуси, докт. физ.-мат. наук, проф. В. М. Асташинский²⁾,
докт. физ.-мат. П. П. Храмцов²⁾, канд. физ.-мат. наук М. Ю. Черник²⁾,
докт. физ.-мат. наук, проф. В. В. Углов³⁾, кандидаты физ.-мат. наук В. И. Шиманский³⁾, Н. Н. Черенда³⁾,
канд. техн. наук С. Б. Соболевский⁴⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

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

³⁾Белорусский государственный университет (Минск, Республика Беларусь),

⁴⁾РУП «БелНИИТ «Транстехника» (Минск, Республика Беларусь)

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

Реферат. В статье приведены результаты исследования влияния параметров плазменной струи (ток, дистанция напыления, расход плазмообразующего газа азота), фракционного состава исходного порошка и степени охлаждения сжатым воздухом на характеристики антиметеоритных покрытий. На оптимальных режимах (ток дуги 600 А; дистанция напыления 110 мм; расход плазмообразующего газа азота 50 л/мин; фракционный состав порошка диоксида циркония <50 мкм; расход сжатого воздуха для охлаждения 1 м³/мин $p = 4$ атм) получают антиметеоритные покрытия на основе диоксида циркония с коэффициентом использования материала 62 %; общая пористость керамического слоя 6 %. После воздействия на покрытие компрессионными плазменными потоками в атмосфере азота кубическая модификация оксида циркония является основной фазой, присутствующей в покрытии. Параметр решетки кубической модификации оксида циркония составляет 0,5174 нм. Ввиду использования азота в качестве плазмообразующего вещества происходит его взаимодействие с атомами циркония покрытия и образуется нитрид циркония $c\text{-ZrN}$ с кубической кристаллической решеткой (параметр решетки 0,4580 нм). Происходит плавление приповерхностного слоя, причем глубина расплавленного слоя, согласно результатам растровой электронной микроскопии, составляет около 8 мкм. Закристаллизовавшийся после воздействия компрессионными плазменными потоками приповерхностный слой характеризуется однородным распределением элементов и отсутствием пор, образованных при формировании покрытия. Структура самого покрытия представлена совокупностью крупных (5–7 мкм) и мелких (1–2 мкм) частиц оксида циркония, спеченных между собой. После воздействия компрессионными плазменными потоками на сформированное покрытие происходит плавление его поверхностного слоя и его скоростная кристаллизация. В результате возникновения внутренних механических напряжений в закристаллизовавшейся части происходит растрескивание поверхностного слоя. Детальный анализ структуры поверхности с помощью растровой электронной микроскопии позволил выявить формирование в закристаллизовавшейся части ячеистой структуры со средним размером ячеек менее 1 мкм, формирование которых может быть вызвано скоростной кристаллизацией расплавленного слоя.

Ключевые слова: плазменная струя, антиметеоритные покрытия, коэффициент использования материала, компрессионные плазменные потоки, кубическая модификация, оксид циркония

Для цитирования: Многослойные композиционные плазменные покрытия на элементах экранной защиты на основе диоксида циркония / В. А. Оковитый [и др.] // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 5. С. 422–431. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-422-431

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 Vjacheslav A.
Belarusian National Technical University
65 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-93-71
niil_svarka@bntu.by

Multilayer Composite Plasma Coatings on Screen Protection Elements Based on Zirconium Dioxide

V. A. Okovity¹, F. I. Panteleenko¹, V. V. Okovity¹, V. M. Astashinsky², P. P. Hramtsov², M. Y. Cernik², V. V. Uglov³, V. I. Chimanskiy³, N. N. Cerenda³, S. B. Sobolewski⁴

¹Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

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

³Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus),

⁴Republican Unitary Enterprise, Belarusian Research Institute of Transport “Transtekhnika” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper contains results of investigations pertaining to an influence of plasma jet parameters (current, spraying distance, consumption of plasma formation gas (nitrogen)), fractional composition of initial powder and degree of cooling with compressed air on anti-meteoritic coating characteristics. Optimum modes (arc current 600 A; spray distance of 110 mm; consumption of plasma formation gas (nitrogen) – 50 l/min; fractional composition of zirconium dioxide powder <50 µm; compressed air consumption for cooling – 1 m³/min; $p = 4$ atm) make it possible to obtain anti-meteoritic coatings based on zirconium dioxide with material utilization rate of 62 %, total ceramic layer porosity of 6 %. After exposure of compression plasma flows on a coating in the nitrogen atmosphere a cubic modification of zirconium oxide is considered as the main phase being present in the coating. The lattice parameter of cubic zirconium oxide modification is equal to 0.5174 nm. Taking into consideration usage of nitrogen as plasma formation substance its interaction with zirconium coating atoms occurs and zirconium nitride (ZrN) is formed with a cubic crystal lattice (lattice parameter 0.4580 nm). Melting of pre-surface layer takes place and a depth of the melted layer is about 8 µm according to the results of a scanning electron microscopy. Pre-surface layer being crystallized after exposure to compression plasma flows is characterized by a homogeneous distribution of elements and absence of pores formed in the process of coating formation. The coating structure is represented by a set of large (5–7 µm) and small (1–2 µm) zirconium oxide particles sintered against each other. Melting of coating surface layer and speed crystallization occur after the impact of compression plasma flows on the formed coating. Cracking of the surface layer arises due to origination of internal mechanical stresses in the crystallized part. While using a scanning electron microscopy a detailed analysis of the surface structure has permitted to reveal a formation of a cellular structure with an average cell size of less than 1 µm in the crystallized portion and formation of the cells can be caused by speed crystallization of the melted layer.

Keywords: plasma jet, anti-meteoritic coatings, material utilization coefficient, compression plasma flows, cubic modification, zirconium oxide

For citation: Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Hramtsov P. P., Cernik M. Y., Uglov V. V., Chimanskiy V. I., Cerenda N. N., Sobolewski S. B. (2017) Multilayer Composite Plasma Coatings on Screen Protection Elements Based on Zirconium Dioxide. *Science and Technique*. 16 (5), 422–431. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-422-434 (in Russian)

Введение

Бурное развитие в последние годы конструкционной керамики в значительной мере определило возросший интерес к промышленному использованию керамических покрытий, прежде всего в области высоких температур – высокопрочных и коррозионностойких, а также антиметиоритных покрытий [1–5]. Среди множества решаемых задач одна из основных – проблема создания новых антиметиоритных материалов, способных противостоять воздействию космического вакуума. Основным методом, используемым для нанесения антиметиоритных покрытий из диоксида циркония, является плазменное напыление (до 90 % разработок) [6–9].

К антиметиоритным покрытиям предъявляются очень жесткие требования, покрытия должны [6]:

- характеризоваться плавным изменением физико-механических свойств (пористости, микротвердости, модулей упругости) в сечении от металлической основы к внешнему керамическому слою;

- выдерживать многократные циклы тепло-смен;

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

В общем случае антиметиоритные покрытия представляют собой многослойную систему, включающую металлический подслой и внешний керамический слой. Основная причина разрушения плазменных покрытий – термомеханические напряжения, возникающие вследствие рассогласования термического расширения металла основы и керамического слоя, а также

неравномерности распределения температурного поля в покрытии. Термомеханические напряжения усугубляются действием остаточных напряжений, возникающих в покрытии при напылении, и ослабляются эффектами пластичности и ползучести, реализующимися в металлическом подслое [9].

В качестве материалов для керамического слоя антиметиоритных покрытий часто применяют композиции на основе частичного стабилизированного диоксида циркония (ЧСДЦ) [5, 9]. Это обусловлено рядом его характеристик: сравнительно высоким коэффициентом линейного термического расширения и возможностью обеспечения высоких механических свойств упрочненной керамики, в частности ударной вязкости.

В силу простоты аппаратного оформления, а также высокой эффективности в настоящее время для нанесения керамического слоя на основе частичного стабилизированного диоксида циркония в основном используется метод плазменного напыления в воздушной среде [10]. Главной особенностью структуры плазменных антиметиоритных покрытий является то, что для увеличения допустимых деформаций керамики в ней формируют некоторую контролируемую пористость [11].

Идея создания структур с контролируемой пористостью основана на том, что пористые тела менее склонны к макроскопическому растрескиванию под действием внутренних напряжений вследствие торможения либо отклонения растущей трещины порами, а также низкого модуля упругости пористых материалов по сравнению с компактными. Более высокая пористость керамического слоя плазменного покрытия достигается изменением режимов напыления (например, увеличением дистанции напыления), увеличением размера напыляемых частиц [12].

Также важнейшие характеристики структуры покрытий – размер и форма пор [13]. Малые, острые и угловатые поры выступают как концентраторы напряжений и могут вызвать снижение вязкости разрушения керамики. В то же время большие и округлые поры приводят к притуплению и торможению трещин. Следует, однако, отметить, что вследствие снижения прочности пористых покрытий для конкретных условий испытаний существует

оптимальная величина общей пористости покрытия, при которой достигается его максимальная долговечность [5]. Параметры плазменного напыления в значительной мере влияют на фазовый состав покрытия из ЧСДЦ, его пористость, а также уровень остаточных напряжений в покрытии. Анализ известных разработок [14, 15] показывает, что технологические параметры напыления следует разделить на группы, определяющие:

- 1) степень проплавления порошка в плазменной струе;
- 2) скорость напыляемых частиц;
- 3) интенсивность охлаждения покрытия и основы при напылении.

Установлено, что температура напыляемых частиц значительно влияет на отношение количества образующихся кубической и тетрагональной фаз ZrO_2 [4, 5, 10]. В частности, существует определенный уровень силы тока дуги плазмотрона, превышение которого приводит к скачкообразному увеличению долговечности ZrO_2 – 7 % Y_2O_3 -покрытия, обусловленного полным проплавлением напыляемых частиц [16]. Дальнейший рост силы тока мало влияет на свойства покрытия. Данный эффект, очевидно, связан с тем, что покрытия из непроплавленных частиц ЧСДЦ содержат повышенное количество моноклинной фазы ZrO_2 [17, 18]. В общем случае увеличение мощности плазмотрона, приводящее к повышению температуры и скорости частиц, применение специальных насадок и т. д. приводят к повышению плотности и прочности покрытий [19]. Интенсивность охлаждения покрытия и подложки при напылении, определяемая скоростью и характером охлаждения формирующегося слоя:

- 1) влияет на размер и, следовательно, долговечность фазовых включений;
- 2) влияет на прочность межчастичных контактов в покрытии;
- 3) определяет вид и уровень остаточных напряжений в покрытии [20].

Оптимизация процесса нанесения антиметиоритного покрытия на основе диоксида циркония

Оптимизация проводилась по методике, описанной в [5]. На первом этапе она выполня-

лась на основании получения максимального коэффициента использования материала (КИМ). Вначале КИМ определяли при различных значениях тока (400; 500; 600 и 700 А) и расходах плазмообразующего газа $R_{N_2} = 40$ (45; 50; 55) л/мин, но с постоянной дистанцией напыления $L = 120$ мм (рис. 1). На следующем этапе оптимальные значения дистанции напыления определяли с постоянными значениями тока и величины расхода плазмообразующего газа ($I = 600$ А; $R_{N_2} = 50$ л/мин) (рис. 2). И, наконец, при оптимальной дистанции напыления $L = 110$ мм и постоянном значении $R_{N_2} = 50$ л/мин изменяли ток (рис. 3).

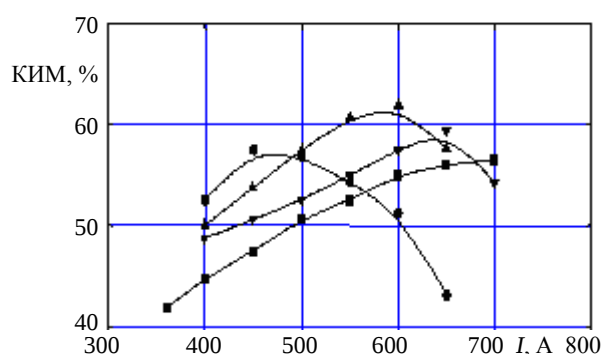


Рис. 1. Влияние тока и расхода плазмообразующего газа N_2 на коэффициент использования материала при напылении покрытий на основе ZrO_2 при: $L = 120$ мм; размере порошка менее 50 мкм;

- – $R_{N_2} = 55$ л/мин; ▲ – $R_{N_2} = 50$ л/мин;
- ▼ – $R_{N_2} = 45$ л/мин; ■ – $R_{N_2} = 40$ л/мин

Fig. 1. Influence of current and consumption of plasma formation gas N_2 on material utilization coefficient while spraying ZrO_2 -based coatings at: $L = 120$ mm; powder size less than 50 μ m;

- – $R_{N_2} = 55$ л/мин; ▲ – $R_{N_2} = 50$ л/мин;
- ▼ – $R_{N_2} = 45$ л/мин; ■ – $R_{N_2} = 40$ л/мин

Покрытия напылялись с и без охлаждения порошком фракционного состава <50 мкм. Повышение тока и расхода плазмообразующего газа (рис. 4) до определенных значений ведет к увеличению КИМ, так как эти параметры влияют на степень проплавления порошка [1–4]. Дальнейшее их увеличение приводит к тому, что частицы перегреваются и при ударе о подложку разбрызгиваются, следовательно, КИМ уменьшается. При повышении расхода N_2 происходит уменьшение значений тока для максимального КИМ. Для $R_{N_2} = 55$ л/мин максимальный КИМ 56 % и соответствует $I = 450$ А; для $R_{N_2} = 50$ л/мин максимальный КИМ 62 %

и соответствует $I = 600$ А; для $R_{N_2} = 45$ л/мин максимальный КИМ 57 % и соответствует $I = 650$ А. Похожая тенденция сохраняется в процессе изменения дистанции напыления (рис. 3) при оптимизации значений расхода N_2 и тока (в рассматриваемом случае $R_{N_2} = 50$ л/мин, $I = 600$ А). При малых дистанциях напыления частица не успевает достаточно нагреться и достигает подложки с температурой $< t_{пл}$.

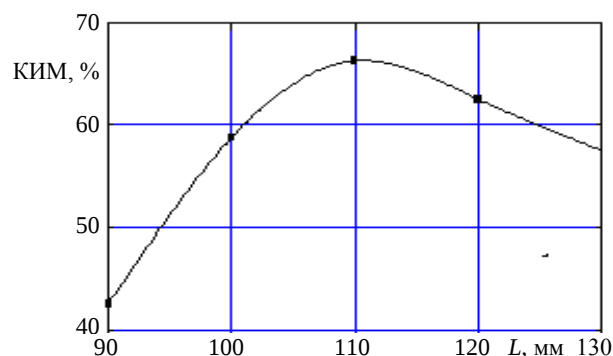


Рис. 2. Влияние дистанции напыления на коэффициент использования материала при напылении покрытий на основе ZrO_2 при: $R_{N_2} = 50$ л/мин; $I = 500$ А; размере порошка менее 50 мкм

Fig. 2. Influence of spraying distance on value of material utilization coefficient while spraying ZrO_2 -based coatings at: $R_{N_2} = 50$ l/min; $I = 500$ A; powder size less than 50 μ m

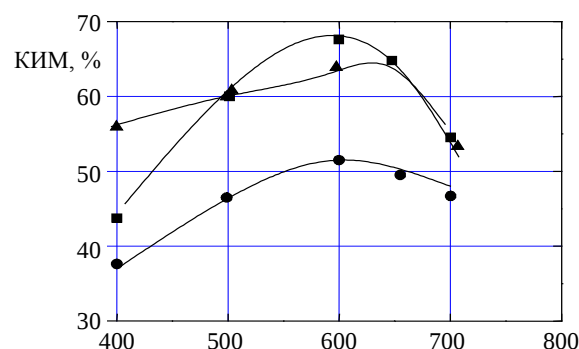


Рис. 3. Влияние тока на коэффициент использования материала при напылении покрытия на основе ZrO_2 при: $L = 110$ мм, $R_{N_2} = 50$ л/мин; размере порошка менее 50 мкм;

- – расход сжатого воздуха 1,5 м³/мин, $p = 6$ атм;
- ▲ – расход сжатого воздуха 1 м³/мин, $p = 4$ атм;
- – без охлаждения

Fig. 3. Influence of current on material utilization coefficient while spraying ZrO_2 -based coatings at: $L = 110$ mm, $R_{N_2} = 50$ l/min; powder size less than 50 μ m;

- – consumption of compressed air 1.5 m³/min, $p = 6$ atm;
- ▲ – consumption of compressed air 1 m³/min, $p = 4$ atm;
- – without cooling

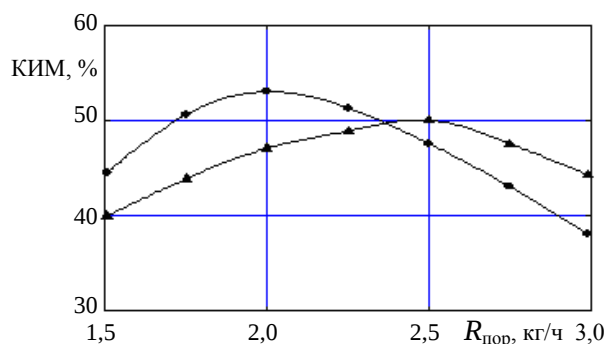


Рис. 4. Влияние скорости подачи порошка на коэффициент использования материала при напылении покрытий на основе ZrO_2 при: $R_{N_2} = 50 \text{ л/мин}$; $I = 600 \text{ А}$; $L = 110 \text{ мм}$; размере частиц порошка менее 50 мкм ;
● – расход сжатого воздуха $1 \text{ м}^3/\text{мин}$, $p = 4 \text{ атм}$;
▲ – расход сжатого воздуха $1,5 \text{ м}^3/\text{мин}$, $p = 6 \text{ атм}$

Fig. 4. Influence of powder supply speed on material utilization coefficient while spraying ZrO_2 -based coatings at: $R_{N_2} = 50 \text{ l/min}$; $I = 600 \text{ A}$; $L = 110 \text{ mm}$; powder size less than $50 \text{ }\mu\text{m}$;
● – consumption of compressed air $1 \text{ m}^3/\text{min}$, $p = 4 \text{ atm}$;
▲ – consumption of compressed air $1.5 \text{ m}^3/\text{min}$, $p = 6 \text{ atm}$

В рассматриваемом случае возрастание КИМ идет до $L = 110 \text{ мм}$, дальнейшее увеличение дистанции напыления приводит к тому, что частица из-за длительного нахождения в струе переплавляется и при ударе о подложку разбрызгивается, соответственно КИМ падает [5].

