

ТОМ 23, №3, 2023

eISSN 2687-1653

РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)

Механика / Mechanics

Машиностроение
и машиноведение /
Machine Building
and Machine Science

Информатика,
вычислительная
техника и управление /
Information Technology,
Computer Science
and Management



www.vestnik-donstu.ru
DOI 10.23947/2687-1653



Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)

Рецензируемый научно-практический журнал (издается с 2000 года)

eISSN 2687–1653

DOI: 10.23947/2687–1653

Том 23, № 3, 2023

Создан в целях информирования читательской аудитории о новейших достижениях и перспективах в области механики, машиностроения, информатики и вычислительной техники. Издание является форумом для сотрудничества российских и иностранных ученых, способствует сближению российского и мирового научно-информационного пространства.

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК) по следующим научным специальностям:

- 1.1.7 – Теоретическая механика, динамика машин (технические науки)
- 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела (технические, физико-математические науки)
- 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы (технические науки)
- 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)
- 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки)
- 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)
- 2.3.5 – Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки)
- 2.3.7 – Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования (технические, физико-математические науки)
- 2.3.8 – Информатика и информационные процессы (технические науки)
- 2.5.2 – Машиноведение (технические науки)
- 2.5.3 – Трение и износ в машинах (технические науки)
- 2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)
- 2.5.6 – Технология машиностроения (технические науки)
- 2.5.8 – Сварка, родственные процессы и технологии (технические науки)
- 2.5.9 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки)
- 2.5.10 – Гидравлические машины, вакуумная, компрессорная техника, гидро- и пневмосистемы (технические науки)

Индексация и архивация:	РИНЦ, CyberLeninka, CrossRef, Dimensions, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus, Internet Archive, Google Scholar
Наименование органа, зарегистрировавшего издание	Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС 77 – 78854 от 07 августа 2020 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
Учредитель и издатель	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ)
Периодичность	4 выпуска в год
Адрес учредителя и издателя	344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
E-mail	vestnik@donstu.ru
Телефон	+7 (863) 2–738–372
Сайт	http://vestnik-donstu.ru/
Дата выхода в свет	30.09.2023





Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)

Peer-reviewed scientific and practical journal (published since 2000)

eISSN 2687–1653

DOI: 10.23947/2687–1653

Vol. 23, no. 3, 2023

The journal is aimed at informing the readership about the latest achievements and prospects in the field of mechanics, mechanical engineering, computer science and computer technology. The publication is a forum for cooperation between Russian and foreign scientists, it contributes to the convergence of the Russian and world scientific and information space.

The journal is included in the List of the leading peer-reviewed scientific publications (Higher Attestation Commission under the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation), where basic scientific results of dissertations for the degrees of Doctor and Candidate of Sciences in scientific specialties and their respective branches of science should be published.

The journal publishes articles in the following fields of science:

- Theoretical Mechanics, Dynamics of Machines (Engineering Sciences)
- Deformable Solid Mechanics (Engineering, Physical and Mathematical Sciences)
- Mechanics of Liquid, Gas and Plasma (Engineering Sciences)
- Mathematical Simulation, Numerical Methods and Program Systems (Engineering Sciences)
- System Analysis, Information Management and Processing, Statistics (Engineering Sciences)
- Automation and Control of Technological Processes and Productions (Engineering Sciences)
- Software and Mathematical Support of Machines, Complexes and Computer Networks (Engineering Sciences)
- Computer Modeling and Design Automation (Engineering, Physical and Mathematical Sciences)
- Computer Science and Information Processes (Engineering Sciences)
- Machine Science (Engineering Sciences)
- Machine Friction and Wear (Engineering Sciences)
- Technology and Equipment of Mechanical and Physicotechnical Processing (Engineering Sciences)
- Engineering Technology (Engineering Sciences)
- Welding, Allied Processes and Technologies (Engineering Sciences)
- Methods and Devices for Monitoring and Diagnostics of Materials, Products, Substances and the Natural Environment (Engineering Sciences)
- Hydraulic Machines, Vacuum, Compressor Equipment, Hydraulic and Pneumatic Systems (Engineering Sciences)

Indexing and archiving

RSCI, CyberLeninka, EBSCO, Dimensions, DOAJ, Index Copernicus, Internet Archive, Google Scholar

Name of the body that registered the publication

Mass media registration certificate ЭЛ № ФС 77 – 78854 dated August 07, 2020, issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media

Founder and publisher

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Don State Technical University (DSTU)

Periodicity

4 issues per year

Address of the founder and publisher

1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation

E-mail

vestnik@donstu.ru

Telephone

+7 (863) 2–738–372

Website

<http://vestnik-donstu.ru/>

Date of publication

30.09.2023



Редакционная коллегия

Главный редактор, Бескопыйный Алексей Николаевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

заместитель главного редактора, Сухинов Александр Иванович, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

ответственный редактор, Комахидзе Манана Гивиевна, кандидат химических наук, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

ответственный секретарь, Шевченко Надежда Анатольевна, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Айзикович Сергей Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Антибас Имад Ризакалла, кандидат технических наук, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Ахилан Аппатурай, младший научный сотрудник, Инженерно-технологический колледж PSN, Университет Анны Ченнаи (Индия);

Ахвердиев Камил Самед Оглы, доктор технических наук, профессор, Ростовский государственный университет путей сообщения (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Варавка Валерий Николаевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Вернер Игорь Михайлович, доктор технических наук, профессор, Технологический институт в Израиле (Израиль);

Воронов Сергей Александрович, доктор технических наук, доцент, Российский фонд фундаментальных исследований (Москва, Российская Федерация);

Галушкин Николай Ефимович, доктор технических наук, профессор, Институт сферы обслуживания и предпринимательства, филиал ДГТУ (Шахты, Российская Федерация);

Лару Гиллеспи, доктор технических наук, профессор, Президент Общества машиностроителей (США);

Аныш Губерт, доктор наук, доцент, Варшавский технологический университет (Польша);

Басмачи Гюльтекин, доктор наук, профессор, Университет Бурдура Мехмета Акифа Эрсоа (Турция);

Дворников Олег Владимирович, доктор технических наук, профессор, Белорусский государственный университет (Беларусь);

Демехин Евгений Афанасьевич, доктор физико-математических наук, профессор, Краснодарский филиал Финансового университета при Правительстве РФ (Краснодар, Российская Федерация);

Хамид Абдулла Джалаб, доктор наук (информатика и ИТ), университет Малайя (Малайзия);

Егназарян Карен Оникович, доктор технических наук, профессор, Технологический университет Тампере (Финляндия);

Еремеев Виктор Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор, Южный научный центр РАН (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Заковоротный Вилор Лаврентьевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Кавтарадзе Реваз Зурабович, доктор технических наук, профессор, Институт механики машин им. Р. Двали (Грузия);

Козубал Януш Виталис, доктор технических наук, профессор, Вроцлавский технический университет (Польша);

Хосе Карлос Куадрадо, доктор наук (электротехника и компьютеры), Политехнический институт Порту (Португалия);

Кудиш Илья Исидорович, доктор физико-математических наук, Университет Кеттеринга (США);

Кузнецов Генний Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, Томский политехнический университет (Томск, Российская Федерация);

Курейчик Виктор Михайлович, доктор технических наук, профессор, Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Лысак Владимир Ильич, доктор технических наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет (Волгоград, Российская Федерация);

Марчук Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, Институт сферы обслуживания и предпринимательства, филиал ДГТУ (Шахты, Российская Федерация);

Владимир Младенович, доктор технических наук, профессор, Крагуевацкий университет (Сербия);

Мукутадзе Мурман Александрович, доктор технических наук, доцент, Ростовский государственный университет путей сообщения (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Наседкин Андрей Викторович, доктор физико-математических наук, профессор, Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Натришвили Тамаз Мамиевич, академик, Институт механики машин им. Р. Двали (Грузия);

Нгуен Донг Ань, доктор физико-математических наук, профессор, Институт механики Академии наук и технологий Вьетнама (Вьетнам);

Нгуен Суан Тьем, доктор технических наук, Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона (Вьетнам);

Паршин Сергей Георгиевич, доктор технических наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация);

Подмастерьев Константин Валентинович, доктор технических наук, профессор, Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева (Орел, Российская Федерация);

Поляков Роман Николаевич, доктор технических наук, доцент, Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева (Орел, Российская Федерация);

Попов Валентин Леонидович, доктор физико-математических наук, профессор, Институт механики Берлинского технического университета (Германия);

Прокопенко Николай Николаевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Рыбак Александр Тимофеевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Музафер Сарачевич, доктор наук, профессор, Университет Нови-Пазара (Сербия);

Саруханян Арестак Арамаисович, доктор технических наук, профессор, Национальный университет архитектуры и строительства Армении (Армения);

Сидоров Владимир Николаевич, доктор технических наук, Российский университет транспорта (Москва, Российская Федерация);

Соловьёв Аркадий Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Сумбатян Междум Альбертович, доктор физико-математических наук, профессор, Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Тамаркин Михаил Аркадьевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Мурад Тезер, профессор, Ближневосточный университет (Турция);

Бертрам Торстен, доктор технических наук, профессор, Технический университет Дортмунда (Германия);

Турдалиев Умид Мухтаралиевич, доктор технических наук, профессор, Андижанский машиностроительный институт (Узбекистан);

Ахмет Уюмаз, доктор технических наук, профессор, университет Бурдура Мехмета Акифа Эрсоа (Турция);

Али Маджид Хасан Алвазли, доктор наук (компьютерная инженерия), доцент, Университет Аль-Нахрейн (Ирак);

Цибулин Вячеслав Георгиевич, доктор физико-математических наук, доцент, Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Чернышев Юрий Олегович, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Хучан Ляо, профессор, научный сотрудник ИААМ; Старший член Школы бизнеса IEEE, Университет Сычуань (Китай);

Языев Батыр Меретович, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация).

Editorial Board

Editor-in-Chief, Alexey N. Beskopylny, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Deputy Chief Editor, Alexandr I. Sukhinov, Corresponding Member, Russian Academy of Sciences, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Executive Editor, Manana G. Komakhidze, Cand.Sci. (Chemistry), Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Executive Secretary, Nadezhda A. Shevchenko, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Sergey M. Aizikovitch, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Kamil S. Akhverdiev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Rostov State Transport University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Imad R. Antipas, Cand.Sci. (Eng.), Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Hubert Anysz, PhD (Eng.), Assistant Professor, Warsaw University of Technology (Republic of Poland);

Ahilan Appathurai, National Junior Research Fellow, Anna University Chennai (India);

Gultekin Basmaci, PhD (Eng.), Professor, Burdur Mehmet Akif Ersoy University (Turkey);

Yuri O. Chernyshev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Evgenii A. Demekhin, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Financial University under the RF Government, Krasnodar branch (Krasnodar, Russian Federation);

Oleg V. Dvornikov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Belarusian State University (Belarus);

Karen O. Egiazaryan, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Tampere University of Technology (Finland);

Victor A. Eremeev, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Southern Scientific Center of RAS (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Nikolay E. Galushkin, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Institute of Service and Business, DSTU branch (Shakhty, Russian Federation);

LaRoux K. Gillespie, Dr.Sci. (Eng.), Professor, President-Elect of the Society of Manufacturing Engineers (USA);

Ali M. Hasan, PhD (Computer Engineering), Al Nahrain University (Baghdad, Iraq);

Huchang Liao, Professor, IAAM Fellow, IEEE Business School Senior Fellow, Sichuan University (China);

Hamid A. Jalab, PhD (Computer Science & IT), University of Malaya (Malaysia);

Revaz Z. Kavtaradze, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Raphiel Dvali Institute of Machine Mechanics (Georgia);

Janusz Witalis Kozubal, Dr.Sci. (Eng.), Wrocław Polytechnic University (Republic of Poland);

Ilya I. Kudish, PhD (Phys.-Math.), Kettering University (USA);

Victor M. Kureychik, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Geny V. Kuznetsov, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russian Federation);

Vladimir I. Lysak, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Volgograd State Technical University (Volgograd, Russian Federation);

Vladimir I. Marchuk, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Institute of Service and Business, DSTU branch (Shakhty, Russian Federation);

Vladimir M. Mladenovic, Dr.Sci. (Eng.), Professor, University of Kragujevac (Serbia);

Murman A. Mukutadze, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Rostov State Transport University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Andrey V. Nasedkin, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Tamaz M. Natriashvili, Academician, Raphiel Dvali Institute of Machine Mechanics (Georgia);

Nguyen Dong Ahn, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Academy of Sciences and Technologies of Vietnam (Vietnam);

Nguyen Xuan Chiem, Dr.Sci. (Eng.), Le Quy Don Technical University (Vietnam);

Sergey G. Parshin, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, St. Petersburg Polytechnic University (St. Petersburg, Russian Federation);

Konstantin V. Podmaster'ev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Orel State University named after I.S. Turgenev (Orel, Russian Federation);

Roman N. Polyakov, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Orel State University named after I.S. Turgenev (Orel, Russian Federation);

Valentin L. Popov, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Berlin University of Technology (Germany);

Nikolay N. Prokopenko, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

José Carlos Quadrado, PhD (Electrical Engineering and Computers), DSc Habil, Polytechnic Institute of Porto (Portugal);

Alexander T. Rybak, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Muzafer H. Saračević, Full Professor, Novi Pazar International University (Serbia);

Arestak A. Sarukhanyan, Dr.Sci. (Eng.), Professor, National University of Architecture and Construction of Armenia (Armenia);

Vladimir N. Sidorov, Dr.Sci. (Eng.), Russian University of Transport (Moscow, Russian Federation);

Arkady N. Solovyev, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Mezhlum A. Sumbatyan, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Mikhail A. Tamarkin, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Murat Tezer, Professor, Near East University (Turkey);

Bertram Torsten, Dr.Sci. (Eng.), Professor, TU Dortmund University (Germany);

Vyacheslav G. Tsybulin, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Umid M. Turdaliev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Andijan Machine-Building Institute (Uzbekistan);

Ahmet Uyumaz, PhD (Eng.), Professor, Burdur Mehmet Akif Ersoy University (Turkey);

Valery N. Varavka, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Igor M. Verner, PhD (Eng.), Professor, Technion — Israel Institute of Technology (Israel);

Sergei A. Voronov, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Russian Foundation of Fundamental Research (Moscow, Russian Federation);

Batyr M. Yazyev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation);

Vilor L. Zakovorotny, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation).

Содержание

МЕХАНИКА

Влияние углов ориентации сфероцилиндрического инструмента на шероховатость при обработке сложнопрофильных поверхностей	231
<i>М.Р. Гимадеев, А.В. Никитенко, В.О. Беркун</i>	
Исследование характеристик динамического отклика дорожных конструкций при ускоренном тестировании.....	241
<i>Ни Гуанцунг, А.Н. Тиратуриян, Е.В. Углова, А.В. Воробьев</i>	
Выпучивание прямоугольных пластин при нелинейной ползучести	257
<i>С.Б. Языев, А.С. Чепурненко</i>	

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Оптимизация геометрических характеристик циклоидальных профилей героторных гидромашин	269
<i>С.О. Киреев, А.Р. Лебедев, М.В. Корчагина</i>	
Исследование динамических характеристик автоматизированного позиционного длинноходового пневмопривода технологического оборудования	283
<i>Д.А. Коротыч, В.С. Сидоренко, С.П. Приходько</i>	

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

GATCGGenerator: новый генератор для создания квазислучайных нуклеотидных последовательностей	296
<i>О.Ю. Кирьянова Р.Р. Гарафутдинов, И.М. Губайдуллин, А.В. Чемерис</i>	
Чувствительность диффузионно-взвешенного изображения в сочетании с последовательностью восстановления турбо-инверсии T2 в качестве альтернативы МРТ с контрастным усилением при обнаружении параректального свища (на англ. языке)	307
<i>Noor Fadhil Baqir, Rasha Sabeeh Ahmed, Khaleel Ibraheem Mohsen</i>	
Метод трехмерного захвата движений человека на основе компьютерного зрения	317
<i>А.Д. Обухов, Д.Л. Дедов, Е.О. Суркова, И.Л. Коробова</i>	
Разработка модели параллельно-конвейерного вычислительного процесса для решения системы сеточных уравнений	329
<i>В.Н. Литвинов, Н.Б. Руденко, Н.Н. Грачева</i>	

Contents

MECHANICS

Influence of the Sphero-Cylindrical Tool Orientation Angles on Roughness under Processing Complex-Profile Surfaces	231
<i>MR Gimadeev, AV Nikitenko, VO Berkun</i>	
Study on Dynamic Response Characteristics of Different Asphalt Pavement Structures Based on ALF Test	241
<i>Ni Guangcong, AN Tiraturyan, E. Uglova, AV Vorobev</i>	
Buckling of Rectangular Plates under Nonlinear Creep	257
<i>SB Yazyev, AS Chepurnenko</i>	

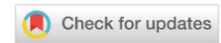
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE

Optimization of Geometric Characteristics of Cycloidal Profiles of Gerotor Hydraulic Machines	269
<i>SO Kireyev, AR Lebedev, MV Korchagina</i>	
Investigation of Dynamic Characteristics of an Automated Position Long-Stroke Pneumatic Actuator of Fabrication System	283
<i>DA Korotych, VS Sidorenko, SP Prikhodko</i>	

INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT

GATCGGenerator: New Software for Generation of Quasirandom Nucleotide Sequences	296
<i>OYu Kiryanova, RR Garafutdinov, IM Gubaydullin, AV Chemeris</i>	
Sensitivity of Diffusion-Weighted Image Combined with T2 Turbo Inversion Recovery Magnitude Sequence and as an Alternative to Contrast-Enhanced MRI in the Detection of Perianal Fistula.....	307
<i>Noor Fadhil Baqir, Rasha Sabeeh Ahmed, Khaleel Ibraheem Mohsen</i>	
3D Human Motion Capture Method Based on Computer Vision	317
<i>AD Obukhov, DL Dedov, EO Surkova, IL Korobova</i>	
Model of a Parallel-Pipeline Computational Process for Solving a System of Grid Equations	329
<i>VN Litvinov, NB Rudenko, NN Gracheva</i>	

МЕХАНИКА MECHANICS



УДК 621.914.1:517

Научная статья

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-231-240>

Влияние углов ориентации сфероцилиндрического инструмента на шероховатость при обработке сложнопровильных поверхностей

 М.Р. Гимадеев¹  , А.В. Никитенко¹ , В.О. Беркун^{1,2} 
¹ Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Российская Федерация² Общество с ограниченной ответственностью «ПромМаш», г. Хабаровск, Российская Федерация✉ 009063@pnu.edu.ru, jl_wiegott@list.ru

Аннотация

Введение. При фрезеровании сложных поверхностей деталей выбор траекторий и ориентации инструмента влияют на параметры шероховатости. Однако в исследованиях, посвященных формированию траекторий, не учитываются рекомендации, позволяющие обеспечить качество микрогеометрии поверхностей. К тому же при написании программ для оборудования с ЧПУ в САМ-системах (от англ. computer-aided manufacturing — автоматизированное производство) ограничения режимов резания определяются исключительно с помощью геометрического подхода. Он не учитывает влияние углов ориентации сфероцилиндрического инструмента относительно плоскости нормали на качество обработки поверхностей, а именно на шероховатость. Цель работы — создание методики по выбору предельных значений углов ориентации сфероцилиндрического инструмента для оптимизации процесса механической обработки пространственно-сложных поверхностей. Задачи: достижение минимальных значений амплитудного параметра шероховатости R_z и определение эффективности различных траекторий обработки.

Материалы и методы. Использовались методы корреляционного и регрессионного анализа, результаты сравнивались и обобщались. Для оценки параметров уравнения регрессии применялся метод наименьших квадратов. Для экспериментальных исследований задействовали обрабатывающий центр DMU 50 ecoline. Шероховатость измеряли на профилометре Surfcom 1800 D. Материал образцов — сталь 12X18H10T. Материал инструмента — твердый сплав 1620 Sandvik с PVD-покрытием (от англ. physical vapor deposition — физическое осаждение паров металлов, ближайший отечественный аналог — Т15К6).

Результаты исследования. Детально показано, как параметры шероховатости R_z зависят от угла наклона и диаметра инструмента. Двадцать примеров представлены в виде таблицы. Естественные коэффициенты регрессии рассчитаны по линейной и гиперболической моделям. Установлено, что диаметр инструмента больше влияет на формирование параметра шероховатости R_z , чем угол наклона. Для детального описания особенностей влияния сравнивались коэффициенты множественной, частной, парной корреляции и множественной детерминации. Определены ограничения, связанные с углами наклона инструмента при обработке сложных поверхностей. Визуализирована схема для расчета угла нормали, которая включает выбранный шаг по оси для определения длин отрезков ломаной кривой. Даны в виде рисунков профилограммы поверхностей, полученные при различных траекториях формообразования. Это позволило сделать вывод о непригодности фрезерования сверху вниз при наклоне инструмента 5° – 35° . Составлена карта, по которой можно судить о шероховатости, зная вид фрезерования и угол наклона (от 5° до 80°). Графически показана зависимость параметра шероховатости от скорости обработки и применения охлаждающей жидкости. Сведены в таблицу расчетные параметры для определения оптимального угла наклона инструмента. Их анализ доказал адекватность предложенного метода подготовки управляющей информации.

Обсуждение и заключение. Представленная методика позволила определить оптимальные значения углов ориентации сфероцилиндрического инструмента с учетом скорости резания и достижения минимально возможного амплитудного параметра шероховатости R_z . Рассмотрена ситуация подачи $f_z = 0,4$ мм/зуб для участков поверхности с суммарным углом 5° – 50° . В этом случае обработка по траекториям в попутном,

встречном направлении и снизу вверх обеспечила шероховатость в диапазоне 3–6 мкм по параметру R_z . Траектория движения сверху вниз не рекомендована к применению на окончательных операциях из-за значительной высоты параметра R_z .

Ключевые слова: амплитудный параметр шероховатости, ориентация сфероцилиндрического инструмента, фрезерование сложных поверхностей, пространственно сложные поверхности

Благодарности: авторы выражают благодарность В. М. Давыдову, д. т. н., профессору, заведующему кафедрой «ТИИС» (ФГБОУ ВО ТОГУ, г. Хабаровск) за значимые замечания и важные советы при проведении исследования и оформлении статьи.

Для цитирования. Гимадеев М.Р., Никитенко А.В., Беркун В.О. Влияние углов ориентации сфероцилиндрического инструмента на шероховатость при обработке сложнопрофильных поверхностей. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(3):231–240. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-231-240>

Original article

Influence of the Sphero-Cylindrical Tool Orientation Angles on Roughness under Processing Complex-Profile Surfaces

Mikhail R. Gimadeev¹ , Aleksandr V. Nikitenko¹ , Vera O. Berkun^{1,2} 

¹ Pacific National University, Khabarovsk, Russian Federation

² “PromMash” LLC, Khabarovsk, Russian Federation

✉ 009063@pnu.edu.ru, jl_wiegott@list.ru

Abstract

Introduction. When milling complex-profile surfaces of parts, the selection of tool trajectories and orientations affect the roughness parameters. However, in the studies devoted to the formation of trajectories, recommendations to provide the quality of microgeometry of surfaces were not taken into account. Moreover, when writing programs for CNC equipment in CAM systems, the limitations of cutting modes were determined exclusively using a geometric approach. It did not take into account the influence of the orientation angles of the sphero-cylindrical tool relative to the normal plane on the quality of surface treatment, namely on roughness. The work was aimed at the creation of the methodology for selecting the limiting values of the orientation angles of a sphero-cylindrical tool to optimize the process of machining spatially complex surfaces. The tasks included achieving the minimum values of the amplitude roughness parameter R_z and determining the effectiveness of various machining paths.

Materials and Methods. Methods of correlation and regression analysis were used, the results were compared and generalized. The least-squares method was applied to estimate the parameters of the regression equation. The DMU 50 ecoline processing center was used for the experimental studies. Roughness was measured on a Surfcam 1800 D profilometer. The material of the samples was steel 12X18N10T. The material of the tool was hard alloy 1620 Sandvik with PVD coating (physical vapor deposition, the closest domestic analogue is T15K6).

Results. It has been shown in detail how roughness parameters R_z depend on the angle of inclination and the diameter of the tool. Twenty examples were summarized in a table. Natural regression coefficients were calculated using linear and hyperbolic models. It was found that the diameter of the tool had a greater effect on the formation of roughness parameter R_z than the angle of inclination. For a detailed description of the influence features, the coefficients of multiple, partial, paired correlation and multiple determination were compared. The limitations associated with the angles of inclination of the tool when processing complex surfaces were determined. A scheme for calculating the angle of the normal was visualized, which included the selected step along the axis to determine the lengths of the segments of the broken curve. The profilograms of surfaces obtained with different shaping trajectories were given in the form of drawings. This allowed us to conclude that milling from top to bottom is unsuitable when the tool is tilted 5°–35°. A map has been compiled by which it is possible to judge the roughness, knowing the type of milling and the inclination angle (from 5° to 80°). The dependence of the roughness parameter on the processing speed and the use of coolant was represented graphically. The calculated parameters for determining the optimal angle of inclination of the tool were tabulated. Their analysis proved the adequacy of the proposed method of preparing control information.

Discussion and Conclusion. The presented technique made it possible to determine the optimal values of the orientation angles of the sphero-cylindrical tool, taking into account the cutting speed and the minimum possible amplitude roughness parameter R_z . The pattern of feeding $f_z = 0.4$ mm/tooth for surface areas with a total angle of 5°–50° was considered. In this case, processing along trajectories in the passing, opposite and bottom-top directions, provided roughness in the range

of 3–6 μm according to parameter R_z . The top-down toolpath is not recommended for use in final operations due to the significant height of parameter R_z .

Keywords: amplitude roughness parameter, orientation of a sphero-cylindrical tool, milling of complex-profile surfaces, spatially complex surfaces

Acknowledgments: the authors would like to thank V.M. Davydov, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Head of the Technical Informatics and Information Systems Department, Pacific National University, Khabarovsk, for significant comments and important tips when conducting research and designing the article.

For citation. Gimadeev MR, Nikitenko AV, Berkun VO. Influence of the Sphero-Cylindrical Tool Orientation Angles on Roughness under Processing Complex-Profile Surfaces. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(3):231–240. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-231-240>

Введение. Надежность деталей машин определяется такими эксплуатационными свойствами (ЭС) поверхностей, как износостойкость, герметичность, прочность, качество покрытий [1]. Эти ЭС зависят от физико-механических и геометрических параметров функциональных поверхностей, в том числе от шероховатости [2–4].

Анализ научной литературы позволяет говорить о растущем интересе к теме обеспечения нужных параметров шероховатости за счет обоснованного выбора траекторий формообразующих движений и ориентации сфероцилиндрического инструмента при фрезеровании пространственно-сложных поверхностей (ПСП) [5–7]. Примеры таких деталей: формообразующие элементы штамповой оснастки, мастер-модели для литья, исполнительные поверхности зубчатых передач [8–10].

Многие авторы изучали влияние стратегий при фрезеровании ПСП и методы оптимизации механической обработки [10–12]. Однако знания о формировании траекторий не учитывают рекомендации по обеспечению качества микрогеометрии поверхностей детали. Отметим также, что при создании программ для оборудования с ЧПУ в САМ-системах (от англ. computer-aided manufacturing — автоматизированное производство) ограничения режимов резания определяются исключительно с помощью геометрического подхода [13, 14]. Он не учитывает влияние углов ориентации сфероцилиндрического инструмента относительно плоскости нормали на качество обработки поверхностей, а именно на шероховатость. Преодолеть указанные недостатки может основанный на эмпирических моделях метод выбора углов ориентации инструмента. Его преимущества:

- принимается во внимание влияние углов ориентации инструмента на шероховатость поверхностей;
- поддерживается возможность обоснованно выбирать траектории обработки.

Цель исследования — создание методики по выбору предельных значений углов ориентации сфероцилиндрического инструмента для оптимизации процесса механической обработки пространственно-сложных поверхностей. Задачи: достижение минимальных значений амплитудного параметра шероховатости R_z и определение эффективности различных траекторий обработки.

Материалы и методы. Итак, САМ-системы позволяют формировать траектории многокоординатной обработки с отслеживанием таких дополнительных параметров, как столкновения, точка касания инструмента с деталью и т. п. Сфероцилиндрический инструмент касается детали в точке $P_i(x_i, y_i, z_i) = P_d(x_d, y_d, z_d)$. При этом нужно избегать механообработки центром фрезы и ориентировать инструмент с углом наклона не менее $5^\circ - 15^\circ$.

На окончательных операциях эффективная скорость резания обусловлена эффективным диаметром. При равной частоте вращения она увеличивается с ростом угла наклона инструмента к обрабатываемой детали. Повышение скорости резания в общем случае приводит к снижению микротвердости поверхности, а при увеличении $V > 75$ м/мин параметры микротвердости изменяются незначительно [12]. Скорость диссипации сильно зависит от скорости резания и объема удаляемого материала, поэтому для интенсификации процесса резания нужна смазочно-охлаждающая жидкость (СОЖ) [15].

Для экспериментов применялось технологическое оборудование с ЧПУ — пятикоординатный обрабатывающий центр DMU 50 ecoline с максимальной частотой шпинделя 8000 об/мин. Шероховатость поверхности измерялась профилометром Surfcom 1800 D. Для обработки стали 12X18H10T использовались концевые фрезы Sandvik серии R216. Материал — твердый сплав 1620 с PVD-покрытием (от англ. physical vapor deposition — физическое осаждение паров металлов, ближайший отечественный аналог — Т15К6). Диаметр — 8 мм, число зубьев — 2. Для обеспечения равномерного припуска ($a_p = 0,2$ мм) перед окончательной операцией фрезерования проводилась механическая обработка сфероцилиндрическими фрезами.

Результаты исследования. До определения углов наклона нужно установить, как переменные факторы влияют на функцию отклика. В данном случае речь идет о шероховатости поверхности по параметру R_z (мкм). Для нахождения эмпирических математических моделей фрезерования сфероцилиндрическим инструментом прием

независимые переменные: X_1 — диаметр (D , мм) и X_2 — угол наклона инструмента (γ , °). Исходные данные для анализа рассмотрены в предыдущих исследованиях (при подаче на зуб $f_z = 0,4$ мм/зуб) [16–19] (таблица 1).

Таблица 1

Параметры шероховатости Rz в зависимости от угла наклона и диаметра инструмента

Угол, °	Диаметр инструмента, мм			
	6	8	10	12
10	9,33	7,66	5,99	4,33
20	8,59	7,06	5,53	4,01
30	7,85	6,46	5,07	3,69
40	7,11	5,86	4,61	3,37
50	6,37	5,26	4,15	3,05

На основе теоретических данных о значимых факторах, влияющих на шероховатость, приняты линейная (1.1) и гиперболическая (1.2) модели:

$$Rz = Y = a + b_1 X_1 + b_2 X_2, \quad (1.1)$$

$$Rz = Y' = a' + b_1 X_1 + \frac{b_2'}{X_2}. \quad (1.2)$$

Здесь рассчитанные естественные коэффициенты регрессии: $a = 13,37$; $a' = 10,25$; $b_1 = -0,66$; $b_2 = -0,58$; $b_2' = 0,51$.

Параметры уравнения двухфакторной регрессии оценивались по стандартному методу наименьших квадратов, поэтому для простоты изложения опустим формулы с указанием коэффициентов. Стандартизованные β -коэффициенты: $\beta_1' = -0,79$; $\beta_2 = -0,58$; $\beta_2' = -0,51$. Сравнение модулей значений стандартизованных коэффициентов регрессии β позволяет заключить, что фактор X_1 (диаметр инструмента) больше влияет на формирование параметра шероховатости Rz , чем X_2 (угол наклона). Коэффициенты множественной, частной, парной корреляции и множественной детерминации:

$$r_{YX_1 X_2} = 0,98; r_{YX_1 X_2} = -0,98; r_{X_2 X_1} = -0,97; r_{X_1 X_2 Y} = -0,95;$$

$$R_{Y X_1 X_2} = 0,95; r_{Y X_1 X_2} = -0,93; r_{Y X_2 X_1} = 0,85; r_{X_1 X_2 Y} = 0,79;$$

$$r_{Y X_1} = -0,79; r_{Y X_2} = -0,58; r_{X_1 X_2} = 0,00; r_{Y X_2} = 0,51;$$

$$r_{X_1 X_2} = 0,00; R^2(Y) = 0,95; R^2(Y') = 0,90.$$

Сравнивая коэффициенты, делаем следующие выводы.

При закреплении фактора X_2 на постоянном уровне фактор X_1 наиболее сильно влиял на Rz ($|0,98| > |0,79|$). При сравнении коэффициентов гиперболической модели ($|0,93| > |0,79|$).

При закреплении фактора X_1 влияние фактора X_2 на Rz увеличилось для обеих моделей: линейной $|0,97| > |0,58|$, гиперболической $|0,93| > |0,51|$.

Для обеспечения однородности микрорельефа поверхности устанавливается зависимость подачи и эффективного диаметра инструмента (D_{cap}), который меняется в зависимости от угла обработки. Определим ограничения, связанные с углами наклона инструмента при обработке ПСП. Для этого поверхность детали нужно разбить на участки и рассчитать углы нормалей. Если $z = f(x, y)$, то в общем случае ориентация инструмента к поверхности задается выбором направления нормали.

При $\cos \gamma = 1 / |N|$:

$$N = \left(-\frac{\delta f}{\delta x}, -\frac{\delta f}{\delta y}, 1 \right). \quad (2.1)$$

При $\cos \gamma = -1 / |N|$:

$$N = \left(\frac{\delta f}{\delta x}, \frac{\delta f}{\delta y}, -1 \right). \quad (2.2)$$

Для определения угла наклона касательной плоскости можно воспользоваться уравнением:

$$\tan \alpha = |grad(z)_A| = \sqrt{\left(\frac{\delta z}{\delta x} \right)^2 + \left(\frac{\delta z}{\delta y} \right)^2}, \quad (3)$$

где $\alpha = |90^\circ - \gamma|$.

В работе А.В. Никитенко [20] представлена модель оптимизации угла ориентации детали с поправочными углами наклона A и B относительно осей X и Y :

$$\tan \alpha' = \sqrt{\left(\frac{\delta z}{\delta x} + \tan B\right)^2 + \left(\frac{\delta z}{\delta y} + \tan A\right)^2}. \quad (4)$$

Для частного случая (рис. 1) определение угла λ к нормали N :

$$\lambda = \arctan \frac{\Delta z}{\Delta x}. \quad (5)$$

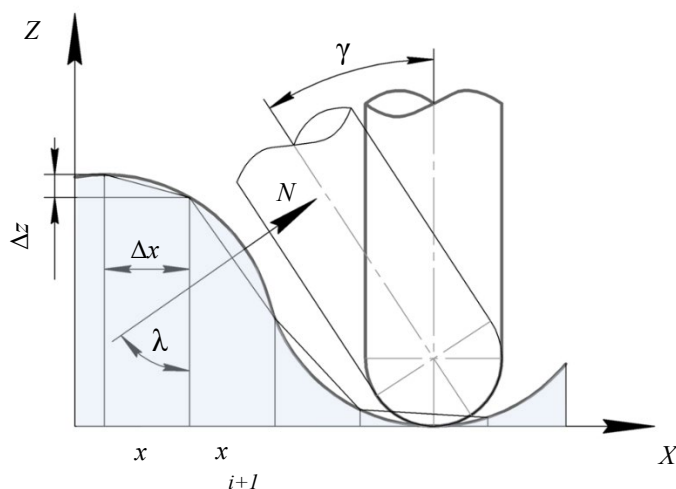


Рис. 1. Схема для расчета угла нормали: N — нормаль; λ — угол к нормали; Δx — выбранный шаг по оси X для расчета длин отрезков ломаной кривой, мм; Δz — расстояние по оси Z , зависящее от шага по оси X , мм

При дискретно заданном профиле поверхности длина кривой, описывающая геометрию профиля:

$$S_n = \sum_{i=1}^n \Delta S_i. \quad (6)$$

Здесь длина участка ломаной $\Delta S_i = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta z^2}$.