Влияние скорости подачи порошка на КИМ показано на рис. 4. Так как в формировании покрытия принимают участие все частицы в плазменной струе, наилучшими свойствами будут обладать покрытия, отвечающие плазменным режимам, где доля расплавленных частиц в струе и их концентрация максимальны.

Для определенных выше оптимальных режимов максимальный КИМ соответствует расходу порошка 2 кг/ч , при дальнейшем увеличении расхода КИМ уменьшается, поскольку тепловой энергии плазменной струи не хватает для расплавления всех подаваемых в струю частиц. С увеличением степени охлаждения при одинаковых скоростях подачи порошка КИМ уменьшается [1–5].

При увеличении толщины керамического слоя его долговечность определяется двумя противоположными факторами:

1) с ростом толщины керамического слоя уменьшается его проницаемость для газов и

снижается температура подслоя, что увеличивает долговечность покрытия;

2) с ростом толщины керамического слоя резко возрастают напряжения в покрытии (как остаточные, так и возникающие в процессе нагрева–охлаждения), что снижает долговечность.

Для разных фракций порошка $ZrO_2 - 7,1 \text{ \% } Y_2O_3$ (<50; 50–63; 63–100; 100–160 $\mu\text{м}$) при различных токах дуги I (400; 500; 600 А) были измерены КИМ и процентное содержание фаз в порошке. Влияние размера частиц на КИМ показано на рис. 5. С увеличением тока дуги для фракций порошка $ZrO_2 < 50$ и 50–63 $\mu\text{м}$ КИМ растет до 650 А , на более жестких режимах частицы переплавляются и КИМ уменьшается [5]. Для крупных фракций (63–100; 100–160 $\mu\text{м}$) КИМ постоянно растет даже при 700 А , частицы недостаточно проплавлены и КИМ не высок – порядка 35 %.

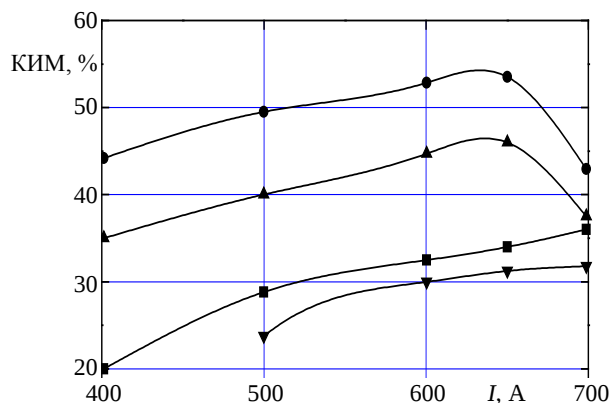


Рис. 5. Влияние тока и размеров частиц порошка на коэффициент использования материала при напылении покрытий на основе ZrO_2 при: $R_{N_2} = 50 \text{ л/мин}$; $L = 110 \text{ мм}$; $R_{пор} = 2 \text{ кг/ч}$;
● – <50 $\mu\text{м}$; ▲ – 50–63 $\mu\text{м}$; ■ – 63–100 $\mu\text{м}$;
▼ – 100–160 $\mu\text{м}$

Fig. 5. Influence of current and powder particle size on value of material utilization coefficient while spraying ZrO_2 -based coatings at: $R_{N_2} = 50 \text{ l/min}$; $L = 110 \text{ mm}$; $R_{пор} = 2 \text{ kg/h}$;
● – <50 μm ; ▲ – 50–63 μm ; ■ – 63–100 μm ;
▼ – 100–160 μm

Исследование поверхности напыленного композиционного покрытия компрессионным плазменным потоком

После воздействия на покрытие компрессионными плазменными потоками (КПП) в атмосфере азота кубическая модификация окси-

да циркония сохраняется как основная фаза, присутствующая в покрытии, что обнаружено с помощью рентгеноструктурного анализа (рис. 6). При этом исчезает обнаруженная в исходном состоянии фаза моноклинной модификации оксида циркония. Параметр решетки кубической модификации оксида циркония составляет 0,5174 нм.

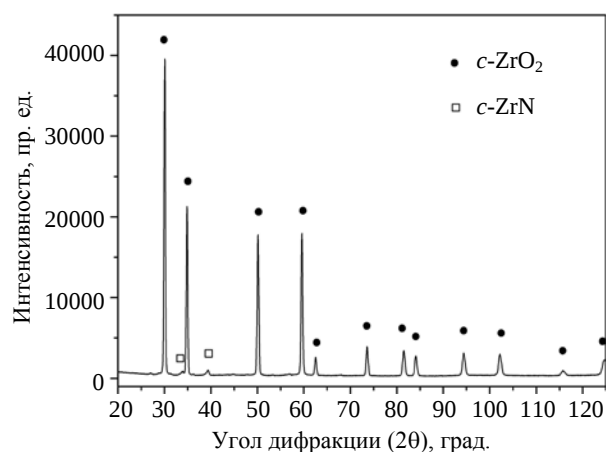


Рис. 6. Рентгеновская дифрактограмма покрытия после воздействия компрессионным плазменным потоком

Fig. 6. X-ray diffractogram of coating after exposure to compression plasma flow

Результаты расшифровки полученной рентгеновской дифрактограммы представлены в табл. 1. Ввиду использования азота в качестве плазмообразующего вещества происходит его взаимодействие с атомами циркония покрытия и образуется нитрид циркония $c\text{-ZrN}$ с кубической кристаллической решеткой (параметр решетки 0,4580 нм).

Согласно данным рентгеноспектрального микроанализа (табл. 2), в состав покрытия после воздействия компрессионными плазменными потоками также входят цирконий и кислород с незначительным содержанием металлов (Ni, Hf, Y). В составе покрытия было обнаружено 3,4 ат. % азота.

Анализ морфологии поверхности покрытия до воздействия компрессионными плазменными потоками, проведенный с помощью растровой электронной микроскопии, показал наличие развитого рельефа поверхности с частичным ее оплавлением (рис. 7а). Структура самого покрытия представлена совокупностью крупных (5–7 мкм) и мелких (1–2 мкм) частиц оксида циркония, спеченных между собой (рис. 7б).

Таблица 1

Результаты расшифровки рентгеновской дифрактограммы покрытия после воздействия компрессионными плазменными потоками

Interpretation results of coating X-ray diffractogram after exposure to compression plasma flows

Угловое положение дифракционных линий покрытия после обработки КПП (2θ), град.	Межплоскостное расстояние дифракционных линий покрытия после обработки КПП, нм	Межплоскостное расстояние дифракционных линий d и их кристаллографические плоскости (hkl) эталонов			
		$c\text{-ZrO}_2$		$c\text{-ZrN}$	
		d , нм	(hkl)	d , нм	(hkl)
30,06	0,2970	0,29646	(111)		
33,94	0,2639			0,26429	(111)
34,86	0,2572	0,25645	(200)		
39,32	0,2290			0,22890	(200)
50,13	0,1818	0,18152	(220)		
59,58	0,1550	0,15467	(311)		
62,53	0,1484	0,14810	(222)		
73,63	0,1285	0,12808	(400)		
81,53	0,1180	0,11770	(331)		
84,11	0,1150	0,11468	(420)		
94,42	0,1049	0,10470	(422)		
102,21	0,0990	0,09865	(511)		
115,81	0,0909	0,09062	(440)		
124,71	0,0870	0,08669	(531)		

Таблица 2

Элементный состав покрытия после воздействия
компрессионными плазменными потоками

Element composition of coating after exposure
to compression plasma flows

Элемент	Концентрация	
	% (вес.)	% (ат.)
Zr	59,0	30,0
O	19,0	55,0
N	1,3	4,5
Ni	0,3	0,3
Hf	1,6	0,4
Y	18,8	9,8
Сумма	100,0	100,0

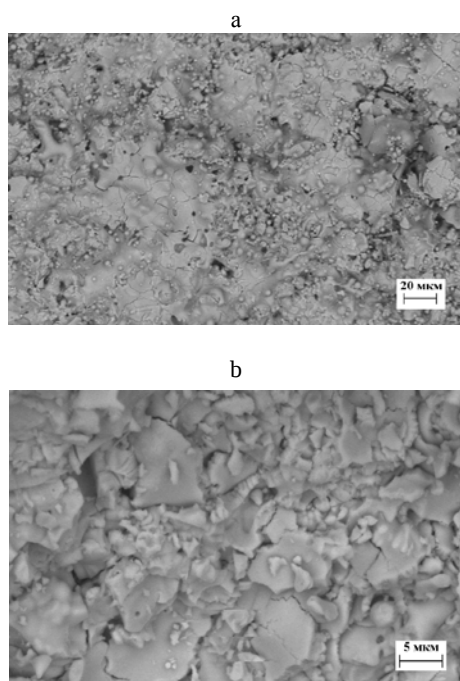


Рис. 7. Растровое электронно-микроскопическое изображение участка поверхности покрытия до воздействия компрессионными плазменными потоками: а – $\times 1000$; б – $\times 5000$

Fig. 8. Scanning electron microscope image of coating surface area before exposure compression plasma flows: а – $\times 1000$; б – $\times 5000$

После воздействия компрессионными плазменными потоками на сформированное покрытие происходят плавление его поверхностного слоя и его скоростная кристаллизация. В результате возникновения внутренних механических напряжений в закристаллизовавшейся части происходит растрескивание поверхностного слоя (рис. 8а). Детальный анализ структуры

поверхности с помощью растровой электронной микроскопии (рис. 8б) позволил выявить формирование в закристаллизовавшейся части ячеистой структуры со средним размером ячеек менее 1 мкм, формирование которых может быть вызвано скоростной кристаллизацией расплавленного слоя.

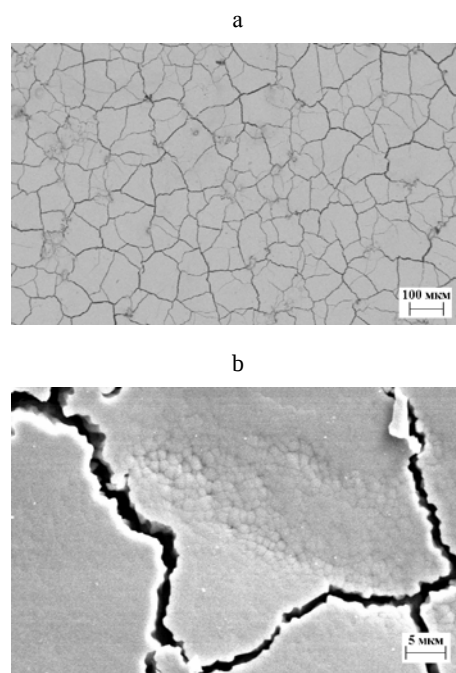


Рис. 8. Растровое электронно-микроскопическое изображение участка поверхности покрытия после воздействия компрессионными плазменными потоками: а – $\times 200$; б – $\times 5000$

Fig. 8. Scanning electron microscope image of coating surface area after exposure to compression plasma flows: а – $\times 200$; б – $\times 5000$

Изучение поперечных шлифов с помощью растровой электронной микроскопии позволило определить толщину покрытия, которая составляет 500–520 мкм (рис. 9а). Между подложкой алюминия и покрытием из оксида циркония ZrO_2 обнаружен подслой, содержащий никель и алюминий, толщина этого слоя, определенная из распределения характеристического рентгеновского излучения атомов, пропорционального их концентрации, вдоль поперечного сечения составляет 50 мкм (рис. 9б, 9с, 10). После воздействия компрессионными плазменными потоками толщина и элементный состав подслоя не изменяются.

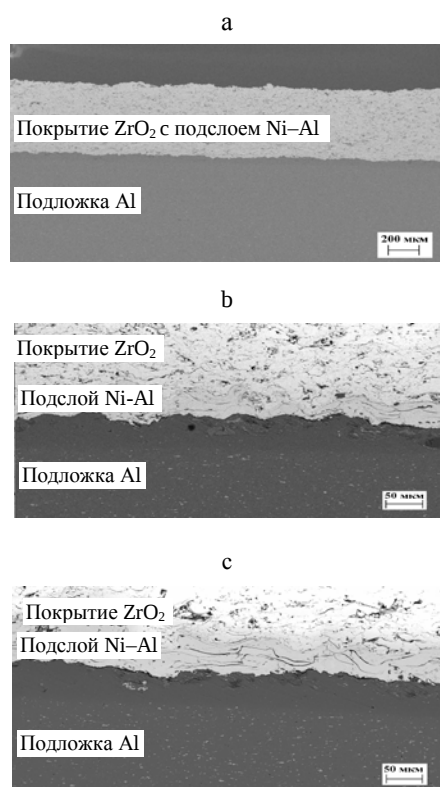


Рис. 9. Растровое электронно-микроскопическое изображение участка поперечного шлифа покрытия после воздействия компрессионными плазменными потоками

Fig. 9. Scanning electron microscope image of coating cross-section area after exposure to compression plasma flows

После воздействия на покрытие ZrO_2 компрессионными плазменными потоками происходит плавление приповерхностного слоя, причем глубина расплавленного слоя, согласно результатам растровой электронной микроскопии (рис. 11), составляет около 8 мкм. Закристаллизовавшийся после воздействия компрессионными плазменными потоками приповерхностный слой характеризуется гомогенным распределением элементов и отсутствием пор, образованных при формировании покрытия.

В результате исследования трибологических характеристик покрытий (рис. 12) был определен коэффициент трения, который в установившемся режиме для исходного покрытия составляет 0,5–0,6, в то время как для покрытия, обработанного компрессионными плазменными потоками, коэффициент трения уменьшается до 0,4. Снижение коэффициента трения покрытия на основе оксида циркония после воздействия компрессионными плазменными потоками является результатом сглаживания поверхности при кристаллизации, а также

упрочнения приповерхностного слоя за счет формирования фазы нитрида циркония ZrN .

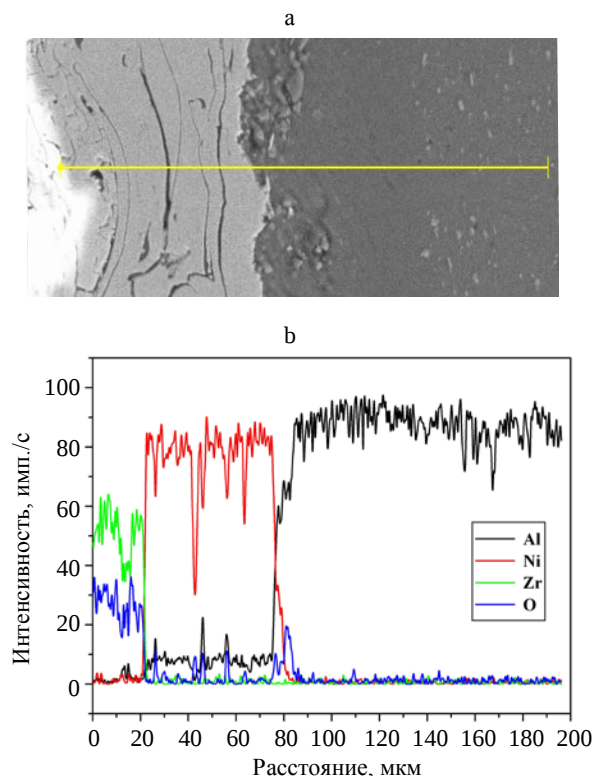


Рис. 10. Растровое электронно-микроскопическое изображение (а) поперечного шлифа подслоя и распределение интенсивности характеристического рентгеновского излучения атомов (b) вдоль выделенного направления

Fig. 10. Scanning electron microscope image (a) sub-layer cross-section and intensity distribution of characteristic X-radiation of atoms (b) along the preferred direction



Рис. 11. Растровое электронно-микроскопическое изображение участка поперечного шлифа приповерхностного слоя покрытия, расплавленного после воздействия компрессионными плазменными потоками

Fig. 11. Scanning electron microscope image of coating boundary layer cross-section melted after exposure to compression plasma flows

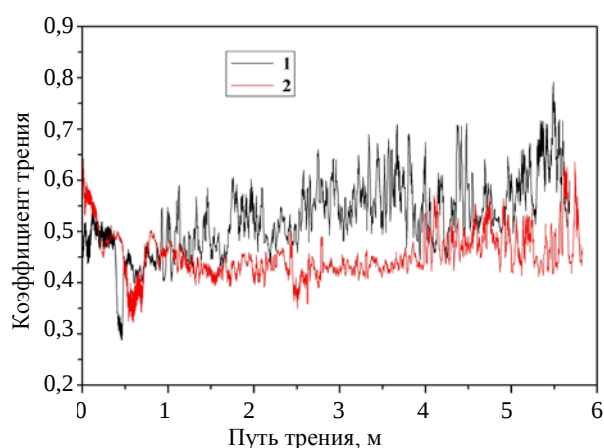


Рис. 12. Зависимость коэффициента трения исходного покрытия (1) и покрытия, обработанного компрессионными плазменными потоками (2), от пути трения

Fig. 12. Dependence of friction factor for initial coating (1) and coating being treated by compression plasma flows (2) on friction path

Таким образом, исследование элементного и фазового составов сформированных покрытий позволило установить в них наличие фазы оксида циркония ZrO_2 кубической модификации и подслоя на основе Ni–Al толщиной 60 мкм. В результате воздействия компрессионными плазменными потоками на покрытия происходит плавление приповерхностного слоя толщиной 8 мкм и образование кубического нитрида циркония ZrN.

ВЫВОДЫ

1. Оптимизация параметров напыления антиметиоритных покрытий на основе диоксида циркония проводилась на основании получения максимального коэффициента использования материала, максимального содержания тетрагональной фазы диоксида циркония в напыленном покрытии и минимальной пористости.

2. Проведены исследования влияния параметров плазменной струи (тока, дистанции напыления, расхода плазмообразующего газа азота), фракционного состава исходного порошка и степени охлаждения сжатым воздухом на характеристики антиметиоритных покрытий.

3. На оптимальных режимах (ток дуги 600 А; дистанция напыления 110 мм; расход плазмообразующего газа азота 50 л/мин; фракционный состав порошка диоксида циркония <50 мкм; расход сжатого воздуха для охлаждения 1 м³/мин; $p = 4$ атм) получены антиметиоритные покры-

тия на основе диоксида циркония с коэффициентом использования материала 62 %, общая пористость керамического слоя 6 %.

4. После воздействия на покрытие компрессионными плазменными потоками в атмосфере азота кубическая модификация оксида циркония является основной фазой, присутствующей в покрытии. Параметр решетки кубической модификации оксида циркония составляет 0,5174 нм. Ввиду использования азота в качестве плазмообразующего вещества происходит его взаимодействие с атомами циркония покрытия и образуется нитрид циркония c -ZrN с кубической кристаллической решеткой (параметр решетки 0,4580 нм). Происходит плавление приповерхностного слоя, причем глубина расплавленного слоя, согласно результатам растровой электронной микроскопии, составляет около 8 мкм. Закристаллизовавшийся после воздействия компрессионными плазменными потоками приповерхностный слой характеризуется гомогенным распределением элементов и отсутствием пор, образованных при формировании покрытия. Структура самого покрытия представлена совокупностью крупных (5–7 мкм) и мелких (1–2 мкм) частиц оксида циркония, спеченных между собой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нанесение покрытий плазмой / В. В. Кудинов [и др.]. М.: Наука, 1990. 407 с.
2. Газотермические покрытия / В. Н. Анциферов [и др.]. Екатеринбург: Наука, 1994. 324.
3. Куприянов, И. Л. Газотермические покрытия с повышенной прочностью сцепления / И. Л. Куприянов, М. А. Геллер. Минск: Наука и техника, 1990. 254 с.
4. Газотермическое напыление композиционных порошков / Ю. С. Борисов [и др.]. М.: Машиностроение, 1985. 261 с.
5. Теплозащитные покрытия на основе ZrO_2 / А. Ф. Ильющенко [и др.]. Минск: Ремика, 1998. 128 с.
6. Акишин, А. И. Космическое материаловедение / А. И. Акишин. М.: НИИЯФ МГУ, 2007. 209 с.
7. Касаев, К. С. Новые наукоемкие технологии в технике: энцикл. / К. С. Касаев; под ред. Л. С. Новикова, М. И. Панасюка. М.: Изд-во ЭНЦИТЕХ, 2000. Т. 17: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. 276 с.
8. Effects of Space Conditions on Materials / Ed. A. I. Aki-shin. N.Y.: Nova Science Publ., 2001. 199 p.
9. Процессы плазменного нанесения покрытий: теория и практика / А. Ф. Ильющенко [и др.]; под общ. ред. А. П. Достанко, П. А. Витязя. Минск: Армита – Маркетинг, Менеджмент, 1999. 544 с.
10. Достанко, А. П. Процессы плазменного нанесения покрытий: теория и практика / А. П. Достанко, А. Ф. Иль-

- ющенко, С. П. Кундас. Минск: Армита – Маркетинг, Менеджмент, 1999. 544 с.
11. Safai, S. Plasma Sprayed Coating – their Ultramicrostructure / S. Safai // T. *Advances in Surface Coating Technology*. 2008. No 1. P. 1–14.
 12. Хасуй, А. Техника напыления / А. Хасуй. М.: Машиностроение, 1975. 286 с.
 13. Борисов, Ю. С. Применение плазменных покрытий в машиностроении / Ю. С. Борисов // *Защитные покрытия на металлах: сб. науч. тр.* Киев: Наукова думка, 1999. № 13. С. 93–95.
 14. Eschnauer, H. Pulverformige Keramische Werkstoffform Plasmaspritzen / H. Eschnauer // *Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft*. 2000. Vol. 57, No 4. P. 94–98.
 15. Meclocklin, R. S. Thermal Spray Coatings for Computer Components / R. S. Meclocklin // T. *Val. Sei and Technol*. 2005. Vol. 12, No 4. P. 783–785.
 16. Вяльцев, А. М. Синтез керамических материалов для высокоплотных покрытий / А. М. Вяльцев // *Получение и исследование свойств новых материалов*. Киев: ИПМ, 1988. С. 149–153.
 17. Современные технологии нанесения теплозащитных керамических покрытий / В. С. Ивашко [и др.] // *Известия Белорусской инженерной академии*. 1997. № 4 (2). С. 28–32.
 18. Aspects of Deposition of the Thermal Barrier Coatings / A. Ilyushenko [et al.] // *TECHNOLOGY-97: Proc. of the International Conf. Bratislava (Slovakia)*, 1997. P. 672–673.
 19. Effect of Chemical, Phase Composition and Heat Resistance of a Ceramic Layer Coating on Resistance to Temperature Cycling // P. Vityaz, [et al.] // *Danube Adria Association for Automation & Manufacturing: Proc. of the 4-st International Conference*. Tallinn, 1997. P. 137–140.
 20. Особенности формирования керамического слоя теплозащитного покрытия / П. А. Витязь [и др.] // *Порошковая металлургия*. 1997. № 20. С. 81–86.
- Поступила 16.01.2017
Подписана в печать 20.03.2017
Опубликована онлайн 29.09.2017
- ### REFERENCES
1. Kudinov V. V., Pekshev P. Iu., Belashchenko V. E., Solonenko O. P., Safiullin V. A. (1990) *Application of Plasma Coating*. Moscow, Nauka Publ. 407 (in Russian).
 2. Antsiferov V. N., Shmakov A. M., Ageev S. S., Bulanov V. Ya. (1994) *Gas-Thermal Coatings*. Ekaterinburg, Nauka Publ. 324 (in Russian).
 3. Kupriyanov I. L., Geller M. A. (1990) *Gas-Thermal Coatings with High Adhesion Strength*. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ. 254 (in Russian).
 4. Borisov Yu. S., Kulik A. Ya., Mnukhin A. S., Nikitin M. D. (1985) *Gas-Thermal Spraying of Composite Powders*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 261 (in Russian).
 5. Il'yushchenko A. F., Ivashko V. S., Okovityi V. A., Sobolevskii S. B. (1998) *Thermal Barrier Coating Based on ZrO₂*. Minsk, Remika Publ. 128 (in Russian).
 6. Akishin A. I. (2007) *Space Material Science*. Moscow, Skobel'syn Institute of Nuclear Physics – Moscow State University. 209 (in Russian).
 7. Kasaev K. S., Novikov L. S., Panasiouk M. I. (eds.) (2000) *New High-End Technology in Technique. Encyclopedia. T. 17: Effect of Space Environment on Materials and Equipment of Space Crafts*. Moscow, Publishing House "ENTSITEKh". 276 (in Russian).
 8. Akishin A. I. (ed.) (2001) *Effects of Space Conditions on Materials*. N.Y., Nova Science Publ. 199.
 9. Il'yushchenko A. F., Kundas S. P., Dostanko A. P., Vityaz P. A. (ed.) (1999) *Plasma Coating Processes: Theory and Practice*. Minsk, Publishing House "Armita – Marketing, Management". 544 (in Russian).
 10. Dostanko A. P., Ilyushchenko A. F., Kundas S. P. (1999) *Processes of Plasma Coating: Theory and Practice*. Minsk, Publishing House "Armita – Marketing, Management". 544 (in Russian).
 11. Safai S. (2008) Plasma Sprayed Coating – their Ultramicrostructure. T. *Advances in Surface Coating Technology*, (1), 1–14.
 12. Hasuy A. (1975) *Spraying Technique*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ. 286 (in Russian).
 13. Borisov Yu. S. (1999) Application of Plasma Coatings in Mechanical Engineering. *Zashchitnye Pokrytiya na Metallakh: Sborn. Nauchn. Trud.* [Protective Coatings on Metals. Collection of Scientific Papers]. Kiev, Naukova Dumka Publ., (13), 93–95 (in Russian).
 14. Eschnauer H. (2000) Pulverformige Keramische Werkstoffform Plasmaspritzen. *Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft*, 57 (4), 94–98 (in German).
 15. Meclocklin R. S. (2005) Thermal Spray Coatings for Computer Components. T. *Val. Sei and Technol*, 12 (4), 783–785.
 16. Vyaltsev A. M. (1988) Synthesis of Ceramic Materials for High-Density Coatings. *Obtaining and Investigation of New Material Properties*. Kiev, Institute for Problems in Material Science, 149–153 (in Russian).
 17. Ivashko V. S. [et al.] (1997) Modern Technologies for Thermal Barrier Ceramic Coatings Technology. *Izvestiya Belorusskoi Inzhenernoii Akademii* [Proceedings of Belarusian Academy of Engineering], 4 (2), 28–32 (in Russian).
 18. Ilyushenko A., Okovity V., Sobolevsky S. [et al.] (1997) Aspects of Deposition of the Thermal Barrier Coatings. *TECHNOLOGY-97: Proc. of the International Conf. Bratislava (Slovakia)*, 672–673.
 19. Vityaz P., Ilyushenko A., Okovity V. [et al.] (1997) Effect of Chemical, Phase Composition and Heat Resistance of a Ceramic Layer Coating on Resistance to Temperature Cycling. *Danube Adria Association for Automation & Manufacturing: Proc. of the 4-st International Conference*. Tallinn, 137–140.
 20. Vityaz P. A., Il'yushenko A. F., Okovityi V. A., Ivashko V. S., Sobolevskii S. B. (1997) Peculiar Features in Formation of Ceramic Layer for Thermal Barrier Coating. *Poroshkovaya Metallurgiya* [Powder Metallurgy], (20), 81–86 (in Russian).
- Received: 16.01.2017
Accepted: 20.03.2017
Published online: 29.09.2017

DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-432-436

УДК 676.1.022

Щелочная варка древесины в присутствии хинона и его влияние на качество целевого продукта, используемого для производства упаковки

Докт. техн. наук, проф. И. И. Карпунин¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

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

Реферат. Применение в виде добавки уже отработанного щелока в количестве 25 %, содержащего использованный хинон, показало, что качественные характеристики полученного целевого продукта почти не отличаются от продукта с использованием свежего хинона для варки растительного целлюлозосодержащего сырья. Поэтому процесс получения целевого продукта (целлюлозы или полуцеллюлозы) становится (на основе расчетов с учетом экологии) экономически выгодным. Анализируя результаты исследований по производству волокнистых полуфабрикатов из растительного сырья (древесины ели), можно отметить, что при щелочной (сульфатной и натронной) варке с введением хинона улучшаются качественные показатели целевого продукта. В ряде научных исследований отмечается положительное влияние добавок на процесс щелочной делигнификации растительного сырья. В результате целевой продукт становится качественнее: снижается содержание в нем лигнина, увеличивается выход целлюлозы и гемицеллюлоз, α -целлюлозы в целлюлозе, улучшаются его физико-механические показатели. Все это способствует более высокому качеству изготавливаемой упаковки. При этом полностью исключается образование вредных, содержащих серу соединений.

Ключевые слова: щелочная варка, хинон, лигнин, древесина, растительное сырье, делигнификация

Для цитирования: Карпунин, И. И. Щелочная варка древесины в присутствии хинона и его влияние на качество целевого продукта, используемого для производства упаковки / И. И. Карпунин // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 5. С. 432–436. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-432-436

Alkaline Wood Pulping with Quinone Presence and its Influence on Quality of Desired Product Used for Packing Production

I. I. Karpunin¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Application of waste liquor at a rate of 25% that contains the used quinone and is applied as an additive has shown that qualitative characteristics of the obtained desired product do not differ from a product while using fresh quinone for pulping of cellulose-containing vegetable raw material. For this reason process of obtaining the desired product (cellulose or semi-cellulose) becomes economically cost-efficient on the basis of calculation and with due account of ecology. While analyzing investigation results pertaining to production of wood pulp from vegetable raw material (sprucewood) it is possible to point out the fact that qualitative characteristics of the desired product have been improved due to addition of quinone in the process of alkaline wood pulping (sulphate and sodic). A number of research publications have described a positive influence of additives on alkaline delignification of vegetable raw material. It subsequently improves the quality of the desired product: reduction of lignin content in the product; an output increase in cellulose and hemicellulose, α -cellulose in cellulose; upgrading of physical and mechanical indices. All the above-mentioned elements and components contribute to better quality of the manufactured packing products. In this case formation of hazardous sulfur-containing compounds is fully excluded.

Keywords: alkaline pulping, quinone, lignin, wood, vegetable raw material, delignification

For citation: Karpunin I. I. (2017) Alkaline Wood Pulping with Quinone Presence and its Influence on Quality of Desired Product Used for Packing Production. *Science and Technique*. 16 (5), 432–436. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-432–436 (in Russian)

Адрес для переписки

Карпунин Иван Иванович
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

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

Введение

В [1] впервые было установлено положительное влияние хинона на процесс щелочной варки древесины. В результате улучшалось качество целевого продукта: снижалось в нем содержание лигнина, повышался выход и улучшались его физико-механические показатели. Тогда же на основании полупроизводственных испытаний предложенного способа (опыт 3) на Жидачевском целлюлозно-бумажном комбинате было установлено [2], что с введением 0,1 % хинона повышался выход целевого продукта на 5 % и его качественные показатели, снижалось содержание лигнина.

Затем в 1972 г. появились сообщения [3, 4] о применении добавки антрахинон-2-моносульфата натрия для ускорения процессов сульфатной и натронной варок при щелочной варке растительного сырья. В результате также ускорился процесс варки. Однако открытие на использование хинона в щелочной варке растительного сырья, подтвержденное а. с. СССР 524877 по заявке № 1721330/04 [2], было признано не за нами. Как выяснилось из результатов испытаний различных исследователей, предложенный в [3, 4] антрахинон не нашел должного практического применения вследствие нерентабельности используемого вида хинона в щелочной варке растительного сырья.

Об использовании хинона и его соединений для щелочной варки

Важным преимуществом использования хинона при щелочной варке растительного сырья является то, что его присутствие в варочном щелоке в количестве 0,01 % приближает сульфатную варку к натронной без ухудшения качественных показателей волокнистого полуфабриката. При этом отсутствует образование вредных серосодержащих соединений.

Исследования продолжались в течение длительного времени, и в результате появился целый ряд работ, в которых изучалось влияние хинонов и других соединений на процесс щелочной делигнификации растительного сырья. Наиболее интересные с теоретической и практической точек зрения работы появились в Канаде [5–10], а затем в Японии [11–13]. Ряд трудов был посвящен изучению механизма реакций, протекающих при щелочной варке растительного сырья [14–16].

Было изучено около 300 органических соединений [7], но эффективными оказались антрахинон и его алкилированные соединения. Оказалось, что для многих целлюлозно-бумаж-

ных предприятий этот реагент слишком дорог и его использование экономически не рентабельно. Имеются многочисленные исследования по влиянию антрахинона на щелочную варку растительного сырья. Наиболее перспективно применение антрахинона при натронной варке различных пород древесины [7, 9, 11]. При натронной варке различных пород древесины с использованием хинонов скорость натронной варки приближается к сульфатной, увеличивается выход целлюлозы, снижается расход щелочи на варку.

Исследованию механизма делигнификации с введением добавки антрахинона и других хинонов посвящено немало работ [14–17]. Под действием раствора щелочи в лигнине происходит частичный разрыв связей и образуется его менее сшитый полимер. При наличии восстановленной формы антрахинона активные центры восстанавливаются, предотвращается сшивка и в результате ускоряется делигнификация. При этом антрахинон не только увеличивает скорость делигнификации растительного сырья, но и стабилизирует углеводы, что способствует повышению выхода целлюлозы. Установлено, что в присутствии антрахинона подавляется образование 3-деоксигексоновой 2-метилглицериновой кислот, которые в наибольших количествах образуются при обычной сульфатной варке. Причем антрахинон также участвует в реакциях с растворимыми продуктами, образовавшимися из конечных глюкозных звеньев. В результате определения количества маннозы, образующейся при гидролизе при щелочной варке в присутствии антрахинона, установлено, что происходит стабилизация глюкоманнана.

Это можно объяснить окислением редуцирующих конечных групп углеводов до групп альдоновых кислот, которые устойчивы в щелочной среде при варке, что предотвращает протекание реакции «пилинг» углеводов.