В качестве выходного параметра рассматривается шероховатость Rz (рис. 2) с учетом ограничений, связанных с траекториями движения и углами наклона сфероцилиндрического инструмента.

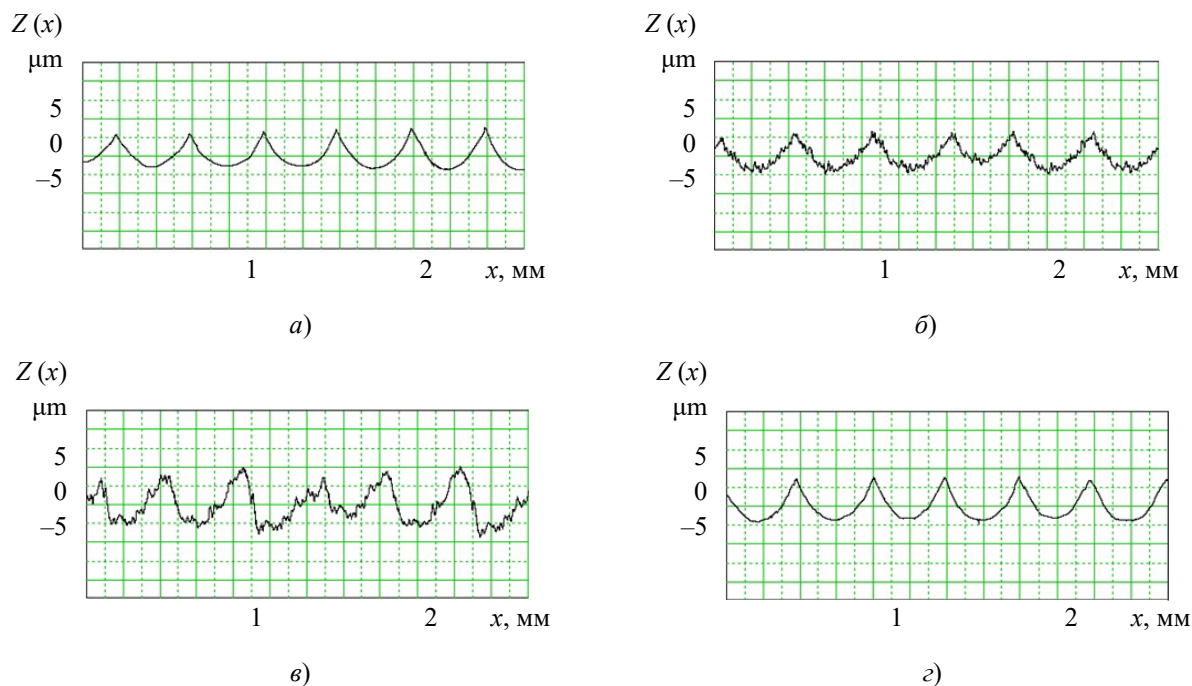


Рис. 2. Профилограммы поверхностей, полученные при различных траекториях формообразования при $\Gamma = 35^\circ - 45^\circ$: а — попутное фрезерование; б — встречное фрезерование; в — фрезерование сверху вниз; г — фрезерование снизу вверх

Фрезерование сверху вниз характеризуется наибольшей амплитудой, неравномерностью полученного профиля поверхности и не рекомендуется для формообразования инструментом, наклоненным под углом $5^\circ - 35^\circ$.

Карта выбора шероховатости (рис. 3) по параметру R_z составлена результатам данного и предыдущих исследований [16–19].

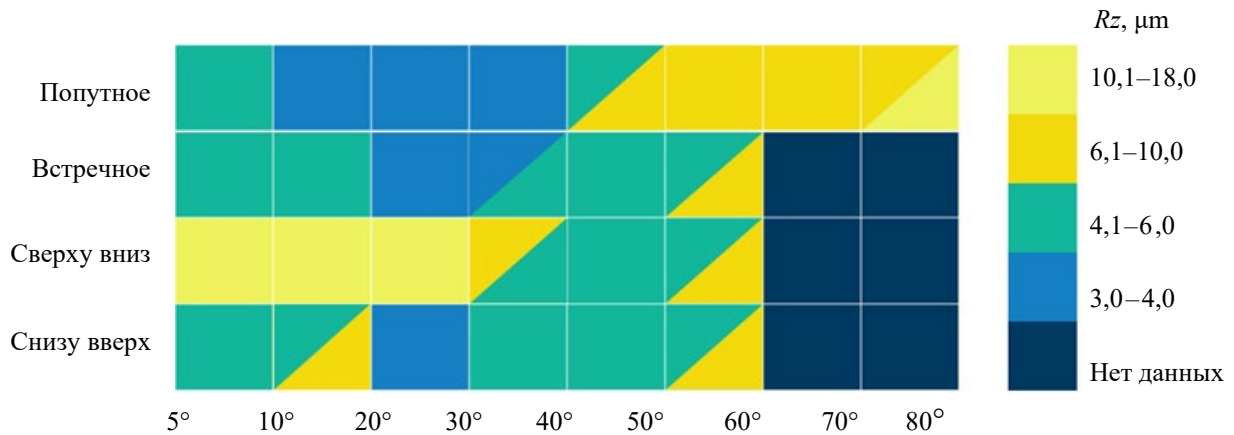


Рис. 3. Карта выбора шероховатости

При использовании СОЖ на поверхностях контакта инструмента и материала заготовки образуется пленка, которая способствует снижению адгезионного износа. На скорости резания $V > 70$ м/мин уменьшается воздействие динамического трения. При этом сокращается длительность физико-химического воздействия среды на контактные поверхности, что ограничивает эффект от применения СОЖ (рис. 4).

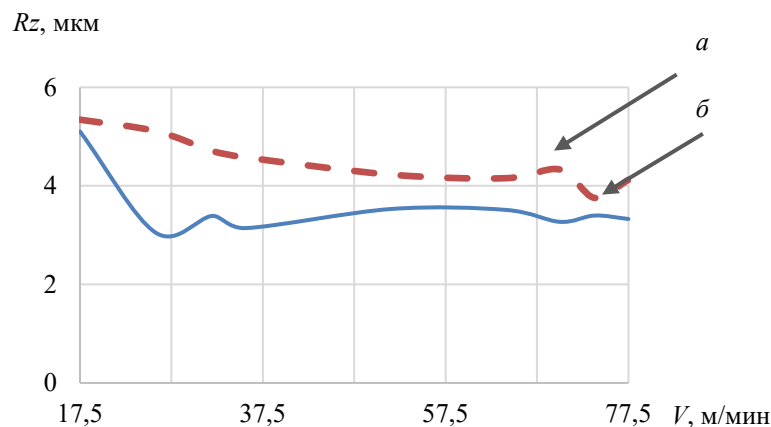


Рис. 4. Зависимость параметра шероховатости R_z от скорости механообработки: а — без СОЖ; б — с применением СОЖ

Рассматриваемая методика направлена не на установление критических значений возможных углов ориентации сфероцилиндрического инструмента для конкретного объекта, а на достижение параметров шероховатости с учетом эффективной скорости резания, подачи и углов наклона для широкого спектра деталей, обладающих вогнуто-выпуклыми и линейными участками. Такой подход позволит обобщить и уточнить способы оптимизации механической обработки. Кроме шероховатости проанализированы ограничения минимальной эффективной скорости резания, зависящей от эффективного диаметра инструмента. При этом минимальная рекомендуемая эффективная скорость резания (V_{cap}) — 75 м/мин.

По подаче и по боковому шагу угол ориентации инструмента может соответствовать положительным и отрицательным значениям. При расчете он учитывался по модулю. На основании расчетных данных (таблица 2) профиль поверхности (рис. 1) разбит на участки. Определены углы нормалей и назначены траектории формообразующих движений для обеспечения требуемой шероховатости с учетом углов наклона инструмента.

Таблица 2

Расчетные параметры для определения оптимального угла наклона инструмента

n	Δz , мм	Δx , мм	λ , °	$\Gamma = \lambda + \gamma$, °			V_{cap} при $\gamma = 5$,
				$\gamma = 1$	$\gamma = 3$	$\gamma = 5$	
1	0,16	0,25	3,59	4,59	6,59	8,59	68,0
2	0,48		10,83	11,83	13,83	15,83	84,4
3	0,82		18,25	19,25	21,25	23,25	99,8
4	1,22		26,01	27,01	29,01	31,01	114,2
5	1,71		34,34	35,34	37,34	39,34	127,2
6	2,38		43,64	44,64	46,64	48,64	138,6
7	3,55		54,82	55,82	57,82	59,82	147,5
8	6,59		69,21	70,21	72,21	74,21	150,7
9	4,56		61,26	62,26	64,26	66,26	150,1
10	2,81		48,39	49,39	51,39	53,39	143,1
11	1,98		38,41	39,41	41,41	43,41	132,7
12	1,43		29,71	30,71	32,71	34,71	120,3
13	1,00		21,73	22,73	24,73	26,73	106,5
14	0,63		14,17	15,17	17,17	19,17	91,5
15	0,30		6,87	7,87	9,87	11,87	75,5
16	0,01		0,32	1,32	3,32	5,32	60,2
17	0,33		7,52	8,52	10,52	12,52	77,0
...	...		...	...	...	...	...
n_i	1,03		22,43	23,43	25,43	27,43	107,8
n_{i+1}	1,47		30,46	31,46	33,46	35,46	121,5

Измеренные значения шероховатости с учетом рекомендуемых углов наклона сфероцилиндрического инструмента и траектории движения являются минимальными по параметру Rz (от 3 до 6 мкм). При этом указанные значения соотносятся с данными других исследований (рис. 3). Это позволяет сделать вывод об адекватности предложенного метода подготовки управляющей информации.

Обсуждение и заключение. Представленная методика выбора предельных значений углов ориентации сфероцилиндрического инструмента может использоваться для обработки ПСП одним инструментом без замены с учетом принятых ограничений. Предложенный подход позволяет определить оптимальные значения углов ориентации сфероцилиндрического инструмента с учетом скорости резания и достижения минимально возможного амплитудного параметра шероховатости Rz .

Рассмотрим ситуацию для участков поверхности с суммарным углом $5^\circ - 50^\circ$ при подаче $f_z = 0,4$ мм/зуб. В этом случае обработка по траекториям в попутном направлении, снизу вверх и во встречном направлении позволила обеспечить шероховатость в диапазоне 3–6 мкм по параметру Rz . Это меньше максимальных полученных значений на 15–30 %. При углах $10^\circ - 40^\circ$ и попутном направлении обработки фиксировались минимальные значения Rz — 3–4 мкм. Траектория движения сверху вниз не рекомендована к применению на окончательных операциях из-за существенной высоты профиля Rz . При этом значения 4,1–6 мкм для данной траектории достигнуты в узком диапазоне углов — $40^\circ - 50^\circ$.

Список литературы

1. Суслов А.Г., Федоров В.П., Нагоркин М.Н., Пыриков И.Л. Комплексный подход к экспериментальным исследованиям технологических систем металлообработки по обеспечению параметров качества и эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин. *Наукоемкие технологии в машиностроении*. 2018;88(10):3–13. https://doi.org/10.30987/article_5bb4b1f9abbc54.46761484
2. Пономарев Б.Б., Нгуен С.Х. Оценка шероховатости при пятикоординатном чистовом фрезеровании поверхностей сфероцилиндрической фрезой. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2020;(5(722)):21–31. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2020-5-21-31>
3. Pimenov D., Hassui A., Wojciechowski S., Mia M., Magri A., Suyama D.I., et al. Effect of the Relative Position of the Face Milling Tool towards the Workpiece on Machined Surface Roughness and Milling Dynamics. *Applied Sciences*. 2019;9(5):842. <https://doi.org/10.3390/app9050842>

4. Аверченков В.И., Филиппова Л.Б., Пугач Л.И. Программный комплекс определения величины коррекции на инструмент для обрабатывающих центров с датчиками активного контроля. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2013;(7–1):70–78. URL: https://tidings.tsu.tula.ru/tidings/pdf/web/file/tsu_izv_technical_sciences_2013_07_part_1.pdf (дата обращения: 05.04.2023).
5. Ižol P., Vrabel M., Maňková I. Comparison of Milling Strategies when Machining Freeform Surfaces. *Materials Science Forum*. 2016;862:18–25. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.862.18>
6. Hassanpour H., Shajari S., Rasti A., Sadeghi M.H. Investigation of Milling Strategies Effect on Microhardness of a Typical Curved Surface. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(2):34–40. URL: https://www.researchgate.net/publication/270449928_Investigation_of_milling_strategies_effect_on_microhardness_of_a_typical_curved_surface (accessed: 05.04.2023).
7. Shajari S., Sadeghi M.H., Hassanpour H. The Influence of Tool Path Strategies on Cutting Force and Surface Texture during Ball End Milling of Low Curvature Convex Surfaces. *The Scientific World Journal*. 2014;2014:374526. <https://doi.org/10.1155/2014/374526>
8. Matras A., Kowalczyk R. Analysis of Machining Accuracy during Free form Surface Milling Simulation for Different Milling Strategies. *Proceedings of the SPIE*. 2014;9290:1–7. <https://doi.org/10.1117/12.2075081>
9. Пономарев Б.Б., Нгуен Ши Хьен. Влияние ориентации инструмента на силы резания при концевом фрезеровании. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2019;(3(708)):11–20. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2019-3-11-20>
10. Mali R.A., Gupta T.V.K., Ramkumar J. A Comprehensive Review of Free-Form Surface Milling — Advances over a Decade. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021;62:132–167. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.12.014>
11. Xiurong Zhu, Yeu Wang. Process Analysis and Parameter Optimization of Five Axis NC Machine for Machining Complex Curved Surface Impellers. In: *Proc. International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS)*. New York: IEEE; 2019. P. 122–124. <https://doi.org/10.1109/ICITBS.2019.00036>
12. Жидяев А.Н., Мещеряков А.В., Проничев Н.Д., Шулепов А.П. Экспериментальное исследование влияния режимов фрезерования и упрочнения на параметры качества поверхностного слоя деталей из жаропрочных сплавов и сталей. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. 2012;(5–2(36)):245–251. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-issledovanie-vliyaniya-rezhimov-frezerovaniya-i-uprochneniya-na-parametry-kachestva-poverhnostnogo-sloya-detaley-iz/viewer> (дата обращения: 05.04.2023).
13. Лапшин В.П., Христофорова В.В., Носачев С.В. Взаимосвязь температуры и силы резания с износом и вибрациями инструмента при токарной обработке металлов. *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2020;22(3):44–58. <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2020-22.3-44-58>
14. Blau P., Busch K., Dix M., Hochmuth C., Stoll A., Wertheim R. Flushing Strategies for High Performance, Efficient and Environmentally Friendly Cutting. *Procedia CIRP*. 2015;26:361–366. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.07.058>
15. Кущева М.Е., Клауч Д.Н., Кобелев О.А. Принципы выбора смазочно-охлаждающих технологических сред для обработки металлов резанием. *Известия МГТУ «МАМИ»*. 2014;8(1–2):73–76. <https://doi.org/10.17816/2074-0530-67737>
16. Gimadееv M.R., Li A.A. Analysis of Systems for Automated Provision of Surface Roughness Parameters Based on Dynamic Monitoring. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2022;22(2):116–129. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-2-116-129>
17. Гимадеев В.М., Давыдов А.В., Никитенко А.В., Сарыгин А.В. Формирование параметров шероховатости на основе корреляционных связей при чистовом фрезеровании пространственно-сложных поверхностей. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2019;15(6(174)):243–249. URL: https://www.mashin.ru/files/2019/up619_web.pdf (дата обращения: 05.04.2023).
18. Гимадеев М.Р., Давыдов В.М. Корреляционные связи показателей шероховатости при фрезеровании сферическим инструментом. *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2019;(5):219–224.
19. Гимадеев М.Р., Ли А.А., Беркун В.О., Стельмаков В.А. Экспериментальное исследование динамики процесса механообработки концевыми сфероцилиндрическими фрезами. *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2023;25(1):44–56. <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2023-25.1-44-56>
20. Никитенко А.В. Разработка модели оптимизации угла ориентации заготовки при обработке сложнопрофильных поверхностей. *Ученые заметки ТОГУ*. 2021;12(2):66–69. URL: https://pnu.edu.ru/media/ejournal/articles-2021/TGU_12_71.pdf (дата обращения: 05.04.2023).

References

1. Suslov AG, Federov VP, Nagorkin MN, Pyrikov IL. Complex Approach to Experimental Investigations of Metal Working Technological Systems to Ensure Parameters of Quality and Operation Properties of Machinery Surfaces.

- Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering. 2018;(88(10)):3–13. https://doi.org/10.30987/article_5bb4b1f9abbc54.46761484
2. Ponomarev BB, Suong H Nguyen. Evaluation of Surface Roughness in Five-Axis Ball-End Milling. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*. 2020;(5(722)):21–31. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2020-5-21-31>
3. Pimenov D, Hassui A, Wojciechowski S, Mia M, Magri A, Suyama DI, et al. Effect of the Relative Position of the Face Milling Tool towards the Workpiece on Machined Surface Roughness and Milling Dynamics. *Applied Sciences*. 2019;9(5):842. <https://doi.org/10.3390/app9050842>
4. Averchenkov VI, Filippova LB, Pugach LI. Determination of Software Tool Compensation Values in the Preparation of Automated Production of the Use of Active Control Sensor Tool. *Izvestiya Tula State University*. 2013;(7–1):70–78. URL: https://tidings.tsu.tula.ru/tidings/pdf/web/file/tsu_izv_technical_sciences_2013_07_part_1.pdf (accessed: 05.04.2023).
5. Ižol P, Vrabel M, Maňková I. Comparison of Milling Strategies when Machining Freeform Surfaces. *Materials Science Forum*. 2016;862:18–25. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.862.18>
6. Hassanpour H, Shajari S, Rasti A, Sadeghi MH. Investigation of Milling Strategies Effect on Microhardness of a Typical Curved Surface. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(2):34–40. URL: https://www.researchgate.net/publication/270449928_Investigation_of_milling_strategies_effect_on_microhardness_of_a_typical_curved_surface (accessed: 05.04.2023).
7. Shajari S., Sadeghi M.H., Hassanpour H. The Influence of Tool Path Strategies on Cutting Force and Surface Texture during Ball End Milling of Low Curvature Convex Surfaces. *The Scientific World Journal*. 2014;2014:374526. <https://doi.org/10.1155/2014/374526>
8. Matras A, Kowalczyk R. Analysis of Machining Accuracy during Free form Surface Milling Simulation for Different Milling Strategies. *Proceedings of the SPIE*. 2014;9290:1–7. <https://doi.org/10.1117/12.2075081>
9. Ponomarev BB, Nguyen Sy Hien. The Influence of Tool Orientation on Cutting Forces during End Milling. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*. 2019;(3(708)):11–20. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2019-3-11-20>
10. Mali RA, Gupta TVK, Ramkumar J. A Comprehensive Review of Free-Form Surface Milling — Advances over a Decade. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021;62:132–167. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.12.014>
11. Xiurong Zhu, Yeu Wang. Process Analysis and Parameter Optimization of Five Axis NC Machine for Machining Complex Curved Surface Impellers. In: *Proc. International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS)*. New York: IEEE; 2019. P. 122–124. <https://doi.org/10.1109/ICITBS.2019.00036>
12. Zhidyaev AN, Masheryakov AV, Pronichev ND, Shulepov AP. Milling and Microballs Strengthening Conditions Influence on High-Temperature Alloys and Steels Parts' Coating Surface Quality Experimental Investigation. *VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2012;(5–2(36)):245–251. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-issledovanie-vliyaniya-rezhimov-frezerovaniya-i-uprochneniya-na-parametry-kachestva-poverhnostnogo-sloya-detaley-iz/viewer> (accessed: 05.04.2023).
13. Lapshin VP, Khristoforova VV, Nosachev SV. Relationship of Temperature and Cutting Force with Tool Wear and Vibration in Metal Turning. *Obrabotka Metallov (Metal Working and Material Science)*. 2020;22(3):44–58. <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2020-22.3-44-58>
14. Blau P, Busch K, Dix M, Hochmuth C, Stoll A, Wertheim R. Flushing Strategies for High Performance, Efficient and Environmentally Friendly Cutting. *Procedia CIRP*. 2015;26:361–366. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.07.058>
15. Kuscheva ME, Klauch DN, Kobelev OA. Principles of Selection of Cutting Technological Mediums for Metal Cutting. *Izvestiya MGTU "MAMI"*. 2014;8(1-2):73–76. <https://doi.org/10.17816/2074-0530-67737>
16. Gimadeev MR, Li AA. Analysis of Systems for Automated Provision of Surface Roughness Parameters Based on Dynamic Monitoring. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2022;22(2):116–129. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-2-116-129>
17. Davydov VM, Gimadeev MR, Nikitenko AV, Sarygin AV. Formation of Roughness Parameters Based on Correlation Relations during Finishing Milling of Spatially Complex Surfaces. *Strengthening Technologies and Coatings*. 2019;15(6(174)):243–249. URL: https://www.mashin.ru/files/2019/up619_web.pdf (accessed: 05.04.2023).
18. Gimadeev MR, Davydov VM. Correlation of the Roughness in Milling of Spherical Tool. *Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making*. 2019;(5):219–224.
19. Gimadeev MR, Li AA, Berkun VO, Stelmakov VA. Experimental Study of the Dynamics of the Machining Process by Ball-End Mills. *Obrabotka Metallov (Metal Working and Material Science)*. 2023;25(1):44–56. <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2023-25.1-44-56>

20. Nikitenko AV. Development of a Model of Optimization of Angle of Orientation of a Workpiece when Processing Difficult Surfaces. *Uchenye zametki TOGU*. 2021;12(2):66–69. URL: https://pnu.edu.ru/media/ejournal/articles-2021/TGU_12_71.pdf (accessed: 05.04.2023).

Поступила в редакцию 26.05.2023

Поступила после рецензирования 23.06.2023

Принята к публикации 27.06.2023

Об авторах:

Михаил Радикович Гимадеев, кандидат технических наук, доцент кафедры технологической информатики и информационных систем Тихоокеанского государственного университета (680035, РФ, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136), [ScopusID](#), [AuthorID](#), [ORCID](#), 009063@pnu.edu.ru, jl_wiegott@list.ru

Александр Васильевич Никитенко, кандидат технических наук, доцент кафедры технологической информатики и информационных систем Тихоокеанского государственного университета (680035, РФ, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136), [AuthorID](#), [ORCID](#), a.v.nikitenko@mail.ru

Вера Олеговна Беркун, инженер-конструктор ООО «ПромМаш» (680031, РФ, г. Хабаровск, ш. Матвеевское, 42 а, л 1), аспирант кафедры технологической информатики и информационных систем Тихоокеанского государственного университета (680035, РФ, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136), [AuthorID](#), [ORCID](#), vera.berkun.2017@gmail.com

Заявленный вклад соавторов:

М.Р. Гимадеев — формирование основной концепции исследования, определение системы уравнений, планирование эксперимента, критический анализ материалов, формулирование выводов.

А.В. Никитенко — решение задач исследования, проведение эксперимента, доработка текста, корректировка выводов.

В.О. Беркун — проведение эксперимента и расчетов, сбор и обработка материалов, анализ и дополнение текста.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 26.05.2023

Revised 23.06.2023

Accepted 27.06.2023

About the Authors:

Mikhail R. Gimadeev, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Technological Informatics and Information Systems Department, Pacific National University (136, Tihookeanskaya St., Khabarovsk, 680035, RF), [ScopusID](#), [AuthorID](#), [ORCID](#), 009063@pnu.edu.ru, jl_wiegott@list.ru

Aleksandr V. Nikitenko, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Technological Informatics and Information Systems Department, Pacific National University (136, Tihookeanskaya St., Khabarovsk, 680035, RF), [AuthorID](#), [ORCID](#), a.v.nikitenko@mail.ru

Vera O. Berkun, Design engineer, “PromMash” LLC (11, 42 a, R. Matveevskoe, Khabarovsk, 680031, RF), Postgraduate of the Technological Informatics and Information Systems Department, Pacific National University (136, Tihookeanskaya St., Khabarovsk, 680035, RF), [AuthorID](#), [ORCID](#), vera.berkun.2017@gmail.com

Claimed contributorship:

MR Gimadeev: basic research concept formulation, determination of the system of equations, experiment planning, critical analysis of materials, formulation of conclusions.

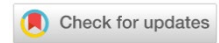
AV Nikitenko: solving research problems, conducting an experiment, finalizing the text, correcting conclusions.

VO Berkun: conducting experiments and calculations, collecting and processing materials, analyzing and supplementing text.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

МЕХАНИКА MECHANICS



УДК 625.7/.8

Научная статья

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-241-256>

Исследование характеристик динамического отклика дорожных конструкций при ускоренном тестировании

 Ни Гуанцунг¹ , А.Н. Тиратуриян² , Е.В. Углова² , А.В. Воробьев²
¹ Шаньдунский транспортный университет, г. Цзинань, провинция Шаньдун, Китайская Народная Республика² Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация tiraturjan@list.ru

Аннотация

Введение. Одним из главных трендов в области испытаний дорожных конструкций в последние годы стали натурные исследования их крупномасштабных моделей на установках ускоренного тестирования (ALF). Это позволяет значительно уменьшить затраты на выбор наиболее экономичных и долговечных конструкций дорожных одежд. Однако результаты, полученные на установках ALF, зачастую являются относительными, так как практически не увязываются с результатами лабораторных и полевых испытаний на реальных объектах. Поэтому целью данного исследования явилось комплексное изучение отклика дорожной конструкции на динамическую нагрузку, установление закономерностей усталостного разрушения асфальтобетонных слоев при испытаниях на ускоренное тестирование и при натуральных испытаниях на реальных объектах.

Материалы и методы. При проведении испытаний использовалась установка ускоренного тестирования, находящаяся в Шаньдунском транспортном университете. Полевые испытания проходили с применением установки динамического нагружения с падающим грузом FWD Primax 1500, которая осуществляет регистрацию чаши прогиба на поверхности обследуемой конструкции. Для регистрации динамического отклика в структуре дорожной конструкции использовался комплекс тензометрических датчиков, позволяющих отмечать как сжимающие напряжения, так и растягивающие деформации в различных слоях. Результаты, полученные в натуральных условиях, были сопоставлены с результатами, полученными на математической МКЭ-модели.

Результаты исследования. Результаты исследования показали, что толщина верхнего слоя основания является основным фактором, влияющим на величину вертикальной деформации дорожного покрытия, который необходимо учитывать на стадии проектирования конструкции дорожной одежды. При толщине верхнего слоя основания в 10 см вертикальная деформация — 100 мкм, а при толщине в 20 см — 55 мкм при условии обеспеченности общей равнопрочности конструкции. Количество циклов приложения нагрузки на установке ускоренного нагружения имеет минимальное влияние на отобранные образцы асфальтобетона при испытаниях прочности на раскол.

Обсуждение и заключение. Путем комплексного сопоставления данных численного моделирования и натуральных испытаний показана их тождественность результатам, полученным в ходе ускоренного тестирования дорожных конструкций, обоснована адекватность применяемых расчетных методик. Результаты исследования могут быть применены в дорожной отрасли для разработки и совершенствования нормативной базы при проектировании жестких дорожных одежд в условиях повышенных нагрузок и интенсивного движения транспорта.

Ключевые слова: асфальтобетонное покрытие, установки ускоренного тестирования, многослойное полупространство, напряженно-деформированное состояние, температурная корректировка, модель динамического отклика

Благодарности: авторы статьи выражают искреннюю благодарность сотрудникам дорожно-испытательной лаборатории Шаньдунского транспортного университета за содействие в выполнении исследований на установке ускоренного тестирования (ALF), а также уважаемым рецензентам за время и силы, затраченные на рассмотрение данной статьи.

Финансирование. Исследования проводились в рамках гранта президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук (заявка МК-242.2022.4).

Для цитирования. Гуанцунг Ни, Тиратурян А.Н., Углова Е.В., Воробьев А.В. Исследование характеристик динамического отклика дорожных конструкций при ускоренном тестировании. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(3):241–256. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-241-256>

Original article

Study on Dynamic Response Characteristics of Different Asphalt Pavement Structures Based on ALF Test

Ni Guangcong¹, Artem N. Tiraturyan², Evgeniya V. Uglova², Andrey V. Vorobev²

¹ ShanDong JiaoTong University, Jinan, China

² Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ tiraturjan@list.ru

Abstract

Introduction. In recent years, one of the main trends in the field of testing road structures has become field study of their large-scale models at the accelerated load facility (ALF). It can significantly reduce the cost of selecting the most economical and durable pavement designs. However, the results obtained on the ALF are often relative, since they practically do not correlate with the results of laboratory and field tests on real objects. This study is aimed at a comprehensive investigation of the response of a road structure to a dynamic load, the establishment of patterns of fatigue failure of asphalt concrete layers during the accelerated testing and full-scale tests on real objects.

Materials and Methods. During testing, an accelerated load facility was used, located on the territory of the ShanDong Transport University. When conducting field tests, a dynamic loading unit with a falling weight FWD Primax 1500 was used, which recorded the deflection bowl on the surface of the structure under study. To record the dynamic response in the arrangement of the road structure, a complex of strain gauge sensors was used, which made it possible to register both compressive stresses and tensile strains in different layers. The results obtained under natural conditions were compared to the results obtained on the mathematical FEM model.

Results. The research results have shown that the thickness of the lower coating layer is the main factor affecting the amount of vertical deformation of the pavement, which must be taken into account at the design stage of the pavement structure. Thus, with a thickness of the upper layer of the base of 10 cm, the vertical deformation was 100 μm, and with a thickness of 20 cm – 55 μm, provided that the overall strength of the structure was ensured. The number of load application cycles on the ALF had a minimal effect on the selected asphalt concrete samples during split tensile tests.

Discussion and Conclusion. The adequacy of the results obtained in the course of accelerated testing of road structures was shown through a comprehensive comparison of numerical simulation data and full-scale tests, and the adequacy of the applied calculation methods was validated. The results of the study can be further applied in the road industry to develop and improve the regulatory framework for the design of non-rigid pavement under conditions of increased loads and heavy traffic.

Keywords: asphalt concrete pavement, accelerated loading test, multilayered half-space, stress-strain, temperature correction, dynamic response model

Acknowledgements: the authors appreciate the staff of the Road-testing laboratory, ShanDong Transport University, for their assistance in carrying out research at the ALF installation, as well as the respected reviewers for the time and effort spent on reviewing this article.

Funding information. The research was carried out within the framework of a grant from President of the Russian Federation on State support for young Russian scientists — Candidates of science (application МК-242.2022.4).

For citation. Guangcong Ni, Tiraturyan AN, Uglova EV, Vorobev AV. Study on Dynamic Response Characteristics of Different Asphalt Pavement Structures Based on ALF Test. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(3):241–256. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-241-256>

Введение. Усталостные повреждения являются одной из основных форм повреждений эксплуатируемых асфальтобетонных покрытий [1, 2]. Как правило, они связаны со знакопеременным нагружением от интенсивного многоциклового воздействия транспортного потока. Этот вид разрушений характерен для автомобильных дорог всего мира и является одной из важнейших проблем, на решение которой направлено

внимание ученых-дорожников. Одним из приоритетных направлений современных исследований в области прогнозирования усталостного разрушения является испытание дорожных конструкций на установках ускоренного тестирования. Определенный вклад в решение этой проблемы внесли китайские ученые, проанализировавшие закон изменения модуля упругости асфальтобетонного слоя и его деформации в процессе ускоренного нагружения [3, 4]. Механизм разрушения и усталостные характеристики асфальтобетонной смеси в процессе эксплуатации исследованы в работе [5]. Ее авторами был получен поправочный коэффициент, учитывающий различие в механизмах деформирования дорожной конструкции при воздействии испытательной нагрузки на установках ускоренного тестирования и при реальных испытаниях в полевых условиях.

В целом нужно отметить, что, несмотря на достаточно эффективное моделирование проезда единичных нагрузок от транспортного потока, воспроизводимое на установках ускоренного тестирования, возникают сложности с моделированием распределения нагрузки по ширине проезжей части, условий окружающей среды, грунтово-геологических условий и прочего. Таким образом, результаты испытаний на установках ускоренного тестирования нельзя напрямую использовать для оценки усталостных характеристик фактического дорожного покрытия. Они требуют дополнительной валидации под реальные условия.

Авторы работ [6–8] изучили отклики дорожных конструкций на динамическое воздействие тестовой нагрузки, сравнили и проанализировали их изменения. Исследователями были применены методы, сочетающие визуальное наблюдение в реальном времени, инструментальные испытания на прогиб и сопротивление усталостным разрушениям в процессе нагружения, а также выполнены работы по установлению взаимосвязей между напряжениями, деформациями в структуре дорожной одежды и температурой различных конструкций дорожного покрытия.

Также необходимо отметить, что подобные исследования, помимо КНР, проводятся и в других странах, в том числе и в Российской Федерации, государствах Европы и США. Результаты активных исследований, направленных на сопоставление лабораторных режимов нагружения с режимами нагружения, соответствующими реальным дорожным условиям, были рассмотрены в работах [9–11]. Вместе с тем отсутствуют аналогичные сопоставления результатов полевых и лабораторных исследований с результатами, получаемыми на крупномасштабных моделях в условиях управляемого эксперимента. Результаты экспериментальных исследований в области прогнозирования усталостного разрушения асфальтобетонных слоев приводятся в работах [12–14]. В них комплексно рассмотрены вопросы определения эмпирических коэффициентов, необходимых для прогнозирования усталостного разрушения слоев асфальтобетона по данным полевых визуальных наблюдений, а также стандартные методы испытаний асфальтобетона на усталость при приложении четырехточечной нагрузки или при непрямом растяжении. Однако вопросы исследования на крупномасштабных моделях в них также не затрагиваются. Ряд работ касается непосредственно крупномасштабного моделирования, но для разных по своей конструкции дорожных одежд [15–17]. Сопоставление же равнопрочных конструкций с различными слоями и их толщинами является наиболее интересным с исследовательской точки зрения, так как оно позволит установить закономерности в процессах деформирования асфальтобетона, связанных с его усталостным разрушением.

Материалы и методы. Установка ускоренного тестирования. Установка ускоренного тестирования (ALF) находится на территории Транспортного университета г. Шаньдунь. Она представляет собой набор оборудования для комплексных испытаний дорожных конструкций (рис. 1). На текущий момент это один из методов моделирования, наиболее приближенных к реальным условиям воспроизведения движущейся транспортной нагрузки. ALF применяют для изучения характеристик асфальтобетонных покрытий при пластических деформациях, усталостном трещинообразовании и нисходящем трещинообразовании. На установках ALF можно регулировать нагрузку на ось и скорость ее движения, что обеспечивает наилучшее из всех видов испытательного оборудования соответствие реальным условиям деформирования.



Рис. 1. Установка для испытаний на ускоренную нагрузку [8]

Для изучения усталостной сопротивляемости асфальтобетонных смесей в процессе эксплуатации, дефектов дорожного покрытия в разных регионах были выбраны три типовые конструкции дорожных одежд для устройства на испытательной дороге. Тестовый участок дороги имеет длину 12 м, ширину 4 м. Конструкция дорожной одежды представляет собой рабочий слой грунта земляного полотна, укрепленного цементом, с покрытием из трех различных типов асфальтобетона: S1, S2 и S3 соответственно (рис. 2). Расчетная нагрузка, воспроизводимая системой ALF, представляет собой полусековую нагрузку, передаваемую через два колеса — BZZ-100. Диапазон воспроизводимой нагрузки составляет 80–200 кН, шаг нагрузки — 20 кН, интервал времени между приложениями нагрузки — 9 с.