Японскими исследователями [11–13] показано, что эффективными добавками, способствующими делигнификации, являются следующие производные антрахинона: тетрагидроантрахинон, дигидрогидроксиантрацен и дигидроксиантрахинон. Ученые установили закономерности связи структуры стандартного окислительно-восстановительного потенциала и каталитической активности. Оказалось, что эффективными катализаторами делигнификации являются соединения, у которых стандартный окислительно-восстановительный потенциал имеет значения от 0,10 до 0,25 В и в структуре молекул есть енольные или подобные им группировки.

Механизм действия добавленных солей металлов переменной валентности при щелочной варке древесины отличается от механизма действия о-фенантролина и гидрохинона. В [18] имеются данные о влиянии присутствия фенантролина при щелочной варке. Это относится к ускорению делигнификации при добавке о-фенантролина при кислородно-щелочной варке с подачей кислорода. При этом расход о-фенантролина составляет (0,05–0,50) % от массы растительного сырья, т. е. больше, чем расход соли меди (медный купорос), – (0,01–0,05) % от массы растительного сырья.

Следует отметить, что при отсутствии подачи кислорода о-фенантролин не действует. Поэтому механизм действия присутствующего металла переменной валентности отличается от механизма действия о-фенантролина при введении его в систему при щелочной варке. Это указывает на то, что фенантролин действует в составе комплексов металла переменной валентности, так как оба эти свойства характерны для действия указанных комплексов при окислении кислородом с разложением образовавшихся пероксидов. Это и отличает предложенный автором статьи механизм влияния солей некоторых металлов переменной валентности в отсутствие о-фенантролина. Отличие действия комплекса иона металла в водном растворе щелочи от комплекса металла с фенантролином состоит в том, что комплекс металла с водным раствором щелочи действует независимо от того, подается кислород или нет.

Более близок по механизму действия антрахинон, добавляемый в щелочь при натронной варке растительного сырья. Количество добавляемого антрахинона составляет (0,01–0,10) % от массы древесины, однако его использование для этих целей не оправдывается стоимостью (по данным литературных источников). В результате автором впервые установлено, что введение хинона в количестве 0,1 % (от растительного сырья) при натронной варке древесины способствует повышению выхода целевого продукта и снижению в нем содержания лигнина. Были выданы и другие патенты на использование соединений хинона в процессе щелочной варки растительного сырья [8–10].

Интересные с практической и теоретической точек зрения работы [6–9, 11–13] появились в Канаде и Японии. Изучались возможные добавки (при различных типах варок) многих других органических соединений. Исследования Номуры и Накамуры [11, 12] по изучению влияния антрахинона, тетрагидроантрахинона

и ряда других хинонов на процессы сульфатной, натронной и полисульфидной варок показали, что при щелочных способах делигнификации они повышают выход целевого продукта, ускоряют процесс, а также улучшают качественные показатели волокнистого полуфабриката.

С целью получения целлюлозы высокого выхода, пригодной для производства крафт-лайнера, следует только добавить 0,05 % антрахинона для того, чтобы снизить содержание лигнина в ней. При этом выход целевого продукта возрастает на (1,8–2,0) % при примерно одинаковом содержании лигнина.

Из [14–16] известно, что в присутствии антрахинона реализуется циклический механизм, а именно редокс-цикл: антрахинон $\leftrightarrow$ антрагидрохинон, в ходе которого осуществляется перенос электронов. В результате антрахинон восстанавливается в соответствующий двухатомный спирт – антрагидрохинон. При этом в щелочном растворе между антрахиноном и антрагидрохиноном устанавливается окислительно-восстановительное редокс-равновесие с переносом электронов. Присутствие кислорода отрицательно сказывается на ходе варки. Восстановители не снижают каталитической активности. Различие в механизме действия заключается в том, что металлы, а точнее, их ионы, могут образовывать комплексы с водой, образуя водород в качестве радикала. В результате процесс полимеризации может прерываться взаимодействием радикала $H^{\cdot}$ с мономером лигнина, содержащим свободный радикал. Антрахинон таких комплексов не образует. В отличие от иона металла переменной валентности можно полагать, что фрагментация лигнина ускоряется за счет присоединения дианионов антрагидрохинона к лигнину по α -углеродному атому с последующим разрывом β -арил-эфирной связи и возникновением антрахинона и фенолят-иона лигнина. В этом смысле в отличие от иона металла переменной валентности антрахинон нельзя просто считать катализатором. Об этом свидетельствует снижение содержания в щелоке антрахинона к концу варки до 15 %.

Щелочные варки с использованием хинона

Для подтверждения литературных данных и изучения качественных (физико-механических) показателей волокнистого полуфабриката, применяемого для изготовления упаковки, автором проведены исследования по влиянию добавок различных количеств хинона на его качествен-

ные показатели при щелочной варке растительного сырья. Варку проводили в стальном автоклаве при жидкостном модуле 1:5. Режим варки: подъем температуры до 170 °С, выдержка при 170 °С 2 ч 15 мин; расход NaOH 25 %; добавка хинона – от 0,01 до 0,15 % к навеске растительного сырья (еловой древесины). Сульфидность сульфатных варок составляла 23 %. Полученные результаты представлены в табл. 1.

Из полученных результатов (табл. 1) следует, что введение хинона при щелочной варке (натронной и сульфатной) способствует повышению качественных свойств целевого продукта. Возрастают физико-механические показатели, количество целлюлозы, α -целлюлозы в целлюлозе, гемицеллюлоз, снижается содержание лигнина в целевом продукте. Повышение выхода целевого продукта объясняется увеличением содержания в нем целлюлозы и гемицеллюлоз. Улучшение качественных (физико-механических) показателей объясняется возрастанием

выхода целлюлозы и повышением содержания α -целлюлозы в целлюлозе. Полученные результаты также свидетельствуют, что количество введенного хинона (в исследованном составе – от 0,01 до 0,15 %) влияет на выход и качественные показатели целевого продукта: чем больше введено хинона, тем существеннее возрастает его действие на процесс щелочной делигнификации растительного сырья.

Использование в качестве добавки уже отработанного щелока в количестве 25 %, содержащего использованный хинон, показало, что качественные показатели полученного целевого продукта почти не отличаются от показателей при использовании свежего хинона для варки растительного целлюлозосодержащего сырья [1]. Это указывает на то, что процесс получения целевого продукта (целлюлозы или полуцеллюлозы) может стать (на основе экономических расчетов с учетом экологии) экономически выгодным при использовании хинона.

Таблица 1

Влияние количества добавленного хинона на качественные показатели полученного целевого продукта при щелочной варке

Influence of added quinone on qualitative indices of obtained desired product during alkaline pulping

Номер варки	Введено хинона, %	Выход, %	Разрывная длина, м	Коэффициент сопротивления раздиранию	Коэффициент сопротивления продавливанию	Пухлость, см ³ /г	Содержание, %			
							гемицеллюлоз	целлюлозы (без лигнина)	α -целлюлозы в целлюлозе	лигнина
1	–	42,7	8870	63	61	1,25	4,1	37,5	85,2	5,2
2	0,010	43,5	9030	70	67	1,25	4,4	39,0	86,7	4,5
3	0,020	44,1	9280	82	78	1,28	4,8	40,1	88,1	4,0
4	0,050	45,3	9540	88	89	1,30	5,3	41,7	90,4	3,6
5	0,070	46,4	9820	96	98	1,30	5,6	43,2	91,3	3,2
6	0,100	47,6	10140	98	106	1,35	6,1	44,8	92,0	2,8
7	0,150	48,9	10230	101	110	1,40	6,6	46,7	92,2	2,2
8	–	44,5	9260	81	83	1,25	5,2	42,0	89,2	2,6
9	0,100	49,7	10380	104	115	1,30	7,0	47,9	93,3	1,8
10	0,005	47,7	9720	90	78	1,25	6,5	46,4	90,3	3,1

Примечание. Хинон вводили со щелоком. Брели средние значения из пяти опытов. Варки ели: 1–7 – натронные, 8–9 – сульфатные. Натронную варку 10 проводили с введением 25 % отработанного щелока, содержащего отработанный хинон, с добавкой 0,005 % свежего хинона.

ВЫВОД

Полученные результаты по производству волокнистых полуфабрикатов из растительного сырья (древесины ели) показывают, что при щелочной (сульфатной и натронной) варке с введением хинона возрастает выход и улучшаются качественные показатели целевого продукта. Это объясняется увеличением выхода

целлюлозы и гемицеллюлоз, α -целлюлозы в целлюлозе, снижением содержания лигнина. Улучшение физико-механических характеристик полученного целевого продукта способствует повышению качества изготавливаемой упаковки. При этом полностью исключается образование вредных, содержащих серу соединений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карпунин, И. И. Введение хинона при щелочной варке древесины и его влияние на качество целевого продукта / И. И. Карпунин // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. 2014. № 3. С. 250–252.
2. Способ получения целлюлозы и полуцеллюлозы: авт. свид. СССР 524877 / Н. С. Козлов, А. И. Скриган, А. М. Шишко, И. Н. Абранпальский, И. И. Карпунин [и др.]; дата публ. 15.08.1976.
3. Verfahren zur Erhöhung der Zellstoffausbeute: pat. 98549 (DDR) / B. Fiehn, D. Gunter. 1972.
4. Bach, B. Neue Möglichkeiten zur Kohlehydratstabilisierung im Alkalischen Holsaufschluss / B. Bach, G. Fiehn // Zellstoff und Papier. 1972. Jg. 21, H. 1. P. 3–8.
5. Holton, H. H. Kraft Pulping with anthraquinone, Laboratory and Full-Scale Mill Trials / H. H. Holton, F. L. Chapman. TAPPI. 1977. Vol. 60, No 11. P. 121–125.
6. Holton, H. H. Anthraquinone as Alkaline Pulping Additive / H. H. Holton. Preprints of Annual Meeting of Canadian Pulp and Association. 1977. P. 107–112.
7. Holton, H. H. Soda Additive Softwood Pulping / H. H. Holton // Pulp and Paper Mag. Canada. 1977. Vol. 78, No 10. P. 19–26.
8. Delignification of the Lignocellulosic Material with an Alkaline Pulping Liquor in the Presence of Cyclic Keto Compound: pat. USA No 4012280 / H. H. Holton; 15.03.1977.
9. Delignification of the Lignocellulosic Material with a Soda Pulping Liquor, Containing a Diels-Alder Adduct of Benzoquinone or Naphtoquinone in Admixture with a Nitroaromatic Compound: pat. USA No 4036680 / H. H. Holton, G. H. Segall; 19.07.1977.
10. Delignification of the Lignocellulosic Material with a Soda Pulping Liquor, Containing a Diels-Alder Adduct of Benzoquinone: pat. USA No 4036681 / H. H. Holton; 19.07.1977.
11. Nomura, J. Studies on Quinine Additive Cooking. Pt. 1 / J. Nomura, M. Nakamura // Japan TAPPI. 1978. Vol. 32, No 12. P. 45–52.
12. Nomura, J. Studies on Quinine Additive Cooking. Pt. 2 / J. Nomura, M. Nakamura // Japan TAPPI. 1979. Vol. 33, No 2. P. 37–40.
13. Nagano, T. Pulping with Anthraquinone and Oxygen Delignification / T. Nagano // Paper Trade J. 1979. Vol. 163, No 4. P. 3–40.
14. Гугнин, М. Ю. К вопросу о механизме действия антрахинона при щелочной варке / М. Ю. Гугнин, Ю. А. Малков, Ю. Н. Непенин // Химия древесины. 1983. № 3. С. 43–46.
15. Чудаков, М. И. Растительные редокс-комплексы как катализаторы делигнификации древесины / М. И. Чудаков // Химия древесины. 1981. № 6. С. 3–15.
16. Шевченко, С. М. Влияние формы введения катализатора на эффективность антрахиноновой варки / С. М. Шевченко, А. Б. Никандров, И. П. Дейнеко // Химия древесины. 1986. № 4. С. 41–44.
17. Применение антрахинона и родственных соединений в качестве добавок при щелочной делигнификации древесины / Р. Н. Ковалевская [и др.] // Химия древесины. 1981. № 2. С. 7–19.
18. Анохин, С. А. Интенсификация двухступенчатых кислородно-щелочных варок с помощью о-фенантрена / С. А. Анохин, Э. И. Гермер, Ю. Г. Бутко // Химия древесины. 1983. № 1. С. 113–114.

REFERENCES

1. Karpunine I. I. (2014) Quinonation during Alkaline Wood Pulping and its Influence on Quality of Desired Product. *Zhurnal Nauchnykh Publikatsiy Aspirantov i Doktorantov* [Journal of Research Publications of Post-Graduate and Post-Doctoral Students]. 2014. (3). 250–252.
2. Kozlov N. S., Skrigan A. I., Shishko A. M., Abranpalsky I. N., Karpunine I. I. [et al.] (1976) *Method for Obtaining Cellulose and Semichemical Cellulose*: USSR Inventors Certificate 524877. (in Russian).
3. Fiehn B., Gunter D. (1972) *Verfahren zur Erhöhung der Zellstoffausbeute*: pat. 98549 (DDR) (in German).
4. Bach B., Fiehn G. (1972) Neue Möglichkeiten zur Kohlehydratstabilisierung im Alkalischen Holsaufschluss. *Zellstoff und Papier*, 21 (1), 3–8 (in German).
5. Holton H. H., Chapman F. L. (1977) Kraft Pulping with Anthraquinone, Laboratory and Full-Scale Mill Trials. *TAPPI*, 60 (11), 121–125.
6. Holton H. H. (1977) *Anthraquinone as Alkaline Pulping Additive*. Preprints of Annual Meeting of Canadian Pulp and Association, 107–112.
7. Holton H. H. (1977) Soda Additive Softwood Pulping. *Pulp and Paper Mag. Canada*, 78 (10), 19–26.
8. Holton H. H. (1977) *Delignification of the Lignocellulosic Material with an Alkaline Pulping Liquor in the Presence of Cyclic Keto Compound*: pat. USA No 4012280.
9. Holton H. H., Segall G. H. (1977) *Delignification of the Lignocellulosic Material with a Soda Pulping Liquor, Containing a Diels-Alder Adduct of Benzoquinone or Naphtoquinone in Admixture with a Nitroaromatic Compound*: pat. USA No 4036680.
10. Holton H. H. (1977) *Delignification of the Lignocellulosic Material with a Soda Pulping Liquor, Containing a Diels-Alder Adduct of Benzoquinone*: pat. USA No 4036681.
11. Nomura J., Nakamura M. (1978) Studies on Quinine Additive Cooking. Pt. 1. *Japan TAPPI*, 32 (12), 45–52.
12. Nomura J., Nakamura M. (1979) Studies on Quinine Additive Cooking. Pt. 2. *Japan TAPPI*, 33 (2), 37–40.
13. Nagano T. (1979) Pulping with Anthraquinone and Oxygen Delignification. *Paper Trade J.*, 163 (4), 3–40.
14. Gugnine M. Yu., Malkov Yu. A., Nepenine Yu. N. (1983) Solution to the Problem Pertaining to Anthraquinone Action Mechanism during Alkaline Pulping. *Khimiya Drevesiny* [Chemistry of Wood], (3), 43–46 (in Russian).
15. Tchudakov M. I. (1981) Vegetational Redox-Complexes as Catalysts of Wood Delignification. *Khimiya Drevesiny* [Chemistry of Wood], (6), 3–15 (in Russian).
16. Shevchenko S. M., Nikandrov A. B., Deyneko I. P. (1986) Influence of Catalyst Type on Efficiency of Anthraquinone Pulping. *Khimiya Drevesiny* [Chemistry of Wood], (4), 41–44 (in Russian).
17. Kovalevskaya R. N., Boiko Yu. A., Ivanov M. A., Kryukov V. M. (1981) Application of Anthraquinone and Related Compounds as Additives during Alkaline Wood Delignification. *Khimiya Drevesiny* [Chemistry of Wood], (2), 7–19 (in Russian).
18. Anokhina S. A., Germer E. I., Butko Yu. G. (1983) Intensification of Two-Stage Oxygen-Alkali Pulping with the Help of o-Phenanthrene. *Khimiya Drevesiny* [Chemistry of Wood], (1), 113–114 (in Russian).

Поступила 19.09.2016

Подписана в печать 25.11.2016

Опубликована онлайн 29.09.2017

Received: 19.09.2016

Accepted: 25.11.2016

Published online: 29.09.2017

DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-437-443

УДК 656.081

Формализация гравитационной модели для расчета параметров междугородних пассажирских корреспонденций

Канд. техн. наук К. В. Доля¹⁾¹⁾Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова (Харьков, Украина)© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Рассмотрена возможность применения гравитационных моделей для расчетов междугородних пассажирских транспортных корреспонденций, реализуемых при помощи общественного транспорта. В качестве объекта исследования была выбрана пассажирская транспортная система Украины, что расширяет возможности применения полученных результатов. При прогнозировании пассажирских транспортных корреспонденций большое значение имеют величины калибровочных коэффициентов, используемых в расчете указанных корреспонденций. Формализация данных коэффициентов необходима для каждой транспортной системы, для которой производится расчет пассажирских транспортных корреспонденций. Актуальной задачей является поиск фактических параметров калибровочных и других коэффициентов как составляющих гравитационных моделей. Значительную роль в этой проблеме играет выбор варианта гравитационной модели. Разработанные на данный момент способы расчетов пассажирских транспортных корреспонденций предлагают их использование на разных типах транспорта и для разных типов поездок. В результате проведенного изучения исследован процесс оказания услуг по перевозке пассажиров на маршрутах общего пользования. Полученные характеристики функционирования рассмотренной системы позволили оценить возможность применения известных способов расчета пассажирских корреспонденций и качество их применения. Эмпирическим способом подобраны калибровочные коэффициенты используемых при расчете указанных корреспонденций способом применения гравитационного моделирования. Формализация ранее неизученных параметров составляющих гравитационных моделей обеспечивает возможность применения рассмотренного подхода к расчету пассажирских корреспонденций в рамках изученной транспортной системы. Это обеспечивает возможность в планировании и взаимодействии функционирования различных видов транспорта и дает новые знания об изученной системе.