4 м	4 м	4 м
←	←	←
5 см SMA-13		
5 см AC-20	10 см AC-20	15 см AC-20
20 см AC-25	15 см AC-25	10 см AC-25
Грунт, обработанный цементом 6 %		
Грунт, обработанный цементом 4 %		
Земляное полотно		

Рис. 2. Конструкция дорожной одежды на участке полевых испытаний

Для обеспечения мониторинга в режиме реального времени за динамическим откликом конструкции в процессе строительства тестового участка дороги был смонтирован набор оборудования из датчиков давления грунта, деформации и температуры, установленных параллельно и перпендикулярно направлению нагружения (рис. 3, 4). В нижней части монолитного асфальтобетонного слоя расположены четыре датчика горизонтальной и продольной деформации (рис. 5). Канал сбора данных соответствующего датчика и его местоположение указаны в таблице 1. Такая схема расстановки оборудования подтверждается мировым опытом мониторинга напряженно-деформированного состояния (НДС) дорожных конструкций и отражена в работах [18–19].



Рис. 3. Датчик для регистрации давления в грунте и на поверхности слоев основания [18]



Рис. 4. Датчик для регистрации относительной растягивающей деформации [18]

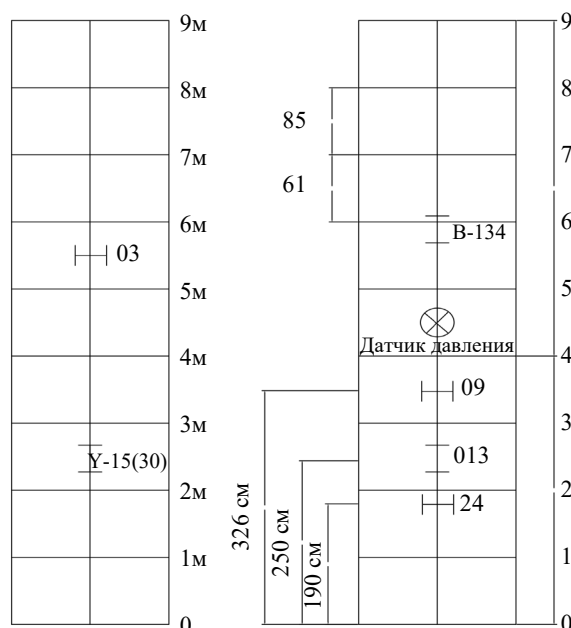


Рис. 5. Глубина заложения каждого датчика

Таблица 1

Номер датчика и его расположение

Номер	Модель	Расположение
W1	B-134	6,0 м
W2	013	2,5 м
W3	24	2,0 м
W4	09	3,2 м
W5	Y-15	2,5 м
W6	03	5,5 м
F1	Датчик давления грунта	4,5 м

Для регистрации динамического отклика на поверхности дорожной конструкции в дополнение к установке ALF использовалась установка динамического нагружения с падающим грузом FWD PRIMAX 1500. Эта установка представляет собой импульсный динамический измеритель перемещений поверхности покрытия, который позволяет определять историю перемещений на поверхности покрытия дорожной одежды при ударном воздействии посредством установленных датчиков геофонов (рис. 6). Исследования показали, что FWD можно использовать для определения модулей упругости слоев дорожных одежд во время испытания на установках ускоренного тестирования ALF [20]. В ходе исследований измерения установкой FWD проводились каждый раз по истечении 70 000 циклов на установке ALF. Схема проведения измерений показана на рис. 7.



Рис. 6. Установка ударного нагружения FWD [20]

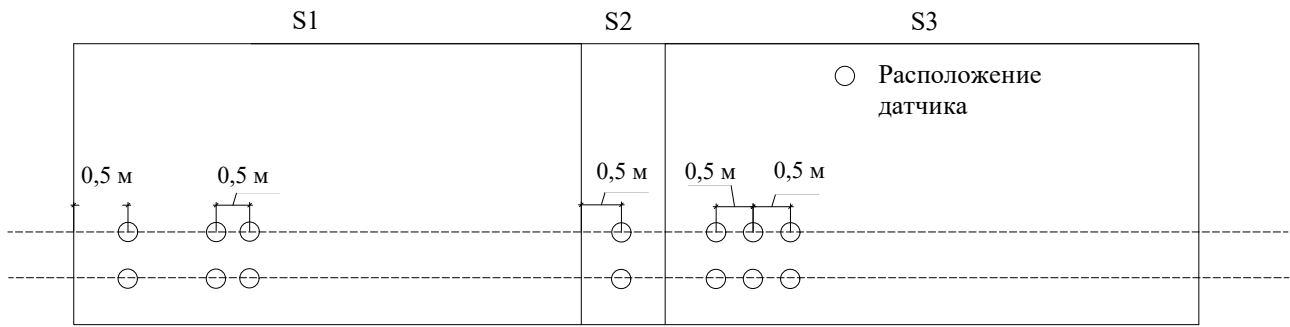


Рис. 7. Принципиальная схема проведения измерений установкой FWD

Испытания прочности на растяжение при расколе. Для получения сопоставимых результатов в рамках данного исследования были проведены лабораторные испытания на усталостную долговечность на установке тестирования асфальтобетона MTS [21–24] (рис. 8). Испытания проводились на образцах асфальтобетона, отобранных с участка проведения ускоренных испытаний в соответствии со стандартом КНР-JTG E20-2011¹. При испытании асфальтобетона на раскол температура составляла 15 °С, скорость нагружения — 50 мм/мин. Каждый вид асфальтобетонной смеси подвергался четырем параллельным испытаниям. При испытании на усталостную долговечность в условиях контролируемого напряжения форма сигнала представляла собой полусинусоиду с частотой 10 Гц. В качестве критерия разрушения принималось полное разрушение образца. Каждое испытание проводилось для трех уровней напряжения и трех образцов асфальтобетонной смеси.



Рис. 8. Установка системы тестирования материалов [21]

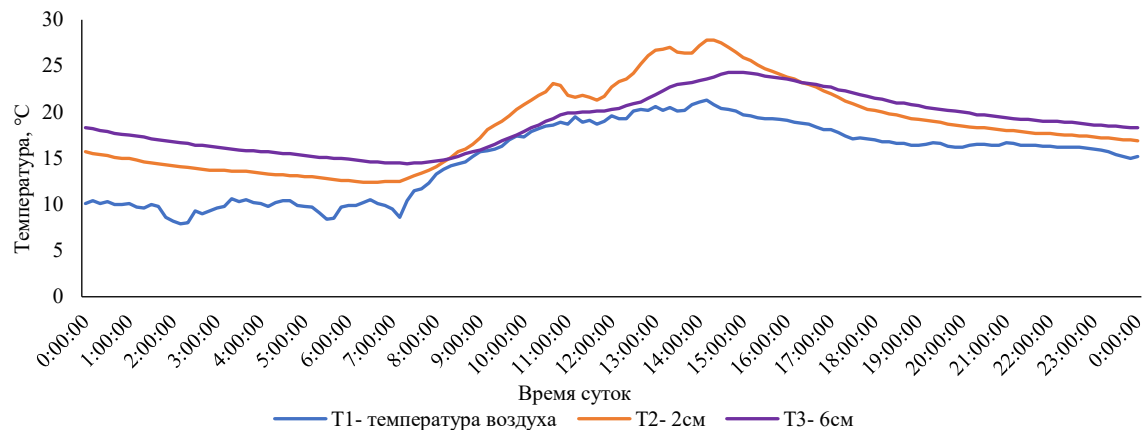


Рис. 9. Диаграмма изменения температуры асфальтобетонных слоев на разной глубине

¹ Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG E20-2011 «Test Regulations of Asphalt and Asphalt Mixture for Highway Engineering» JTG E20-2011 English PDF (JTGE20-2011). ([chinesestandard.net](http://www.chinesestandard.net)) [S].

Результаты исследования. Температурный режим функционирования дорожной конструкции на участке ускоренных испытаний. Датчики температуры были смонтированы в тестовых конструкциях дорожных одежд на глубине 0,2 и 6 см от поверхности покрытия дороги соответственно (рис. 9).

Автоматический сбор данных осуществлялся каждые 15 минут. На рис. 9 показана кривая изменения температуры на различной глубине конструкции дорожного покрытия. Видно, что температура здесь изменяется совместно с изменением температуры окружающей среды. Температура на глубине 2 см от поверхности покрытия практически в течение всего периода наблюдений выше температуры воздуха и температуры на глубине 6 см.

Анализ температуры, напряжений и деформаций в нижнем слое асфальтобетона. При проведении испытаний на установке ускоренного тестирования данные о растягивающих деформациях на нижней границе нижнего асфальтобетонного слоя собирались в течение каждого дня испытаний. Для обеспечения точности и достоверности данных о деформации ее регистрация проходила с использованием канала с частотой передачи 2 000 Гц и непрерывной записью отклика продолжительностью не менее трех минут, с возможностью параллельной фиксации информации о температуре.

Максимальное число циклов до появления усталостных трещин при испытании на установке ускоренного тестирования составило 420 000 приложений нагрузки. При этом было установлено, что температура оказывает наибольшее влияние на растягивающие деформации в диапазоне от 140 000 до 240 000 приложений, что видно по данным, представленным на рис. 10, 11.

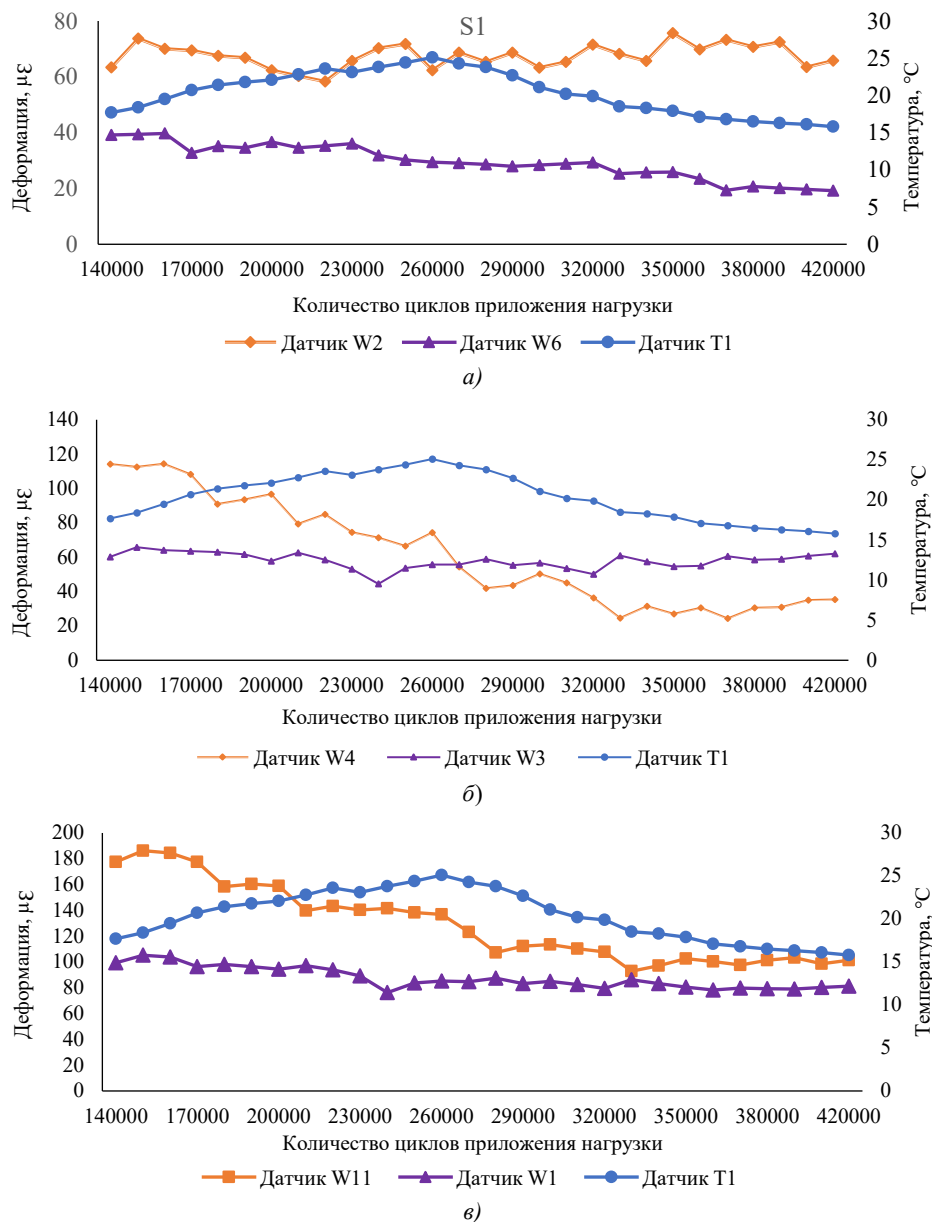


Рис. 10. Кривая изменения деформации в зависимости от температуры на нижней грани нижнего слоя покрытия и верхнего слоя покрытия при различном времени нагружения: а — конструкция S1; б — конструкция S2; в — конструкция S3

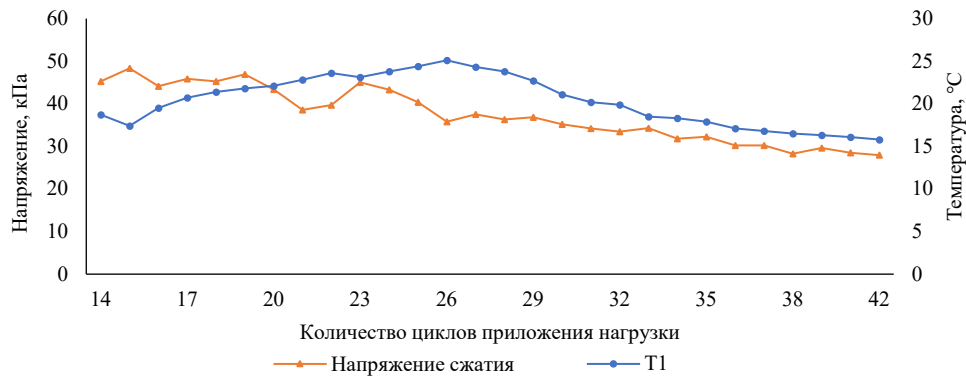


Рис. 11. Кривая изменения максимального значения напряжения в нижнем слое покрытия в зависимости от температуры при различном времени нагружения

Как видно на рис. 10 и рис. 11, деформация различных слоев дорожного покрытия изменяется в зависимости от температуры при разном времени нагружения: в конструкции S1 растягивающая деформация в нижней части верхнего слоя покрытия составляет 19,3–39,7 мк, а деформация на нижней границе нижнего слоя асфальтобетона колеблется от 58,3 до 75,6 мк. В конструкции S2 диапазон изменения деформации на нижней границе верхнего слоя покрытия составляет 42,5–64,8 мк, диапазон деформации нижнего слоя асфальтобетона — 59,2–115,37 мк. Деформации растяжения и сжатия на нижней границе нижнего слоя покрытия постепенно уменьшаются с увеличением времени нагружения и сильно зависят от температуры. Изменения на нижней грани нижнего слоя асфальтобетона не очевидны. В конструкции S3 диапазон изменения деформации в нижней части верхнего слоя покрытия составляет 76,2–105,2 мк, диапазон деформации на нижней грани нижнего слоя асфальтобетона составляет 92,8–186,2 мк. Деформация при растяжении нижнего слоя покрытия преимущественно не зависит от температуры.

Диапазон изменения сжимающего напряжения на верхней границе слоя основания составляет 30,2–48,3 кПа, по мере увеличения количества нагружений изменение сжимающего напряжения имеет высокую корреляцию с тенденцией изменения температуры.

Анализ результатов испытаний установкой ударного нагружения FWD. Установка FWD применялась, в первую очередь, для определения фактических значений модулей упругости слоев дорожной конструкции и их изменения в процессе тестирования установкой ускоренных испытаний ALF² в соответствии с методикой backcalculation [25].

Было проведено в общей сложности шесть испытаний установкой FWD. На каждой точке испытания замеры проводились по три раза при одной и той же нагрузке. Затем в качестве характерного перемещения было использовано среднее значение прогиба в центральной точке нагружения за последние два удара. Кривые изменения вертикального перемещения в точке приложения нагрузки в зависимости от числа циклов приложения нагрузки в ходе ускоренных испытаний показаны на рис. 12.

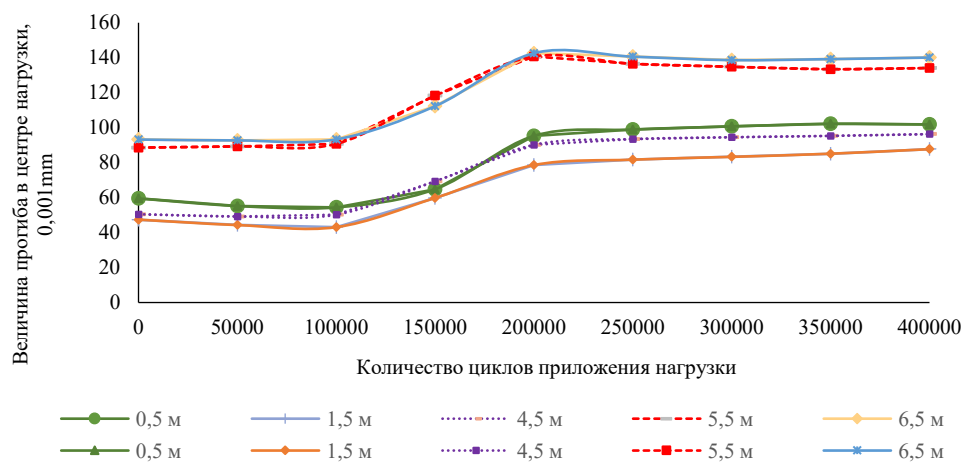


Рис. 12. Кривая отклонения различных конструкций дорожного покрытия в зависимости от времени нагрузки

² CAL/APT Contract Team. Test plan for CAL.APT Goal 3 Berkeley [D]. California: Department of transportation, and institute of transportation studies, University of California, 1997. (CALTRANS ACCELERATED PAVEMENT TEST (escholarship.org))

На рис. 12 показано, что величина прогиба в центре приложения нагрузки установкой FWD постепенно увеличивается с увеличением числа нагрузок. В зависимости от температуры и времени загрузки в течение первых 100 000 циклов нагрузки изменение величины прогиба незначительно. Наибольшее изменение величины вертикального перемещения отмечается в диапазоне от 100 000 до 200 000 приложений нагрузки. После 200 000 приложений нагрузки вертикальное перемещение стабилизируется. Поскольку на конструкцию дорожного покрытия воздействуют температура и время нагрузки, прочность конструкции дорожной одежды будет соответственно снижаться, а величина вертикального перемещения — увеличиваться.

Для проверки результатов определения модуля упругости асфальтобетонных слоев с использованием методики backcalculation, базирующейся на результатах испытания установкой динамического нагружения FWD, было проведено дополнительное лабораторное тестирование образцов асфальтобетона с целью определения их динамического модуля упругости³. Фактический динамический модуль упругости, как правило, приводится к стандартному значению, замеренному при температуре 20 °С по формуле 1:

$$E_{20} = E_T \cdot e^{-0,0722(20-T)}, \quad (1)$$

где E_{20} — обратно рассчитанный модуль асфальтобетонного слоя при 20 °С, МПа; E_T — обратно рассчитанный модуль упругости асфальтобетонного слоя при фактической температуре, МПа; T — температура, °С.

На рис. 13 представлены результаты определения модуля упругости асфальтобетонного слоя основания в зависимости от количества циклов нагрузки, воспроизведенных при ускоренном тестировании.

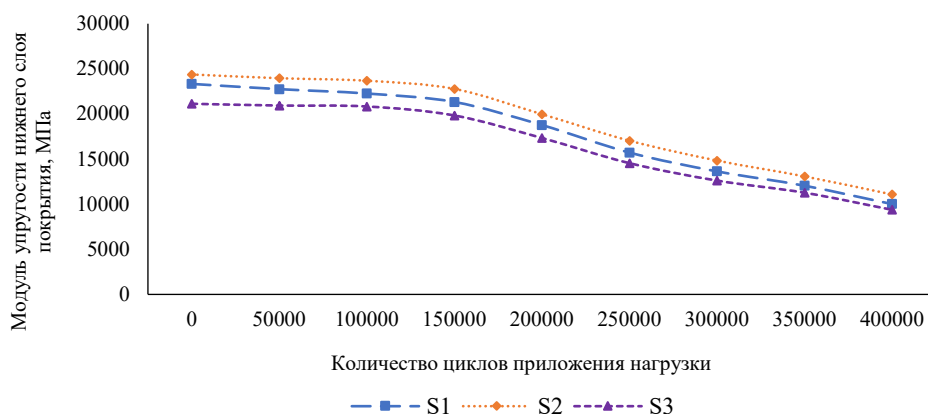


Рис. 13. Изменение динамического модуля упругости нижнего слоя асфальтобетона в зависимости от количества циклов нагружения

На рис. 13 видно, что по мере увеличения количества приложений нагрузки модуль нижнего слоя асфальтобетона различных конструкций дорожного покрытия имеет тенденцию к снижению. На начальном этапе испытания, 0–100 000 приложений нагрузки (нормативная суммарная расчетная нагрузка на ось 0–25,6 млн приложений), модуль упругости нижнего слоя асфальтобетона медленно уменьшается с увеличением количества приложений нагрузки (среднее снижение составляет 5,23 %). Когда количество приложений нагрузки превышает 100 000, скорость снижения модуля упругости нижнего слоя асфальтобетона значительно увеличивается. Модуль упругости нижнего слоя асфальтобетона всех конструкций уменьшается в среднем на 54,87 %.

Анализ испытаний прочности на растяжение при расколе. Как показали результаты испытаний на ускоренное тестирование, усталостные трещины начинают появляться примерно к 350 000 циклу приложения нагрузки. Когда нагрузка достигает 420 000 приложений, наблюдаются усталостные трещины на поверхностном слое асфальтобетона шириной раскрытия до 2 мм и испытание останавливают.

При отборе кернов в местах локализации трещин было установлено, что трещины, как правило, появляются на поверхности покрытия, а не проникают в слой. Большинство из них являются поперечными, проходящими через полосы наката колесной нагрузки, и только малая часть может быть отнесена к нисходящим усталостным трещинам. По результатам лабораторных испытаний образцов асфальтобетона, отобранных на участках ускоренного тестирования, были установлены зависимости прочности на раскол от числа циклов прикладываемой нагрузки.

На рис. 14 показано, что прочность на растяжение при расколе асфальтобетонных смесей в процессе эксплуатации, подвергнутых различному времени ускоренного нагружения, мало изменяется. В целом влияние ускоренного нагружения на прочность на растяжение при расколе асфальтобетонной смеси в процессе эксплуатации незначительно.

³ AASHTO TP 62-2007 Standard Method of Test for Determining the Percentage of Fracture in Coarse Aggregate [S].(D 5821 – 01 (kashanu.ac.ir))

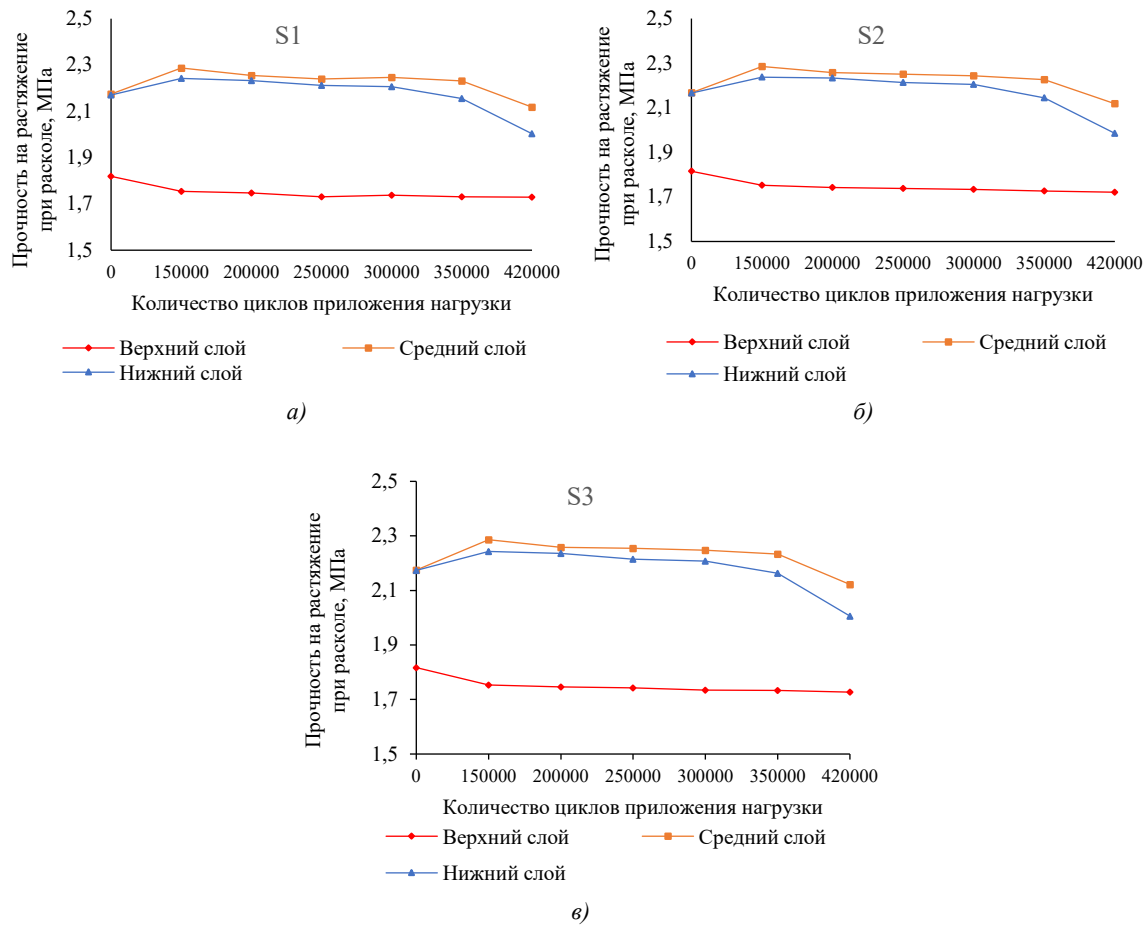


Рис. 14. Предел прочности при непрямом растяжении асфальтобетонных смесей в процессе эксплуатации:
а — конструкция S1; б — конструкция S2; в — конструкция S3

Определение расчетного количества циклов асфальтобетона до отказа. В завершении данного исследования в соответствии с нормативным документом КНР JTG D50-2017 «Технические условия на проектирование асфальтобетонного покрытия автомобильных дорог»⁴ и на основе данных, непосредственно полученных авторами данного исследования, с применением метода регрессионного анализа была получена зависимость (2) для прогнозирования предельного количества циклов до наступления усталостного разрушения. Для учета влияния толщины пакета слоев асфальтобетона с применением метода регрессионного анализа и на основе данных, полученных в ходе ускоренных испытаний, была определена зависимость для назначения поправочного коэффициента, представленная на рис. 15.

$$N_f = 0,265 \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{4,51} \left(\frac{1}{E} \right)^{1,42}, \quad (2)$$

$$N_f = C_1 \cdot N_{alf}, \quad (3)$$

где N_f — количество циклов нагружения на фактической конструкции дорожной одежды автомобильной дороги, циклы; N_{alf} — количество циклов нагружения на установке ускоренного тестирования ALF, циклы; ε_t — величина деформации при растяжении на нижней грани асфальтобетонного слоя, мке; E — модуль упругости асфальтобетонного слоя, МПа; C_1 — поправочный коэффициент между лабораторными значениями и значениями, полученными на полномасштабной испытательной установке ALF.

⁴ Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG D50-2017 « Specifications for Design of Highway Asphalt Pavement. Ministry of Transport» [S]. 2017. (JTG D50-2017 English PDF (JTGD50-2017) (chinesestandard.net)).

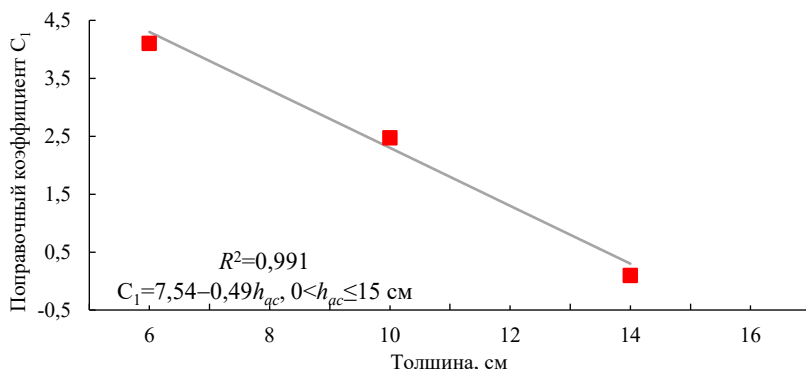


Рис. 15. Взаимосвязь между поправочным коэффициентом ALF и толщиной слоя асфальтобетона

Структура зависимости отвечает общему виду, полученному Asphalt institute [14]:

$$N_f = a \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)^b \left(\frac{1}{s} \right)^c, \quad (4)$$

где a , b , c — эмпирические коэффициенты, определяемые исходя из лабораторных или полевых испытаний; ε — предельная деформация, при которой проводятся испытания; s — параметр жесткости материала.

Анализ характеристик механического отклика. В JTG D50-2017 «Технические условия на проектирование асфальтобетонного покрытия автомобильных дорог» параметр усталостного трещинообразования нижнего слоя асфальтобетона является одним из расчетных показателей, принятых при проектировании. Из-за большей жесткости нижнего слоя асфальтобетона на его нижней границе концентрируются наибольшие растягивающие деформации, что подтверждается результатами, приведенными в данной статье. В рамках численного эксперимента в качестве примера рассматривается конструкция S3 как ключевая контрольная конструкция для расчета деформации при растяжении в нижней части асфальтобетонного покрытия. Расчетная схема дорожной одежды, принятая при моделировании, представлена на рис. 16.

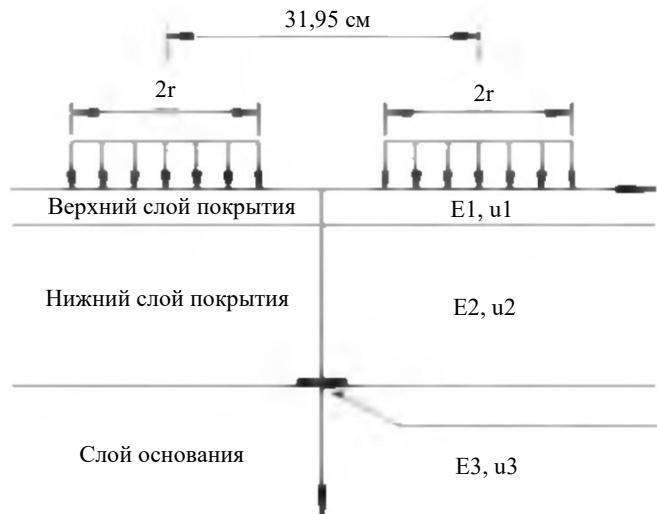


Рис. 16. Модель расчета механического отклика в соответствии с JTG D50-2017

Расчет отклика конструкции выполнен на конечно-элементной модели дорожной конструкции, при этом принята гипотеза о полном сцеплении между всеми конструктивными слоями дорожной одежды. Расчет осуществлен для спаренного колеса автотранспортного средства с нагрузкой на ось 200 кН и давлением 1,1 МПа [25–27]. При подстановке в математическую модель в качестве входных данных использовались модули упругости слоев дорожной одежды, рассчитанные по результатам испытаний установкой ударного нагружения FWD. Результаты сопоставления отклика дорожной конструкции, зарегистрированного при проведении ускоренных испытаний и рассчитанного по методу конечных элементов (МКЭ), приведены на рис. 17.

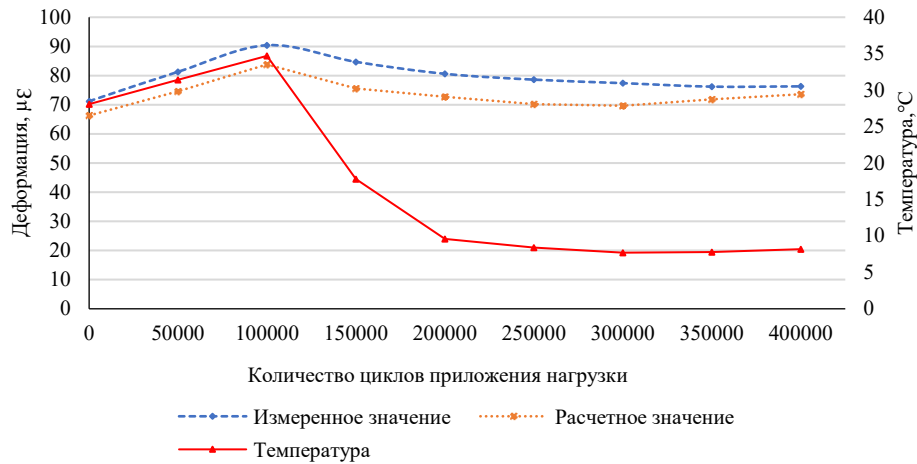


Рис. 17. Сравнение измеренных и рассчитанных значений отклика на деформацию нижнего слоя покрытия S3

Судя по данным на рис. 17, из-за влияния температуры окружающей среды и толщины нижнего слоя асфальтобетона расчетное значение деформации в нижней части немного меньше измеренного значения деформации. Однако это может быть объяснено рядом упрощений, принятых в математической модели. В целом результаты натурных испытаний и численного моделирования достаточно близки и характеризуются схожими тенденциями изменения, что свидетельствует об адекватности как постановки натурных испытаний, так и применяемых методов численного моделирования.

Обсуждение и заключение. Одним из основных результатов, представленных в данной статье и отличающихся от итогов ранее проведенных исследований [3–8, 14, 19, 20], является вывод о преобладающем влиянии толщины верхнего слоя основания на величину вертикальной упругой деформации, регистрируемой на поверхности дорожной конструкции, что подтверждается комплексом экспериментальных измерений с использованием установки динамического нагружения с падающим грузом FWD Primax 1500. В аналогичных работах отмечалось, что в наибольшей степени влияние на величину упругого прогиба на поверхности оказывает совокупное влияние толщины нижнего слоя покрытия и верхнего слоя основания.

Также в рамках данного исследования по итогам комплексного анализа результатов испытаний на установке ускоренного тестирования и численных экспериментов на основе известных моделей прогнозирования усталостных разрушений получены зависимости (2) и (3) для осуществления перехода и обеспечения сопоставимости данных результатов. Следует отметить, что коэффициенты, полученные в ходе данной работы для зависимости (2), отличаются от аналогичных известных нам значений, полученных на полигоне MnRoad [14] (рис. 18).

Коэффициент	Зависимость MnRoad	Зависимость, полученная авторами
a	0,314	0,265
b	3,291	4,510
c	0,854	1,420

Рис. 18. Коэффициенты зависимости MnRoad и полученные авторами

Отличия в коэффициентах в значительной степени обусловлены различиями в правилах подбора асфальтобетонных смесей, а также региональными условиями проведения испытаний. Также следует отметить, что данные коэффициенты несколько ужесточают классическую модель работоспособности, уменьшая прогнозный срок службы дорожных одежд, в сравнении с моделью MnRoad.

Несомненно, данные результаты получены для достаточно ограниченной выборки экспериментов и набора материалов по своим физико-механическим свойствам, соответствующих требованиям к асфальтобетонным смесям, используемым при возведении автомобильных дорог в КНР, и достаточно близким к смесям, применяемым в Российской Федерации. Вместе с тем видится перспективность использования полученных результатов, в дальнейшем работы по калибровке зависимости будут продолжены с учетом данных с тестовых участков эксплуатируемых автомобильных дорог в РФ и КНР.