Ключевые слова: транспортная система, функция тяготения, фактор сопротивления, отправления, прибытия, пассажиропоток, калибровочный коэффициент, расстояние

Для цитирования: Доля, К. В. Формализация гравитационной модели для расчета параметров междугородних пассажирских корреспонденций / К. В. Доля // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 5. С. 437–443. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-437-443

Gravity Model Formalization for Parameter Calculation of Intercity Passenger Transport Correspondence

С. V. Dolya¹⁾¹⁾О. М. Бекетов National University of Urban Economy in Kharkiv (Kharkiv, Ukraine)

Abstract. The paper considers a possibility to apply gravity models for calculation of intercity passenger transport correspondences which are implemented with the help of public transport. The Ukraine transportation system has been selected as an object of investigation and this approach extends application possibilities of the obtained results. Calibration coefficients

Адрес для переписки

Доля Константин Викторович
Харьковский национальный университет
городского хозяйства имени А. Н. Бекетова
ул. Маршала Бажанова, 17,
61022, г. Харьков, Украина
Тел.: +38 099 291-81-60
k.dolya@inbox.ru

Address for correspondence

Dolya Constantine V.
O. M. Beketov National University
of Urban Economy in Kharkiv
17 Marshal Bazhanov str.,
61022, Kharkiv, Ukraine
Tel.: +38 099 291-81-60
k.dolya@inbox.ru

used in calculation of the indicated correspondences are rather important and significant in case of forecasting passenger transport correspondences. Formalization of these factors is necessary for every transportation system if a calculation of passenger transport correspondences has been made for it. In this case searching for actual calibration parameters and other coefficients as components of gravitational models is a relevant objective of the given paper. Selection of the gravity model variant plays rather significant role in solution of this problem. The developed methods for calculation of passenger transport correspondences are proposed for their application in respect of various transport and trip types. The executed research works have made it possible to investigate a process pertaining to providing of services for passenger transportation while using public routes. The obtained characteristics on functioning of the studied system have allowed to assess the possibility for application of the known methods for calculation of passenger correspondences and analyze the quality of their application. Calibration coefficients have been empirically selected for calculation of the indicated correspondences while using method of gravity modeling. Formalization of previously unexplored parameters of gravity model component provides the possibility to apply the considered approach for calculation of passenger correspondences within the framework of the investigated transportation system. This makes it possible to plan and arrange interaction of various transport types and provides new data and knowledge on the studied system.

Keywords: transport system, gravity function, resistance factor, departure, arrival, passenger flow, calibration coefficient, distance

For citation: Dolya C. V. (2017) Gravity Model Formalization for Parameter Calculation of Intercity Passenger Transport Correspondence. *Science and Technique*. 16 (5), 437–443. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-437-443 (in Russian)

Введение

Роль транспорта в обеспечении потребностей общества сложно переоценить. Не вызывает сомнения тот факт, что транспортировка есть неотъемлемая составляющая каждого производственного процесса и жизнедеятельности любого человека. Важность наличия своевременной реализации потребности общества в транспортировке не вызывает сомнений. Однако своевременность не определяющий фактор. Кроме своевременности потребитель транспортных услуг – пассажир – требует комфортности, быстроты перемещения, регулярности и доступной стоимости услуги. Параметры комфортности перемещения пассажиров в транспорте общего пользования, безусловно, должны вносить свои коррективы в деятельность организаций-перевозчиков. Следует отметить, что транспортные предприятия не всегда имеют возможность полностью удовлетворять требования пассажиров в вопросах интервалов движения, расписания или типа подвижного состава. Это связано с высокой стоимостью самих транспортных средств.

Для обеспечения планирования деятельности транспортного предприятия в части закупок транспортных средств, расчетов основных технико-экономических показателей деятельности транспортного предприятия и потребления ресурсов необходимо прогнозировать параметры корреспонденций пассажиров. К таким параметрам можно отнести объемы прибытия и отправки пассажиров по отношению к каждому

транспортному узлу и характеристики корреспонденций пассажиров между узлами.

Учеными уже рассматривался вопрос расчета пассажирских корреспонденций. Так, в [1] предложено рассчитать пассажирскую корреспонденцию между городами за год по следующей зависимости:

$$H_{ij} = \frac{K P_{ij}^a}{F_{ij}^b}, \quad (1)$$

где H_{ij} – корреспонденция между городами i и j соответственно; K , a , b – калибровочные коэффициенты; P_{ij} – привлекательность городов i и j ; F_{ij} – фактор сопротивления поездке между городами i и j .

К недостатку данных исследований можно отнести отсутствие определенных способов расчета привлекательности городов и фактора сопротивления поездке. При этом данная модель рассматривалась авторами как гравитационная.

В [2] предложено использовать следующий вариант гравитационной модели:

$$H_{ij} = k \frac{(A_i A_j)^\alpha}{d_{ij}^\gamma}, \quad (2)$$

где A_i , A_j – факторы привлекательности городов i и j ; k – константа; γ – параметр, контролирующий сопротивление расстояния фактору привлекательности; α – параметр контроля влияния фактора привлекательности.

Следует отметить, что авторами работы предлагается использовать данную модель не

для пассажирской транспортной системы в целом, а только для авиационных перевозок. Не приняты и способы определения как контролирующих параметров, так и константы. В свою очередь это затрудняет использование предложенной зависимости.

Авторами [3] рассмотрена классическая гравитационная модель Ньютона в качестве основы для расчета корреспонденции пассажиров между городами по предложенной ими зависимости

$$H_{ij} = \frac{GDP_i \cdot Pop_i \cdot GDP_j \cdot Pop_j}{(d_{ij} \cdot AirFare_{ij})^2}, \quad (3)$$

где GDP_i , GDP_j – внутренний валовой продукт городов i и j ; Pop_i , Pop_j – население городов i и j ; d_{ij} – расстояние между городами i и j ; $AirFare_{ij}$ – стоимость перелета.

В предложенном способе расчета учтены уровень благосостояния и количество населения городов, а расстояние и стоимость играют роль сопротивления корреспонденции аналогично функции (1). Однако следует заметить, что модель предложена для авиационного транспорта, где стоимость значительно отличается от стоимости на наземном, что может привести к невозможности применения данной модели ко всей пассажирской транспортной системе. Необходимо отметить, что в этой модели учитывается внутренний валовой продукт городов.

В [4] для прогнозирования количества поездок (корреспонденции) пассажиров из региона в регион авторы предложили использовать следующую зависимость:

$$H_{ij} = H_{ei} \frac{P_j F_{ij} K_{ij}}{\sum_i A_j F_{ij} K_{ij}}, \quad (4)$$

где H_{ei} – количество отправок из города i .

В предложенной модели калибровочный коэффициент K_{ij} рассматривается для балансирования социально-экономических характеристик регионов i и j соответственно. Данная модель разработана для расчета корреспонденций между странами, где наблюдается необходимость учитывать разные уровни их развития, что не применимо для корреспонденций внутри одной страны.

В [5, 6] предложены способы прогнозирования распределения корреспонденции пассажиров между видами транспорта. Это позволяет планировать взаимодействие разных видов транспорта для корректировки параметров функционирования пассажирской транспортной системы. Так, авторами предположено использовать результаты исследований для оптимизации расписаний и типов транспортных средств, что влияет на комфортность поездки.

В [7] изучено влияние стоимости пользования транспортной услугой на социально-экономические факторы развития общества, вопрос изменения объемов перевозок пассажиров в системе при варьировании стоимости транспортных услуг для населения, а также изменение корреспонденции пассажиров при варьировании длины средней поездки. Это подтверждает выводы предыдущих исследователей о влиянии стоимости и расстояния поездки на количественные показатели пассажирской транспортной корреспонденции.

Авторами [8] предлагается проводить обследование существующих пассажирских корреспонденций для установления фактических значений эмпирических констант, факторов сопротивления и балансировочных коэффициентов. Следует отметить, что в [9] также предлагается провести обследование существующих потоков пассажиров, установив фактические значения в предлагаемых ими функциях для прогнозирования корреспонденций.

Для установления корреспонденции пассажиров предложено использовать гравитационную модель в ее классической интерпретации [10]

$$H_{ij} = \frac{d_{ij} H_{ei} H_{ni}}{L_{ij}^x}, \quad (5)$$

где H_{nj} – количество прибытий в город j ; L_{ij} – расстояние между городами i и j ; d_{ij} – функция тяготения между городами i и j ; x – калибровочный коэффициент фактора расстояния.

По результатам проведенного анализа современных подходов к решению проблемы о расчете пассажирских транспортных корреспонденций установлены:

- возможность применения гравитационных моделей в области рассматриваемой проблематики;

- количественные показатели корреспонденции прямо пропорциональны количеству жителей, отправок или прибытий пассажиров и обратно пропорциональны стоимости проезда и расстоянию между городами.

При этом установление количественных значений калибровочных коэффициентов является нерешенным вопросом. Такие результаты проведенного анализа ставят задачи по:

- рассмотрению возможности применения методов гравитационного моделирования при расчетах пассажирских транспортных корреспонденций в рамках пассажирской транспортной системы Украины;

- установлению значения калибровочных коэффициентов для выбранной гравитационной модели;

- оценке точности проводимых расчетов при использовании полученных значений калибровочных коэффициентов.

По результатам проведенной работы возможно получение новых сведений о пассажирской транспортной системе Украины, что в свою очередь дополнит имеющиеся данные. В отличие от достижений рассмотренных авторов, проведенное исследование будет учитывать корреспонденции пассажиров на маршрутах общего пользования всех видов транспорта.

Основная часть исследования

Для прогнозирования корреспонденций пассажиров выбрана зависимость (5). В ней предложено рассмотреть функцию тяготения как комплексную

$$d_{ij} = \frac{a}{L_{ij}^x}, \quad (6)$$

где a – эмпирическая константа.

Вследствие преобразования (5) принимает вид

$$H_{ij} = \frac{a}{L_{ij}^x} (H_{ei} H_{ni}). \quad (7)$$

Данная интерпретация дает возможность учитывать влияние на расчетные показатели пассажирской корреспонденции длины маршрута, скорректированной калибровочным ко-

эффициентом для фактора расстояния. Фактор стоимости поездки принято не учитывать, так как он зависит от длины поездки, а значит, уже учитывается.

Для установления возможности использования зависимости (7) в расчетах применительно к пассажирским транспортным системам Украины было проведено обследование сложившихся корреспонденций между городами. В рассматриваемых пассажирских транспортных корреспонденциях предусмотрено, что пассажиры совершают поездки на транспорте общего пользования без учета других способов перемещения. Как известно, междугородние перевозки пассажиров на маршрутах общего пользования предусматривают станционное обслуживание. Это позволяет установить количественные показатели корреспонденций между городами Украины, используя станционную информацию железнодорожного и автомобильного транспорта.

На следующем этапе был проведен расчет потенциальной корреспонденции между городами i и j в соответствии с предлагаемой зависимостью (7). Для расчетов выбрали следующие значения эмпирической константы: 1; 5; 35; 65; 95; 125 и 155. Калибровочный коэффициент фактора расстояния принимался: –0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 1,9 и 2,5. Расстояние между городами принято равным длине автобусных маршрутов, соединяющих данные населенные пункты. Для проведения расчетов матрицы кратчайших расстояний областными центрами были присвоены номера (Винница – 1, Ковель – 2 и т. п.).

Расчетные данные корреспонденции между городами i и j (H_{ij}) сведены в табл. 1.

Соответствие и оценка значения расчетной потенциальной корреспонденции H'_{ij} между городами i и j по отношению к фактическому значению реализованы по зависимости

$$\varepsilon = \frac{|H_{ij} - H'_{ij}|}{H_{ij}}. \quad (8)$$

Значение ε – удельное отклонение полученного расчетного количественного показателя – дает возможность в совершении анализа качества использования комбинации значения константы a и значения калибровочного коэффициента x . Результаты расчетов по зависимости (8) сведены в табл. 2.

Таблица 1

Значения потенциальной корреспонденции пассажиров, рассчитанные по (7)
Potential passenger correspondence values calculated according to (7)

№ п/п	№ транспортного узла		H'_{ij} при		...	H'_{ij} при			
	i	j	$a = 1,$ $x = -0,8$	$a = 1,$ $x = 1,0$		$a = 155,$ $x = 1,6$	$a = 155,$ $x = 1,8$	$a = 155,$ $x = 1,9$	$a = 155,$ $x = 2,5$
1	8	22	20,53	19,31	...	16,83	15,79	15,23	11,57
2	8	15	67,13	71,07	...	63,99	60,46	58,52	45,52
3	13	14	103,37	111,57	...	102,22	97,15	94,29	73,83
4	13	8	20,31	33,70	...	35,44	35,50	35,41	32,98
5	13	15	22,37	40,82	...	45,14	46,14	46,52	46,95
6	13	22	69,26	30,35	...	19,22	16,11	14,69	8,05
7	14	8	468,76	538,10	...	579,49	594,78	602,50	645,12
8	14	20	24,17	16,45	...	12,36	11,09	10,47	7,19
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
20	20	18	1,16	10,61	...	63,40	61,52	60,43	52,03
21	20	15	12,02	3,92	...	90,33	102,66	108,95	147,21
22	22	14	607,86	464,50	...	3,36	2,68	2,38	1,05
23	22	8	22,69	146,24	...	0,83	0,66	0,59	0,28
24	22	13	32,21	11,38	...	0,61	0,44	0,38	0,13
25	20	18	31,15	14,31	...	15,17	15,84	16,10	17,00
26	20	15	16,36	6,12	...	6,42	5,31	4,81	2,51

Таблица 2

Удельное отклонение значений расчетных показателей корреспонденции пассажиров
между городами от фактических показателей
Specific deviation of values for calculated indices of passenger correspondence
between towns from actual indices

№ п/п	№ транспортного узла		ε при		...	ε при			
	i	j	$a = 1,$ $x = -0,8$	$a = 1,$ $x = 1,0$		$a = 155,$ $x = 1,6$	$a = 155,$ $x = 1,8$	$a = 155,$ $x = 1,9$	$a = 155,$ $x = 2,5$
1	8	22	0,26	0,18	...	0,03	0,03	0,07	0,29
2	8	15	0,04	0,11	...	0,00	0,06	0,09	0,29
3	13	14	0,02	0,10	...	0,01	0,04	0,07	0,27
4	13	8	0,39	0,02	...	0,07	0,07	0,07	0,00
5	13	15	0,33	0,22	...	0,35	0,38	0,39	0,40
6	13	22	0,57	0,31	...	0,57	0,64	0,67	0,82
7	14	8	0,21	0,09	...	0,03	0,00	0,01	0,09
8	14	20	1,10	0,43	...	0,08	0,04	0,09	0,38
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
20	20	18	0,92	0,29	...	0,07	0,01	0,01	0,13
21	20	15	7,58	1,80	...	0,18	0,16	0,29	0,76
22	22	14	0,44	0,10	...	0,00	0,04	0,05	0,18
23	22	8	0,90	0,38	...	0,06	0,04	0,09	0,36
24	22	13	5,71	1,37	...	0,12	0,15	0,27	0,72
25	20	18	2,62	0,66	...	0,06	0,11	0,18	0,54
26	20	15	5,29	1,35	...	0,23	0,04	0,16	0,63
27	22	14	0,33	0,03	...	0,02	0,02	0,03	0,05
28	22	8	2,23	0,79	...	132,81	135,32	136,55	143,47
ε_{cp}			2,09	0,58	...	0,11	0,10	0,15	0,41

Полученное значение ε_{cp} демонстрирует среднее отклонение расчетных показателей от фактических при использовании определенных сочетаний a и x . При наличии в каждом опыте количественных показателей a , x и ε_{cp} получаем возможность в построении по-

верхности зависимости ε_{cp} от переменных a и x (рис. 1).

Для визуализации влияния константы a на расчетный показатель пассажирской корреспонденции построим точечный график распределения значений ε_{cp} от a (рис. 2).

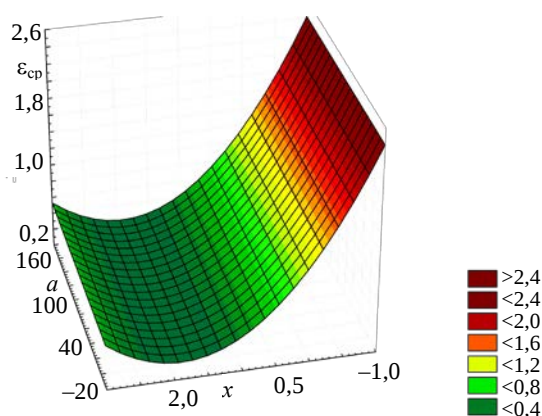


Рис. 1. Поверхность зависимости $\varepsilon_{\text{ср}}$ от переменных a и x

Fig. 1. Surface dependence $\varepsilon_{\text{ср}}$ on a and x variables

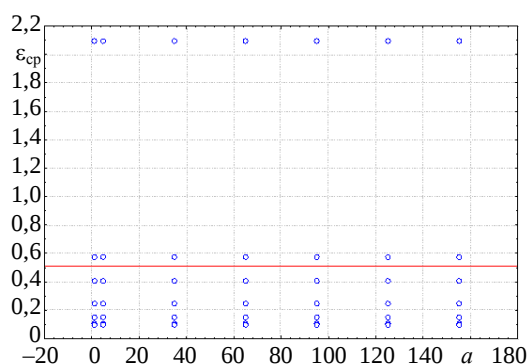


Рис. 2. Зависимость распределения значений $\varepsilon_{\text{ср}}$ от a

Fig. 2. Dependence of $\varepsilon_{\text{ср}}$ -value distribution on a

Из рис. 2 следует, что при изменении эмпирической константы в интервале от 1 до 155 не происходит изменений расчетных значений корреспонденции. Полученные результаты позволяют принять в формуле (7) $a = 1$.

Для графического интерпретирования зависимости отклонения полученного расчетного количественного показателя от фактического построим аналогичный график распределения значений $\varepsilon_{\text{ср}}$ от x (рис. 3).

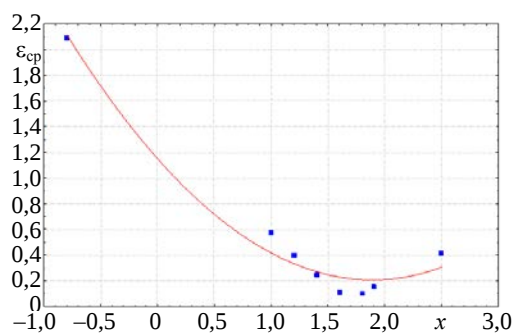


Рис. 3. Зависимость распределения значений $\varepsilon_{\text{ср}}$ от x

Fig. 3. Dependence of $\varepsilon_{\text{ср}}$ -value distribution on x

На рис. 3 отображено, что значения расчетной пассажирской транспортной корреспонденции максимально приближаются к фактическим показателям при $x = 1,8$. Основываясь на данных расчетов, приведенных в табл. 2, а также на рис. 1 и 3, можно утверждать, что наименьшее среднее удельное отклонение полученного расчетного количественного показателя от фактического составляет 10 % и получено при использовании значения калибровочного коэффициента $x = 1,8$.

Согласно результатам расчетов, приведенным в табл. 2, можно предположить, что в исследованном процессе оказания услуг по перевозке пассажиров на маршрутах общего пользования имеют место корреспонденции, которые можно рассчитать с применением гравитационной модели, приведенной в (7). При этом доказано, что значение эмпирической константы не влияет на результаты расчетов. В связи с изложенным (7) принимает следующий вид:

$$H_{ij} = \frac{H_{ei} H_{ni}}{L_{ij}^x}. \quad (9)$$

Данные, полученные в результате исследований, являются доказательством возможности применения выбранной гравитационной модели для междугородних пассажирских корреспонденций на Украине.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрена возможность применения методов гравитационного моделирования при проведении расчетов пассажирских транспортных корреспонденций в рамках пассажирской транспортной системы Украины. Выбранный способ требует дополнительных обследований сложившихся корреспонденций в рассматриваемой системе для формализации фактических значений калибровочного коэффициента и эмпирической константы.

2. Найдено значение калибровочного коэффициента для выбранной гравитационной модели. В результате этого функция расчета транспортных корреспонденций пассажиров между областными центрами на Украине принимает следующий вид:

$$H_{ij} = \frac{H_{ei} H_{ni}}{L_{ij}^{1,8}}.$$

3. Анализом точности проводимых расчетов при использовании значений калибровочных коэффициентов установлена возможность прогнозирования показателей транспорт-

ных корреспонденций пассажиров с точностью до 10 %. Следует отметить, что полученные результаты применимы только к исследованной пассажирской транспортной системе Украины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cohen, G. Intercity Rail Travel Models' / G. Cohen, N. S. Earlbaum, D. T. Hartgen // *Transportation Research Record*. 1978. No 673. P. 21–25.
2. Grosche, T. Gravity Models for Airline Passenger Volume Estimation / T. Grosche, F. Rothlauf, A. Heinzl // *Air Transp. Manag.* 2007. Vol. 13, No 4. P. 175–183. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2007.02.001.
3. Terekhov, I. A Concept of Forecasting Origin-Destination Air Passenger Demand between Global City Pairs Using Future Socio-Economic Development Scenarios / I. A. Terekhov, R. Ghosh, V. Gollnick // *Proceedings of 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting*. Kissimmee, Florida, USA. 2015. DOI: 10.2514/6.2015-1640.
4. Forecasting Model for Air Taxi, Commercial Airline, and Automobile Demand in the United States / H. Baik [et al.] // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2008. Vol. 2052. P. 9–20. DOI: 10.3141/2052-02.
5. Григорова, Т. М. Разработка моделей распределения объемов перевозок пассажиров между видами пригородного транспорта / Т. М. Григорова, Ю. О. Давидич, В. К. Доля // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2015. Т. 3, № 3. С. 10–14. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.43381.
6. Tao, Li. A Demand Estimator Based on a Nested Logit Model / Li Tao // *Transportation Science*. 2016. P. 41–59. DOI: 10.1287/trsc.2016.0671.
7. Вакуленко, Е. Е. Особенности управления городским пассажирским транспортом / Е. Е. Вакуленко, К. В. Доля. Харьков: Харьков. нац. ун-т гор. хоз-ва имени А. Н. Бекетова, 2015. 259 с.
8. Prasolenco, O. The Human Factor in Road Traffic City / O. Prasolenco, O. Lobashov, A. Galkin // *International Journal of Automation, Control and Intelligent Systems*. 2015 Vol. 1, No 3. P. 77–84. Available at: <http://files.aiscience.org/journal/article/html/70100035.html>.
9. Grigорова, T. Transport Fatigue Simulation of Passengers in Suburban Service / T. Grigорова, Yu. Davidich, V. Dolya // *International Journal of Automation, Control and Intelligent Systems*. 2015. Vol. 1, No 2. P. 87–99. Available at: <http://www.aiscience.org/journal/paperInfo/ijacis?paperId=1240>.
10. Grigорова, T. Assessment of Elasticity of Demand for Services of Suburban Road Passenger Transport / T. Grigорова, Yu. Davidich, V. Dolya // *Technology Audit and Production Reserves*. 2015. Vol. 3, No 2. P. 13–16. DOI: 10.15587/2312-8372.2015.44768/

Поступила 03.02.2017

Подписана в печать 10.04.2017

Опубликована онлайн 29.09.2017

REFERENCES

1. Cohen G., Earlbaum N. S., Hartgen D. T. (1978) Intercity Rail Travel Models'. *Transportation Research Record*, (673), 21–25.
2. Grosche T., Rothlauf F., Heinzl A. (2007) Gravity Models for Airline Passenger Volume Estimation. *Journal of Air Transport Management*, 13 (4), 175–183. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2007.02.001.
3. Terekhov I. A., Ghosh R., Gollnick V. (2015) Concept of Forecasting Origin-Destination Air Passenger Demand between Global City Pairs Using Future Socio-Economic Development Scenarios. *Proceedings of 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting*. Kissimmee, Florida, USA. DOI: 10.2514/6.2015-1640.
4. Baik H., Trani A., Hinze N., Swingle H., Ashiabor S., Seshadri A. (2008) Forecasting Model for Air Taxi, Commercial Airline, and Automobile Demand in the United States. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2052, 9–20. DOI: 10.3141/2052-02.
5. Grigорова T. M., Davidich Yu. O., Dolya V. K. (2015) Development of Distribution Model of Passenger Transportation Volumes Among Suburban Transport Modes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (3), 10–14. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.43381.
6. Tao Li. (2016) A Demand Estimator Based on a Nested Logit Model. *Transportation Science*, 41–59. DOI: 10.1287/trsc.2016.0671.
7. Vakulenko E. E., Dolya V. K. (2015) Peculiar Features in Control Over of Urban Passenger Transport. Kharkov, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. 259 (in Russian).
8. Prasolenco O., Lobashov O., Galkin A. (2015) The Human Factor in Road Traffic City. *International Journal of Automation, Control and Intelligent Systems*, 1 (3), 77–84. Available at: <http://files.aiscience.org/journal/article/html/70100035.html>.
9. Grigорова T., Davidich Yu., Dolya V. (2015) Transport Fatigue Simulation of Passengers in Suburban Service. *International Journal of Automation, Control and Intelligent Systems*, 1 (2), 87–99. Available at: <http://www.aiscience.org/journal/paperInfo/ijacis?paperId=1240>.
10. Grigорова T., Davidich Yu., Dolya V. (2015) Assessment of Elasticity of Demand for Services of Suburban Road Passenger Transport. *Technology Audit and Production Reserves*, 3 (2), 13–16. DOI: 10.15587/2312-8372.2015.44768.

Received: 03.02.2017

Accepted: 10.04.2017

Published online: 29.09.2017

Оценка эффективности движения транспортных потоков на основе обработки навигационных данных о движении транспортных средств

Докт. техн. наук Д. В. Капский¹⁾, магистры техн. наук В. В. Касьяник²⁾, А. В. Евтух²⁾, канд. техн. наук, доц. О. А. Капцевич³⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Брестский государственный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

³⁾ОАО «АГАТ – системы управления» – управляющая компания холдинга «Геоинформационные системы управления» (Минск, Республика Беларусь)

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

Реферат. Рассмотрены метод оценки параметров транспортных потоков и определения эффективности вариантов организации дорожного движения, а также качества дорожного движения. Разработан метод оценки основных параметров транспортного потока с использованием двухжидкостной математической модели Германа – Пригожина на основе пассивной обработки навигационных данных о движении дорожных транспортных средств на транспортных магистралях и улично-дорожной сети городов. Достоинствами и новизной разработанного метода (в отличие от традиционного использования математической модели Германа – Пригожина на основе активной обработки навигационных данных) являются: пассивная обработка GPS-треков и поддержка их форматов, что позволяет существенно повысить качество и адекватность результатов модели; облачная обработка данных (использование для хранения больших объемов данных облачного хранилища); наличие клиентского мобильного приложения для ОС Android для сбора данных в дополнение к работе с уже собранными навигационными данными от навигационно-информационного центра и других источников; применение для расчетов и обработки данных современных веб-технологий; масштабируемость и настраиваемость системы. Работоспособность предложенных алгоритмов, математических моделей оценки параметров транспортных потоков и системы в целом подтверждена в ходе ее апробации с использованием набора трекков на основных магистралях Беларуси.

Ключевые слова: транспортное средство, навигационная система, математическая модель оценки транспортных потоков

Для цитирования: Оценка эффективности движения транспортных потоков на основе обработки навигационных данных о движении транспортных средств / Д. В. Капский [и др.] // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 5. С. 444–454. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-444-454

Evaluation of Transport Flow Efficiency on the Basis of Traffic Movement Data

D. V. Kapskiy¹⁾, V. V. Kasyanik²⁾, A. V. Evtuh²⁾, O. A. Kaptsevich³⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Brest State Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

³⁾Open Joint-Stock Company (OJSC) “AGAT – Control Systems” – Managing Company of Geoinformation Control Systems Holding” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper considers a method for evaluation of transport flow parameters and determine an efficiency of variants concerning organization of traffic movement and provision of qualitative transportation. A method for evaluation of main

Адрес для переписки

Капский Денис Васильевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 331-05-48
atf@bntu.by

Address for correspondence

Kapskiy Denis V.
Belarusian National Technical University
12 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 331-05-48
atf@bntu.by

traffic flow parameters while using a two-fluid mathematical model of Herman – Prigogine has been developed and it is based on passive processing of navigation data for road transport facilities on highways and urban road and street networks. The main advantages and novelty of the method (in contrast with the traditional usage of a mathematical model of Herman – Prigogine on the basis of active processing of navigation data) are the following: a passive treatment of GPS-tracks and support of their formats that make it possible significantly improve quality and adequacy of the model results; cloud computing (usage of cloud storage for storing large bulk of data); presence of client mobile application for Android operating system which is used for data collection in addition to operation with already collected navigation data from navigation and information center and other sources; application for calculation and processing of modern web technologies; scalability and configurability of the system. Efficiency of the proposed algorithms, mathematical models for evaluation of transport flow parameters and system as a whole have been proved in the process of their approbation while using a set of tracks on main highways of Belarus.

Keywords: transport facility, navigation system, mathematical model for evaluation of transport flows

For citation: Kapskiy D. V., Kasyanik V. V., Evtuh A. V., Kaptsevich O. A. (2017) Evaluation of Transport Flow Efficiency on the Basis of Traffic Movement Data. *Science and Technique*. 16 (5), 444–454. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-444-454 (in Russian)

Введение

В настоящее время в большинстве развитых стран мира актуальной проблемой в сфере транспорта является перегруженность дорожных сетей движением. Прежде всего эта проблема характерна для ключевых магистралей, по которым осуществляются значительные объемы грузовых и пассажирских перевозок, а также для улично-дорожных сетей городов, где сосредоточена большая часть парка личного автотранспорта. На сегодняшний день в мире накоплен значительный опыт реализации мероприятий, направленных на решение данной проблемы. Эти мероприятия подразделяются на три основные группы:

- меры, направленные на повышение максимальной пропускной способности дорожной сети (строительство и реконструкция дорожных объектов);
- меры, направленные на повышение эффективности использования пропускной способности существующей дорожной сети (совершенствование организации дорожного движения, включая применение автоматизированных систем управления дорожным движением);
- меры, направленные на регулирование объема и структуры транспортного спроса (введение различных ограничений на движение и парковку автотранспортных средств, снижение потребностей экономики и населения в перевозках за счет мероприятий в сфере территориального планирования и т. д.).

При этом методологической основой для разработки подобных мероприятий и принятия научно обоснованных решений для их реализа-

ции все в большей степени служит применение методов математического моделирования функционирования существующих и проектируемых транспортных систем, использование которых позволит:

- оценить эффективность планируемых мероприятий с использованием как эксплуатационных, так и экономических показателей;
- выявить возможные отрицательные последствия их внедрения;
- разработать научно обоснованную программу их реализации.

Прогнозирование эффекта от различных мер по управлению пропускной способностью дорожной сети требует решения различных задач транспортного моделирования:

- прогнозирование эффекта от строительства или реконструкции дорожных объектов требует моделирования распределения транспортного потока (ТП) на дорожной сети;
- оценка эффективности мер по совершенствованию организации дорожного движения, как правило, требует моделирования движения индивидуальных автомобилей в ТП;
- оценка эффективности мер по регулированию транспортного спроса требует моделирования объема и структуры потребности населения и экономики в поездках.

Постановка задачи

Объектами исследования являлись транспортные потоки на магистральных Республики Беларусь, навигационная информация и другие источники информации, алгоритмы их обработки с целью получения оценок парамет-

ров ТП. Основные направления исследования – вопросы научно-методического и алгоритмического обеспечения процессов мониторинга параметров ТП на основе обработки данных о движении транспортных средств (ТС) для оценки параметров ТП с использованием навигационной информации. При этом выполнялись следующие задачи:

- разработка метода расчета основных параметров ТП с использованием двухжидкостной математической модели Германа – Пригожина на основе пассивной обработки навигационных данных о движении ТС на магистралях и улично-дорожных сетях (УДС) с учетом особенностей их движения;

- разработка системы оценки параметров ТП, обеспечивающей сбор навигационных данных, хранение, верификацию данных треков, управление данными дорожных участков (улиц), расчет параметров ТП с использованием вышеуказанного метода и кластеризацию дорожных участков (улиц) по полученным параметрам.

Описание модели транспортного потока

С появлением современных технологий определения местоположения, таких как GPS и ГЛОНАСС, для решения задач оценки параметров ТП на магистралях и УДС началось более активное применение двухжидкостной модели ТП Германа – Пригожина [1]. В качестве основных характеристик ТП для расчетов с использованием этой модели рассматривали: интенсивность, объем движения, среднюю скорость движения, время сообщения, коэффициент загрузки движением. С помощью данной модели определяли нелинейные зависимости между удельным временем в пути, затрачиваемым на единицу расстояния, и удельным временем задержек на единицу расстояния.

Модель Германа – Пригожина очень привлекательна для практического использования, поскольку она по сравнению с другими моделями легко применима при проведении регулярных обследований условий дорожного движения и целесообразность ее применения была обоснована в ранее проведенных научных исследованиях по данной тематике [2]. Важное свойство кинетической теории описания ТП, предложенное Р. Германом и И. Пригожиным, заключается в том, что могут быть рассмотрены и отображены два различных режима движения [3]. Это индивидуальный и коллектив-

ный потоки, которые функционально зависят от концентрации ТС (плотности потока). При незначительной плотности потока движение осуществляется в режиме индивидуального потока. При повышении плотности потока движение переходит в состояние коллективного потока. В данном случае поток становится в значительной мере независимым от желаний индивидуальных водителей в выборе режима движения.

На основании того, что кинетическая теория изучает многополосное движение (более присущее городскому движению), Р. Германом и И. Пригожиным была выдвинута теория двух потоков движения как характеристик движения коллективного потока по дорожной сети. При этом ТС в составе потока движения разделены на две группы – движущиеся и остановившиеся ТС. Последние включают ТС, остановившиеся в самом потоке, т. е. остановившиеся на перекрестках, остановившиеся из-за помех движению (например, по причине загрузки или разгрузки ТС, которые блокируют полосу движения), остановившиеся по причине обычного затора движения и т. д., но исключают находящиеся вне движения средства (например, припаркованные автомобили).