В ходе лабораторных испытаний на прочность на раскол установлено, что прочность при раскалывании практически не зависит от количества циклов нагружения испытанных асфальтобетонов при проведении ускоренного тестирования.

Полученные результаты могут быть применены для дальнейшей разработки и усовершенствования нормативной базы дорожной отрасли, регламентирующей методы расчета и прогнозирования усталостного трещинообразования.

Список литературы

1. Ji Xiaoping, Zheng Nanxiang, Niu Sisheng, Meng Shutao, Xu Quanliang. Development of a Rutting Prediction Model for Asphalt Pavements with the Use of an Accelerated Loading Facility. *Road Materials and Pavement Design*. 2015;17(1):1–17. <https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1055337>
2. Insoo Yeo, Youngchan Suh, Sungho Mun. Development of Remaining Fatigue Life Model for Asphalt Black Base through Accelerated Pavement Testing. *Construction and Building Materials*. 2008;22(8):1881–1886. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.04.015>
3. Chen Shao Xing, Wei Xin Ren. Study Fatigue Performance Predict Model of Asphalt Layer Basement on Accelerated Loading Test. *Advanced Materials Research*. 2011;255–260:3238–3243. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.255-260.3238>
4. Zexin Ma, Li-Ping Liu, L.-J. Sun. Damage and Failure Performance of In-Service Asphalt Mixture Based on Accelerated Loading Test. *Journal of Jilin University*. 2019;49(2):384–391. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb20171109>
5. Shao Xing Chen, Wei Xin Ren. Study Fatigue Performance Predict Model of Asphalt Layer Basement on Accelerated Loading Test. *Advanced Materials Research*. 2011;255:3238–3243. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.255-260.3238>
6. TRB's National Cooperative Highway Research Program (NCHRP synthesis 433): Significant Findings from Full Scale Accelerated Pavement Testing. Washington, DC: The National Academies Press; 2012. <https://doi.org/10.17226/22699>
7. Timm D.H, Priest A.L, McEwen T.V. *Design and Instrumentation of the Structural Pavement Experiment at the NCAT Test Track*. Auburn AL: National Center for Asphalt Technology; 2004. 89 p. URL: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/38610> (accessed: 20.07.2023).
8. Ji Xiaoping, Zheng Nanxiang, Hou Yueqin, Niu Sisheng. Application of Asphalt Mixture Shear Strength to Evaluate Pavement Rutting with Accelerated Loading Facility (ALF). *Construction and Building Materials*. 2013;41:1–8. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.111>
9. Uglova E.V., Tiraturyan A.N., Lyapin A.A. Integrated Approach to Studying Characteristics of Dynamic Deformation on Flexible Pavement Surface Using Nondestructive Testing. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2016;(2):111–130. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2016.2.08>
10. Tiraturyan A.N., Uglova E.V. Assessment of Durability Indicators of Flexible Pavements on the Basis of the Mechanical-Statistical Method. *MATEC Web of Conferences*. 2018;196:01020. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819601020>
11. Углова Е.В., Тиратурян А.Н., Шилов О.А. Прогнозирование накопления усталостных разрушений в асфальтобетонных слоях жестких дорожных одежд. *Научный журнал строительства и архитектуры*. 2019; 55(3):52–61. <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.55.3.006>
12. Nithin Sudarsanan, Youngsoo Richard Kim. A Critical Review of the Fatigue Life Prediction of Asphalt Mixtures and Pavements. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2022;9(5):808–835. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.05.003>
13. Sohrab Zarei, Jian Ouyang, Yanqing Zhao. Evaluation of Fatigue Life of Semi-Flexible Pavement with Cement Asphalt Emulsion Pastes. *Construction and Building Materials*. 2022;349:128797. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061822024540> (accessed: 20.07.2023).
14. Tanquist B. Local Road Material Properties and Calibration for MnPAVE Summary Report. Saint Paul, MN: Minnesota Department of Transportation; 2008. 43 p. URL: <https://www.lrrb.org/media/reports/200856.pdf> (accessed: 20.07.2023).
15. Jian Zou, Roque R., Byron T. Effect of HMA Ageing and Potential Healing on Top-down Cracking Using HVS. *Road Materials and Pavement Design*. 2012;13(3):1–16. <https://doi.org/10.1080/14680629.2012.709177>
16. Zhen Liu, Xingyu Gu, Hua Ren, Zhou Zhou, Xiang Wang, Shi Tang. Analysis of the Dynamic Responses of Asphalt Pavement Based on Full-Scale Accelerated Testing and Finite Element Simulation. *Construction and Building Materials*. 2022; 325:126429. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126429>
17. Ze Jiao Dong, Sheng Long Li, Jia Yu Wen, Hong Chun Chen. Asphalt Pavement Structural Health Monitoring Utilizing FBG Sensors. *Advanced Engineering Forum*. 2012;5:339–344. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AEF.5.339>

18. Wei Lu, Kayser S., Wellner F. Impact of Surface Temperature on Fatigue Damage in Asphalt Pavement. *Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition)*. 2013;7(3):1–6. <https://doi.org/10.1061/JHTRCQ.0000324>
19. Lin Wang, Jincheng Wei, Wenjuan Wu, Xiaomeng Zhang, Xizhong Xu, Xiangpeng Yan. Technical Development and Long-Term Performance Observations of Long-Life Asphalt Pavement: A Case Study of Shandong Province. *Journal of Road Engineering*. 2022;2(4):369–389. <https://doi.org/10.1016/j.jreng.2022.11.001>
20. Jinting Wu, Fen Ye, Yinting Wu. Modulus Evolution of Asphalt Pavement Based on Full-Scale Accelerated Pavement Testing with Mobile Load Simulator. *International Journal of Pavement Engineering*. 2014;16(7):1–11. <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.943213>
21. Yong Pen, Lijun Sun, Yongjiu Shi. Factors Affecting the Splitting Strength of Asphalt Mixture. *Journal of Jilin University: Engineering Edition*. 2007;37(6):1304–1307. URL: https://www.researchgate.net/publication/290298136_Factors_affecting_splitting_strength_of_asphalt_mixture (accessed: 20.07.2023).
22. Lu Xue-yuan, Sun Li-jun. Factors Affecting Splitting Strength for AC-13 Modified Asphalt Mixture and Marshall Performance Standard Correlation. *Journal of Jilin University: Engineering Edition*. 2010;40(03):676–682. URL: <http://xuebao.jlu.edu.cn/gxb/EN/abstract/abstract10100.shtml> (accessed: 20.07.2023).
23. Yong Chun Qin, Sui Yuan Wang, Wei Zeng, Xiao Pei Shi, Jian Xu, Song Chang Huang. The Effect of Asphalt Binder Aging on Fatigue Performance of Evotherm WMA. *Advanced Materials Research*. 2012;535–537:1686–1692. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.535-537.1686>
24. Castro M, Sánchez J.A. Estimation of Asphalt Concrete Fatigue Curves – A Damage Theory Approach. *Construction and Building Materials*. 2008;22(6):1232–1238.
25. Uglova E.V., Tiraturyan A.N. Interlayer Bond Evaluation in the Flexible Pavement Structures Using a Nondestructive Testing Method. *Procedia Engineering*. 2016;150:1791–1796. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.172>
26. Nazarian S., Alvarado G. Impact of Temperature Gradient on Modulus of Asphaltic Concrete Layers. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2006;18(4):492–499. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2006\)18:4\(492\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:4(492))
27. Shuhua Wu, Huaxin Chen, Jiupeng Zhang, Zhonghua Zhang. Effects of Interlayer Bonding Conditions between Semi-Rigid Base Layer and Asphalt Layer on Mechanical Responses of Asphalt Pavement Structure. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2017;10(3):274–281. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.02.003>

References

1. Ji Xiaoping, Zheng Nanxiang, Niu Sisheng, Meng Shutao, Xu Quanliang. Development of a Rutting Prediction Model for Asphalt Pavements with the Use of an Accelerated Loading Facility. *Road Materials and Pavement Design*. 2015;17(1):1–17. <https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1055337>
2. Insoo Yeo, Youngchan Suh, Sungho Mun. Development of Remaining Fatigue Life Model for Asphalt Black Base through Accelerated Pavement Testing. *Construction and Building Materials*. 2008;22(8):1881–1886. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.04.015>
3. Chen Shao Xing, Wei Xin Ren. Study Fatigue Performance Predict Model of Asphalt Layer Basement on Accelerated Loading Test. *Advanced Materials Research*. 2011;255–260:3238–3243. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.255-260.3238>
4. Zexin Ma, Li-Ping Liu, L-J Sun. Damage and Failure Performance of In-Service Asphalt Mixture Based on Accelerated Loading Test. *Journal of Jilin University*. 2019;49(2):384–391. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb20171109>
5. Shao Xing Chen, Wei Xin Ren. Study Fatigue Performance Predict Model of Asphalt Layer Basement on Accelerated Loading Test. *Advanced Materials Research*. 2011;255:3238–3243. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.255-260.3238>
6. TRB's National Cooperative Highway Research Program (NCHRP synthesis 433): *Significant Findings from Full Scale Accelerated Pavement Testing*. Washington, DC: The National Academies Press; 2012. <https://doi.org/10.17226/22699>
7. Timm DH, Priest AL, McEwen TV. *Design and Instrumentation of the Structural Pavement Experiment at the NCAT Test Track*. Auburn AL: National Center for Asphalt Technology; 2004. 89 p. URL: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/38610> (accessed: 20.07.2023).
8. Ji Xiaoping, Zheng Nanxiang, Hou Yueqin, Niu Sisheng. Application of Asphalt Mixture Shear Strength to Evaluate Pavement Rutting with Accelerated Loading Facility (ALF). *Construction and Building Materials*. 2013;41:1–8. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.111>

9. Uglova E.V., Tiraturyan A.N., Lyapin A.A. Integrated Approach to Studying Characteristics of Dynamic Deformation on Flexible Pavement Surface Using Nondestructive Testing. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2016;(2):111–130. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2016.2.08>
10. Tiraturyan AN, Uglova EV. Assessment of Durability Indicators of Flexible Pavements on the Basis of the Mechanical-Statistical Method. *MATEC Web of Conferences*. 2018;196:01020. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201819601020>
11. Uglova EV, Tiraturyan AN, Shilo OA. Prediction of Failure Fatigue Accumulation in Asphalt Concrete Layers of Flexible Pavements. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2019;55(3):52–61. <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.55.3.006>
12. Nithin Sudarsanan, Youngsoo Richard Kim. A Critical Review of the Fatigue Life Prediction of Asphalt Mixtures and Pavements. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2022;9(5):808–835. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.05.003>
13. Sohrab Zarei, Jian Ouyang, Yanqing Zhao. Evaluation of Fatigue Life of Semi-Flexible Pavement with Cement Asphalt Emulsion Pastes. *Construction and Building Materials*. 2022;349:128797. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061822024540> (accessed: 22.07.2023).
14. Tanquist B. *Local Road Material Properties and Calibration for MnPAVE Summary Report*. Saint Paul, MN: Minnesota Department of Transportation; 2008. 43 p. URL: <https://www.lrrb.org/media/reports/200856.pdf> (accessed: 20.07.2023)
15. Jian Zou, Roque R, Byron T. Effect of HMA Ageing and Potential Healing on Top-down Cracking Using HVS. *Road Materials and Pavement Design*. 2012;13(3):1–16. <https://doi.org/10.1080/14680629.2012.709177>
16. Zhen Liu, Xingyu Gu, Hua Ren, Zhou Zhou, Xiang Wang, Shi Tang. Analysis of the Dynamic Responses of Asphalt Pavement Based on Full-Scale Accelerated Testing and Finite Element Simulation. *Construction and Building Materials*. 2022; 325:126429. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126429>
17. Ze Jiao Dong, Sheng Long Li, Jia Yu Wen, Hong Chun Chen. Asphalt Pavement Structural Health Monitoring Utilizing FBG Sensors. *Advanced Engineering Forum*. 2012;5:339–344. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AEF.5.339>
18. Wei Lu, Kayser S, Wellner F. Impact of Surface Temperature on Fatigue Damage in Asphalt Pavement. *Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition)*. 2013;7(3):1–6. <https://doi.org/10.1061/JHTRCQ.0000324>
19. Lin Wang, Jincheng Wei, Wenjuan Wu, Xiaomeng Zhang, Xizhong Xu, Xiangpeng Yan. Technical Development and Long-Term Performance Observations of Long-Life Asphalt Pavement: A Case Study of Shandong Province. *Journal of Road Engineering*. 2022;2(4):369–389. <https://doi.org/10.1016/j.jreng.2022.11.001>
20. Jinting Wu, Fen Ye, Yinting Wu. Modulus Evolution of Asphalt Pavement Based on Full-Scale Accelerated Pavement Testing with Mobile Load Simulator. *International Journal of Pavement Engineering*. 2014;16(7):1–11. <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.943213>
21. Yong Pen, Lijun Sun, Yongjiu Shi. Factors Affecting the Splitting Strength of Asphalt Mixture. *Journal of Jilin University: Engineering Edition*. 2007;37(6):1304–1307. URL: https://www.researchgate.net/publication/290298136_Factors_affecting_splitting_strength_of_asphalt_mixture (accessed: 20.07.2023).
22. Lu Xue-yuan, Sun Li-jun. Factors Affecting Splitting Strength for AC-13 Modified Asphalt Mixture and Marshall Performance Standard Correlation. *Journal of Jilin University: Engineering Edition*. 2010;40(03):676–682. URL: <http://xuebao.jlu.edu.cn/gxb/EN/abstract/abstract10100.shtml> (accessed: 20.07.2023).
23. Yong Chun Qin, Sui Yuan Wang, Wei Zeng, Xiao Pei Shi, Jian Xu, Song Chang Huang. The Effect of Asphalt Binder Aging on Fatigue Performance of Evotherm WMA. *Advanced Materials Research*. 2012;535-537:1686–1692. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.535-537.1686>
24. Castro M, Sánchez JA. Estimation of Asphalt Concrete Fatigue Curves – A Damage Theory Approach. *Construction and Building Materials*. 2008;22(6):1232–1238.
25. Uglova EV, Tiraturyan AN. Interlayer Bond Evaluation in the Flexible Pavement Structures Using a Nondestructive Testing Method. *Procedia Engineering*. 2016;150:1791–1796. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.172>
26. Nazarian S, Alvarado G. Impact of Temperature Gradient on Modulus of Asphaltic Concrete Layers. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2006;18(4):492–499. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2006\)18:4\(492\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:4(492))
27. Shuhua Wu, Huaxin Chen, Jiupeng Zhang, Zhonghua Zhang. Effects of Interlayer Bonding Conditions between Semi-Rigid Base Layer and Asphalt Layer on Mechanical Responses of Asphalt Pavement Structure. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2017;10(3):274–281. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.02.003>

Поступила в редакцию 01.08.2023

Поступила после рецензирования 14.08.2023

Принята к публикации 18.08.2023

Об авторах:

Ни Гуанцунг, инженер кафедры гражданского строительства и архитектуры Шаньдунского транспортного университета (КНР, провинция Шаньдун, г. Цзинань), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ORCID](#), ngc931123@163.com

Артем Николаевич Тиратурян, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автомобильных дорог Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [AuthorID](#), [ORCID](#), tiraturjan@list.ru

Евгения Владимировна Углова, доктор технических наук, профессор кафедры автомобильных дорог Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [AuthorID](#), [ORCID](#), uglova.ev@yandex.ru

Андрей Викторович Воробьев, инженер кафедры автомобильных дорог Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ResearcherID](#), [ORCID](#), andreyvorobyev19@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Ни Гуанцунг — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов.

А.Н. Тиратурян — научное руководство, анализ результатов исследований, формирование выводов.

Е.В. Углова — научное руководство, анализ результатов исследований, корректировка выводов.

А.В. Воробьев — подготовка и доработка текста, формирование выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 01.08.2023

Revised 14.08.2023

Accepted 18.08.2023

About the Authors:

Ni Guangcong, Engineer of the Department of Civil Engineering and Architecture, Shan Dong JiaoTong University (5001, Haitang Road, Jinan City, Shandong Province, 250023, China), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ORCID](#), ngc931123@163.com

Artem N. Tiraturyan, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Motorways Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [AuthorID](#), [ORCID](#), tiraturjan@list.ru

Evgeniya V. Uglova, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Motorways Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [AuthorID](#), [ORCID](#), uglova.ev@yandex.ru

Andrey V. Vorobev, Engineer of the Motorways Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), [ResearcherID](#), [ORCID](#), andreyvorobyev19@mail.ru

Claimed contributorship:

Ni Guangcong: basic concept formulation, research objectives and tasks computational analysis.

AN Tiraturyan: academic advising, analysis of research results, formulation of conclusions.

EV Uglova: academic advising, analysis of research results, correction of the conclusions.

AV Vorobev: preparation and revision of the text, formulation of conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

МЕХАНИКА MECHANICS



УДК 624.04

Научная статья

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-257-268>

Выпучивание прямоугольных пластин при нелинейной ползучести

С.Б. Языев , А.С. Чепурненко

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

anton_chepurnenk@mail.ru

Аннотация

Введение. Задача анализа устойчивости пластин и оболочек в условиях ползучести актуальна для элементов конструкций из материалов, обладающих свойством старения, находящихся под действием длительных нагрузок, поскольку потеря устойчивости может происходить резко и задолго до исчерпания прочностного ресурса материала. Вопросы совместного учета геометрической нелинейности и ползучести в задачах выпучивания пластин в настоящее время остаются слабо изученными, существующие программные комплексы не позволяют выполнить такой расчёт. Целью настоящей работы выступает разработка алгоритма расчета на устойчивость прямоугольных пластинок с начальной погибью, испытывающих действие нагрузок в срединной плоскости с учетом геометрической нелинейности и ползучести.

Материалы и методы. При получении разрешающих уравнений в основу положены геометрические и статические уравнения теории гибких упругих пластин. Физические уравнения выводятся из предположения, что полные деформации равны сумме упругих деформаций и деформаций ползучести. Окончательно задача была сведена к системе из двух дифференциальных уравнений, в которых в качестве искомых функций выступают функция напряжений и прогиба. Решение полученной системы уравнений выполнялось численно с помощью метода конечных разностей в сочетании с методом последовательных приближений и методом Эйлера. В качестве граничных условий для функции напряжений используется рамная аналогия, как в случае плоской задачи теории упругости.

Результаты исследования. В рамках поставленной цели разработан алгоритм расчета и представлено решение задачи для пластины, сжимаемой в одном направлении равномерно распределенной нагрузкой. Исследован характер роста перемещений при различной величине нагрузки и начальной погиби. Установлено, что при достижении вертикальными перемещениями величин, соизмеримых с толщиной пластинки, скорость их роста начинает затухать даже при нагрузке больше длительной критической.

Обсуждение и заключение. Результаты анализа устойчивости с использованием разработанного алгоритма показывают, что рост прогиба пластины при рассмотренных граничных условиях ограничен, потеря устойчивости не наблюдается при любых значениях нагрузки, не превосходящих мгновенную критическую. Это говорит о возможности длительной безопасной эксплуатации таких конструкций при нагрузке менее мгновенной критической.

Ключевые слова: устойчивость, ползучесть, пластина, геометрическая нелинейность, физическая нелинейность, начальные несовершенства, метод конечных разностей

Благодарности: авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Языев С.Б., Чепурненко А.С. Выпучивание прямоугольных пластин при нелинейной ползучести. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(3):257–268. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-257-268>

Buckling of Rectangular Plates under Nonlinear Creep

Serdar B. Yazyev , Anton S. Chepurnenko  

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

 anton_chepurnenk@mail.ru

Abstract

Introduction. The task of analyzing the stability of plates and shells under creep conditions is critical for structural elements made of materials with the property of aging, which are under the action of long-term loads, since the loss of stability can occur abruptly and long before the exhaustion of the strength resource of the material. Currently, the issues of joint consideration of geometric nonlinearity and creep in the problems of buckling plates remain poorly studied, existing software systems do not provide such calculations. The objective of this work is to develop an algorithm for calculating the stability of rectangular plates with initial deflection, which are subjected to loads in the middle plane, taking into account geometric nonlinearity and creep.

Materials and Methods. When obtaining the resolving equations, the geometric and static equations of the theory of flexible elastic plates were taken as the basis. Physical equations were derived from the assumption that total strains were equal to the sum of elastic strains and creep deformations. Finally, the problem was reduced to a system of two differential equations, in which the desired functions were the stress and deflection functions. The resulting system of equations was solved numerically using the finite-difference method in combination with the method of successive approximations and the Euler method. As the boundary conditions for the stress function, the frame analogy was used, as in the case of a plane problem of elasticity theory.

Results. The solution to the problem for a plate compressed in one direction by a uniformly distributed load has been presented. The nature of the growth of displacements at different load rates and initial deflection was studied. It has been established that when the vertical displacements reach values comparable to the thickness of the plate, their growth rate begins to decay even at a load greater than the long-term critical one.

Discussion and Conclusion. The results of stability analysis using the developed algorithm show that the growth of plate deflection under the considered boundary conditions is limited, stability loss is not observed at any load values not exceeding the instantaneous critical one. This indicates the possibility of long-term safe operation of such structures with a load less than instant critical one.

Keywords: stability, creep, plate, geometric nonlinearity, physical nonlinearity, initial imperfections, finite-difference method

Acknowledgements: the authors would like to thank the editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved the quality of the article.

For citation. Yazyev SB, Chepurnenko AS. Buckling of Rectangular Plates under Nonlinear Creep. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(3):257–268. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-257-268>

Введение. Анализу устойчивости тонкостенных конструкций в виде пластин и оболочек уделяется большое внимание, поскольку такие конструкции широко используются в строительстве и других областях техники [1–3]. Одной из актуальных задач в области расчета пластин и оболочек является анализ их напряженно-деформированного состояния в условиях ползучести, что подтверждается значительным числом работ, опубликованных в последнее время по данной проблеме в отечественных и зарубежных источниках. Так, в работах [4–8] исследуются вопросы выпучивания при ползучести композитных тонкостенных конструкций. В статье [9] рассматривается задача устойчивости функционально-градиентных пластин с учетом зависимости свойств материала от температуры. В работе [10] в задаче выпучивания композитных пластин применены методы стохастического анализа. В статьях [11–17] изложены вопросы устойчивости вязкоупругих пластин и оболочек при воздействии динамической и следящей нагрузки, а в статье [18] рассматриваются пластины средней толщины с учетом зависимости свойств материала от времени. Возникающие при решении указанных задач математические трудности приводят к тому, что многие исследователи ограничиваются линейными законами вязкоупругого деформирования или рассматривают случай установившейся ползучести. Большие возможности в задачах расчета пластин и оболочек с учетом ползучести открывает метод конечных элементов. Однако в современные расчетные комплексы, такие как ANSYS, Abaqus, ЛИРА и др., заложен ограниченный набор реологических моделей, применимых для конкретных материалов в фиксированном диапазоне напряжений и температур. Существует необходимость в альтернативных методах расчета, подходящих для произвольных законов вязкоупругого деформирования, в том числе нелинейных.

Целью настоящей работы явилось построение системы разрешающих уравнений для задачи выпучивания пластин прямоугольной формы с нелинейными вязкоупругими свойствами при действии усилий в срединной плоскости, с учетом больших перемещений, а также алгоритма ее решения. Отметим, что проблема устойчивости элементов конструкций с учетом ползучести не может быть решена, как проблема чистой устойчивости. Ее решение требует наличия возмущений в виде начальных неперпендикулярностей. Обычно начальные несовершенства задаются в виде начальной погиби или эксцентриситетов приложения нагрузок.

Материалы и методы. Методику расчета рассмотрим на примере пластинки с начальной погибью $w_0(x, y)$, имеющей шарнирное опирание по контуру и сжимаемой в направлении оси x распределенной нагрузкой p [кН/м] (рис. 1).

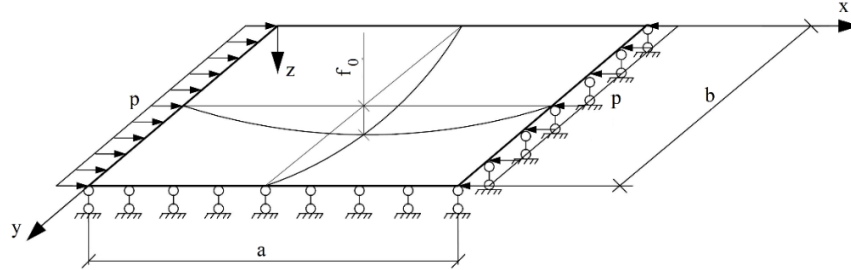


Рис. 1. Расчетная схема

В рассматриваемом случае при наличии ползучести, если сравнивать с теорией упругих гибких пластин, отличие будет проявляться только в форме физических уравнений. Полные деформации могут быть представлены в виде суммы деформаций срединной плоскости (переходящей в поверхность) и изгибных деформаций, которые вызваны изменением показателей кривизны срединной поверхности:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_x^0 - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}; \varepsilon_y = \varepsilon_y^0 - z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}; \gamma_{xy} = \gamma^0 - 2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}, \quad (1)$$

где ε_x и ε_y — полные линейные деформации; γ_{xy} — полные угловые деформации; ε_x^0 и ε_y^0 — линейные деформации срединной поверхности; γ^0 — угловые деформации срединной поверхности.

Для деформаций срединной поверхности может быть записано уравнение неразрывности деформаций [19]:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x^0}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y^0}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \gamma^0}{\partial x \partial y} = \left(\frac{\partial^2 (w + w_0)}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 (w + w_0)}{\partial x^2} \frac{\partial^2 (w + w_0)}{\partial y^2} - \left[\left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \right]. \quad (2)$$

Для материалов с вязкоупругими свойствами полные деформации можно представить в виде:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu \sigma_y) + \varepsilon_x^*; \varepsilon_y = \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu \sigma_x) + \varepsilon_y^*; \gamma_{xy} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xy} + \gamma_{xy}^*, \quad (3)$$

где $\varepsilon_x^*, \varepsilon_y^*, \gamma_{xy}^*$ — деформации ползучести; E — модуль упругости; ν — коэффициент Пуассона; $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ — величины компонентов напряжений по соответствующим направлениям.

Выразив в (3) компоненты напряжений через деформации, запишем физические соотношения в обратной форме:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_x + \nu \varepsilon_y - (\varepsilon_x^* + \nu \varepsilon_y^*)); \sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_y + \nu \varepsilon_x - (\varepsilon_y^* + \nu \varepsilon_x^*)); \tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)} (\gamma_{xy} - \gamma_{xy}^*). \quad (4)$$

Связь внутренних силовых факторов с напряжениями определяется интегральными соотношениями:

$$N_x = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x dz; N_y = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y dz; S = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy} dz; M_x = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x z dz; M_y = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y z dz; H = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy} z dz, \quad (5)$$

где N_x и N_y — погонные продольные силы; S — погонные сдвигающие силы; M_x и M_y — погонные изгибающие моменты; H — погонные крутящие моменты; h — толщина пластинки.

Далее подставим (1) в (4), а также (4) в (5). В итоге получим:

$$N_x = \frac{Eh}{1-\nu^2} (\varepsilon_x^0 + \nu \varepsilon_y^0) - N_x^*; N_y = \frac{Eh}{1-\nu^2} (\varepsilon_y^0 + \nu \varepsilon_x^0) - N_y^*; S = \frac{Eh}{2(1+\nu)} \gamma^0 - S^*; \\ M_x = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) - M_x^*; M_y = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) - M_y^*; H = -D(1-\nu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} - H^*, \quad (6)$$

где $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ — цилиндрическая жесткость пластинки, $N_x^* = \frac{E}{1-\nu^2} \int_{-h/2}^{h/2} (\varepsilon_x^* + \nu \varepsilon_y^*) dz$,

$$N_y^* = \frac{E}{1-\nu^2} \int_{-h/2}^{h/2} (\varepsilon_y^* + \nu \varepsilon_x^*) dz, S^* = \frac{E}{2(1+\nu)} \int_{-h/2}^{h/2} \gamma_{xy}^* dz,$$

$$M_x^* = \frac{E}{1-\nu^2} \int_{-h/2}^{h/2} (\varepsilon_x^* + \nu \varepsilon_y^*) z dz, M_y^* = \frac{E}{1-\nu^2} \int_{-h/2}^{h/2} (\varepsilon_y^* + \nu \varepsilon_x^*) z dz, H^* = \frac{E}{2(1+\nu)} \int_{-h/2}^{h/2} \gamma_{xy}^* z dz.$$

Величины $N_x^*, N_y^*, S^*, M_x^*, M_y^*, H^*$ имеют размерность внутренних усилий и определяют вклад деформаций ползучести в перераспределение усилий.

Статические уравнения теории гибких пластин имеют вид [19]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial y} &= 0; \frac{\partial S}{\partial x} + \frac{\partial N_y}{\partial y} = 0; \\ \frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 H}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} + N_x \frac{\partial^2 (w + w_0)}{\partial x^2} + N_y \frac{\partial^2 (w + w_0)}{\partial y^2} + 2S \frac{\partial^2 (w + w_0)}{\partial x \partial y} + q &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь q — нормальная нагрузка по поверхности пластины, которая в данной задаче равна нулю.

Удовлетворить первым двум статическим уравнениям можно при помощи функции напряжений Эри, введенной по формулам:

$$N_x = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2}; N_y = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2}; S = -\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y}. \quad (8)$$

После подстановки последних трех равенств из (6) в последнее статическое уравнение в (7) и с учетом (8), получим первое разрешающее уравнение:

$$D \nabla^4 w = q + q^* + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} \frac{\partial^2 (w + w_0)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} \frac{\partial^2 (w + w_0)}{\partial x^2} - 2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 (w + w_0)}{\partial x \partial y}, \quad (9)$$

$$\text{где } q^* = -\left(\frac{\partial^2 M_x^*}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 H^*}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y^*}{\partial y^2} \right).$$

Чтобы получить второе разрешающее уравнение, необходимо выразить из (6) деформации срединной поверхности:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x^0 &= \frac{N_x - \nu N_y + N_x^* - \nu N_y^*}{Eh} = \frac{1}{Eh} \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} - \nu \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + N_x^* - \nu N_y^* \right); \\ \varepsilon_y^0 &= \frac{N_y - \nu N_x + N_y^* - \nu N_x^*}{Eh} = \frac{1}{Eh} \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} - \nu \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + N_y^* - \nu N_x^* \right); \\ \gamma^0 &= \frac{2(1+\nu)}{Eh} (S + S^*) = \frac{2(1+\nu)}{Eh} \left(-\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y} + S^* \right). \end{aligned} \quad (10)$$

Подставив (10) в (2), получим:

$$\begin{aligned} \frac{1}{Eh} \nabla^4 \Phi &= \left(\frac{\partial^2 (w + w_0)}{\partial x \partial y} \right)^2 - \left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 (w + w_0)}{\partial x^2} \frac{\partial^2 (w + w_0)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} + \frac{1}{Eh} (2(1+\nu) \frac{\partial^2 S^*}{\partial x \partial y} + \\ &+ \nu \left(\frac{\partial^2 N_x^*}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N_y^*}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial^2 N_x^*}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 N_y^*}{\partial x^2}). \end{aligned} \quad (11)$$

Таким образом, для рассматриваемой задачи получена система разрешающих уравнений из двух дифференциальных уравнений четвертого порядка (9) и (11). Уравнения (9) и (11) являются нелинейными. В полученных уравнениях величины Φ и w представляют собой функции координат x, y , а также времени t . В явном виде в данных уравнениях время отсутствует, зависимость от времени закладывается в деформации ползучести $\varepsilon_x^*, \varepsilon_y^*, \gamma_{xy}^*$, которые учитываются введением интегральных величин $N_x^*, N_y^*, S^*, M_x^*, M_y^*, H^*$.

Для изображенной на рис. 1 расчетной схемы граничные условия записываются в виде:

$$\begin{aligned} \text{при } x = 0, x = a: N_x &= \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = -p; S = -\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y} = 0; w = 0; M_x = 0; \\ \text{при } y = 0, y = b: N_y &= \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} = 0; S = -\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y} = 0; w = 0; M_y = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Уравнение (11) при малых перемещениях, в случае пластины из упругого материала, представляет бигармоническое уравнение, которое используется для решения плоской задачи теории упругости в напряжениях. Граничными условиями по функции напряжений для бигармонического уравнения может служить рамная аналогия. Контур пластины рассматривается как рама и функция напряжений на контуре будет равна в ней изгибающему моменту M , а ее производная по нормали к контуру — продольной силе N . Эпюры M и N в раме могут быть построены в одной из основных систем метода сил (ОСМС). Основная система, а также эпюры изгибающего момента и продольной силы в раме показаны на рис. 2.

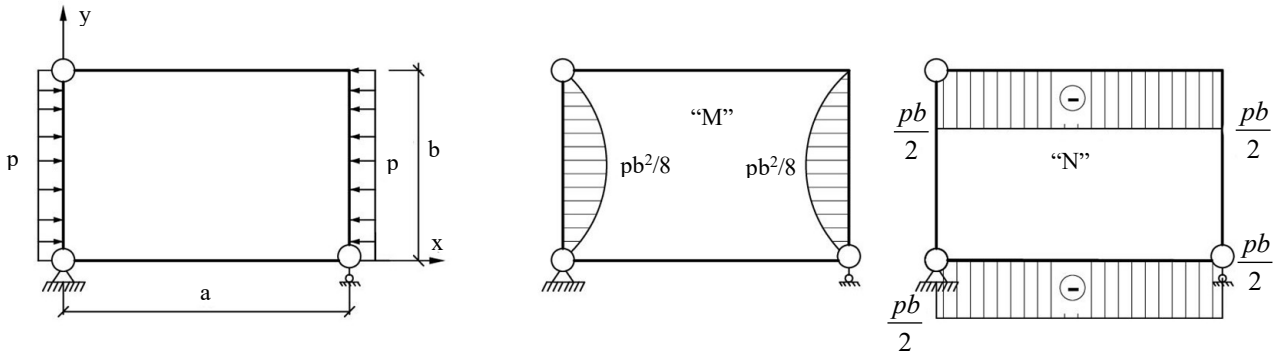


Рис. 2. ОСМС и эпюры изгибающих моментов и продольных сил

Если вертикальные перемещения не превышают четверть толщины пластинки, то можно принять усилия в срединной поверхности не зависящими от координат x и y ($N_x = -p, N_y = S = 0$) и использовать для расчетов линеаризованное уравнение:

$$D\nabla^4 w + p \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = q^* - p \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}. \quad (13)$$

Аналитическое решение системы уравнений (9) и (11) связано с большими трудностями. Авторы предлагают решать данную систему численно. Используется метод конечных разностей (МКР) в комбинации с методом последовательных приближений. Для определения деформации ползучести во временной области применяется метод Эйлера. В качестве первого этапа выполняется решение для упругой пластинки. Нагрузка p прикладывается ступенчато с небольшим шагом. При начальных значениях нагрузки прогибы w_1 вычисляются путем решения упрощенного уравнения (13). Затем выполняется подстановка вычисленных значений w_1 в дифференциальное уравнение (11). Это позволяет определить функцию напряжений. Следующим шагом является решение дифференциального уравнения (9) с использованием известных величин функции Φ , что позволяет определить узловые величины прогибов w'_1 . После этого выполняется подстановка значений $w_2 = (w_1 + w'_1)/2$ в уравнение (11). Повторение итерационного процесса на каждом шаге происходит до тех пор, пока относительное расхождение с нормами векторов узловых значений прогибов w_i и w'_i больше заданного значения (авторами оно принималось равным 0,1 %). Для второго шага по нагрузке начальным значением w_1 в каждом узле выступает конечный результат, полученный на первом шаге. Методика расчета во временной области с учетом ползучести аналогична. Интервал времени, на котором исследуется процесс, делится на шаги Δt . В случае задания закона вязкоупругого деформирования в дифференциальной форме величины деформаций ползучести на шаге $t + \Delta t$ вычисляются на основе известной скорости их роста в момент времени t с использованием аппроксимации по Эйлера:

$$\varepsilon_{t+\Delta t}^* = \varepsilon_t^* + \frac{\partial \varepsilon^*}{\partial t} \Delta t. \quad (14)$$

Блок-схема алгоритма расчета на ползучесть приведена на рис. 3.