Модель двух потоков представляет макроскопическое измерение качества функционирования дорожной сети. Модель базируется на исходных предположениях:

- средняя скорость движения по дорожной сети пропорциональна доле ТС, находящихся в движении;

- длительность задержек ТС, двигающегося по дорожной сети, пропорциональна количеству ТС, остановившихся в данный момент времени.

Параметры, используемые в модели Германа – Пригожина, состоящей из двух потоков (движущиеся и стоящие ТС), представляют средние данные, определенные в масштабе всей дорожной сети за этот период времени. Уникальность модели состоит в том, что при оценке влияния уровня загрузки дорожной сети на условия движения не требуется определять уровень загрузки, т. е. интенсивность ТП и пропускную способность элементов дорожной сети. Для оценки параметров n и T_m необходимы лишь данные об удельных показателях времени поездки T и времени простоя T_s .

На практике используется логарифмическое представление модели в следующем виде:

$$\ln T_r = \frac{1}{n+1} \ln T_m + \frac{n}{n+1} \ln T, \quad (1)$$

что обеспечивает возможность применения линейной регрессии для получения зависимости между параметрами n и T_m .

С целью использования линейной регрессии выражение (1) преобразуют к виду

$$\ln T_r = \ln T_m + n(\ln T - \ln T_m).$$

Уравнение линейной зависимости упрощает саму процедуру регрессионного анализа и позволяет пользоваться стандартными статистическими методами оценки параметров ТП. Исследования подтвердили положения теории двух потоков [4, 5]. Одновременно было установлено, что дорожные сети могут быть охарактеризованы двумя параметрами модели: n и T_m . Это подтверждается вычислениями на основе экспериментальных данных, полученных по результатам обследований дорожных сетей крупнейших городов мира.

Модель Германа – Пригожина может применяться:

- для сравнения дорожных сетей между собой или участков в пределах одной дорожной сети;
- для сравнения особенностей поведения водителей и движения отдельных типов ТС;
- для детальной оценки влияния геометрических и других параметров дорожной сети на условия дорожного движения;
- в моделировании транспортных потоков с целью оценки прогнозируемых условий движения.

Классификация дорожных сетей на основе параметров, входящих в состав модели Германа – Пригожина, позволяет прогнозировать скорости сообщения и затраты времени на передвижение на любом заданном участке дорожной сети. Классификация может быть построена, например, с применением кластерного анализа экспериментально установленных значений параметров T , T_r и T_s [6].

По степени влияния уровня загрузки дорожным движением на темп движения T дорожные сети классифицируются следующим образом:

- не реагирующие на увеличение загрузки (1, 2 классы), $n = 0$;
- имеющие слабую реакцию (5-й класс), $n = 1,22$;
- имеющие умеренную реакцию (6-, 8-, 9-й классы), $n = 2,50$ – $2,90$;
- имеющие сильную реакцию (3-, 7-й классы), $n = 3,70$ – $4,90$;
- имеющие максимальную реакцию (4-, 10-й классы), $n = 5,40$ – $7,01$.

Полученные классы или аналогичные могут использоваться:

- для детальной оценки условий движения и качества организации движения с использованием навигационного оборудования автомобилей (систем GPS и ГЛОНАСС);
- для верификации результатов микро- и макро моделирования транспортных потоков.

Реализация системы оценки параметров транспортных потоков

Данные об удельных показателях времени поездки T и времени простоя T_s , рассмотренных в [6, 7], собирают активным способом, используя специальным образом оборудованный автомобиль для проезда по исследуемым участкам УДС. В авторской работе разработана и применена для исследований пассивная система, в которой удельные показатели рассчитываются на основе навигационных данных, собранных с различных транспортных средств, участвующих в дорожном движении. Такие данные могут быть получены из различных источников, например с серверов транспортных компаний. Для анализа нет необходимости раскрывать личные данные участников движения, а лишь параметры их перемещения по УДС. Использование пассивного подхода к сбору данных позволяет увеличить точность системы, так как может быть исследовано большое количество данных, которые собраны с различных транспортных средств, управляемых разными водителями.

На базе двухжидкостной модели Германа – Пригожина реализована программная система, позволяющая производить количественную оценку параметров дорожного движения с использованием навигационных данных, а также их визуализацию с помощью геоинформационной системы Google Maps [1, 3, 7]. Программный комплекс, предлагаемый для решения поставленных задач, реализован на базе клиент-серверной архитектуры (рис. 1, 2).

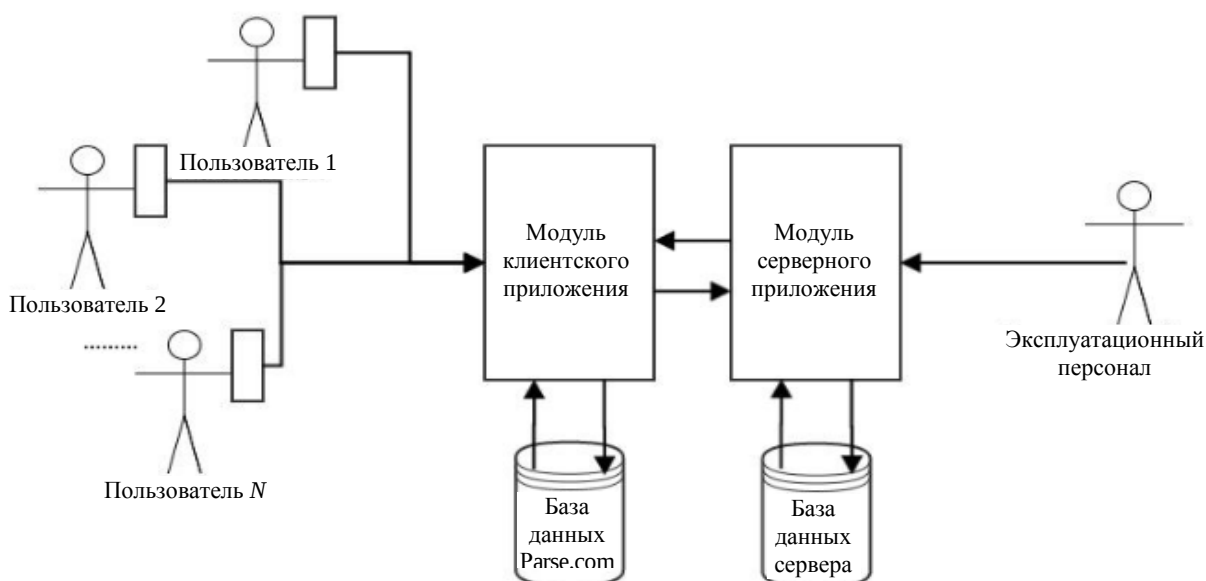


Рис. 1. Архитектура системы оценки параметров транспортных потоков

Fig. 1. Architecture of evaluation system for parameters of transport flows

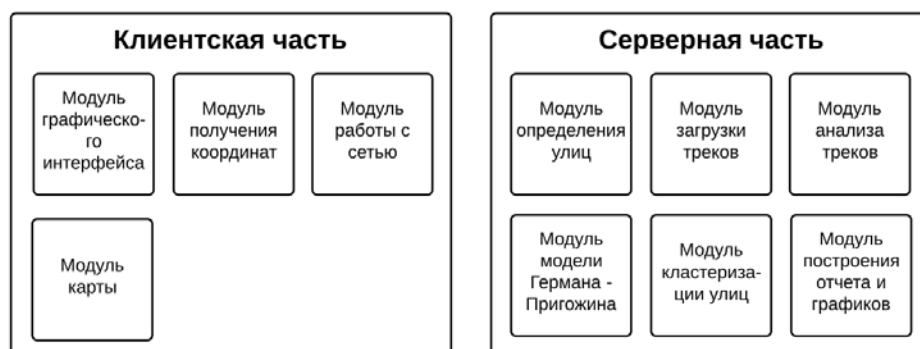


Рис. 2. Состав системы оценки параметров транспортных потоков

Fig. 2. System composition for evaluation of transport flows parameters

Клиентская часть реализована и представлена двумя типами устройств – встроенным навигационным модулем в составе ТС или мобильным приложением на базе ОС Android. Визуальная часть разработана в соответствии с требованиями Google [8] для интерфейса Android-приложений. При получении физического адреса текущего местоположения использовали стандартный Geocoder [9]. Данные пользователя отправляются на облачный сервер Parse.com для последующего хранения и экспорта в нужном формате. При работе с данными для Parse.com была использована библиотека Parse.com [10]. Серверная часть реализована в виде веб-приложения, которое предназначено для решения следующих задач:

- загрузки навигационных треков из файла; при этом могут использоваться как собственные треки в формате JSON [11], полученные с помощью клиентского приложения, так и треки сторонних организаций в формате CSV;
- обработки треков с использованием модели Германа – Пригожина;
- визуализации полученных результатов с наложением на картографический сервис Google Maps [11];
- кластеризации участков дорожной сети с использованием параметров модели Германа – Пригожина [12].

Для отображения в Web использован веб-фреймворк Flask [13]. В качестве картографической основы применяли сервис Google

Мар v3 [14], для манипуляции с картой (построение точек, маршрутов) – язык программирования JavaScript [15]. Для работы с базой данных использовали SQLAlchemy ORM [16], в качестве системы управления базами данных применяли SQLite [17].

По окончании анализа треков и расчета параметров с использованием модели Германа – Пригожина строили отчет, который представлял собой файл в текстовом формате. Техническое обеспечение программного комплекса оценки параметров ТП включает в себя:

- мобильное устройство для сбора информации о движении – навигационный модуль в составе ТС или мобильное устройство с GPS-приемником (операционная система Android версии 4.0 и выше) с активированной функцией передачи данных;
- SDK Parse.com [10] для ОС Android – библиотеку, которая упрощает работу с платформой Parse.com на мобильном устройстве;
- программные продукты транспортных компаний, предоставляющие навигационные данные в формате CSV;
- автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора, включающее персональный компьютер под управлением операционной системы семейства Linux. При разработке АРМ использовали виртуальное окружение (virtual env), а также веб-фреймворк Flask [13], веб-приложение разработано с помощью языка программирования Python [18];
- облачный сервис Parse.com [10] для хранения передаваемых данных от клиентов.

Апробация программного комплекса оценки параметров транспортных потоков с использованием экспериментальных данных

Для проверки функционирования работы модели Германа – Пригожина [19] в составе программного комплекса оценки параметров ТП использованы маршруты, полученные от одной из транспортных компаний Республики Беларусь, объемом 5000000 записей. Пример статистики движения автомобилей по участку УДС приведен на рис. 3. По оси X расположены номера навигационных треков, а по Y отложены общее время измерения и время в движении ТС. На основе этих данных рассчитывали необходимые для модели удельные показатели

времени поездки и времени простоя для выбранного участка УДС.

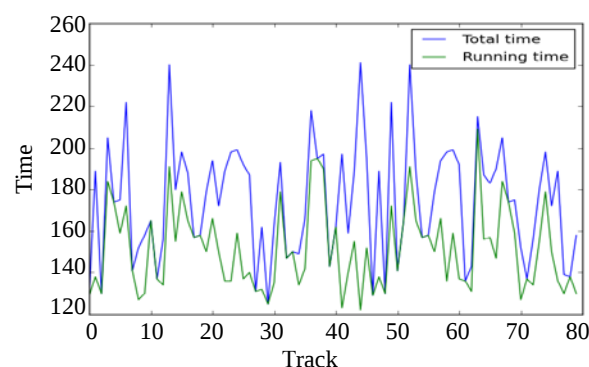


Рис. 3. Отображение параметров треков автомобилей

Fig. 3. Display of vehicle track parameters

Получив результаты по расчетам параметров модели Германа – Пригожина для конкретных улиц г. Минска, на график наносили точки минимального среднего удельного времени поездки и индикатора n Германа – Пригожина для этих улиц (рис. 4). Как видно, точки расположены неравномерно, образуя кластеры улиц по качеству организации дорожного движения. Для поиска и явного выделения этих кластеров необходимо применить методы машинного обучения для кластеризации данных, так как исходное число классов улиц визуально определить сложно.

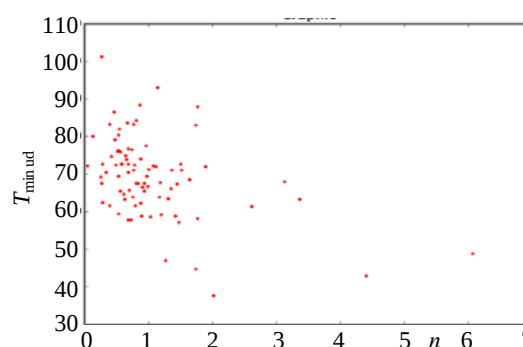


Рис. 4. Визуализация результатов расчета по модели Германа – Пригожина

Fig. 4. Visualisation of calculation results according to Herman – Prigogine model

Для кластеризации этого набора данных выбран алгоритм FOREL, так как он требует указать лишь первоначальный размер предполагаемых кластеров. В результате работы алгоритма на выходе генерируется список точек, распределенных по классам-кластерам. Полу-

ченные кластеры с радиусом 7 единиц приведены на рис. 5. Радиус в 7 единиц выбран экспериментально для получения устойчивого распределения кластеров.

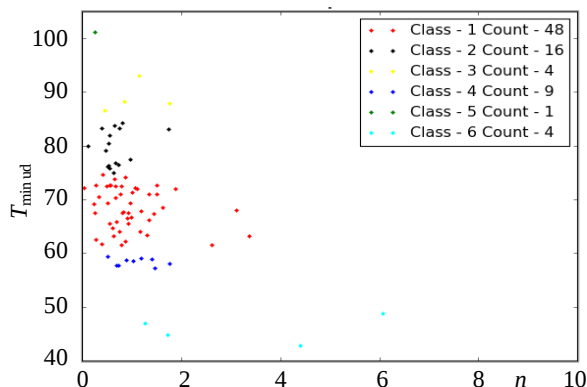


Рис. 5. Кластеризация маршрутов с радиусом 7 единиц
Fig. 5. Clusterization of routes with radius of 7 units

На рис. 5 видно, что в итоге улицы были разбиты на шесть кластеров, каждая группа – с различным количеством улиц. Параметры каждого кластера приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики кластеров
Clusters characteristics

Номер кластера	Количество улиц	Диапазон n	Диапазон T	Краткая характеристика
1	48	[0,04; 3,36]	[61,51; 74,70]	Умеренная реакция на увеличение загрузки улицы
2	16	[0,12; 1,74]	[74,91; 84,30]	Слабая реакция на увеличение загрузки
3	4	[0,45; 1,76]	[86,60; 93,09]	
4	9	[0,52; 1,76]	[57,21; 59,39]	
5	4	[1,26; 6,07]	[42,86; 48,76]	Максимальная реакция на увеличение загрузки
6	1	[0,26; 0,26]	[101,17; 101,17]	Не реагирует на увеличение загрузки

Для каждого кластера дана краткая характеристика дорожных условий, определенная на основании анализа показателей для других городов. Сравнивая данные различных городов, можно сделать вывод о характеристиках организации дорожного движения в г. Минске. Так была определена степень влияния нагрузки транспортного потока на качество обслужива-

ния, результаты которой приведены в графе «Краткая характеристика» табл. 1. Кроме того, полученная кластеризация маршрутов применена для отображения маршрутов на карте в различной цветовой дифференциации в зависимости от класса маршрута. Это позволяет визуально выделить участки дорог с различными дорожными условиями. Результаты визуализации приведены на рис. 6.

При нажатии на маршрут (начало или конец маршрута) есть возможность получить информацию о данном маршруте вместе с графиком в движении и остановках авто. Эта возможность продемонстрирована на рис. 7, на котором представлены значения общего времени поездки и времени в движении для каждого номера трека. Синим цветом изображено общее время движения каждого участника, зеленым – время в движении (без времени стояния). Таким образом, визуально можно определить адекватность треков по разрывам между общим временем и временем в движении.

В результате тестирования подсистемы кластеризации получена классификация улиц г. Минска по качеству организации дорожного движения, определены проблемные улицы и визуализированы результаты. Для тестирования данного функционала разработанной системы был выбран участок магистрали М1 от Кобрина до Дзержинска (рис. 8). Отчет по результатам расчета параметров ТП с использованием модели Германа – Пригожина для этого участка транспортной магистрали представлен на рис. 9.

Как видно из отчета на рис. 9, участок трассы имеет длину 246 км, средняя скорость транспортных средств на участке составляет 81 км/ч, качество обслуживания равно 4,61, что соответствует максимальной реакции на увеличение загрузки транспортной магистрали на основании ранее приведенной классификации. Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что на данном участке магистрали при увеличении нагрузки средняя скорость движения будет сильно уменьшаться, а время проезда может существенно увеличиваться. Таким образом, учитывая исключительную важность магистрали М1, при организации дорожного движения необходимо прорабатывать варианты совершенствования инфраструктуры магистрали с целью уменьшения влияния нагрузки на характеристики и качество транспортного сообщения.