Отметим, что система уравнений (9) и (11) позволяет использовать схемы более высокого порядка точности, например, метод Рунге-Кутты четвертого порядка. При этом для достижения той же точности результатов можно задавать заметно большие шаги по времени. Однако при увеличении шага есть вероятность не уловить эффекты неустановившейся ползучести в начальные моменты времени. А при одинаковом шаге по времени метод Рунге-Кутты, по сравнению с методом Эйлера, требует выполнить в четыре раза больше операций.

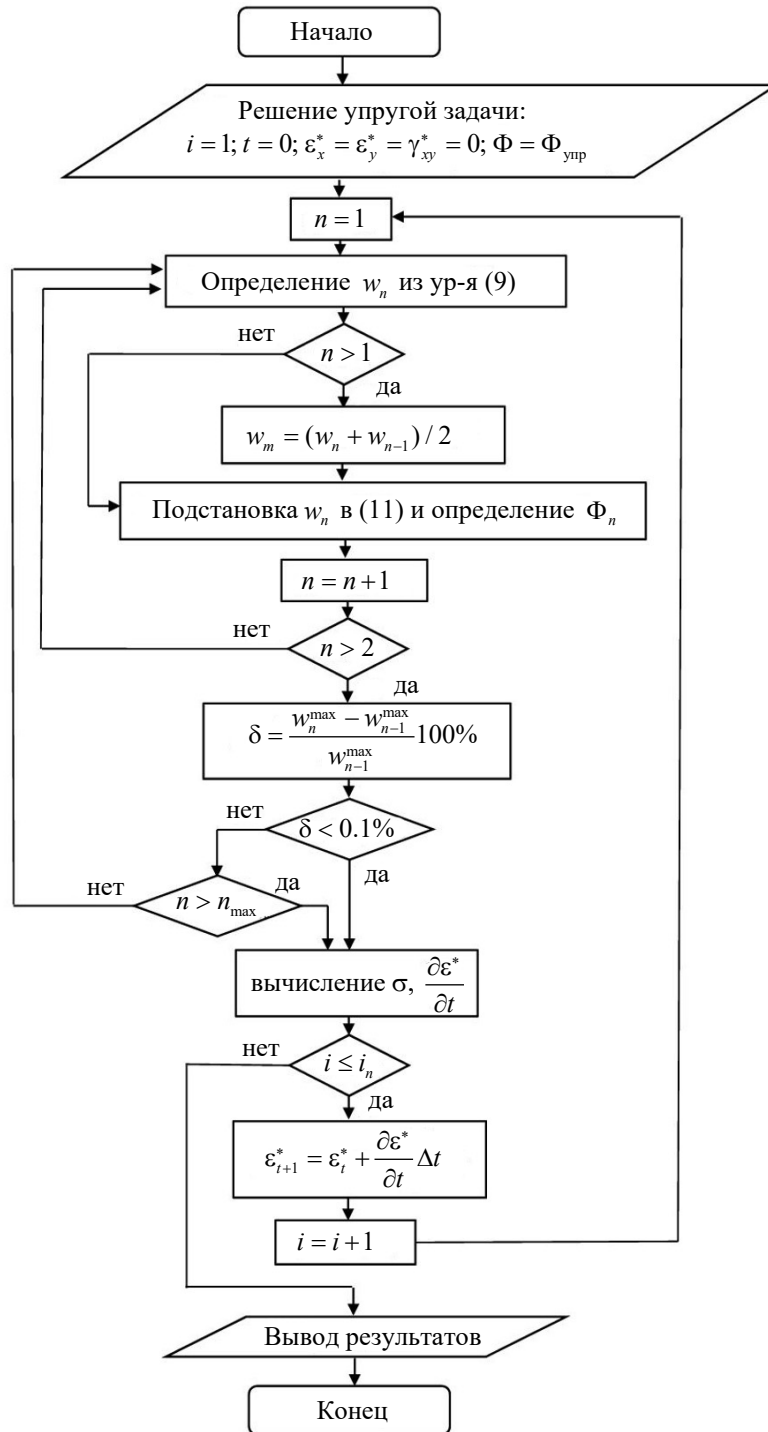


Рис. 3. Блок-схема алгоритма расчета на ползучесть

Результаты исследования. Рассмотрена полимерная пластинка из поливинилхлорида размерами $a = 2$ м, $b = 2$ м, $h = 1$ см при $E = 1480$ МПа, $\nu = 0,3$. В качестве закона, определяющего скорость роста деформаций ползучести, было принято нелинейное уравнение Максвелла-Гуревича:

$$\frac{\partial \varepsilon_{ij}^*}{\partial t} = \frac{f_{ij}^*}{\eta^*}, \quad i = x, y, \quad j = x, y;$$

$$f_{ij}^* = \frac{3}{2} (\sigma_{ij} - \sigma_0 \delta_{ij}) - E_\infty \varepsilon_{ij}^*;$$

$$\eta^* = \eta_0^* \exp \left(-\frac{|f_{max}^*|}{m^*} \right); \quad f_{max}^* = \left| \frac{3}{2} (\sigma_{rr} - \sigma_0) - E_\infty \varepsilon_{rr}^* \right|_{max}, \quad (15)$$

где δ_{ij} — символ Кронекера; $\sigma_0 = J_1 / 3$, $J_1 = \sigma_x + \sigma_y$ — первый инвариант тензора напряжений; η_0^* , E_∞ и m — реологические параметры материала, называемые начальной релаксационной вязкостью, модулем высокоэластичности и модулем скорости.

Индексами rr в формуле (15) обозначено направление главных напряжений.

Для ПВХ значения реологических параметров авторами были взяты из работы [20]: $E_\infty = 5,99 \cdot 10^3$ МПа, $m^* = 12,6$ МПа, $\eta_0^* = 5,44 \cdot 10^7$ МПа·с. Форма начальной погиби $w_0(x, y)$ принималась в соответствии с первой формой потери устойчивости пластинки из упругого материала:

$$w_0(x, y) = f_0 \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b}. \quad (16)$$

Для пластины из упругого материала без начальных несовершенств критическая нагрузка, в случае целого отношения сторон a/b , определяется по формуле [19]:

$$P_{кр} = \frac{4\pi^2 D}{b^2}. \quad (17)$$

Для верификации разработанного алгоритма расчета первым этапом было выполнено решение тестовой упругой задачи и сравнение результатов с расчетом в конечно-элементном пакете ЛИРА-САПР (рис. 4). Величина стрелы начальной погиби f_0 задавалась равной 0,15 мм. Размер сетки при использовании МКР составлял 20×20 , количество шагов по нагрузке — 200. При расчете в ПК ЛИРА-САПР выполнялось разбиение пластинки треугольными конечными элементами с шагом триангуляции 0,1 м. Величина шага по нагрузке принималась такая же, как и при использовании МКР. Значение критической нагрузки для упругой пластинки, вычисленное по формуле (17), составило 1340 Н/м. В таблице 1 показано сравнение вертикальных перемещений в центре пластинки для различных значений нагрузки, полученных по авторской методике и при помощи метода конечных элементов (МКЭ). Прогибы, вычисленные с использованием двух альтернативных методов, достаточно близки, за исключением нагрузки 1330 Н/м. Отклонение при этой величине нагрузки можно объяснить тем, что при приближении к критической нагрузке перемещения устремляются в бесконечность.

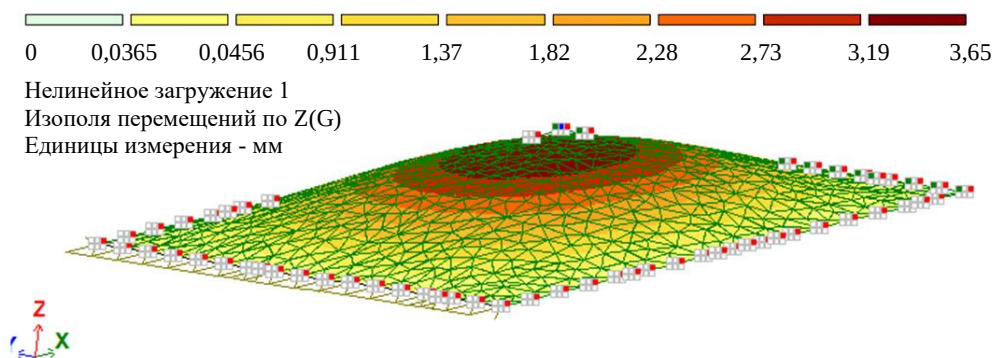


Рис. 4. Изополя вертикальных перемещений в ПК ЛИРА-САПР ($p = 1330$ Н/м): нелинейное нагружение 1, изополя перемещений по Z(G), единицы измерения — мм

Таблица 1

Сравнение результатов расчета по авторской методике и при помощи МКЭ

p , Н/м	$w \cdot 10^3$, мм	
	ЛИРА-САПР	Авторская методика
133	16	16
266	37	37
399	63	63
532	98	99
665	146	148
798	218	221
931	336	342
1064	562	578
1197	1163	1229
1330	3646	4229

В статье [21] показана возможность перехода от решения упругой задачи расчета пластин к решению в конце процесса ползучести. Величину длительной критической нагрузки p_∞ можно получить, заменив цилиндрическую жесткость D упругой пластинки на длительную цилиндрическую жесткость D_∞ , которая определяется по формуле:

$$D_\infty = \frac{\alpha h^3}{12(\alpha^2 - \beta^2)}, \quad (18)$$

где $\alpha = \frac{1}{E} + \frac{1}{E_\infty}$; $\beta = \frac{\nu}{E} + \frac{1}{2E_\infty}$.

Для вязкоупругих стержней и круглых пластин было ранее установлено, что в случае $p < p_\infty$, рост перемещений во времени замедляется, и стрела прогиба приходит к конечному значению. Если $p = p_\infty$, прогибы растут с постоянной скоростью. При $p > p_\infty$ скорость роста прогибов возрастает.

Авторами также проведен анализ характера роста прогибов во времени для $p < p_\infty$, $p = p_\infty$ и $p > p_\infty$ для различных значений максимальной начальной погиби f_0 . Кривые изменения прогиба с течением времени в центре пластины при $p = 0,9 p_\infty$, $p = p_\infty$ и $p = 1,1 p_\infty$ приведены соответственно на рис. 5–7.

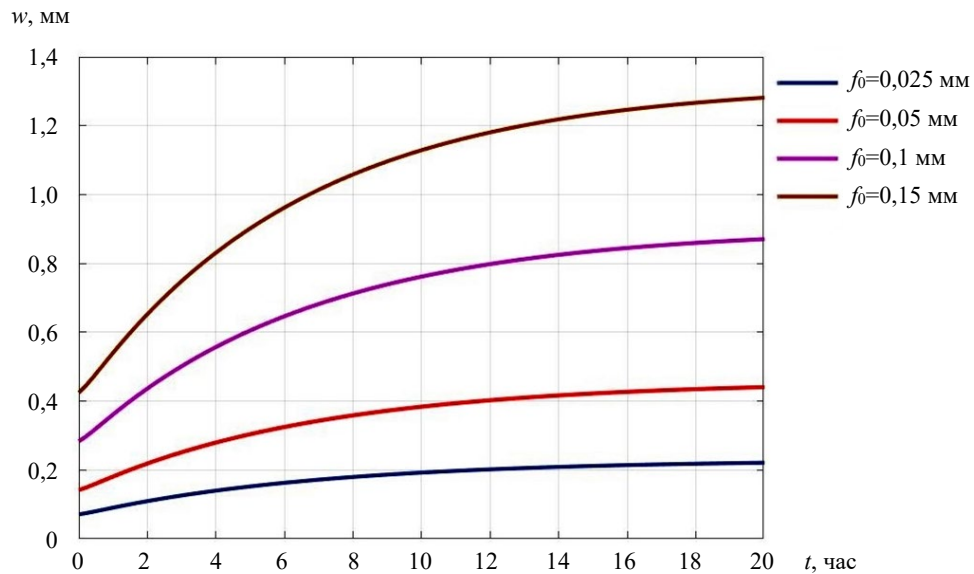


Рис. 5. Кривые изменения прогиба в центре пластины во времени при $p = 0,9 p_\infty$

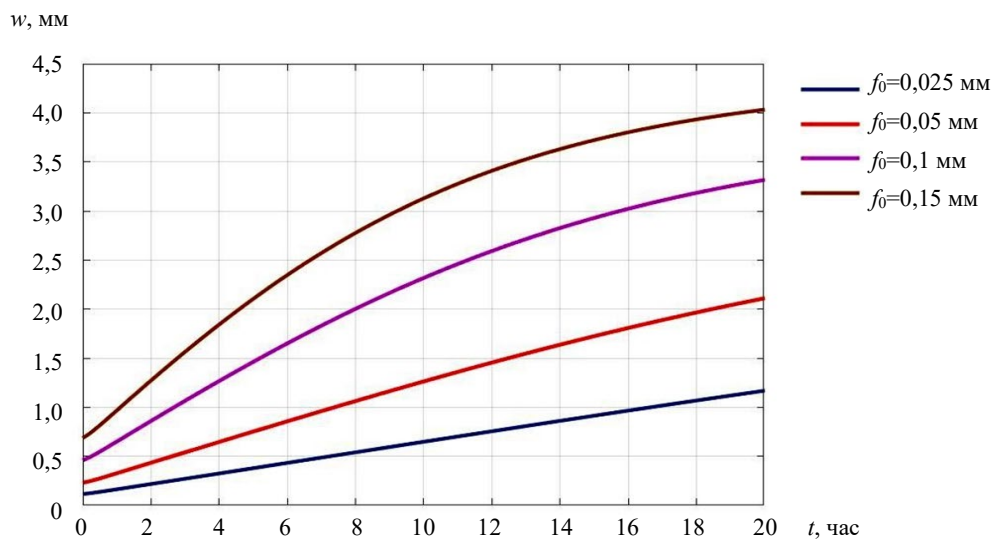


Рис. 6. Кривые изменения прогиба в центре пластины во времени при $p = p_\infty$

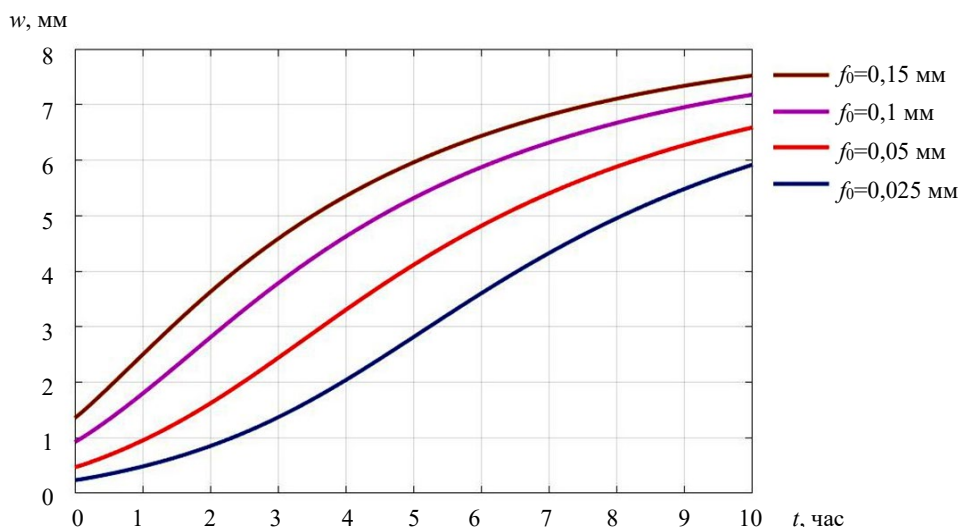


Рис. 7. Кривые изменения прогиба в центре пластины во времени при $p = 1,1 p_{\infty}$

Обсуждение и заключение. Из рис. 5 видно, что при $p < p_{\infty}$ стрела прогиба всегда приходит к конечному значению, независимо от значений начальных несовершенств. В то же время при $p \geq p_{\infty}$ полученный в [21] характер роста прогибов имеет место только при малых перемещениях. При достижении прогибами значений, превышающих примерно четверть толщины пластины, скорость роста деформаций начинает убывать даже в случае нагрузок, превышающих длительную критическую. Следует также отметить полное отсутствие участка с возрастающей скоростью роста перемещений для пластин с большими начальными искривлениями. Объяснить выявленные эффекты можно перераспределением усилий N_x , N_y , S в срединной поверхности.

Резюмируя вышесказанное, можно сделать вывод, что вертикальные перемещения пластины, шарнирно опертой по контуру, при действии сжимающей нагрузки по одной оси, всегда приходят к конечному значению, если нагрузка не превышает мгновенную критическую. Иначе говоря, при рассмотренном закреплении и нагружении пластина в условиях ползучести находится в устойчивом равновесии.

Полученные уравнения и алгоритм вычислений позволяют рассчитывать пластинки из произвольных вязкоупругих материалов при любых вариантах закрепления. Закон связи между напряжениями и деформациями ползучести также может быть задан произвольно.

Список литературы

1. Yankovskii A.P. Refined Deformation Model for Metal-Composite Plates of Regular Layered Structure in Bending under Conditions of Steady-State Creep. *Mechanics of Composite Materials*. 2017;52(6):715–732. <https://doi.org/10.1007/s11029-017-9622-7>
2. Янковский А.П. Установившаяся ползучесть сложно армированных металлокомпозитных пластин, нагруженных в своей плоскости. *Математическое моделирование*. 2010;22(8);55–66. URL: https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=mm&paperid=3007&option_lang=rus (дата обращения: 18.05.2023).
3. Хорошун Л.П., Бабич Д.В. Устойчивость прямоугольных пластин из слоистого композитного материала при длительной повреждаемости компонентов. *Прикладная механика*. 2010;46(12):67–75.
4. Zhongyu Lu, Guijun Xian, Khuram Rashid. Creep Behavior of Resin Matrix and Basalt Fiber Reinforced Polymer (BFRP) Plate at Elevated Temperatures. *Journal of Composites Science*. 2017;1(1):3. <https://doi.org/10.3390/jcs1010003>
5. Pawlus D. Stability of Three-Layered Annular Plate with Composite Facings. *Applied Composite Materials*. 2017;24(1):141–158. <https://doi.org/10.1007/s10443-016-9518-z>
6. Rouzegar J., Gholami M. Creep and Recovery of Viscoelastic Laminated Composite Plates. *Composite Structures*. 2017;181:256–272. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.094>
7. Gräfe M., Dietsch P., Winter S. CLT under In-Plane Loads: Investigation on Stress Distribution and Creep. In: *Proc. INTER International Network on Timber Engineering Research*. Karlsruhe: Timber Scientific Publishing; 2018. P. 289–306. URL: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1533836/document.pdf>
8. Pawlus D. Dynamic Behaviour of Three-Layered Annular Plates with Viscoelastic Core under Lateral Loads. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2015;53(4):775–788. <https://doi.org/10.15632/jtam-pl.53.4.775>

9. Sharma K., Kumar D. Elastoplastic Stability and Failure Analysis of FGM Plate with Temperature Dependent Material Properties under Thermomechanical Loading. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2017;14(7):1361–1386. <https://doi.org/10.1590/1679-78253747>
10. Kumar R.R., Mukhopadhyay T., Pandey K.M., Dey S. Stochastic Buckling Analysis of Sandwich Plates: The Importance of Higher Order Modes. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019;152:630–643. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.12.016>
11. Kosheleva E. Dynamic Stability of a Viscoelastic Plate. *MATEC Web of Conferences*. 2017;117:00086. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711700086>
12. Abramovich H. *Stability and Vibrations of Thin-Walled Composite Structures*. Cambridge: Woodhead Publishing; 2017. 770 p.
13. Кирсанов М.Н. Выпучивание пластины из нелинейного реологического материала при переменном нагружении. *Вестник Татарского государственного гуманитарно-педагогического университета*. 2011;24:19–22. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vypuchivanie-plastiny-iz-nelineynogo-reologicheskogo-materiala-pri-peremennom-nagruzenii> (дата обращения: 18.05.2023).
14. Абдикаримов Р.А., Жгутов В.М. Геометрически нелинейное математическое моделирование динамической устойчивости вязкоупругих пологих оболочек переменной толщины. *Инженерно-строительный журнал*. 2011;(6):12–22. <https://cyberleninka.ru/article/n/geometricheski-nelineynoe-matematicheskoe-modelirovanie-dinamicheskoy-ustoychivosti-vyazkouprugih-pologih-obolochek-peremennoy/viewer> (дата обращения: 18.05.2023).
15. Абдикаримов Р.А., Худаяров Б.А. Динамическая устойчивость вязкоупругих гибких пластин переменной жесткости при осевом сжатии. *Прикладная механика*. 2014;50(4): 41–51.
16. Абдикаримов Р.А., Верлань А.Ф., Горошко И.О. Численное исследование динамической устойчивости вязкоупругих ортотропных прямоугольных пластин с переменной жесткостью. *Моделювання та інформаційні технології*. 2011;60:10–17.
17. Robinson M.T.A., Adali S. Nonconservative Stability of Viscoelastic Plates Subject to Triangularly Distributed Follower Loads. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2017;55(3):1015–1027. <https://doi.org/10.15632/jtam-pl.55.3.1015>
18. Jafari N., Azhari M. Stability Analysis of Arbitrarily Shaped Moderately Thick Viscoelastic Plates Using Laplace–Carson Transformation and a Simple HP Cloud Method. *Mechanics of Time-Dependent Materials*. 2017;21(3):365–381. <https://doi.org/10.1007/s11043-016-9334-8>
19. Chepurnenko A.S., Yazyev B.M., Savchenko A.A. Calculation for the Circular Plate on Creep Considering Geometric Nonlinearity. *Procedia Engineering*. 2016;150:1680–1685. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.150>
20. Chepurnenko A.S., Andreev V.I., Beskopylny A.N., Jazyev B.M. Determination of Rheological Parameters of Polyvinylchloride at Different Temperatures. *MATEC Web of Conferences*. 2016;67:06059. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20166706059>
21. Андреев В.И., Языев Б.М., Чепурненко А.С. Осесимметричный изгиб круглой гибкой пластинки при ползучести. *Вестник Московского государственного строительного университета*. 2014;(5):16–24. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osesimmetrichnyy-izgib-krugloy-gibkoy-plastinki-pri-polzuchesti> (дата обращения: 18.05.2023).

References

1. Yankovskii AP. Refined Deformation Model for Metal-Composite Plates of Regular Layered Structure in Bending under Conditions of Steady-State Creep. *Mechanics of Composite Materials*. 2017;52(6):715–732. <https://doi.org/10.1007/s11029-017-9622-7>
2. Yankovskii AP. The Steady Creeping Difficulty Reinforced the Metal-Composite Plates Loaded in the Plane. *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2010;22(8):55–66. URL: https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=mm&paperid=3007&option_lang=rus (accessed: 18.05.2023).
3. Khoroshun LP, Babich DV. Ustoichivost' pryamougol'nykh plastin iz sloistogo kompozitnogo materiala pri dlitel'noi povrezhdaemosti komponentov. *Prikladnaya mekhanika*. 2010;46(12):67–75. (In Russ.)
4. Zhongyu Lu, Guijun Xian, Khuram Rashid. Creep Behavior of Resin Matrix and Basalt Fiber Reinforced Polymer (BFRP) Plate at Elevated Temperatures. *Journal of Composites Science*. 2017;1(1):3. <https://doi.org/10.3390/jcs1010003>
5. Pawlus D. Stability of Three-Layered Annular Plate with Composite Facings. *Applied Composite Materials*. 2017;24(1):141–158. <https://doi.org/10.1007/s10443-016-9518-z>
6. Rouzegar J, Gholami M. Creep and Recovery of Viscoelastic Laminated Composite Plates. *Composite Structures*. 2017;181:256–272. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.094>

7. Gräfe M, Dietsch P, Winter S. CLT under In-Plane Loads: Investigation on Stress Distribution and Creep. In: *Proc. INTER International Network on Timber Engineering Research*. Karlsruhe: Timber Scientific Publishing; 2018. P. 289–306. URL: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1533836/document.pdf> (accessed: 18.05.2023).
8. Pawlus D. Dynamic Behaviour of Three-Layered Annular Plates with Viscoelastic Core under Lateral Loads. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2015;53(4):775–788. <https://doi.org/10.15632/jtam-pl.53.4.775>
9. Sharma K. Kumar D., Elastoplastic Stability and Failure Analysis of FGM Plate with Temperature Dependent Material Properties under Thermomechanical Loading. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2017;14(7):1361–1386. <https://doi.org/10.1590/1679-78253747>
10. Kumar RR, Mukhopadhyay T, Pandey KM, Dey S. Stochastic Buckling Analysis of Sandwich Plates: The Importance of Higher Order Modes. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019;152:630–643. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.12.016>
11. Kosheleva E. Dynamic Stability of a Viscoelastic Plate. *MATEC Web of Conferences*. 2017;117:00086. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711700086>
12. Abramovich H. *Stability and Vibrations of Thin-Walled Composite Structures*. Cambridge: Woodhead Publishing; 2017. 770 p.
13. Kirsanov MN. Buckling of a Plate of Nonlinear Rheological Mwith Variable Loading. *Bulletin of the Tatar State Humanitarian and Pedagogical University*. 2011;24:19–22. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vypuchivanie-plastiny-iz-nelineynogo-reologicheskogo-materiala-pri-peremennom-nagruzhении> (accessed: 18.05.2023).
14. Abdikarimov RA, Zhgutov VM. Geometrically Nonlinear Mathematical Simulation the Viscoelastic Gently Sloping Variable-Thickness Shells' Dynamic Steadiness. *Magazine of Civil Engineering*. 2011;(6):12–22. <https://cyberleninka.ru/article/n/geometricheski-nelineynoe-matematicheskoe-modelirovanie-dinamicheskoy-ustoychivosti-vyazkouprugih-pologih-obolochek-peremennoy/viewer> (accessed: 18.05.2023).
15. Abdikarimov RA, Khudayarov BA. Dinamicheskaya ustoichivost' vyazkouprugikh gibkikh plastin peremennoi zhestkosti pri osevom szhatii. *Prikladnaya mekhanika*. 2014;50(4): 41–51. (In Russ.)
16. Abdikarimov RA, Verlan AF, Goroshko IO. Chislennoe issledovanie dinamicheskoi ustoichivosti vyazkouprugikh ortotropnykh pryamougol'nykh plastin s peremennoi zhestkost'yu. *Модельовання та інформаційні технології*. 2011;60:10–17. (In Russ.)
17. Robinson MTA, Adali S. Nonconservative Stability of Viscoelastic Plates Subject to Triangularly Distributed Follower Loads. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2017;55(3):1015–1027. <https://doi.org/10.15632/jtam-pl.55.3.1015>
18. Jafari N, Azhari M. Stability Analysis of Arbitrarily Shaped Moderately Thick Viscoelastic Plates Using Laplace–Carson Transformation and a Simple HP Cloud Method. *Mechanics of Time-Dependent Materials*. 2017;21(3):365–381. <https://doi.org/10.1007/s11043-016-9334-8>
19. Chepurnenko AS, Yazyev BM, Savchenko AA. Calculation for the Circular Plate on Creep Considering Geometric Nonlinearity. *Procedia Engineering*. 2016;150:1680–1685. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.150>
20. Chepurnenko AS, Andreev VI, Beskopylny AN, Jazyev BM. Determination of Rheological Parameters of Polyvinylchloride at Different Temperatures. *MATEC Web of Conferences*. 2016;67:06059. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20166706059>
21. Andreev VI, Yazyev BM, Chepurnenko AS. Axisymmetric Bending of a Round Elastic Plate in Case of Creep. *Vestnik MGSU*. 2014;(5):16–24. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osesimmetrichnyy-izgib-krugloy-gibkoy-plastinki-pri-polzuchesti> (accessed: 18.05.2023).

Поступила в редакцию 29.06.2023

Поступила после рецензирования 27.07.2023

Принята к публикации 01.08.2023

Об авторах:

Сердар Батырович Языев, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры строительной механики и теории сооружений Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ScopusID](#), [AuthorID](#), [ORCID](#), russiangel@mail.ru

Антон Сергеевич Чепурненко, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительной механики и теории сооружений Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [AuthorID](#), [ORCID](#), anton_chepurnenk@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

С.Б. Языев — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов.

А.С. Чепурненко — анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

Received 29.06.2023

Revised 27.07.2023

Accepted 01.08.2023

About the Authors:

Serdar B. Yazyev, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Structural Mechanics and Theory of Structures Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), [ScopusID](#), [AuthorID](#), [ORCID](#), russiangel@mail.ru

Anton S. Chepurnenko, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Structural Mechanics and Theory of Structures Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [AuthorID](#), [ORCID](#), anton_chepurnenk@mail.ru

Claimed contributorship:

SB Yazyev: basic concept formulation, research objective and tasks, calculation analysis, text preparation, formulation of conclusions.

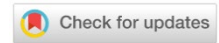
AS Chepurnenko: analysis of the research results, revision of the text, correction of conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.817

Научная статья

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-269-282>

Оптимизация геометрических характеристик циклоидальных профилей героторных гидромашин

С.О. Киреев  , А.Р. Лебедев , М.В. Корчагина 

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

 kireevso@yandex.ru

Аннотация

Введение. Производительность и надежность работы героторных гидромашин зависит от геометрических параметров профиля циклоидального зацепления. Существующие методики расчета и оптимизации параметров профиля громоздкие, многокритериальные, сложные для практического применения. Поэтому актуальной представляется проблема создания методики расчета параметров профиля рабочего органа героторной машины, пригодной для инженерных расчетов на этапе эскизного проектирования. В связи с этим целью данной работы являлась модернизация методики проектирования геометрии профилей торцевого сечения гипоциклоидальных зубчатых зацеплений, используемых в героторных гидравлических машинах, и анализ возможностей их оптимизации при предварительном проектировании. В ходе исследования была использована система компьютерной математики Mathcad, проведены численные эксперименты для изучения влияния геометрических параметров профилей на производительность и работоспособность героторной гидравлической машины. На основе полученных и проанализированных данных выработаны рекомендации по проектированию оптимальных профилей торцевого сечения героторных гидравлических машин.

Материалы и методы. Материалы включают в себя известные методики расчета параметров профиля, основанные на применении классических формул эквидистант гипоциклоид, используемых для очерчивания профилей зубьев рабочих органов героторных машин. Основной метод исследования — моделирование профиля героторной машины с помощью системы компьютерной математики Mathcad. Получены расчетные данные для выбранных диапазонов варьируемых параметров, обработанные методом регрессионного однофакторного анализа.

Результаты исследования. Разработан алгоритм анализа гладкости профилей зубьев. Определены два целевых параметра: площадь сечения торцевого профиля, влияющая на производительность, и наименьший приведенный радиус контакта, определяющий работоспособность рабочего органа. Предложена методика по расчету целевых параметров на ранней стадии проектирования. Получен ряд оптимальных значений параметров профиля по критериям производительности и работоспособности героторной машины. Построены зависимости, позволяющие установить оптимальные значения параметров профиля на стадии проектирования.

Обсуждение и заключение. Разработанная авторами методика дает возможность на этапе проектирования рабочего органа получить оценку производительности и работоспособности героторной гидромашин. Результаты исследований могут быть использованы в машиностроении при проектировании героторных гидромашин для улучшения их технико-эксплуатационных характеристик.

Ключевые слова: гидравлическая машина, героторное зацепление, гипоциклоида, ротор, статор, контакт, площадь живого сечения

Благодарности: авторы выражают благодарность всем участникам договора за помощь в проведении стендовых испытаний.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госбюджетной НИОКР АААА-А20-120012190068-8 «Исследование, моделирование и разработка инновационных конструкций машин и оборудования нефтегазовых промыслов».

Для цитирования. Киреев С.О., Лебедев А.Р., Корчагина М.В. Оптимизация геометрических характеристик циклоидальных профилей героторных гидромашин. *Advanced Engineering Research*. 2023;23(3):269–282. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-269-282>

Original article

Optimization of Geometric Characteristics of Cycloidal Profiles of Gerotor Hydraulic Machines

Sergey O. Kireyev  , Alexey R. Lebedev , Marina V. Korchagina 

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

 kireevso@yandex.ru

Abstract

Introduction. The performance and reliability of gerotor hydraulic machines depend on the geometry of the cycloidal gearing profile. The existing methods of calculating and optimizing the profile parameters are cumbersome, multi-criteria and difficult for practical application. Therefore, the problem of creating the methodology for calculating the parameters of the gerotor machine profile suitable for engineering calculations at the stage of conceptual design is a challenge. In this regard, the objective of this work was to modernize the methodology for designing the geometry of the profiles of the end section of hypocycloidal gears used in gerotor hydraulic machines, and to analyze the possibilities of their optimization during preliminary design. In the course of the study, the Mathcad computer mathematics system was used; numerical experiments were carried out to study the influence of geometric profile parameters on the performance and operability of the gerotor hydraulic machine, based on the data obtained and analyzed; recommendations for the design of optimal profiles of the end section of gerotor hydraulic machines were developed.

Materials and Methods. Materials included known methods of profile parameters calculation, based on application of classical formulas of hypocycloidal equidistant used for outlining profiles of teeth of working elements of gerotor machines. The basic research method was modeling the gerotor machine profile using Mathcad computer mathematics system. Calculated data were obtained for the selected ranges of varying parameters, processed through the univariate regression analysis.

Results. An algorithm for analyzing the tooth profile smoothness was developed. Two target parameters were defined: the cross-sectional area of the end profile, which affects the productivity; the smallest reduced radius of contact that determines operability of the working body. A technique for calculating the target parameters at the early stage of design was proposed. A number of optimal values of profile parameters according to the criteria of productivity and operability of gerotor machine was obtained. The dependences providing the optimum values of profile parameters at the stage of designing were constructed.

Discussion and Conclusion. The developed methodology makes it possible to obtain an assessment of the performance and operability of the gerotor hydraulic machine at the design stage of the working body. The research results can be used in mechanical engineering when designing gerotor hydraulic machines in order to improve their technical and operational characteristics.

Keywords: hydraulic machine, gerotor gearing, hypocycloid, rotor, stator, contact, open area

Acknowledgements: the authors would like to thank all the parties to the agreement for their assistance in conducting bench tests.

Funding information. The research was carried out within the framework of the state-funded R&D ААААА20-120012190068-8 “Study, modeling and development of innovative designs of machinery and equipment of oil and gas fields”.

For citation. Kireyev SO, Lebedev AR, Korchagina MV. Optimization of Geometric Characteristics of Cycloidal Profiles of Gerotor Hydraulic Machines. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(3):269–282. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-269-282>

Введение. Героторные гидравлические машины все чаще стали применяться в строительстве и при эксплуатации нефтяных и газовых скважин, причина — их конструктивно-эксплуатационные преимущества, основными из которых являются низкая неравномерность подачи для насосов или крутящего момента для двигателей, компактные габаритные размеры.

В научной литературе большое место занимают исследования, посвященные работе героторных гидромашин. Сильное влияние геометрических характеристик профиля ротора на производительность и надежность винтовых героторных гидромашин отмечают Д. и Ф. Балденко [1]. Основным узлом такой машины является многозаходный винтовой героторный механизм — цилиндрическая планетарная зубчатая передача внутреннего зацепления, состоящая из статора и ротора, с разницей в числах зубьев, равной единице. Профиль статора в торцовом сечении контактирует с профилем ротора, образуя замкнутые площадки. Авторы проанализировали также технологии изготовления зубчатых передач.

Р. Айер, В. Джатти исследовали эффективность применения математических моделей при конструировании винтовых насосов [2]. Они представили также результаты моделирования различных типоразмеров двухвинтовых насосов при перекачивании воды, смеси воды и воздуха. Суан-Фыонг Данг и Хонг-Сок Парк предложили процесс оптимизации САД-модели с использованием результатов моделирования САЕ и вычислений в Mathcad [3]. Другие авторы (А. Лебедев, С. Киреев, М. Корчагина, С. Власкин, А. Ефимов) в своих публикациях отметили эффективность проектирования разнообразных объектов и процессов на основе параметризации и последующей оптимизации конструкции по одному или нескольким целевым параметрам [4–6].

В совместной работе Ф.Д. Балденко и Яо Ян подчеркнули, что площадь живого сечения не зависит от относительного положения профилей ротора и статора и определяет производительность насоса, проанализировали влияние безразмерных геометрических параметров профиля на площадь живого сечения [7].

Лэй Чжэн, Сяодун Ву, Гоцин Хань, Хуачан Ли, Йи Цзо и Дэйк Чжоу разработали конечно-элементную модель рабочего органа винтового насоса с поверхностным приводом для нефтегазовой промышленности [8]. По результатам моделирования и экспериментальных проверок ими был сделан вывод, что зазоры в сопряжении и толщина статора являются двумя основными факторами, влияющими на оптимизируемый целевой параметр — объемную эффективность насоса.

Новые данные получены Х. Гамбоа, А. Оливет, С. Эспин при моделировании рабочего органа однозаходного винтового насоса [9]. Эти авторы определили существенную зависимость между площадью зазора проскальзывания и перепадом давления, связанным с механическими свойствами материала статора.

Яо Ян, Ф. Балденко исследовали влияние безразмерных коэффициентов торцового профиля героторной гидромашин на характеристики циклоидного зацепления, что позволяет проводить оптимизацию на основе геометрических и кинематических критериев [10]. И.А. Лягов, Ф.Д. Балденко, А.В. Лягов, В.У. Ямалиев, А.А. Лягова предложили методику выбора оптимальной конфигурации силовых секций при проектировании секционных забойных двигателей, отметив актуальность проблемы уменьшения габаритных параметров длины винтового насоса [11].

Ю.А. Коротаев, А.Н. Алпатов, А.В. Соболев и др. пришли к выводу, что наиболее эффективным является профилирование зацепления от исходного контура рейки, очерченного эквидистантой укороченной циклоиды [12]. В отношении профилей, полученных от эквидистанты обыкновенной гипоциклоиды, авторы указали на их основной недостаток: они строятся как специальные и не предусматривают натяг в зацеплении. Ю.А. Коротаев и Д.А. Голдобин обратили внимание на проблему, связанную с необходимостью повышения производительности винтовых насосов, и возникающие при этом недопустимые условия жесткости при производстве статоров и роторов [13].

А.Ф. Миникаев, В.А. Пронин, Д.В. Жигновская, Ю.Л. Кузнецов, Ф.Д. Балденко, А.Е. Ковалёнок разработали методику исследования напряженно-деформированного состояния статора при контактном взаимодействии с ротором винтового рабочего органа гидромашин с применением САЕ-моделирования и утверждают, что классическая теория Герца о контактном взаимодействии не может быть применена для определения контактных напряжений в роторе и статоре из-за действия ряда особенностей: изменения кривизны соприкасающихся поверхностей ротора и статора, различной толщины эластичной обкладки по длине окружности корпуса, наличия предварительного натяга в паре, сложного планетарного движения ротора, сопровождающегося сочетанием трения качения и скольжения, смещения вектора радиальной силы относительно нормали в точке контакта.

Подводя итог обзору научных публикаций на тему проектирования героторной гидромашин, необходимо отметить, что большинство исследователей в данной области стремятся повысить эффективность работы этой машины, увеличивая площадь живого сечения и сокращая габаритные размеры рабочего органа. Достижение оптимальных результатов происходит за счет применения и варьирования коэффициентов внецентроидности,

формы зуба, относительной скорости скольжения, смещения рейки и т. д. Методики расчета громоздки, их сложно применять на практике. Торцевые профили строятся, как правило, на основе укороченных гипоциклоид, что приводит к возникновению проблемы с обеспечением кинематической точности движения, контактного взаимодействия ротора и статора. Некоторые авторы (Ю.А. Коротаев, А.Н. Алпатов, А.В. Соболев и др.) указали на невозможность создания натяга в случае применения обыкновенной гипоциклоиды, но натяг может быть создан за счет изменения эквидистантного расстояния профилей ротора и статора.

Материалы и методы. Для получения профилей ротора и статора в торцевом сечении рабочего органа героторной гидравлической машины зададимся следующим набором исходных параметров (рис. 1):

1) R_k — контурный радиус профиля, определяющий диаметр окружности C_1 , описывающей профиль статора (мм). Фактически этот параметр задает радиальный габарит героторной машины, что особенно важно в нефтегазовой промышленности, когда проектируемый объект необходимо разместить, например, в стволе эксплуатационной колонны скважины;

2) z_1 — число зубьев ротора;

3) R_r — радиус ролика, определяющий расстояние эквидистантной линии профилей ротора и статора относительно соответствующих гипоциклоид (мм);

4) Δ — натяг в сопряжении ротора и статора (мм).

Напомним принцип образования профилей гипоциклоидального зацепления, который заключается в том, что внутри окружности C_2 (основная окружность гипоциклоиды статора) перекатывается без скольжения окружность C_3 (основная окружность гипоциклоиды ротора). Центр окружности C_3 всегда находится на расстоянии e (эксцентриситет) относительно центра окружности C_2 .

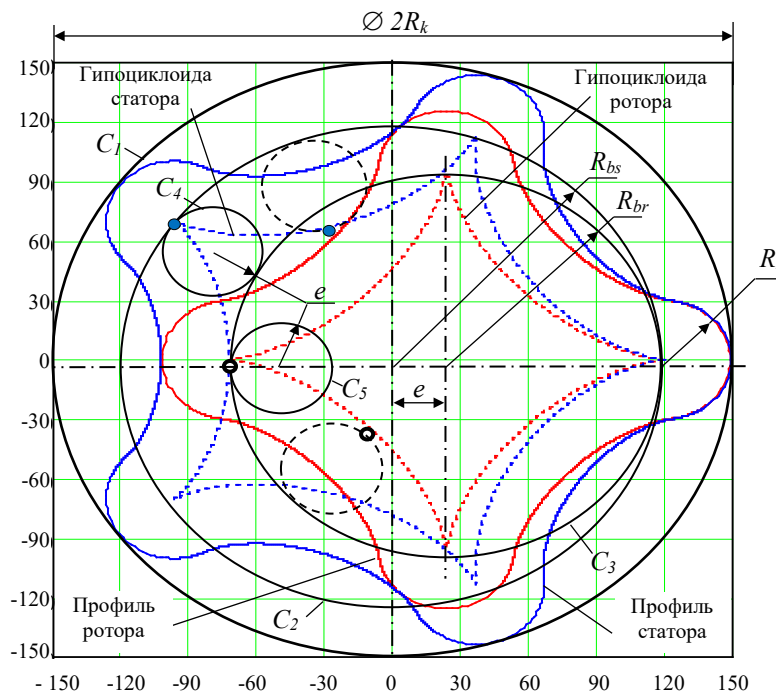


Рис. 1. Схема образования гипоциклоидального профиля торцевого сечения рабочего органа героторной машины,

$$z_1 = 4, R_k = 150 \text{ мм}, R_r = 30 \text{ мм}$$

Внутри окружности C_3 перекатывается без скольжения окружность C_5 (производящая окружность гипоциклоиды ротора), одна точка которой образует гипоциклоиду ротора. Внутри окружности C_2 перекатывается без скольжения окружность C_4 (производящая окружность гипоциклоиды статора), одна точка которой образует гипоциклоиду статора. Заметим, что радиусы окружностей C_5 и C_4 равны эксцентриситету e . Профили ротора и статора образуются как эквидистантные линии, отложенные на расстояние R_r от соответствующих гипоциклоид.

В такой постановке профили ротора и статора обеспечивают идеальный контакт при эксцентричном вращении ротора. При необходимости обеспечить натяг/зазор в соединении следует изменить эквидистантное расстояние R_r для профиля ротора на величину Δ .

Перейдем к математическому описанию методики образования профилей торцевого сечения ротора и статора. Число зубьев статора равно

$$z_2 = z_1 + 1. \quad (1)$$

Радиус основной окружности гипоциклоиды статора R_{bs} определим из условия (рис. 1):

$$R_{bs} = R_k - R_r. \quad (2)$$

Определим эксцентриситет e передачи по условию равенства длины окружности C_2 целому числу z_2 длин производящей окружности C_4 радиусом e :

$$2pR_{bs} = 2pez_2,$$

тогда

$$e = R_{bs} / z_2. \quad (3)$$

Заметим, что при $z_1 = 1$ (механизм Муано) из условия размещения ротора в полости статора необходимо определять эксцентриситет и радиус ролика R_r по другим формулам:

$$e = R_k / 3uR_r = 2e, \text{ если } z_1 = 1. \quad (4)$$

Радиус основной окружности гипоциклоиды ротора R_{br} равен (рис. 1)

$$R_{br} = R_{bs} - e. \quad (5)$$

Введем функцию для определения радиуса основной окружности ротора или статора, выполняющую условия (2) и (5):

$$R(z) = R_k - R_r - e \cdot (z_2 - z). \quad (6)$$

Параметрические формулы гипоциклоид ротора и статора в декартовой системе координат XOY:

$$\begin{aligned} x(\varphi, z) &= R(z) \cdot \left[(1 - 1/z) \cos(\varphi/z) + (a/z) \cos((1 - 1/z)\varphi) \right], \\ y(\varphi, z) &= R(z) \cdot \left[(1 - 1/z) \sin(\varphi/z) - (a/z) \sin((1 - 1/z)\varphi) \right], \end{aligned} \quad (7)$$

где z — число ветвей гипоциклоиды ротора z_1 или статора z_2 ; a — коэффициент укорочения гипоциклоиды. В случае обыкновенной гипоциклоиды в теории $a = 1$. Однако в практических расчетах с применением систем компьютерной математики (Mathcad, MATLAB) при $a = 1$ возникают сложности с вычислением эквидистантных профилей ротора и статора. Поэтому в модели мы допустили $a = 0,99$, что для достижения наших целей вполне оправданно; φ — угол поворота радиус-вектора, проведенного из начала координат до каждой точки гипоциклоиды. Если гипоциклоида должна быть построена по N_p точкам, то

$$\varphi(i, z) = 2 \cdot \pi \cdot i \cdot z / N_p, \quad i = 0 \dots N_p. \quad (8)$$

Профили ротора и статора определяются по известным формулам эквидистантной траектории относительно гипоциклоид ротора или статора на расстояние R_r с учетом натяга в сопряжении Δ

$$\begin{aligned} X_p(\varphi, z, \Delta) &= x(\varphi, z) + (R_r + \Delta) \cdot \frac{\partial y(\varphi, z)}{\partial \varphi} / \sqrt{\left(\frac{\partial y(\varphi, z)}{\partial \varphi} \right)^2 + \left(\frac{\partial x(\varphi, z)}{\partial \varphi} \right)^2}, \\ Y_p(\varphi, z, \Delta) &= y(\varphi, z) - (R_r + \Delta) \cdot \frac{\partial x(\varphi, z)}{\partial \varphi} / \sqrt{\left(\frac{\partial y(\varphi, z)}{\partial \varphi} \right)^2 + \left(\frac{\partial x(\varphi, z)}{\partial \varphi} \right)^2}. \end{aligned} \quad (9)$$

При работе передачи центр ротора движется по окружности радиусом e и поворачивается на угол $\alpha = 0 \dots 2\pi$. Все точки ротора при этом совершают дополнительный поворот на угол ψ , определяемый функцией

$$\psi(\alpha) = \alpha \cdot (1 - z_2 / z_1). \quad (10)$$

Модель вращения ротора описывается параметрическими функциями преобразования координат при перемещении и вращении объекта:

$$\begin{aligned} X_v(\alpha, \varphi, \Delta) &= e \cdot \cos(\alpha) + X_p(\varphi, z_1, \Delta) \cos(\psi(\alpha)) - Y_p(\varphi, z_1, \Delta) \sin(\psi(\alpha)) \\ Y_v(\alpha, \varphi, \Delta) &= e \cdot \sin(\alpha) + Y_p(\varphi, z_1, \Delta) \cos(\psi(\alpha)) + X_p(\varphi, z_1, \Delta) \sin(\psi(\alpha)). \end{aligned} \quad (11)$$

В выражении (11) применена условная функция, обнуляющая перемещение по оси Y в случае прямолинейного перемещения ротора в полости статора при $z_1 = 1$.

Опыт применения данной методики показал, что эквидистантные профили ротора и статора при увеличении эквидистантного расстояния или радиуса ролика R_r могут потерять гладкость. Это происходит в точках перехода от эквидистанты окружности в эквидистанту гипоциклоиды. На рис. 2 представлена проблема потери гладкости линии профиля статора в окрестности ± 1 мм от точки перехода эквидистантных линий.

В математике известна формула критерия гладкости функции, заданной в параметрическом виде. Для профиля статора такая функция будет иметь вид:

$$F_s(p, z) = \frac{\partial Y_p(p, z, 0)}{\partial p} / \frac{\partial X_p(p, z, 0)}{\partial p}, \quad (12)$$

где $z = z_2$; p — угол радиус-вектора точки профиля статора.

Необходимо отметить, что функция F_s во всем диапазоне $\varphi(i, z_2)$ ведет себя нестабильно и найти какие-либо особенности ее поведения в интересующей нас точке перехода эквидистантных линий достаточно сложно. Поэтому поведение функции F_s изучалось только в окрестности точки перехода при изменении углового параметра

$$p = \pi / z_2 - m \dots \pi / z_2 + m, \quad (13)$$

где m — угол отклонения от угла радиус-вектора точки перехода.

$$m = 2 \cdot p \cdot u, \quad (14)$$

где u — часть углового сектора профиля статора для изучения гладкости в окрестности точки перехода. Величину u (для $z_2 = 2..12$) определяем по эмпирической формуле:

$$u = 0,12 - 0,01 \cdot (z_2 - 1). \quad (15)$$

На рис. 2 можно заметить, что с увеличением радиуса ролика в окрестности точки перехода эквидистантных линий профиль статора из гладкого превращается в самопересекающийся. Поведение функции F_s также изменяется, и при появлении эффекта самопересечения профиля возникает петля (рис. 2 в).

Этот эффект положен в основу предлагаемого авторами статьи алгоритма контроля гладкости профиля статора, приведенного на рис. 3. Следует отметить, что, судя по многочисленным замерам, если критерий гладкости статора выполняется, то гладкость профиля ротора проверять не требуется, так как он построен на гипоциклоиде с меньшим значением радиуса основной окружности.

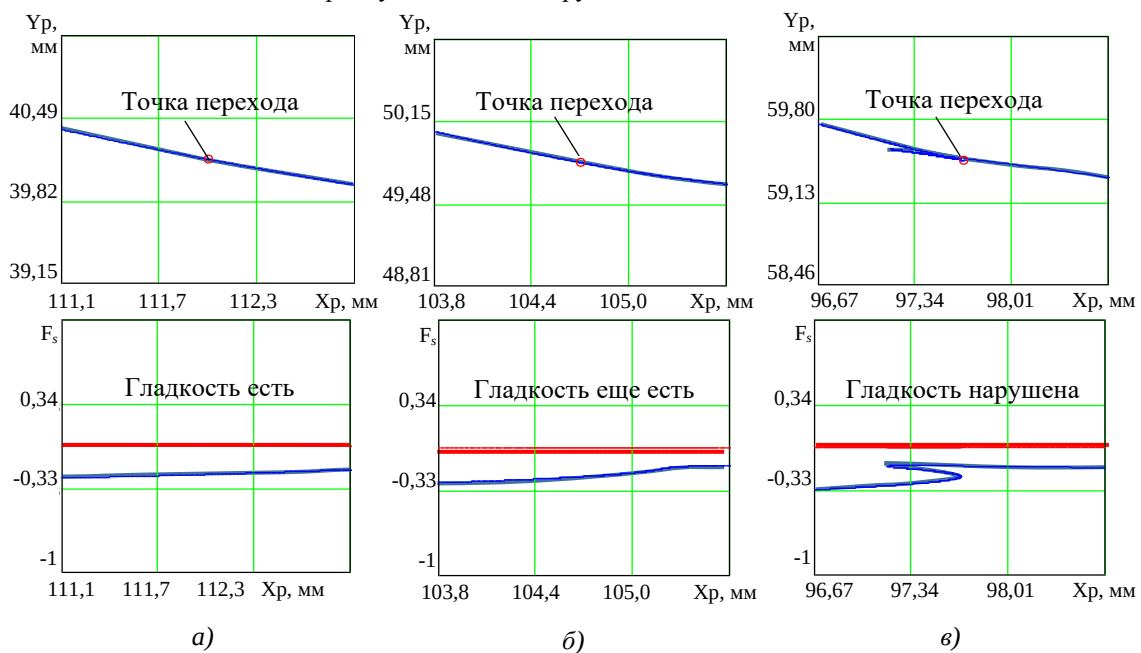


Рис. 2. Профиль статора в окрестности ± 1 мм от точки перехода эквидистантных линий (верхний график) и значения функции F_s (нижний график) при $z_1 = 3$ и $R_k = 150$ мм, для R_r : а — 40 мм; б — 50 мм; в — 60 мм

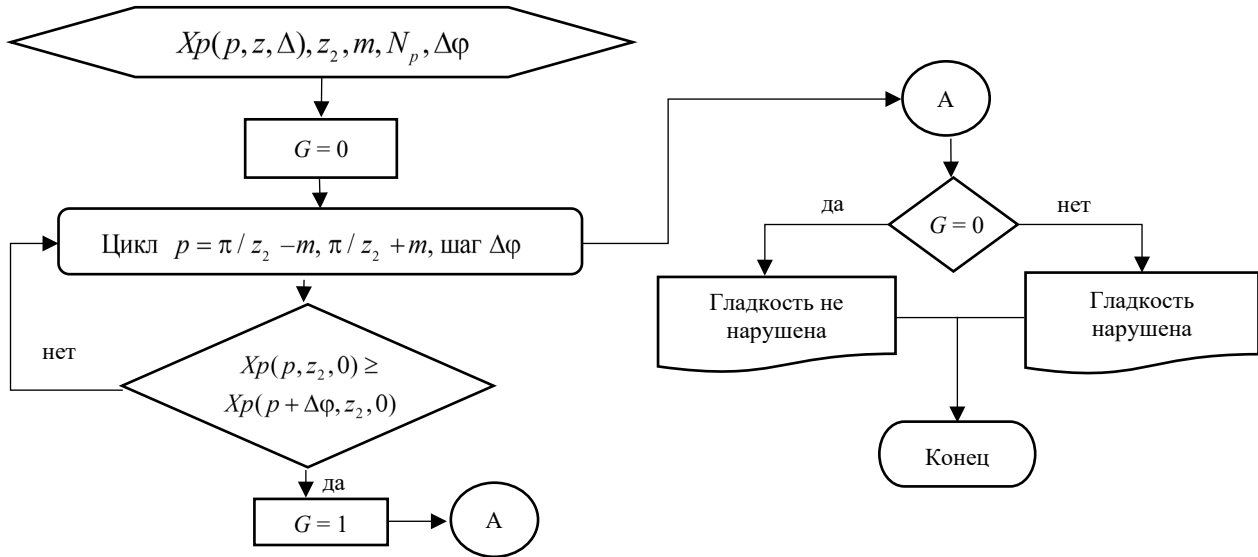


Рис. 3. Схема алгоритма контроля гладкости профиля статора

Контроль гладкости профиля статора должен проводиться всегда при проектировании геометрии торцевого сечения героторной машины. С целью изучения параметра максимального радиуса ролика $R_{r\max}$, ниже которого гладкость кривой не нарушается, авторы провели серию численных экспериментов, в которых задавались различными значениями контурного радиуса R_k и числами зубьев ротора z_1 .

Первым целевым параметром данного исследования является площадь живого сечения рабочего органа S . Этот параметр входит в формулу подачи героторной машины и определяет ее производительность. С имеющимися параметрическими функциями, описывающими профили ротора и статора, задача по определению S сводится к вычислению разности площадей параметрических кривых статора S_s и ротора S_r (9). Формула площади параметрической кривой известна из математики, и поэтому в методике авторов она выглядит так:

$$S = S_s - S_r = \int_0^{z_2 \cdot 2\pi} \left(X_p(p, z_2, 0) \cdot \frac{\partial Y_p(p, z_2, 0)}{\partial p} \right) dp - \int_0^{z_1 \cdot 2\pi} \left(X_p(p, z_1, \Delta) \cdot \frac{\partial Y_p(p, z_1, \Delta)}{\partial p} \right) dp \quad (16)$$

Вторым целевым параметром исследования является приведенный радиус ρ_{np} кривизны при контактном взаимодействии ротора и статора. Напомним, что согласно теории Герца, при контакте двух цилиндрических поверхностей рассчитывается приведенный радиус, который в формуле контактных напряжений находится в знаменателе. Следовательно, величина контактных напряжений наряду с физико-механическими параметрами материалов контактируемых поверхностей будет иметь наибольшую величину при наименьшем значении приведенного радиуса ρ_{np} , определяемого по формуле:

$$\rho_{np} = (\rho_r \cdot \rho_s) / (\rho_r + \rho_s), \quad (17)$$

где ρ_r — радиус эквидистантной окружности ротора, равный параметру R_r ; ρ_s — радиус кривой профиля статора.

Заметим, если $\rho_s > 1$, то числитель в формуле (17) всегда растет быстрее, чем знаменатель, следовательно, наименьшее значение $\rho_{np\min}$ полностью определяется параметром наименьшего радиуса статора $\rho_{cr\min}$.

В торцевом сечении рабочего органа героторной машины при любом угле поворота ротора осуществляется непрерывный контакт его эквидистантной окружности со сложной кривой профиля статора. По результатам наблюдений за динамикой контактных взаимодействий можно сделать вывод, что наибольшие напряжения возникают в точках перехода эквидистанты гипоциклоиды в эквидистанту окружности профиля статора. Следовательно, наименьший радиус линии профиля статора $\rho_{cr\min}$ также будет находиться в зоне перехода эквидистантных линий и определится по известной из математики формуле:

$$\rho_{cm\min}(p) = \frac{\left[\left(\frac{\partial X_p(p, z_2, 0)}{\partial p} \right)^2 + \left(\frac{\partial Y_p(p, z_2, 0)}{\partial p} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}}{-\left(\frac{\partial X_p(p, z_2, 0)}{\partial p} \right) \cdot \left(\frac{\partial^2 Y_p(p, z_2, 0)}{\partial p^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 X_p(p, z_2, 0)}{\partial p^2} \right) \cdot \left(\frac{\partial Y_p(p, z_2, 0)}{\partial p} \right)}, \quad (18)$$

где $\rho = \pi/z_2$ — угловой параметр точки профиля статора в месте перехода эквидистантных линий. В случае потери гладкости линии статора параметр $\rho_{\text{ст min}}$ стремится к нулю.

Описанная выше методика реализована в системе математических расчетов Mathcad. При выполнении расчетов коэффициент укорочения гипоциклоиды $a=0,99$, $N_p = 40\,000$.

На первом этапе исследований планируется изучение максимального радиуса ролика $R_{r \max}$, при котором критерий G гладкости линии профиля статора равен нулю. Изменяемые параметры — контурный радиус R_k (100, 150, 200 мм) и число зубьев ротора z_1 от 1 до 7). Расчеты проводятся при последовательном увеличении параметра R_r от 5 мм до срабатывания критерия гладкости G . Исследуемый параметр $R_{r \max}$ фиксируем с точностью до 1 мм.

На втором этапе проводятся серии расчетов для изучения влияния радиуса ролика R_r (от 5 мм до $R_{r \max}$, числа зубьев ротора z_1 (от 2 до 7) и контурного радиуса R_k (100, 150, 200 мм) на площадь живого сечения S и минимальный приведенный радиус контакта $\rho_{\text{пр min}}$.

Описанная методика расчета геометрических параметров профиля торцевого сечения рабочего органа героторной машины может быть реализована в любой другой системе программирования или в системе компьютерной математики.

Результаты исследования. Данные численных опытов по определению параметра максимального радиуса ролика $R_{r \max}$, при котором гладкость линии профиля статора сохраняется, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Максимальный радиус ролика $R_{r \max}$ (мм) при различных контурных радиусах R_k (мм)

z_1	$R_k = 100$	$R_k = 150$	$R_k = 200$
1	66,6	100	133
2	45	68	91
3	27	41	55
4	20	31	40
5	15	23	31
6	12	19	25
7	10	16	21

На основании данных таблицы 1 построены графики (рис. 4 а). Видно, что оцениваемый параметр $R_{r \max}$ при увеличении контурного радиуса R_k растет пропорционально. Введем в рассмотрение относительный параметр $R_o = R_{r \max} / R_k$, график которого представлен на рис. 4 б).

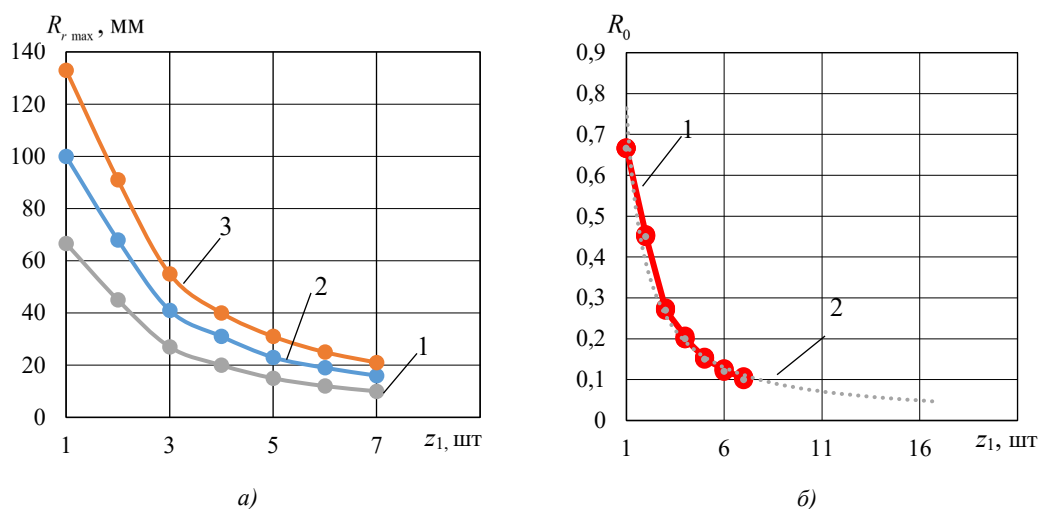


Рис. 4. Зависимость максимального радиуса ролика от числа зубьев ротора:

а — $R_{r \max}$ при R_k : 1 — 100 мм; 2 — 150 мм; 3 — 200 мм; б — R_o (1) и линия тренда (2) с экстраполяцией до $z_1 = 16$

Эмпирическая формула, с помощью которой можно определить максимально допустимый радиус ролика $R_{r \max}$, имеет вид:

$$R_o = 0,768z_1^{-0.996} \quad (19)$$

При $z_1 = 15$, $R_k = 150$ мм, $R_o = 0,0517$ мм, $R_{r \max} = 7,76$ мм гладкость профиля достигается при $R_r = 7,5$ мм. При $z_1 = 10$, $R_k = 200$ мм, $R_o = 0,0775$ мм, $R_{r \max} = 15,5$ мм гладкость профиля достигается при $R_r = 15,5$ мм. Таким образом, можно сделать вывод об удовлетворительной точности эмпирической формулы (19) для предсказания максимально допустимого параметра $R_{r \max}$.

Следует отметить, что формула (19) получена при значениях коэффициента укорочения $a = 0,99$. Уменьшение a приводит к достижению гладкости профиля и при более значительном увеличении параметра R_r . Однако при этом изменяется форма зуба циклоидального зацепления и нарушаются условия контактного взаимодействия ротора и статора, особенно в тех местах, где ротор должен касаться статора боковыми сторонами зубьев. Расчеты показывают, что при $a = 0,99$ и $R_r = 38$ мм критерий гладкости находится на пределе выполнимости. Однако при $a = 0,99$ и $R_r = 38$ мм достигается хорошая гладкость профиля статора, но нарушается кинематический контакт деталей рабочего органа машины, восстановить который удастся лишь специальным подбором значений параметров гипоциклоид ротора и статора. Поэтому исследование влияния коэффициента укорочения на параметр $R_{r \max}$ выведены за рамки данного исследования.

В таблице 2 представлены данные расчетов целевых параметров исследований для числа зубьев ротора $z_1 = 3$ при различных значениях контурных радиусов. Полученные значения площади живого сечения S и минимального приведенного радиуса контакта $\rho_{np \min}$ в последних двух колонках таблицы 2 приведены к безразмерному виду для удобства анализа.

Таблица 2

Данные расчетов целевых параметров при $z_1=3$

R_r , мм	$\rho_{np \min}$, мм	S , мм ²	$S/\max(S)$	$\rho_{np \min} / \max(\rho_{np \min})$
$R_k = 150$ мм				
5	4,72	18038	0,9712	0,2656
10	8,83	18256	0,983	0,4969
15	12,28	18415	0,9915	0,6911
20	14,98	18513	0,9968	0,843
25	16,85	18572	1	0,9482
30	17,77	18530	0,9977	1
35	17,63	18450	0,9934	0,9921
40	16,28	18307	0,9857	0,9162
$R_k = 200$ мм				
10	9,14	32275	0,9786	0,3857
20	16,37	32738	0,9926	0,6909
30	21,36	32982	1	0,9015
35	22,9	32980	0,9999	0,9664
40	23,69	32943	0,9988	0,9998
45	23,695	32844	0,9958	1
50	22,82	32685	0,991	0,9631
55	20,98	32466	0,9844	0,8854
$R_k = 100$ мм				
5	4,57	8068	0,9773	0,3857
10	8,18	8184	0,9914	0,6903

R_r , мм	$\rho_{np\ min}$, мм	S , мм ²	$S/\max(S)$	$\rho_{np\ min} / \max(\rho_{np\ min})$
$R_k = 150$ мм				
13	9,83	8225	0,9964	0,8295
15	10,68	8245	0,9988	0,9013
17	11,32	8255	1	0,9553
20	11,85	8235	0,9976	1
24	11,64	8189	0,992	0,9823

На рис. 5 представлены графики изменения целевых параметров исследований при $z_1=3$. На них нетрудно заметить, что при увеличении радиуса ролика R_r происходит незначительное изменение площади живого сечения S и достаточно сильное изменение приведенного радиуса контакта, максимальное значение которого приходится на достаточно узкий диапазон R_r , что представляет для проектировщика наибольший интерес, так как при этом контактные напряжения будут минимальны. Расчеты для других значений z_1 (от 2 до 7) показали примерно такую же качественную картину, как и на рис. 5.

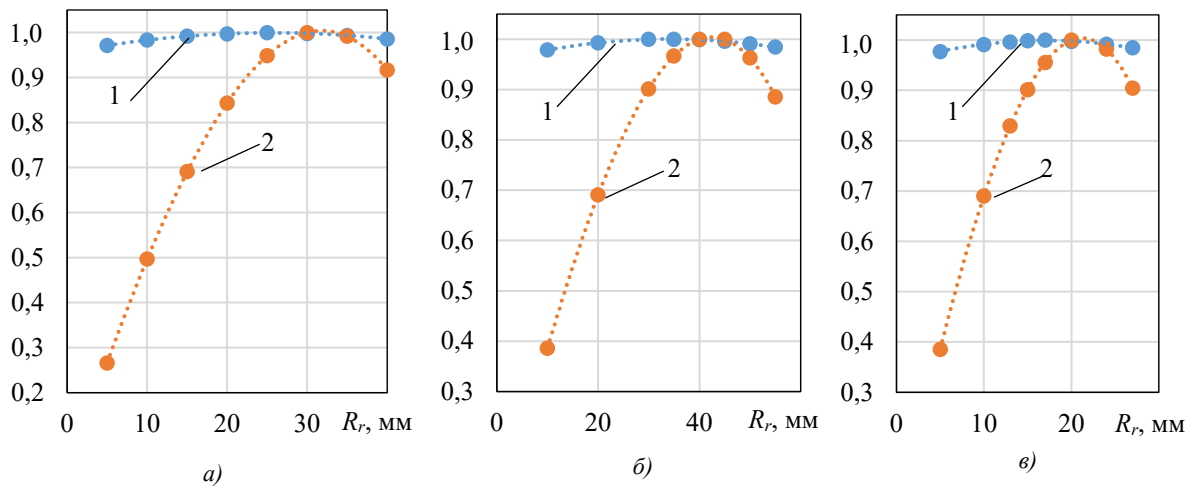


Рис. 5. Зависимости целевых параметров исследований от радиуса ролика R_r при $z_1=3$, $a=0,99$, $\Delta=0$:

1 — $S/\max(S)$; 2 — $\rho_{np\ min} / \max(\rho_{np\ min})$ (таблица 2); R_k , мм: а — 150; б — 200; в — 100 мм

В таблице 3 представлены данные расчетов оптимальных радиусов роликов $R_{r\ opt}$ для различных параметров z_1 и R_k . В результате анализа выяснилось, что параметры $R_{r\ opt}$ и R_k для одного z_1 изменяются практически одинаково. Поэтому, если ввести параметр относительного оптимального радиуса ролика

$$R_{ro} = R_{r\ opt} / R_k, \quad (20)$$

то с помощью однофакторной зависимости вида $R_{ro} = f(z_1)$ можно на предварительном этапе проектирования рабочего органа героторной машины определять оптимальный радиус ролика R_r .

В результате аналогичных рассуждений для приведенных в таблице 3 параметров S и $\rho_{np\ min}$ введены также безразмерные параметры относительного приведенного радиуса контакта $\rho_{np\ o}$ и относительной площади живого сечения S_o :

$$S_o = S / R_k^2; \rho_{np\ o} = r_{np\ min} / R_k \quad (21)$$

Новые относительные величины также представлены в таблице 3.

Таблица 3

Оптимальные радиусы $R_{r\text{opt}}$ и относительные параметры зацепления

R_k , мм	z_1	$R_{r\text{opt}}$, мм	S , мм ²	$\rho_{\text{np min}}$, мм	R_{ro}	$\rho_{\text{np o}}$	S_o
200	2	68	36103	43,2	0,340	0,216	0,903
150	2	51	20318	32,2	0,340	0,215	0,903
100	2	34	9015	21,65	0,340	0,217	0,902
100	3	21	8235	11,85	0,210	0,119	0,824
150	3	32	18530	17,8	0,213	0,119	0,824
200	3	42	32800	23,1	0,210	0,116	0,820
200	4	28	30015	15,32	0,140	0,077	0,750
150	4	21	16880	11,5	0,140	0,077	0,750
100	4	14	7495	7,63	0,140	0,076	0,750
100	5	10	6860	5,35	0,100	0,054	0,686
150	5	15	15441	8,1	0,100	0,054	0,686
200	5	20	27452	10,81	0,100	0,054	0,686
150	7	9	13050	4,7	0,060	0,031	0,580
200	7	12	22100	6,2	0,060	0,031	0,582
100	7	6	5780	3,2	0,060	0,032	0,578

Следует отметить, что все вновь введенные относительные величины с высокой степенью достоверности подчиняются аппроксимирующим формулам, включающим один фактор — число зубьев ротора z_1 .