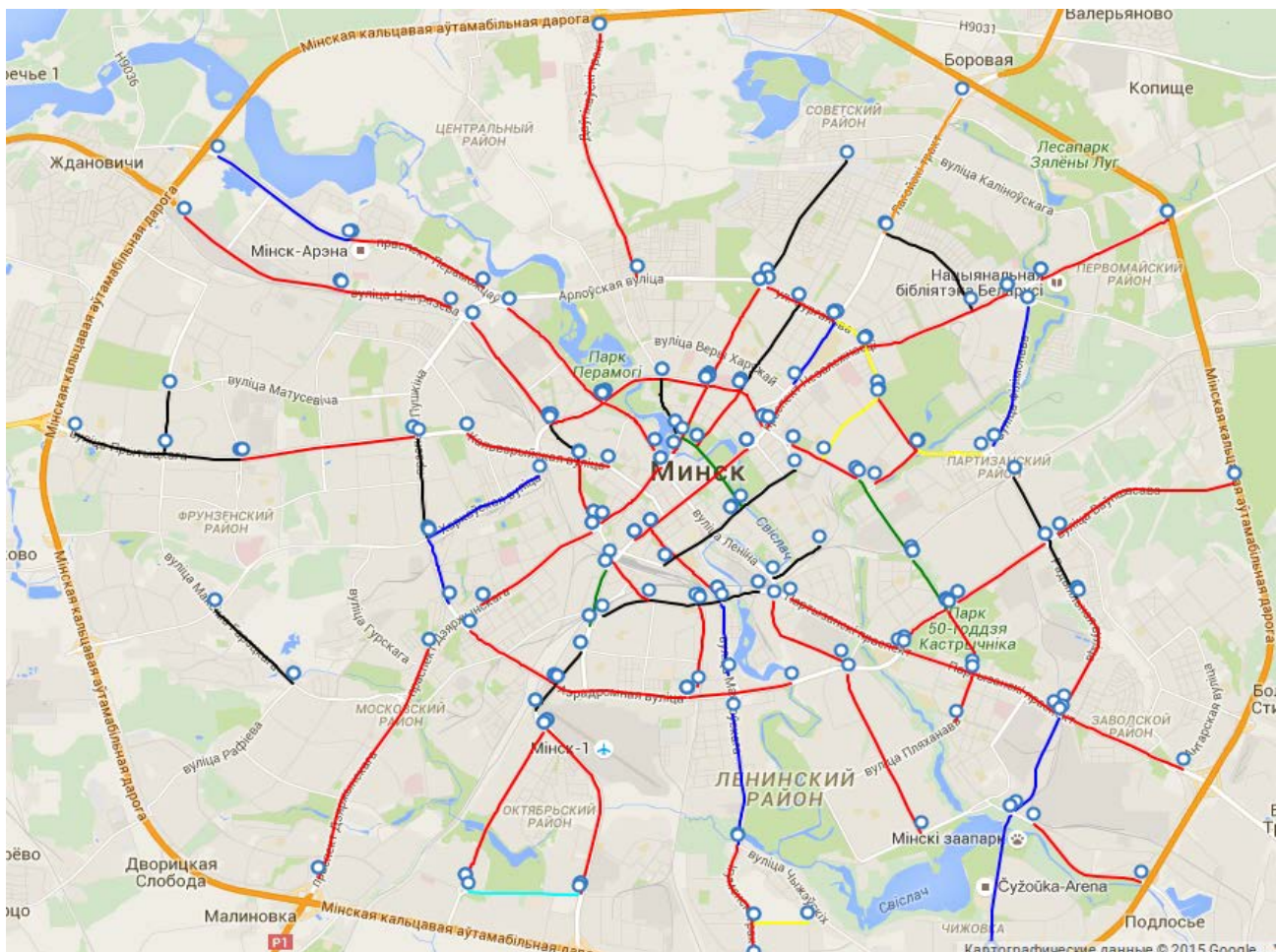


Рис. 6. Визуализация маршрутов по классам (выделены цветом)

Fig. 6. Visualization of routes on classes (the classes are highlighted)

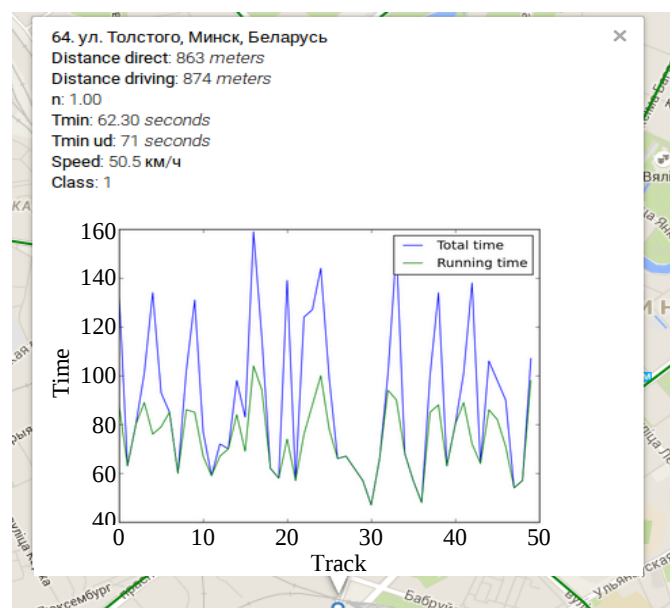


Рис. 7. Краткая информация о маршруте

Fig. 7. Brief information on route

bysaferyindex: Map Add street

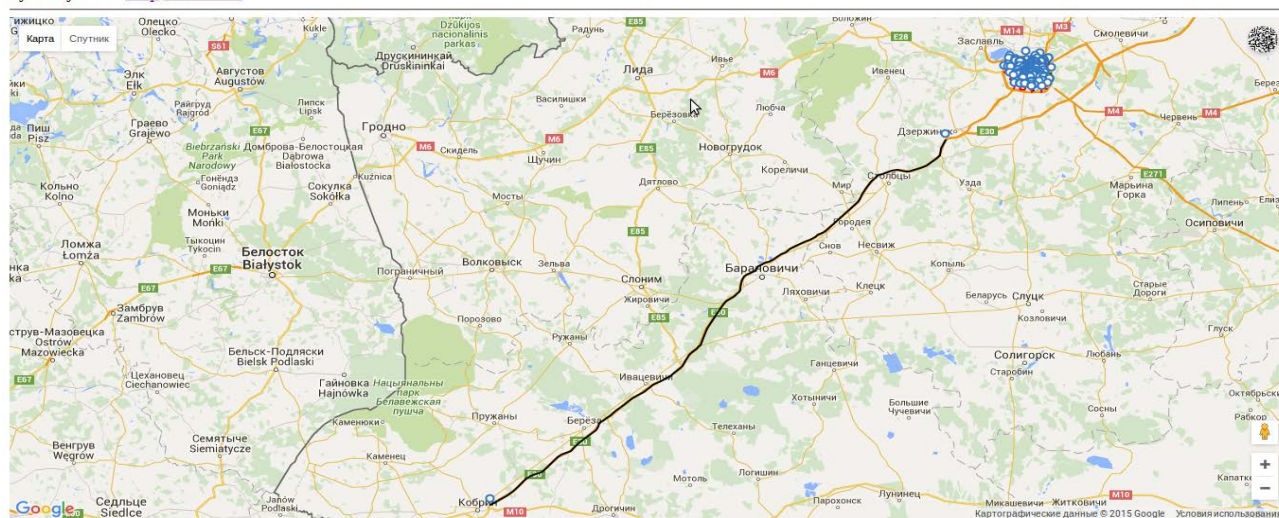


Рис. 8. Участок международной магистрали М1

Fig. 8. Section of international highway M1

=====

Номер маршрута: 230

Адрес: Е30, Дзержинск-Кобрин, Беларусь

Начальная точка: [53.64997985644802, 27.07310199737549]

Конечная точка: [52.23320757003185, 24.430932998657227]

Расстояние по прямой: 236813 метра(см)

Расстояние по дороге: 246949 метра(см)

Скорость: 80.8 км/ч

#	TT	RT	logTT	logRT	TT*TT	TT*RT	x-avg(x)	(x-avg(x))^2
1	15686.014942	0.9.6605238737726	9.6119313185357	93.3257215157306	92.8562919757772	0.1298575119255	0.0168629734035	
2	11637.011628	0.9.3619449561081	9.3611712616788	87.6460133611975	87.6387700765374	-0.1687214057390	0.0284669127546	
3	14062.012944	0.9.5512314027591	9.4683876392983	91.2260213090517	90.4347613539618	0.0205650409120	0.0004229209077	
4	13398.012620	0.9.5028607210682	9.4430381360952	90.3043618840211	89.7358761910483	-0.0278056407789	0.0007731536591	
5	15686.014942	0.9.6605238737726	9.6119313185357	93.3257215157306	92.8562919757772	0.1298575119255	0.0168629734035	
6	12669.012669	0.9.4469133436021	9.4469133436021	89.2441717215265	89.2441717215265	-0.0837530182451	0.0070145680652	

x - logTT y - logRT

Подгоночные параметры для y=kx+b

k = 0.822026497023356

b = 1.656101885896788

Параметры модели Германа-Пригожина

n = 4.618813942945377

Tmin = 10996.456542833406274

Tmin_ud = 44.529261275945260

Статус: ОК

=====

Рис. 9. Отчет по результатам расчета параметров Германа – Пригожина для участка магистрали М1

Fig. 9. Report on results of Herman – Prigogine parameter calculation for M1-highway section

ВЫВОДЫ

1. Разработан метод оценки основных параметров транспортных потоков с использованием двухжидкостной математической модели Германа – Пригожина на основе пассивной обработки навигационных данных о движении транспортных средств на транспортных магистралях и улично-дорожных сетях городов.

Основными достоинствами и новизной разработанной системы являются:

- облачная обработка данных (использование для хранения больших объемов данных облачного хранилища);
- наличие клиентского мобильного приложения для ОС Android для сбора данных в дополнение к возможности работы с уже собранными навигационными данными от нави-

гационно-информационного центра и других источников;

- поддержка форматов современных GPS-трекеров;
- использование для расчетов и обработки данных современных веб-технологий.
- масштабируемость и настраиваемость системы.

2. Создана система оценки параметров транспортных потоков, включающая модули сбора навигационных данных, хранения, верификации данных треков, управления данными дорожных участков (улиц), подсистемы расчета параметров транспортных потоков с использованием математической модели Германа – Пригожина и кластеризации дорожных участков (улиц) по полученным параметрам.

3. Работоспособность предложенных алгоритмов, математических моделей оценки параметров транспортных потоков и системы в целом подтверждена в ходе ее апробации с использованием набора треков на основных магистралях Беларуси. Так, для одной из важнейших магистралей трассы М1 Брест – граница Российской Федерации получены параметры скорости 81 км/ч и качества обслуживания 4,61. Эти результаты говорят о том, что трасса уже сейчас работает на границе своих возможностей. Аналогичные расчеты выполнены для г. Минска, где также выявлены проблемы – 46 основных улиц функционируют на пределе своих возможностей.

4. Результаты оценки параметров транспортных потоков могут применяться с целью повышения эффективности и качества деятельности государственных органов, служб и компаний в сфере транспорта для поддержки принятия решений по учету и перераспределению транспортных потоков в пределах транспортных магистралей и улично-дорожных сетей, по анализу транспортной нагрузки, оптимальной организации дорожного движения, а также при модернизации существующих и проектировании новых дорожных сетей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Prigogine, I. Kinetic Theory of Vehicular Traffic / I. Prigogine, R. Herman. N.Y.: Elsevier, 1971.
2. Разработка системы оценки параметров транспортных потоков в рамках транзитных транспортных коридоров на территориях государств – участников СНГ на основе обработки навигационных данных о движении транспортных средств: отчет о НИР «Поток-СНГ-РБ» / ОАО «Агат – системы управления» – управляющая компания холдинга «Геоинформационные системы управления», науч. рук. О. А. Капцевич. Минск, 2015. 319 с.
3. Herman, R. A Two-Fluid Approach to Town Traffic / R. Herman, I. Prigogine // Science. 1979. Vol. 204, No 4839. P. 148–151. DOI:10.1126/science.204.4389.148.
4. Nelson, P. The Prigogine – Herman Kineticmodel Predicts Widely Scatteredtraffic Flow Data at Highconcentrations / P. Nelson, A. Sopasakis // Transportation Res. 1998. Part B: Methodological. Vol. 32, No 8. P. 589–604. DOI: 10.1016/s0191-2615(98)00020-4.
5. Studying the EBB and Flow of Stop-and-Go; Los Alamos Lab Using Cold War Tools to Scrutinize Traffic Patterns Alan Sipress Washington Post Staff Writer, Thursday, August 5, 1999, Last updated 1/31/00.
6. Румянцев, Е. А. Совершенствование методов оценки условий движения транспортных потоков на городской улично-дорожной сети / Е. А. Румянцев // Вестник Иркутск. гос. техн. ун-та. 2012. № 9. С. 148–151.
7. Блинкин, М. Я. Системная оценка условий движения на базе модели Германа – Пригожина (Ч. 1) / М. Я. Блинкин (НИИТДХ), Б. А. Ткаченко (ЦИТИ) // Сайт «Транспортные системы городов и зон их влияния» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://waksman.ru/Russian/Org&B/2008/blinkin1.htm>.
8. Material Design // Сайт Google Design Guidelines [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.google.com/design/spec/material-design/introduction.html>.
9. Directions Service // Сайт Google Developers [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://developers.google.com/maps/documentation/javascript/directions>.
10. Parse Android Developers Guide // Сайт Parse [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://parse.com/docs/android/guide>.
11. Google Maps Javascript API // Сайт Google Developers [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://developers.google.com/maps/documentation/javascript/examples/event-simple>.
12. Алгоритмы семейства FOREL // Сайт «Википедия» [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Алгоритмы_семейства_FOREL.
13. Flask // Сайт Flask (A Python Microframework) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://flask.pocoo.org>.
14. Location and Sensors APIs // Сайт Android developers [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://developer.android.com/guide/topics/sensors/index.html>.
15. jQuery API Documentation // Сайт jQuery [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://api.jquery.com/>.
16. The Python SQL Toolkit and Object Relational Mapper. SQLAlchemy. Available at: <http://www.sqlalchemy.org>.
17. SQLite Documentation // Сайт SQLite [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.sqlite.org/docs.html>.
18. Лутц, М. Изучаем Python, 4-е издание / М. Лутц. М.: Изд-во «Символ плюс», 2010. 1280 с.

19. Ardekani, S. A. Urban Network-Wide Variables and their Relations / S. A. Ardekani, R. Herman // *Transportation Science*. 1987. Vol. 21, No 1. P. 1–16. DOI: 10.1287/trsc.21.1.1

Поступила 07.07.2016

Подписана в печать 12.09.2016

Опубликована онлайн 29.09.2017

REFERENCES

1. Prigogine I., Herman R. (1971) *Kinetic Theory of Vehicular Traffic*. N.Y.: Elsevier.
2. Kaptsevich O. A. (Research Supervisor) (2015) *Development of System for Evaluation of Transport Flow Parameters within the Framework of Transit Transport Corridors on the Territory of CIS Countries Based on Processing of Navigation Data on Movement of Transport Facilities*. Research report “CIS-Republic of Belarus Flow”. Minsk. 319 (in Russian, unpublished).
3. Herman R., Prigogine I. (1979) A Two-Fluid Approach to Town Traffic. *Science*, 204 (4389), 148–151. DOI: 10.1126/science.204.4389.148.
4. Nelson P., Sopasakis A. (1998) The Prigogine – Herman Kineticmodel Predicts Widely Scatteredtraffic Flow Data at Highconcentrations. *Transportation Research. Part B: Methodological*, 32 (8), 589–604. DOI: 10.1016/s0191-2615(98)00020-4.
5. Sipress A. (1999) Studying the EBB and Flow of Stop-and-Go; Los Alamos Lab Using Cold War Tools to Scrutinize Traffic Patterns. *Washington Post*. August, 5.
6. Rumiantsev E. A. (2012) Improvement of Methods for Evaluation of Transport Flow Movement Conditions in Urban Street-Road Network. *Vestnik Irkutskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*, (9), 148–151.
7. Blinkin M. Ya., Tkachenko B. A. *Systematic Evaluation of Movement Conditions on the Basis of the Prigogine – Herman Model (Part 1)*. Available at: <http://waksman.ru/Russian/Org&B/2008/blinkin1.htm>.
8. Material Design. Available at: <https://www.google.com/design/spec/material-design/introduction.html>.
9. Directions Service. Available at: <https://developers.google.com/maps/documentation/javascript/directions>.
10. Parse Android Developers Guide. Available at: [https:// parse.com/docs/android/guide](https://parse.com/docs/android/guide).
11. Google Maps Javascript API. Available at: [https://develo pers.google.com/maps/documentation/javascript/examples/ event-simple](https://developers.google.com/maps/documentation/javascript/examples/event-simple).
12. FOREL Family Algorithms. *Wikipedia*. Available at [https://ru. wikipedia.org/wiki/Algorithms_family_FOREL](https://ru.wikipedia.org/wiki/Algorithms_family_FOREL).
13. Flask. Available at: <http://flask.pocoo.org>.
14. Location and Sensors APIs. *Android Developers*. Available at: [http://developer.android.com/guide/topics/sensors/ index.html](http://developer.android.com/guide/topics/sensors/index.html).
15. *jQuery API Documentation*. Available at: [http://api.jque ry.com](http://api.jquery.com).
16. The Python SQL Toolkit and Object Relational Mapper. *SQLAlchemy*. Available at: <http://www.sqlalchemy.org>.
17. SQLite Documentation. Available at: [https://www.sqlite. org/docs.html](https://www.sqlite.org/docs.html).
18. Luts M. (2010) *We Study Python*, 4th ed. Moscow, Simvol Plyus Publ. 1280 (in Russian).
19. Ardekani S. A., Herman R. (1987). Urban Network-Wide Variables and their Relations. *Transportation Science*, 21 (1), 1–16. DOI: 10.1287/trsc.21.1.1.

Received: 07.07.2016

Accepted: 12.09.2016

Published online: 29.09.2017