Формула относительного оптимального радиуса ролика R_{ro} имеет вид:

$$R_{ro} = 0,9331 \cdot z_1^{-1,392} \quad (R^2 = 0,9965), \quad (22)$$

где R^2 — величина достоверности аппроксимации.

Формула относительного приведенного радиуса контакта $\rho_{\text{np o}}$ имеет вид:

$$\rho_{\text{np o}} = 0,635 \cdot z_1^{-1,534} \quad (R^2 = 0,9995). \quad (23)$$

Формула относительной площади живого сечения S_o имеет вид:

$$S_o = 1,0175 - 0,0641 z_1 \quad (R^2 = 0,9911). \quad (24)$$

Рассмотрим пример применения полученных результатов при проектировании геометрии профиля торцевого сечения героторной машины. Зададимся следующим набором исходных данных: контурный радиус $R_k = 120$ мм, число зубьев ротора $z_1 = 4$, натяг в сопряжении $\Delta = 0$ мм (эмпирические формулы получены при нулевом натяге). Относительный оптимальный радиус ролика R_{ro} по формуле (22):

$$R_{ro} = 0,9331 \cdot 4^{-1,392} = 0,135.$$

Абсолютное значение радиуса ролика $R_r = R_{ro} \cdot R_k = 0,135 \cdot 120 = 16,2$ мм.

Относительный приведенный радиус контакта $\rho_{\text{np o}}$ по формуле (23):

$$\rho_{\text{np o}} = 0,635 \cdot 4^{-1,534} = 0,076.$$

Абсолютное значение минимального приведенного радиуса контакта:

$$\rho_{\text{np min}} = \rho_{\text{np o}} \cdot R_k = 0,076 \cdot 120 = 9,12 \text{ мм.}$$

Относительная площадь живого сечения S_o по формуле (24):

$$S_o = 1,0175 - 0,0641 \cdot 4 = 0,761.$$

Абсолютное значение площади живого сечения:

$$S = S_o \cdot R_k^2 = 0,761 \cdot 120^2 = 10958 \text{ мм}^2.$$

Расчеты по программе Mathcad дают следующие величины: $S = 10820 \text{ мм}^2$, $\rho_{np \min} = 9,167 \text{ мм}$. Как видно на этом примере, эмпирические формулы достаточно точно предсказывают основные параметры геометрии торцевого сечения героторной машины.

Обсуждение и заключение. Проведенное исследование направлено на решение задачи совершенствования рабочих органов героторных гидромашин и в достаточной степени соответствует работам отечественных и зарубежных авторов [10–15]. Основное отличие заключается в том, что при построении профилей ротора и статора использованы идеальные гипоциклоиды, обеспечивающие наибольшую кинематическую точность движения и контактного взаимодействия элементов зацепления. Известную проблему обеспечения натяга в сопряжении предлагается решить за счет разности параметров радиуса ролика, а для контроля гладкости профилей разработан специальный алгоритм [12]. Оптимальную геометрию профиля, как и в работе [10], предлагается определять на основе максимальной площади живого сечения рабочего органа героторной машины. Но при этом приведенный радиус контакта также должен иметь наибольшую величину, как залог наименьших контактных напряжений. В данном исследовании на основе большого числа расчетов по специально разработанной программе Mathcad в диапазоне чисел зубьев ротора z_1 от 2 до 7 и контурного диаметра R_k от 100 до 200 мм были определены оптимальные значения эквидистантного расстояния гипоциклоид, или радиусов роликов R_r , при которых достигается наилучшее сочетание приведенного радиуса контакта и площади живого сечения рабочего органа героторной машины. Выяснилось, что введение относительных величин радиуса ролика, площади живого сечения и приведенного радиуса контакта позволяет с помощью простых эмпирических зависимостей на раннем этапе проектирования получить абсолютные значения этих же величин для любого контурного радиуса в пределах установленных диапазонов.

Разработанная методика дает возможность на этапе проектирования профилей ротора и статора оценить производительность и работоспособность героторной машины. В перспективе подобные изыскания могут быть проведены для эпициклоидных и смешанных зацеплений в героторных гидромашинах.

Результаты исследований могут быть использованы в машиностроении при проектировании героторных гидравлических машин для улучшения их технико-эксплуатационных характеристик.

Список литературы

1. Baldenko D.F., Baldenko F.D. Single-Screw Hydraulic Machines in the Oil and Gas Industry: Fields of Application and Development Prospects. *Petroleum & Petrochemical Engineering Journal*. 2019;3(5):000207. <https://doi.org/10.23880/ppej-16000207>
2. Ramakrishnan Balaji Iyer, Jatti V.K., Yeshpal Yadav, Anurag Verma, Jaimin Desai, Dewan C.P. Design Optimization of CAD Model. *Materials Today: Proceedings*. 2017;4(8):7357–7364. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.065>
3. Hong-Seok Park, Xuan-Phuong Dang. Structural Optimization Based on CAD–CAE Integration and Metamodeling Techniques. *Computer-Aided Design*. 2010;42(10):889–902. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2010.06.003>
4. Lebedev A., Kireev S., Korchagina M., Lubinec V. Improvement of Design of Device for Production of Cycloidal Pinion Gear. In book: M. Shamtshyan, M. Pasetti, A. Beskopylny (eds). *Robotics, Machinery and Engineering Technology for Precision Agriculture. Smart Innovation, Systems and Technologies*. Vol. 247. P. 223–236. Singapore: Springer; 2022. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-16-3844-2_24
5. Korchagina M., Lebedev A., Kireev S., Vlaskin S. Model of Hole Mandrel Process in Tubular Workpieces. In book: A. Guda (ed) *Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles*. Vol. 509. P. 1541–1550. Cham: Springer; 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-031-11058-0_156
6. Lebedev A., Kireev S., Korchagina M., Efimov A. Optimization of Structure Parameters of Semi-Trailer-Tank for Hydraulic Fracturing of Formation. In book: A. Guda (ed) *Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles*. Vol. 510. Cham: Springer; 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-11051-1_178
7. Балденко Ф.Д., Яо Ян. Исследование площади камер рабочих органов одновинтовых гидравлических машин. *Бурение и нефть*. 2020;(6):24–29. <https://burneft.ru/archive/issues/2020-06/24>
8. Jie Chen, He Liu, Fengshan Wang, Guocheng Shi, Gang Cao, Hengan Wu. Numerical Prediction on Volumetric Efficiency of Progressive Cavity Pump with Fluid-Solid Interaction Model. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2013;109:12–17. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2013.08.019>

9. Gamboa J., Olivet A., Espin S. New Approach for Modeling Progressive Cavity Pumps Performance. *Journal of Petroleum Technology*. 2003;56(5):51–53. <https://doi.org/10.2118/84137-MS>
10. Yang Yao, Baldenko F. Optimization of Cycloidal Gearing Geometric Parameters of Positive Displacement Motors. *Equipment and Technologies for Oil and Gas Complex*. 2021;(6):22–26. [https://doi.org/10.33285/1999-6934-2021-6\(126\)-22-26](https://doi.org/10.33285/1999-6934-2021-6(126)-22-26)
11. Lyagov I., Baldenko F., Lyagov A., Yamaliev V., Lyagova A. Methodology for Calculating Technical Efficiency of Power Sections in Small-Sized Screw Downhole Motors for the “Perfobur” System. *Journal of Mining Institute*. 2019;240:694–700. <https://doi.org/10.31897/pmi.2019.6.694>
12. Коротаев Ю.А., Алпатов А.Н., Соболев А.В., Мяслицин Н.Ю. Исследование систематических погрешностей зацепления героторного механизма, спрофилированного от исходного контура рейки. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2017;8(1):112–120.
13. Коротаев Ю.А., Голдобин Д.А. Особенности проектирования и расчета многозаходных винтовых героторных механизмов мультифазных насосов. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2016;8(2):175–182.
14. Minikaev A.F., Pronin V.A., Zhignovskaya D.V., Kuznetsov Yu.L. The Use of Computer Modelling for the Development of the Working Bodies’ Profiles for Screw Single-Rotor Compressor. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2018;(1):61–66. <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2018-17-1-61-66>
15. Балденко Ф.Д., Ковалёнок А.Е. Компьютерное моделирование контактного взаимодействия рабочих органов одновинтовых гидравлических машин. *Территория Нефтегаз*. 2014;10:18–27.

References

1. Baldenko DF, Baldenko FD. Single-Screw Hydraulic Machines in the Oil and Gas Industry: Fields of Application and Development Prospects. *Petroleum & Petrochemical Engineering Journal*. 2019;3(5):000207. <https://doi.org/10.23880/ppej-16000207>
2. Ramakrishnan Balaji Iyer, Jatti VK, Yeshpal Yadav, Anurag Verma, Jaimin Desai, Dewan CP. Design Optimization of CAD Model. *Materials Today: Proceedings*. 2017;4(8):7357–7364. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.065>
3. Hong-Seok Park, Xuan-Phuong Dang. Structural Optimization Based on CAD–CAE Integration and Metamodeling Techniques. *Computer-Aided Design*. 2010;42(10):889–902. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2010.06.003>
4. Lebedev A, Kireev S, Korchagina M, Lubinec V. Improvement of Design of Device for Production of Cycloidal Pinion Gear. In: M Shamtsyan, M Pasetti, A Beskopylny (eds). *Robotics, Machinery and Engineering Technology for Precision Agriculture. Smart Innovation, Systems and Technologies*. Vol. 247. P. 223–236. Singapore: Springer; 2022. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-16-3844-2_24
5. Korchagina M, Lebedev A, Kireev S, Vlaskin S. Model of Hole Mandrel Process in Tubular Workpieces. In book: A. Guda (ed) *Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles*. Vol. 509. P. 1541–1550. Cham: Springer; 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-031-11058-0_156
6. Lebedev A, Kireev S, Korchagina M, Efimov A. Optimization of Structure Parameters of Semi-Trailer-Tank for Hydraulic Fracturing of Formation. In book: A. Guda (ed) *Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles*. Vol. 510. Cham: Springer; 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-11051-1_178
7. Baldenko FD, Yang Yao. The Study of the Chambers Area of the Working Bodies of Single-Screw Hydraulic Machines. *Drilling and Oil Magazine*. 2020;(6):24–29. <https://burneft.ru/archive/issues/2020-06/24>
8. Jie Chen, He Liu, Fengshan Wang, Guocheng Shi, Gang Cao, Hengan Wu. Numerical Prediction on Volumetric Efficiency of Progressive Cavity Pump with Fluid-Solid Interaction Model. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2013;109:12–17. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2013.08.019>
9. Gamboa J, Olivet A, Espin S. New Approach for Modeling Progressive Cavity Pumps Performance. *Journal of Petroleum Technology*. 2003;56(5):51–53. <https://doi.org/10.2118/84137-MS>
10. Yang Yao, Baldenko F. Optimization of Cycloidal Gearing Geometric Parameters of Positive Displacement Motors. *Equipment and Technologies for Oil and Gas Complex*. 2021;(6):22–26. [https://doi.org/10.33285/1999-6934-2021-6\(126\)-22-26](https://doi.org/10.33285/1999-6934-2021-6(126)-22-26)
11. Lyagov I, Baldenko F, Lyagov A, Yamaliev V, Lyagova A. Methodology for Calculating Technical Efficiency of Power Sections in Small-Sized Screw Downhole Motors for the “Perfobur” System. *Journal of Mining Institute*. 2019;240:694–700. <https://doi.org/10.31897/pmi.2019.6.694>
12. Korotaev YuA, Alpatov AN, Sobolev AV, Myalitsin NYu. Investigation of the Systematic Error of Gerotor Mechanism Action Profiled from the Initial Rack Contour. *Izvestiya Tula State University*. 2017;8(1):112–120.

13. Korotaev YuA, Goldobin DA. Designing and Calculation Peculiarities of the Multiple-Thread Screw-Type Gerotor Machines of the Multiphase Pumps. *Izvestiya Tula State University*. 2016;8(2):175–182.
14. Minikaev AF, Pronin VA, Zhignovskaya DV, Kuznetsov YuL. The Use of Computer Modelling for the Development of the Working Bodies' Profiles for Screw Single-Rotor Compressor. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2018;(1):61–66. <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2018-17-1-61-66>
15. Baldenko FD, Kovalenok AE. Komp'yuternoe modelirovanie kontaktnogo vzaimodeistviya rabochikh organov odnovintovykh gidravlicheskiy mashin. *Neftegaz Territory*. 2014;10:18–27. (In Russ.)

Поступила в редакцию 29.05.2023

Поступила после рецензирования 21.06.2023

Принята к публикации 26.06.2023

Об авторах:

Сергей Олегович Киреев, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машин и оборудования нефтегазового комплекса Донского государственного технического университета, (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), [AuthorID](#), kireevso@yandex.ru

Алексей Романович Лебедев, кандидат технических наук, доцент, кафедры машин и оборудования нефтегазового комплекса» Донского государственного технического университета, (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), [AuthorID](#), alex-diplom@mail.ru

Марина Валерьевна Корчагина, кандидат технических наук, доцент, кафедры машин и оборудования нефтегазового комплекса» Донского государственного технического университета, (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), [AuthorID](#), ms.korchaginamv@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

С.О. Киреев — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, научное руководство.

А.Р. Лебедев — проведение расчетов, подготовка текста, анализ результатов исследований, формирование выводов.

М.В. Корчагина — доработка рисунков и текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 29.05.2023

Revised 21.06.2023

Accepted 26.06.2023

About the Authors:

Sergey O. Kireev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Oil and Gas Complex Machinery and Equipment Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), [AuthorID](#), kireevso@yandex.ru

Alexey R. Lebedev, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Oil and Gas Complex Machinery and Equipment Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), [AuthorID](#), alex-diplom@mail.ru

Marina V. Korchagina, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Oil and Gas Complex Machinery and Equipment Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), [AuthorID](#), ms.korchaginamv@mail.ru

Claimed contributorship:

SO Kireev: basic concept formulation, research objectives and tasks, academic advising.

AR Lebedev: computational analysis, text preparation, analysis of the research results, formulation of conclusions.

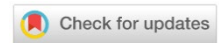
MV Korchagina: revision of drawings and text, correction of conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 62-522.7

Научная статья

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-283-295>

Исследование динамических характеристик автоматизированного позиционного длинноходового пневмопривода технологического оборудования

Д.А. Коротыч , В.С. Сидоренко , С.П. Приходько

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

daniilberuk@gmail.com

Аннотация

Введение. На длинноходовые перемещения в автоматизированных пневмоприводах приходится значительное количество исполнительных движений в координатных столах, на автоматизированных складах, раскройных машинах и т. д. Длинноходовые перемещения ухудшают динамическое качество и позиционирование привода. Это обусловлено трением поршня и нелинейными характеристиками потока сжатого газа в значительных объемах напорной и сливной полостей цилиндра. Таким образом, представляется перспективным создание автоматизированного позиционного пневмопривода для длинноходовых перемещений. Это позволит повысить производительность процессов при обеспечении заявленной точности. Цель работы — получение математической модели и зависимостей основных параметров предложенного автоматизированного позиционного длинноходового пневмопривода технологического оборудования на участках разгона, движения с установившейся скоростью, замедления и торможения.

Материалы и методы. Базой для расчетов и моделирования стала схема двух траекторий перемещения из точки А в точку Е с учетом сил, затраченных на эти процессы. Оптимальное перемещение определили с помощью принципа Портнягина (то есть оптимального быстродействия). Пропорциональное управление приводом представлено как метод достижения результата. Для длинноходовых перемещений привода детально визуализированы (представлены как рисунки): схематическое решение и расчетная схема. Предложены оригинальный струйный датчик с внутренней пневматической связью и пневмомеханическое дискретно-пропорциональное устройство для быстродействия контура управления. Математическая модель включает движение и торможение поршня, баланс массовых расходов, давление в точках и контур управления. Систему уравнений решали методом Рунге — Кутты в программном продукте «Симинтех» (Simintech). По итогам исследования обобщенной математической модели построили зависимости изменения кинематических, силовых и пневматических свойств привода в реальном времени при типовом цикле позиционирования. Информацию суммировали и представили как совокупность графиков.

Результаты исследования. Математическая модель сформирована по комплексу расчетов. Она учитывает зависимости, характерные для движения поршня пневмоцилиндра. Баланс массовых расходов исследуется по уравнениям расхода газа при сжатии в камере, через распределители и дроссели, в нагнетательной и сливной полостях и в управляющем устройстве. Рассмотрены неравенства, описывающие давления в точках и контур управления. Сложная математическая модель решалась в программной среде «Симинтех» (Simintech) методом Рунге — Кутты с изменяемым шагом интегрирования. Фрагмент работы программы выбран в качестве одной из иллюстраций. Он показывает, что софт задействует для расчетов такие показатели, как: заданная и приведенные координаты; универсальная газовая постоянная; коэффициенты жесткости пружины, сопротивления, адиабаты и вязкого трения в поршне; давление компрессора; массу подвижных частей пневмопривода; силу внешних сопротивлений; диаметры трубопровода, поршня пневмоцилиндра и тормозного устройства; протяженность хода поршня цилиндра; площади поршневых полостей и дросселей; длину трубопровода и его внутренний объем. Таким образом, программа оперирует значительным комплексом данных, что дает возможность получить существенные и адекватные результаты. Схематически показана взаимосвязь блоков и диаграмм, использованных при решении модели. Речь идет о графиках перемещений, площадей, давлений, скоростей и

температур. Используются блоки с текстом программы и предназначенные для интегрирования. Таким образом получены математическая модель автоматизированного пневмопривода технологического оборудования и зависимости основных параметров его работы. Графики свидетельствуют о том, что исполнительный механизм пневмопривода должным образом следует предложенной траектории.

Обсуждение и заключение. Итоги работы позволяют рассмотреть несколько этапов длинноходового перемещения привода, определить временные рамки этих процессов (от 0 до 0,65 сек), а также фиксируемые в данные промежутки изменения давления и скорости движения каретки пневмоцилиндра. Таких этапов пять: разгон, движение с установившейся скоростью, замедление, движение со скоростью позиционирования и торможение. Дальнейшие исследования будут сосредоточены на оптимизации системы для сокращения продолжительности и поддержания точного позиционирования при внешних воздействиях.

Ключевые слова: длинноходовой пневмопривод, струйная система управления, мехатронный модуль, пневматический датчик, позиционирование пневмопривода, программная среда «Симинтех», метод Рунге — Кутты

Благодарности: авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Коротыч Д.А., Сидоренко В.С., Приходько С.П. Исследование динамических характеристик автоматизированного позиционного длинноходового пневмопривода технологического оборудования. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(3):283–295. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-283-295>

Original article

Investigation of Dynamic Characteristics of an Automated Position Long-Stroke Pneumatic Actuator of Fabrication System

Daniil A. Korotych^{ID}, Valentin S. Sidorenko^{ID}, Sergey P. Prikhodko^{ID}

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ daniilberuk@gmail.com

Abstract

Introduction. Long-stroke movements in automated pneumatic drives account for a significant number of executive movements in coordinate tables, automated warehouses, cutting machines, etc. Long-stroke movements degrade the dynamic quality and positioning of the drive. This is due to the friction of the piston and the nonlinear characteristics of the compressed gas flow in significant volumes of the pressure and drain cavities of the cylinder. Thus, it seems promising to create an automated position pneumatic actuator for long-stroke movements. This will increase the productivity of processes while providing the declared accuracy. The objective of the work is to obtain a mathematical model and dependences of the critical parameters of the proposed automated position long-stroke pneumatic drive of fabrication system in the areas of acceleration, steady-speed movement, deceleration, and braking.

Materials and Methods. The basis for calculations and modeling was the scheme of two trajectories of movement from point A to point E, taking into account the forces expended on these processes. The optimal displacement was determined using the Portnyagin's principle (i.e., optimal performance). Proportional drive control was presented as a method of achieving the result. For long-stroke drive movements, schematic solution and design scheme were visualized in detail (presented as drawings). An original jet sensor with an internal pneumatic connection and a pneumo-mechanic discrete-proportional device for the control loop performance were proposed. The mathematical model included the movement and braking of the piston, the balance of mass flow, the pressure at points, and the control loop. The system of equations was solved by the Runge — Kutta method in the SimInTech software product. Based on the results of the study of a generalized mathematical model, the dependences of changes in the kinematic, power and pneumatic properties of the drive were constructed in real time during a typical positioning cycle. The information was summarized and presented as a set of graphs.

Results. The mathematical model was formed according to a set of calculations. It took into account the dependences characteristic of the movement of the piston of the pneumatic cylinder. The balance of mass flow was investigated by the equations of gas flow during compression in the chamber, through distributors and throttles, in the discharge and drain cavities and in the control device. Inequalities describing the pressures at the points and the control loop were considered. A complex mathematical model was solved in the SimInTech software environment by the Runge — Kutta method with a variable integration step. A fragment of the program was selected as one of the illustrations. It showed that the software used the following indicators for calculations: target and reduced coordinates; absolute gas constant; coefficients of spring

stiffness, resistance, adiabatic and viscous friction in the piston; compressor pressure; mass of the moving parts of the pneumatic actuator; strength of external resistances; diameters of the pipeline, the pneumatic cylinder piston and the braking device; length of the stroke of the cylinder piston; area of piston cavities and throttles; length of the pipeline and its internal volume. Thus, the program manipulated a significant set of data, which made it possible to obtain meaningful and adequate results. The relationship of blocks and diagrams used in solving the model was schematically shown. We are talking about graphs of movements, areas, pressures, velocities and temperatures. Blocks with the program text and intended for integration were used. Thus, a mathematical model of an automated pneumatic drive of the fabrication system and the dependences of the basic parameters of its operation were obtained. The graphs indicated that the operating mechanism of the pneumatic actuator properly followed the proposed trajectory.

Discussion and Conclusion. The research results allowed us to consider several stages of long-stroke movement of the drive, to determine the time frame of these processes (from 0 to 0.65s), as well as changes in pressure and speed of movement of the pneumatic cylinder carriage recorded in these intervals. There were five such stages: acceleration, steady-speed movement, deceleration, movement with positioning speed, and braking. Further research will focus on optimizing the system to reduce the duration and maintain accurate positioning under external influences.

Keywords: long-stroke pneumatic actuator, jet control system, mechatronic module, pneumatic sensor, pneumatic actuator positioning, SimInTech software environment, Runge-Kutta method

Acknowledgements: the authors would like to thank the editors and reviewers for their attentive attitude to the article and comments that made it possible to improve its quality.

For citation. Korotych DA, Sidorenko VS, Prikhodko SP. Investigation of Dynamic Characteristics of an Automated Position Long-Stroke Pneumatic Actuator of Fabrication System. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(3):283–295. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-283-295>

Введение. Производительность приводов определяется точностью позиционирования и скоростью перемещения координат в различных рабочих циклах. Современное промышленное оборудование часто оснащают автоматическими пневматическими приводами, для которых характерны длинноходовые перемещения. Это, например, порталные аппараты для контактной сварки, координатные столы и раскройные машины.

Современные позиционные пневмоприводы длинноходовых перемещений в технологическом оборудовании обеспечивают скорость до 30 мм/с и точность ~1 % от длины перемещения. В специальном исполнении при скорости до 100 мм/с точность позиционирования достигает 0,4 %. Отметим, что траектория движений формируется с помощью управления потоком сжатого воздуха в напорных или сливных трубопроводах и полостях пневмоцилиндра. В длинноходовых приводах длина таких полостей достигает 3 м. Сложные термодинамические процессы и сжимаемость в воздушных потоках — основные факторы, ограничивающие повышение точности [1–3].

Таким образом, необходимо увеличить производительность рабочих и технологических процессов оборудования при обеспечении заявленной точности. В данном случае представляется перспективным создание автоматизированного позиционного пневмопривода для длинноходовых перемещений. Новое решение должно учитывать такие характеристики пневмопривода, как скорость, массогабаритные показатели, пожаро- и взрывозащищенность [2, 4].

Цель работы — получение математической модели и зависимостей основных параметров предложенного автоматизированного позиционного длинноходового пневмопривода технологического оборудования на участках разгона, движения с установившейся скоростью, замедления и торможения.

Материалы и методы. На рис. 1 схематически представлена транспортная задача перемещения из точки *A* в точку *E* по двум траекториям. Учтены силы, затраченные на каждое из перемещений. Субоптимальное перемещение *ABCDE* (трапеция) при простом алгоритме управления реализуется за время $T_{n1} \gg T_{n2} \rightarrow \min$. Оптимальное перемещение *AFE* (колокол) получено решением оптимального быстродействия на основе принципа Портнягина $T_{n2} \rightarrow \min, \Delta L \leq |\Delta L_{\max}|$. Результат достигается при более сложном пропорциональном управлении приводом. Траекторию движения обеспечивает точность переключения управлений движением по пути L_{ny} .

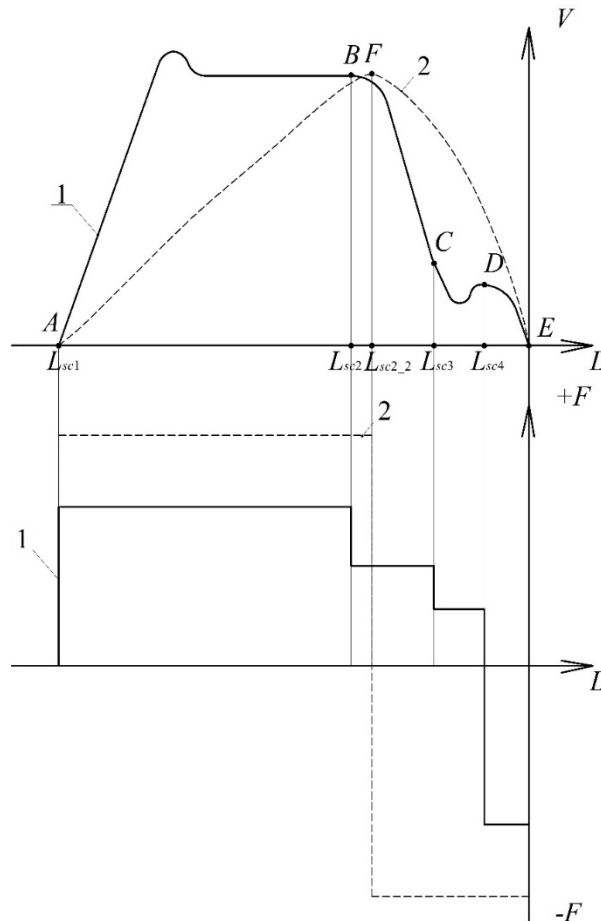


Рис. 1. Траектории перемещений: 1 — субоптимального $ABCDE$; 2 — оптимального AFE

В описании траектории 1 латинскими буквами обозначены точки переключения: A — на разгон привода; B — на замедление; C — на скорость позиционирования; D — на остановку. На участках AB и BC обеспечиваются начальный разгон и торможение до скорости позиционирования $V_{ПЗ}$ и дальнейшей остановки тормозным устройством $\Delta L_2 \leq |\Delta L_{max}|$.

При движении по 2-й траектории: A — переключение на разгон привода; F — переключение на остановку.

При использовании траектории 1 увеличивается длительность перемещений, но меньше используются сила и мощность. Следовательно, точность будет лучше в сравнении с траекторией 2.

Предлагается оригинальный струйный датчик с внутренней пневматической связью и пневмомеханическое дискретно-пропорциональное устройство, позволяющее повысить быстродействие контура управления, так как обратные связи в известных аналогах при длинных ходах снижают точность основного двигателя примерно на 10–15 % [4–6].

Схематическое решение пневматического позиционного привода для длинноходовых перемещений показано на рис. 2. Привод работает в соответствии с субоптимальной траекторией движения, определяемой в задаче оптимальной скорости при заданной точности позиционирования. Здесь ПЦ1 — бесштоковый пневмоцилиндр длинноходовых перемещений, который осуществляет главное движение; ПЦ2, ПЦ3 — тормозные пневмоцилиндры, которые фиксируют привод; СА — струйный датчик, определяющий координату перемещения, ускорение привода, его скорость и усилие; Р1 — пневматический распределитель с электропневматическим управлением, он управляет подачей на струйный датчик; Р2 — главный управляющий распределитель; Р3 — распределитель с пневматическим управлением, он управляет работой тормозных пневмоцилиндров; Г1–Г4 — глушители, отвечающие за сброс давления в атмосферу; ДД — датчик давления, получающий данные со струйного датчика; ПЛК — логический контроллер; ШД — шаговый двигатель, управляющий золотником распределителя; БПВ — блок подготовки воздуха; ДР1, ДР2 — дроссель с обратным клапаном, служащий для регулирования скорости бесштокового пневмоцилиндра длинноходовых перемещений главного движения [7].

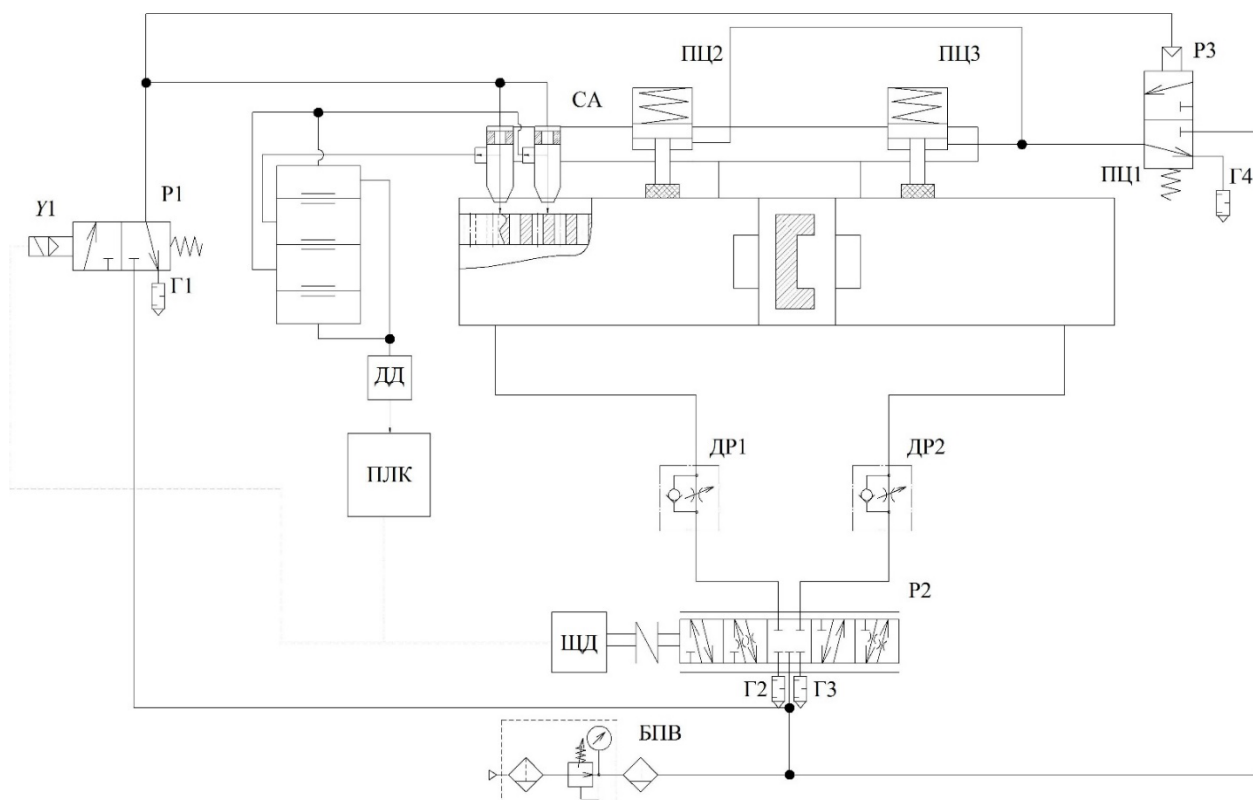


Рис. 2. Схематехническое предложение автоматизированного позиционного длинноходового пневмопривода

Привод содержит систему управления, которая отслеживает положение каретки бесштокового пневмоцилиндра, замедляет ход при приближении к заданным координатам и посылает сигнал на тормозное устройство [1, 4, 7].

Быстродействие повышается введением дискретно-пропорционального регулирующего устройства. Для управления используются сигналы, формируемые контуром управления. Устройство выполнено в виде двух сопел и содержит компенсационные измерения.

Результаты исследования. Расчетная схема пневмопривода длинноходовых перемещений представлена на рис. 3. Здесь ПЦ1 — бесштоковый пневмоцилиндр длинноходовых координатных перемещений, осуществляющий главное движение; ПЦ2, ПЦ3 — тормозные пневмоцилиндры, фиксирующие привод во время остановки в нужном положении; СА — струйный датчик, определяющий координату перемещения, ускорение привода, его скорость и усилие; P1 — пневматический распределитель с электропневматическим управлением, он управляет подачей на струйный датчик; P2 — главный управляющий распределитель; P3 — распределитель с пневматическим управлением, он управляет работой тормозных пневмоцилиндров; Г1–Г4 — глушители, отвечающие за сброс давления в атмосферу; ДР1–ДР2 — дроссель с обратным клапаном, служащий для регулирования скорости бесштокового пневмоцилиндра длинноходовых перемещений главного движения; ДД — датчик давления, получающий данные со струйного датчика; S — площадь поршня бесштокового пневмоцилиндра длинноходовых координатных перемещений; P1–P5 — исследуемые давления в точках 1–5; T1–T5 — исследуемые температуры в точках 1–5; $F_{тр}$ — сила трения в бесштоковом пневмоцилиндре длинноходовых перемещений; $F_{вт}$ — сила вязкого трения в бесштоковом пневмоцилиндре длинноходовых перемещений; $F_{вн}$ — внешняя сила в бесштоковом пневмоцилиндре длинноходовых перемещений; x — перемещение каретки бесштокового пневмоцилиндра длинноходовых перемещений; V — скорость перемещения каретки бесштокового пневмоцилиндра длинноходовых перемещений [7]; $C_{пр}$ — жесткость пружины тормозных пневмоцилиндров; m — перемещаемая масса; P_t — давление в тормозных цилиндрах; P_y — давление в управляющем канале; f_1 – f_4 — площади проходных сечений; P_a — давление атмосферы; $d_{з1}$ – $d_{з3}$ — диаметры золотников распределителей; $C_{прр1}$ – $C_{прр3}$ — жесткость пружины распределителей 1–3; $x_{р1}$ – $x_{р4}$ — перемещение золотников распределителей 1–4; $V_{р1}$ – $V_{р4}$ — скорость перемещения золотников распределителей 1–4; $F_{эм1}$ – $F_{эм2}$ — сила электромагнита управления распределителями 1–2; P_m — давление компрессора; T_m — температура, создаваемая компрессором.



- давление источника сжатого воздуха остается постоянным с течением времени;

1. Уравнение движения поршня пневмоцилиндра [1, 4]:

Здесь S — площадь поршня нагнетательной и сливной полостей бесштокового пневмоцилиндра длинноходовых координатных перемещений главного движения, м²; P_1, P_2 — давление воздуха в нагнетательной и сливной полостях цилиндра длинноходовых перемещений, Па; F_{BH} — внешние силы, Н; k_{BT} — коэффициент вязкого трения;

$F_{тр}$ — сила трения, Н; α — Булев параметр: $\alpha=0$ при $p_5 \leq p_{атм}$ и $\alpha = 1$ при $p_5 \geq p_{атм}$; p_5 — давление в канале управления, Па; $p_{атм}$ — давление атмосферы, Па [12–14]; m — масса подвижных частей привода, кг; F_T — сила торможения, Н.

$$F_m = \mu \cdot c_{пр\ m} \cdot (x_{0m} - x_m), \quad (2)$$

где $c_{пр\ t}$ — коэффициент жесткости пружины пневмоцилиндра тормоза; μ — коэффициент трения.

2. Уравнение движения поршня пневмоцилиндра торможения:

$$m \frac{d^2 x_m}{dt^2} = c_{пр\ m} \cdot (x_{0m} - x_m) - S_m \cdot p_m - F_{вн\ m} - k_{вн\ m} \cdot \frac{dx_m}{dt}. \quad (3)$$

Здесь $c_{пр\ m}$ — коэффициент жесткости пружины пневмоцилиндра тормоза; $x_{0т}$ — координата начального сжатия; S_T — эффективная площадь поршня сливной полости пневмоцилиндра тормоза, м²; P_M — давление воздуха соответственно в нагнетательной полости пневмоцилиндра тормоза, Па; $F_{вн\ t}$ — внешние силы, Н; $k_{вн\ t}$ — коэффициент вязкого трения.

3. Уравнения баланса массовых расходов:

$$G_{p2}(t) - G_{нп1}(t) + G_{сж}(t) = 0, \quad (4)$$

$$G_{нп2}(t) - G_{p3}(t) - G_{оп}(t) + G_{сж}(t) = 0, \quad (5)$$

$$G_{оп1}(t) - G_{оп2}(t) - G_{yy1}(t) + G_{сж}(t) = 0, \quad (6)$$

$$G_{оп3}(t) - G_{оп4}(t) - G_{yy2}(t) + G_{сж}(t) = 0, \quad (7)$$

$$G_{yy}(t) - G_{py4}(t) + G_{сж}(t) = 0. \quad (8)$$

Здесь $G_{сж}(t)$ — массовый расход газа при сжатии в камере; $G_{p2}(t), G_{p3}(t)$ — массовый расход через распределители; $G_{нп1}(t)$ и $G_{нп2}(t)$ массовый расход в нагнетательной и сливной полостях бесштокового пневмоцилиндра длинноходовых перемещений; $G_{оп}(t), G_{оп1}(t), G_{оп2}(t), G_{оп3}(t), G_{оп4}(t), G_{оп}(t)$ — массовый расход через дроссели в сливной линии, на входе в сопловой аппарат струйного датчика и на выходе из соплового аппарата; $G_{yy1}(t), G_{yy2}(t), G_{yy}(t), G_{py4}(t)$ — массовый расход в каналах управления управляющего устройства, на выходе из управляющего устройства, распределителя тормозных пневмоцилиндров [7].

$$G_{сж}(t) = \frac{\rho \cdot \pi \cdot V}{4 \cdot E \cdot R \cdot T} \cdot \frac{dp}{dt}, \quad (9)$$

где $\rho = 1,288$ кг/м³ — плотность воздуха; V — объем полости; $R = 287$ Дж/(кг·К) — газовая постоянная; E — объемный модуль упругости воздуха; T — температура в точке; $\frac{dp}{dt}$ — изменение давления в точке [6].

$$G_{нп1}(t) = \frac{W_1}{k \cdot R \cdot T} \cdot \frac{dp_1}{dt}, \quad (10)$$

$$G_{нп2}(t) = \frac{W_2}{k \cdot R \cdot T} \cdot \frac{dp_2}{dt}, \quad (11)$$

где W_1 и W_2 — текущие объемы в напорной и сливной полостях основного пневмоцилиндра, м³; k — показатель адиабаты (для воздуха $k = 1,4$).

4. Уравнения давления в точках:

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{k \cdot f_1 \cdot \sqrt{R \cdot T_M}}{S(x + x_{01}) \sqrt{\xi_1}} \cdot \sqrt{p_M^2 - p_1^2} - \frac{k \cdot f_3 \cdot \sqrt{R \cdot T_M}}{S(x + x_{01}) \sqrt{\xi_2}} \cdot \left(\frac{p_3}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{2k}} \cdot \sqrt{p_1^2 - p_3^2} - \frac{k \cdot p_1}{x + x_{01}} \cdot \frac{dx}{dt}, \quad (12)$$

$$\frac{dp_2}{dt} = -\frac{k \cdot f_2 \cdot \sqrt{R \cdot T_M}}{S(L - x + x_{02}) \sqrt{\xi_2}} \cdot \left(\frac{p_2}{p_a}\right)^{\frac{k-1}{2k}} \cdot \sqrt{p_2^2 - p_a^2} + \frac{k \cdot p_2}{L - x + x_{02}} \cdot \frac{dx}{dt}, \quad (13)$$

$$\frac{dp_3}{dt} = \frac{k \cdot f_3 \cdot \sqrt{R \cdot T_3}}{W_1 \cdot \sqrt{\xi_3}} \cdot \sqrt{p_1^2 - p_3^2} - \frac{k \cdot f_4 \cdot \sqrt{R \cdot T_4}}{W_2 \cdot \sqrt{\xi_4}} \cdot \left(\frac{p_3}{p_a}\right)^{\frac{k-1}{2k}} \cdot \sqrt{p_3^2 - p_a^2}, \quad (14)$$

$$\frac{dp_4}{dt} = \frac{k \cdot f_5 \cdot \sqrt{R \cdot T_5}}{W_3 \cdot \sqrt{\xi_5}} \cdot \sqrt{p_1^2 - p_4^2} - \frac{k \cdot f_6 \cdot \sqrt{R \cdot T_6}}{W_4 \cdot \sqrt{\xi_6}} \cdot \left(\frac{p_4}{p_a}\right)^{\frac{k-1}{2k}} \cdot \sqrt{p_4^2 - p_a^2}, \quad (15)$$

$$\frac{dp_5}{dt} = \frac{k \cdot f_6 \cdot \sqrt{R \cdot T_7}}{W_5 \cdot \sqrt{\xi_7}} \cdot \sqrt{p_5^2 - p_a^2}. \quad (16)$$

Здесь k — показатель адиабаты; R — газовая постоянная, Дж/кг·К; T_M — температура воздуха в магистрали, К; P_a — давление атмосферы, Па; $P_1 - P_5$ — давления в проточных частях трубопровода, Па; $W_1 - W_5$ — объемы проточных частей, м³; $\xi_1 - \xi_7$ — коэффициенты сопротивления в линии; $f_1 - f_6$ — площади проходных сечений трубопровода, м²; L — максимальный ход поршня, м; x_{01}, x_{02} — отношение начальных объемов пневмопривода к полезной площади поршня поршневой полости пневмоцилиндра, м; $\frac{dx}{dt}$ — скорость перемещения поршня, м/с.

5. Уравнения контура управления.

Уравнение движения золотника распределителя 1:

$$m_{3p1} \frac{d^2 x_{31}}{dt^2} = c_{np1} \cdot x_{31} - F_{c1} \cdot \text{sign} \left(\frac{dx_{31}}{dt} \right) - F_{y1} \cdot \left(\frac{dx_{31}}{dt} \right) - F_{эм1}. \quad (17)$$

Уравнение движения золотника распределителя 2:

$$m_{3p2} \frac{d^2 x_{32}}{dt^2} = c_{np2} \cdot x_{32} - F_{c2} \cdot \text{sign} \left(\frac{dx_{32}}{dt} \right) - F_{y2} \cdot \left(\frac{dx_{32}}{dt} \right) - F_{эм2}. \quad (18)$$

Уравнение движения золотника распределителя 3:

$$m_{3p3} \frac{d^2 x_{33}}{dt^2} = S_{p3} \cdot P_y - c_{np2} \cdot x_{33} - F_{c3} \cdot \text{sign} \left(\frac{dx_{33}}{dt} \right) - F_{y1} \cdot \left(\frac{dx_{33}}{dt} \right). \quad (19)$$

Уравнение движения золотника распределителя 4:

$$m_{3p4} \frac{d^2 x_{34}}{dt^2} = S_{p4} \cdot p_3 - S_{p4} \cdot p_4 - F_{c4} \cdot \text{sign} \left(\frac{dx_{34}}{dt} \right) - F_{y4} \cdot \left(\frac{dx_{34}}{dt} \right). \quad (20)$$

Здесь S_p — площадь торца золотника распределителя, м²; P_3, P_4, P_y — давление в каналах управления, Па;

F_c — силы сопротивления перемещению золотника распределителя, Н; F_y — силы реакции упоров, Н;

$F_{эм}$ — сила электромагнита, действующая на золотник распределителя, Н; c_{np} — коэффициент сжатия пружины, Н/м; m_{3p} — масса золотника распределителя, кг.

Для решения математической модели использовали программный продукт «Симинтех» (Simintech). Задействовали метод Рунге — Кутты с изменяемым шагом интегрирования (рис. 4–5).

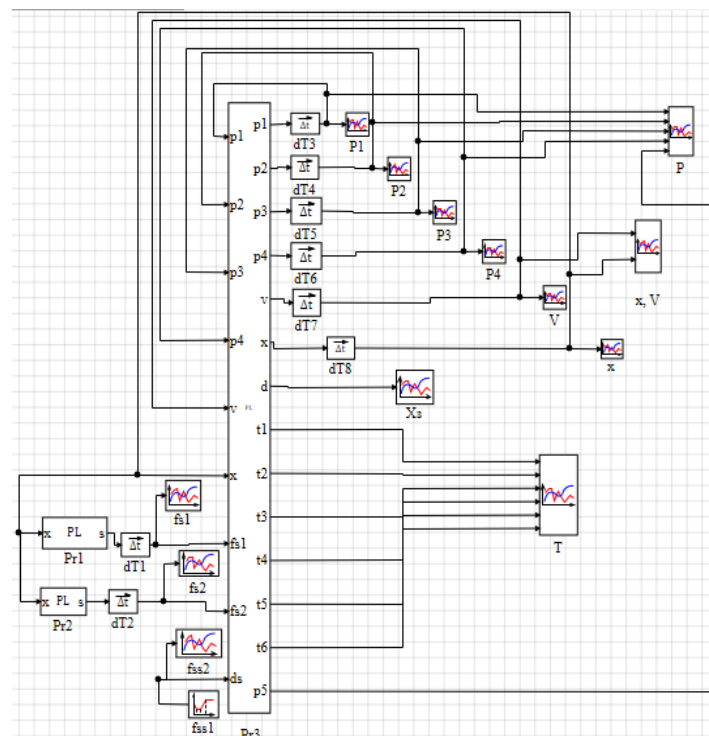


Рис. 4. Фрагмент модели в программе «Симинтех»

Здесь $P_1 - P_3$ — блоки с текстом программы; f_{s1}, f_{s2} — графики вывода площадей 1 и 2 дросселя струйного датчика; f_{ss1} — блок задачи площадей проходных сечений струйного датчика; f_{ss2} — графики вывода площадей проходных сечений струйного датчика; $dT1 - dT8$ — блоки интегрирования; $P1 - P4$ — графики вывода полученных давлений в точках 1–4; P — общий график вывода всех давлений; V — график вывода полученной скорости перемещения каретки бесштокового пневмоцилиндра; x — график вывода полученного перемещения каретки бесштокового пневмоцилиндра; x, V — общий график вывода полученного перемещения и скорости каретки бесштокового пневмоцилиндра; T — графики вывода полученных температур; X_z — график вывода полученного перемещения золотника управляющего распределителя.

```

1 input p1, p2, p3, p4, V, x, fs1, fs2, ds;
2 output p1, p2, p3, p4, V, x, d, T1, T2, T3, T4, T5, T6, p5;
3 init p1=100000, p2=100000, p3=100000, p4=100000, V=0, x=0;
4 xk=0.31 //Заданная координата
5 R=287; //Универсальная газовая постоянная
6 Tm=293; // Температура окружающей среды
7 ks1=65; //Коэффициент сопротивления
8 ks2=100; //Коэффициент сопротивления
9 ks3=70; //Коэффициент сопротивления
10 ks4=70; //Коэффициент сопротивления
11 d3=0.001; //Коэффициент сопротивления
12 d5=0.006; //Коэффициент сопротивления
13 pm=6*10^5; //Давление компрессора
14 pa=1.01325*10^5; //Давление атмосферы
15 k=1.4; //Коэффициент адиабаты
16 x01=0.008; //Приведенная координата
17 x02=0.008; //Приведенная координата
18 m=6; //Масса подвижных частей пневмопривода
19 Fvn=20; //Сила внешних сопротивлений
20 dtr1=0.005; //Диаметр трубопровода
21 dtr2=0.005; //Диаметр трубопровода
22 D=0.04; //Диаметр поршня пневмоцилиндра
23 Dt=0.04; //Диаметр поршня тормозного устройства
24 kvt=320; //Коэффициент вязкого трения в поршне

```

а)

```

L=0.4; //Ход поршня цилиндра
S=(pi*D^2)/4; //Площадь поршневой полости цилиндра
St=(pi*Dt^2)/4; //Площадь поршневой полости тормозного устройства
kt=0.4 //Коэффициент трения
begin
  if x<xk+0.0577 then
    p6=0
  else
    p6=pm
  end
  begin
    if x<0.363 then
      p5=pm
    else
      p5=0
    end
    N=p5*St;
    Ft=kt*N; //Сила трения
  begin
    if x<xk then
      d2=0.008
    else
      d2=0.0004
    end;

```

б)

```

begin
  if x<xk+0.0577 then
    d=ds
  else
    d=d2=0
  end;
  begin
    if x<xk then
      f5=0
    else
      f5=(pi*d5^2)/4
    end;
    f1=(pi*d^2)/4; //Площадь дросселя
    f2=(pi*d2^2)/4; //Площадь дросселя
    f3=(pi*d3^2)/4; //Площадь дросселя
    Ltr=0.01; //Длина трубопроводов
    cpr=500000; //Коэффициент жесткости пружины
    W1=Ltr*((pi*dtr1^2)/4); //Объем в трубопроводе
    W2=Ltr*((pi*dtr2^2)/4); //Объем в трубопроводе
  begin
    if L<x then Fy=(cpr*(x-L))
    else
      if (L>=x) or (x>=0) then Fy=0
      else if x<0 then Fy=cpr*x

```

в)

```

end
begin
  if p3>=600000 then p3=600000;
end
begin
  if p3<=pa then p3=pa;
end
begin
  if p4<=pa then p4=pa;
end
T1=(p1/pm)^((k-1)/k)*Tm;
T2=(p2/pm)^((k-1)/k)*Tm;
T3=(pm/pm)^((k-1)/k)*Tm;
T4=(p3/pm)^((k-1)/k)*Tm;
T5=(pm/pm)^((k-1)/k)*Tm;
T6=(p4/pm)^((k-1)/k)*Tm;
G11=(k*f1*sqrt(R*Tm)/(S*(x+x01)*sqrt(ks1)))*sqrt(abs(pm^2-p1^2));
G12=(k*f3*sqrt(R*T3)/(S*(x+x01)*sqrt(ks2)))*sqrt(abs(p3-p1)^((k-1)/(2*k)))*sqrt(abs(p1^2-p3^2));
G13=(k*f3*sqrt(R*T5)/(S*(x+x01)*sqrt(ks2)))*sqrt(abs(p4-p1)^((k-1)/(2*k)))*sqrt(abs(p1^2-p4^2));
G14=(k*f1/(x+x01))*V;
G21=(k*f2*sqrt(R*T2)/(S*(L-x+x02)*sqrt(ks2)))*sqrt(abs(p2-pa)^((k-1)/(2*k)))*sqrt(abs(p2^2-pa^2));
G22=(k*f2/(L-x+x02))*V;
G31=(k*f3*sqrt(R*T3)/(W1*sqrt(ks3)))*sqrt(p1^2-p3^2);
G32=(k*f3*sqrt(R*T3)/(W2*sqrt(ks4)))*sqrt(p3^2-pa^2);
G41=(k*f3*sqrt(R*T5)/(W1*sqrt(ks3)))*sqrt(p1^2-p4^2);
G42=(k*f3*sqrt(R*T6)/(W2*sqrt(ks4)))*sqrt(p4^2-pa^2);
p1'=G11-G12-G13-G14;
p2'=-G21+G22;
p3'=G31-G32;
p4'=G41-G42;
x'=V;
V'=(S*(p1-p2)-Fvn*sign(V)-kvt*V-Ft*sign(V))/m;

```

г)

Рис. 5. Блок программирования в «Симинтех»: а — часть исходных данных; б — часть логических функций; в — часть присваивания переменных; г — основная часть программы

Исследование обобщенной математической модели предлагаемого привода позволило получить графики поведения привода при разгоне, замедлении и остановке (рис. 6), описывающие изменения кинематических, силовых и пневматических свойств привода в реальном времени при типовом цикле позиционирования [15].

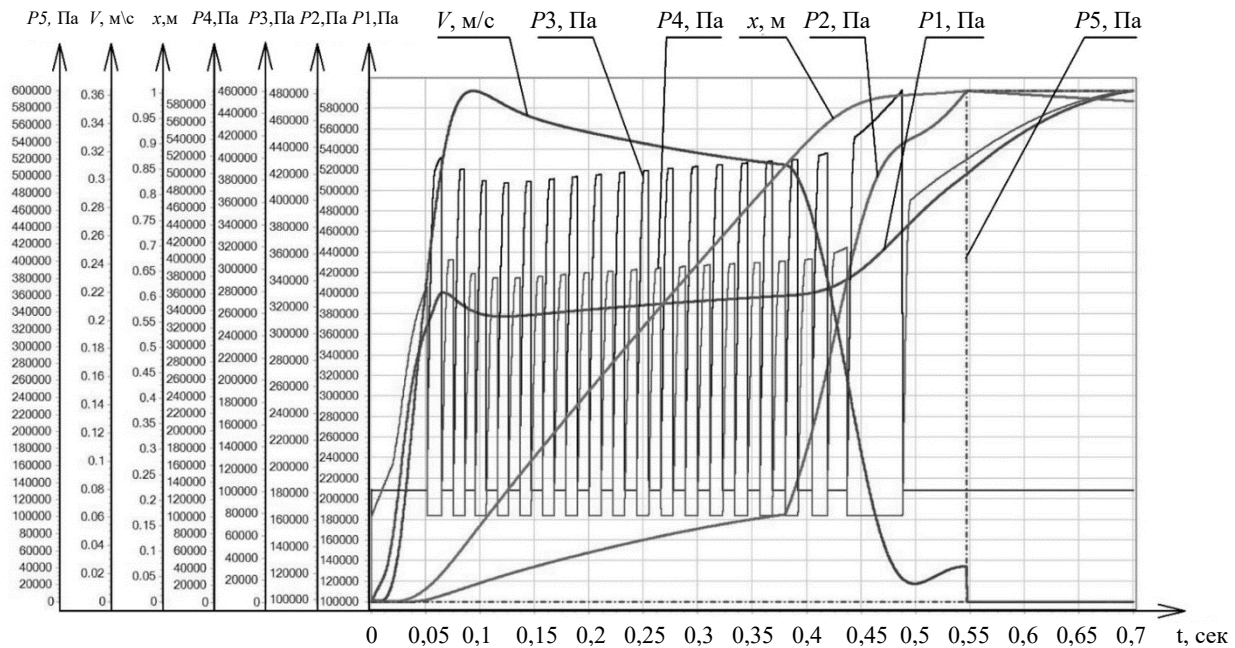


Рис. 6. Комплекс графиков по данным обобщенной математической модели

Обсуждение и заключение. График показывает длинноходовое перемещение по траектории, предложенной на рис. 1. Работа привода состоит из нескольких этапов.

1. 0–0,1 сек. Разгон. Давление в напорной полости повышается до 4 бар, скорость движения каретки пневмоцилиндра — 1 м/с.

2. 0,1–0,38 сек. Движение с установившейся скоростью. Давление в напорной полости — около 3,8 бар. Давление в сливной линии повышается до 1,6 бар, скорость движения каретки пневмоцилиндра — 0,85 м/с.

3. 0,38–0,5 сек. Замедление. Давление в напорной и сливной полостях увеличивается. Скорость движения каретки пневмоцилиндра понижается до 0,075 м/с.

4. 0,5–0,65 сек. Движение со скоростью позиционирования. Давление в напорной и сливной полостях повышается, скорость движения каретки пневмоцилиндра — 0,075 м/с.

5. 0,65 сек. Переключение на торможение, активация внешнего тормозного устройства.

Полученные графики подтверждают, что длинноходовые перемещения пневмопривода выполняются в соответствии с предложенной траекторией (рис. 1) и система управления функционирует должным образом. Дальнейшие исследования будут сосредоточены на оптимизации системы для сокращения продолжительности и поддержания точного позиционирования при внешних воздействиях.

Список литературы

1. Коротыч Д.А., Сидоренко В.С. Позиционная система управления длинноходовыми пневмоприводами. В: *Мат-лы XXIII междунар. науч.-тех. конф. студентов и аспирантов, посвященной 100-летию доктора технических наук, заслуженного профессора МЭИ, почетного академика водохозяйственных наук Бориса Тихоновича Емцева «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика»*. Москва: Издательство «Мир науки»; 2019. С. 157–163. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41599329> (дата обращения: 04.05.2023).
2. Jihong Wang, Gordon T. Energy Optimal Control of Servo-Pneumatic Cylinders through Nonlinear Static Feedback Linearization. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 2012;134(5):051005. <https://doi.org/10.1115/1.4006084>
3. Дао Тхе Ань. *Позиционный пневмопривод повышенного быстродействия и точности*. Дис. канд. тех. наук. Ростов-на-Дону; 2016. 206 с. URL: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01008559478> (дата обращения: 04.05.2023).
4. Sidorenko V.S., Korotych D.A., Grishenko V.I., Kharchenko AN. Simulation of Pneumatic Actuator Position System for Long Stroke Mounting Movements. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1029:012039. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1029/1/012039>
5. Галлямов Ш.Р., Стариков К.В., Целищев В.А. Экспериментальное исследование характеристик пневмопривода FESTO с пропорциональным распределителем расхода. *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. 2011;15(1)(41):26–33. URL: <http://journal.ugatu.su/index.php/Vestnik/article/view/900> (дата обращения: 04.05.2023).

6. Mosadegh B., Polygerinos P., Keplinger Ch., Wennstedt S., Shepherd R.F., Gupta U., et al. Pneumatic Networks for Soft Robotics that Actuate Rapidly. *Advanced Functional Materials*. 2014;24(15):2163–2170. <https://doi.org/10.1002/adfm.201303288>
7. Дао Тхе Ань, Сидоренко В.С. Моделирование процессов позиционирования быстродействующего пневмопривода робота. *Фундаментальные исследования*. 2015;(7–2):285–292. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=38687> (дата обращения: 06.05.2023).
8. Долгов Г.А. Комбинированный пневмопривод поворотных-делительных механизмов повышенного быстродействия и точности. В: *Мат-лы XXIII междунар. науч.-тех. конф. студентов и аспирантов, посвященной 100-летию доктора технических наук, заслуженного профессора МЭИ, почетного академика водохозяйственных наук Бориса Тихоновича Емцева «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика»*. Москва: Изд-во «Мир науки»; 2019. С. 119–126.
9. Lemesko M., Molev M., Golovin I. Hydraulic Technological Machines with Adaptive Drive Structure. *MATEC Web of Conferences*. 2018;224:02087. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822402087>
10. Дао Тхе Ань, Сидоренко В.С., Дымочкин Д.Д. Исследование точности позиционирования автоматизированного пневмопривода с внешним тормозным устройством. *Вестник Донского государственного технического университета*. 2015;15(4):46–53. <https://doi.org/10.12737/16077>
11. Gorin A., Tokmakov N., Kyznetsov I. Substantiation of Parameters of Machine with Volumetric Hydraulic Drive for Formation of Wells in Ground. In: *Proc. 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE)*. Cham: Springer; 2019. P. 1315–1323. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-22063-1_139 (дата обращения: 04.05.2023).
12. Vardhan A., Dasgupta K., Mishra S.K. Dynamic Analysis of a Closed-Circuit Hydraulic Drive System Used in the Rotary Head of Blasthole Drilling Machine Using MATLAB-Simulink Environment. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*. 2019;233(6):702–719. <https://doi.org/10.1177/0959651818808870>
13. Obukhova E.N., Grishchenko V.I., Dolgov G.A. Formalization of Dynamic Model of Pneumatic Drive with Variable Structure. *MATEC Web of Conferences*. 2018;226:02022. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822602022>
14. Sepe Terry, Joost Brancart, Dirk Lefeber, Guy Van Assche, Bram Vanderborcht. Self-Healing Soft Pneumatic Robots. *Science Robotics*. 2017;2(9):4268. <https://www.science.org/doi/10.1126/scirobotics.aan4268>
15. Obukhova E.N., Popov A.N. Synergetic Synthesis of Nonlinear Adaptive Control for Pneumatic Drives. In: *Proc. IV Int. Conf. on Control in Technical Systems (CTS)*. New York: IEEE; 2021. <https://doi.org/10.1109/CTSS3513.2021.9562786>

References

1. Korotych DA, Sidorenko VS. Pozitsionnaya sistema upravleniya dlinnokhodovymi pnevmoprivodami. In: *Proc. XXIII Int. Sci.-Tech. Conf. of students and postgraduates “Hydraulic Machines, Hydraulic Drives and Hydropneumodynamics”, dedicated to the 100th anniversary of Boris T. Emtsev, Dr.Sci. (Eng.), Honored Professor of MEI, Honorary Academician of Water Sciences*. Moscow: Izd-vo “Mir nauki”; 2019. P. 157–163. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41599329> (accessed: 04.05.2023). (In Russ.)
2. Jihong Wang, Gordon T. Energy Optimal Control of Servo-Pneumatic Cylinders through Nonlinear Static Feedback Linearization. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 2012;134(5):051005. <https://doi.org/10.1115/1.4006084>
3. Dao The Anh. *Pozitsionnyi pnevmoprivod povyshennogo bystrodeistviya i tochnosti*. Cand.Sci. (Engineering) diss. Rostov-on-Don; 2016. 206 p. URL: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01008559478> (accessed: 04.05.2023). (In Russ.)
4. Sidorenko VS, Korotych DA, Grishenko VI, Kharchenko AN. Simulation of Pneumatic Actuator Position System for Long Stroke Mounting Movements. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1029:012039. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1029/1/012039>
5. Gallyamov ShR, Starikov KV, Celischev VA. Experimental Research of Characteristics of the Pneumatic Actuator FESTO with Proportional Allocation of the Expenditure. *Vestnik UGATU*. 2011;15(1)(41):26–33. URL: <http://journal.ugatu.su/index.php/Vestnik/article/view/900> (accessed: 04.05.2023).
6. Mosadegh B, Polygerinos P, Keplinger Ch, Wennstedt S, Shepherd RF, Gupta U, et al. Pneumatic Networks for Soft Robotics that Actuate Rapidly. *Advanced Functional Materials*. 2014;24(15):2163–2170. <https://doi.org/10.1002/adfm.201303288>
7. Dao The Anh, Sidorenko VS. The Study of the Dynamical System High-Speed Pneumatic Robot Position. *Fundamental research*. 2015;(7–2):285–292. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=38687> (accessed: 06.05.2023).

8. Dolgov GA. Kombinirovannyi pnevmoprivod povorotno-delitel'nykh mekhanizmov povyshennogo bystrodeistviya i tochnosti. In: *Proc. XXIII Int. Sci.-Tech. Conf. of students and postgraduates "Hydraulic Machines, Hydraulic Drives and Hydropneumatics", dedicated to the 100th anniversary of Boris T. Emtsev, Dr.Sci. (Eng.), Honored Professor of MEI, Honorary Academician of Water Sciences*. Moscow: Izd-vo "Mir nauki"; 2019. P. 119–126.
9. Lemeshko M, Molev M, Golovin I. Hydraulic Technological Machines with Adaptive Drive Structure. *MATEC Web of Conferences*. 2018;224:02087. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822402087>
10. Dao The Anh, Sidorenko VS, Dymochkin DD. Study on Positioning Accuracy of Automated Pneumatic Drive with an Outer Brake. *Vestnik of DSTU*. 2015;15(4):46–53. <https://doi.org/10.12737/16077>
11. Gorin A, Tokmakov N, Kyznetsov I. Substantiation of Parameters of Machine with Volumetric Hydraulic Drive for Formation of Wells in Ground. In: *Proc. 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE)*. Cham: Springer; 2019. P. 1315–1323. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-22063-1_139 (accessed: 04.05.2023).
12. Vardhan A, Dasgupta K, Mishra SK. Dynamic Analysis of a Closed-Circuit Hydraulic Drive System Used in the Rotary Head of Blasthole Drilling Machine Using MATLAB-Simulink Environment. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*. 2019;233(6):702–719. <https://doi.org/10.1177/0959651818808870>
13. Obukhova EN, Grishchenko VI, Dolgov GA. Formalization of Dynamic Model of Pneumatic Drive with Variable Structure. *MATEC Web of Conferences*. 2018;226:02022. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822602022>
14. Seppe Terry, Joost Brancart, Dirk Lefeber, Guy Van Assche, Bram Vanderborght. Self-Healing Soft Pneumatic Robots. *Science Robotics*. 2017;2(9):4268. <https://www.science.org/doi/10.1126/scirobotics.aan4268> (accessed: 04.05.2023).
15. Obukhova EN, Popov AN. Synergetic Synthesis of Nonlinear Adaptive Control for Pneumatic Drives. In: *Proc. IV Int. Conf. on Control in Technical Systems (CTS)*. New York: IEEE; 2021. <https://doi.org/10.1109/CTS53513.2021.9562786>

Поступила в редакцию 01.06.2023

Поступила после рецензирования 28.06.2023

Принята к публикации 07.07.2023

Об авторах:

Даниил Андреевич Коротыч, ассистент и аспирант кафедры гидравлики, гидропневмоавтоматики и тепловых процессов Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ScopusID](#), [ORCID](#), [ResearcherID](#), [Автор ID](#), daniilberuk@gmail.com

Валентин Сергеевич Сидоренко, доктор технических наук, профессор кафедры гидравлики, гидропневмоавтоматики и тепловых процессов Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ScopusID](#), [ORCID](#), [ResearcherID](#), [Автор ID](#), vsidorenko@donstu.ru

Сергей Павлович Приходько, ассистент и аспирант кафедры гидравлики, гидропневмоавтоматики и тепловых процессов Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ScopusID](#), [ORCID](#), [ResearcherID](#), [Автор ID](#), sergey.161.96@gmail.com

Заявленный вклад соавторов:

Д.А. Коротыч — подготовка текста, составление математической модели, моделирование в программе, анализ результатов исследования.

В.С. Сидоренко — научное руководство, формирование основной концепции, цели и задач исследования.

С.П. Приходько — оформление и доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 01.06.2023

Revised 28.06.2023

Accepted 07.07.2023

About the Authors:

Daniil A. Korotych, Teaching assistant and Postgraduate student of the Hydraulics, Hydropneumodynamics and Heat Management Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), [ScopusID](#), [ORCID](#), [ResearcherID](#), [Авtop ID](#), daniilberuk@gmail.com

Valentin S. Sidorenko, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Hydraulics, Hydropneumodynamics and Heat Management Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), [ScopusID](#), [ORCID](#), [ResearcherID](#), [Авtop ID](#), vsidorenko@donstu.ru

Sergey P. Prihodko, Teaching assistant and Postgraduate student of the Hydraulics, Hydropneumodynamics and Heat Management Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), [ScopusID](#), [ORCID](#), [ResearcherID](#), [Авtop ID](#), sergey.161.96@gmail.com

Claimed Contributorship:

DA Korotych: preparation of the text, development of the mathematical model, modeling in the program, analysis of research results.

VS Sidorenko: academic advising, basic concept formulation, research objectives and tasks.

SP Prihodko: design and revision of the text, correction of the conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT



УДК 57.087

Научная статья

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-296-306>

GATCGGenerator: новый генератор для создания квазислучайных нуклеотидных последовательностей

О.Ю. Кирьянова¹ , Р.Р. Гарафутдинов² , И.М. Губайдуллин³ , А.В. Чемерис² 

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация

² Институт биохимии и генетики — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Уфимский федеральный исследовательский центр», г. Уфа, Российская Федерация

³ Институт нефтехимии и катализа — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Уфимский федеральный исследовательский центр», г. Уфа, Российская Федерация

✉ olga.kiryanova27@gmail.com

Аннотация

Введение. В последние десятилетия знания о ДНК все шире применяются для решения небιологических задач (вычисления с помощью ДНК, долговременное хранение информации). В первую очередь речь идет о случаях, когда необходимо подобрать искусственные нуклеотидные последовательности. Для их создания используются специальные программы. Однако существующие генераторы не учитывают физико-химические свойства ДНК и не позволяют получать последовательности с явно выраженной «небиологической» структурой. Фактически они генерируют последовательности, распределяя нуклеотиды случайным образом. Целью данной работы является создание генератора квазислучайных последовательностей с особой нуклеотидной структурой. Он должен учитывать некоторые физико-химические особенности нуклеотидных структур и будет задействован при хранении небιологической информации в ДНК.

Материалы и методы. Описано новое программное обеспечение GATCGGenerator для генерации квазислучайных последовательностей нуклеотидов. Оно предоставляется как SaaS (от англ. software as a service — программное обеспечение как услуга), что обеспечивает его доступность с разных устройств и платформ. Программа генерирует последовательности определенной структуры с учетом гуанин-цитозинового (GC) состава и содержания динуклеотидов. Представлена работа алгоритма новой программы. Требования к сгенерированным нуклеотидным последовательностям заданы с помощью чата в «Телеграм» (Telegram), наглядно показано взаимодействие с пользователем. Определены и обобщены различия входных параметров и получаемых в результате работы программы конкретных нуклеотидных структур. Также в сопоставлении даны временные затраты генерации последовательностей при различных входных данных. Изучены короткие последовательности, различающиеся по типу, длине, GC-составу и содержанию динуклеотидов. В табличном виде показано, как в этом случае соотносятся входные и выходные параметры.

Результаты исследования. Созданное программное обеспечение сравнили с существующими генераторами нуклеотидных последовательностей. Установлено, что генерируемые последовательности отличаются по структуре от известных ДНК-последовательностей живых организмов, а значит, могут быть использованы в качестве вспомогательных или маскирующих олигонуклеотидов, пригодных для молекулярно-биологических манипуляций (например — реакции амплификации), а также для хранения в молекулах ДНК небιологической информации (изображений, текстов и т. д.). Предложенное решение дает возможность формировать специфические последовательности длиной от 20 до 5 000 нуклеотидов с заданным числом динуклеотидов и без гомополимерных участков. Более жесткие условия генерации снимают известные ограничения и позволяют создавать квазислучайные последовательности нуклеотидов по заданным входным параметрам. Кроме количества и длины последовательностей можно заранее определить GC-состав, содержание динуклеотидов и природу нуклеиновой кислоты (ДНК или РНК).

Приводятся примеры коротких последовательностей, различающихся по длине, GC-составу и содержанию динуклеотидов.

Полученные 30-нуклеотидные последовательности прошли проверку. Установлено отсутствие 100-процентной гомологии с известными ДНК-последовательностями живых организмов. Максимальное совпадение наблюдалось для сгенерированных последовательностей длиной 25 нуклеотидов (сходство около 80 %). Таким образом доказано, что GATCGGenerator может с высокой эффективностью генерировать небιологические нуклеотидные последовательности.

Обсуждение и заключение. Новый генератор позволяет создавать нуклеотидные последовательности *in silico* с заданным GC-составом. Решение дает возможность исключить гомополимерные фрагменты, что качественно улучшает физико-химическую стабильность последовательностей.

Ключевые слова: GATCGGenerator, генератор нуклеотидных последовательностей, синтетические нуклеиновые кислоты, случайные последовательности, хранение данных в ДНК, стеганография, NYRN-олигонуклеотиды, вычисления с помощью ДНК, криптография, ДНК-метчики в гидрологии

Благодарности: авторы выражают признательность рецензентам за ценные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

Финансирование. Работа выполнена в рамках гранта РФФИ 20–07–00222.

Для цитирования. Кириянова О.Ю., Гарафутдинов Р.Р., Губайдуллин И.М. Чемерис А.В. GATCGGenerator: новый генератор для создания квазислучайных нуклеотидных последовательностей. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(3):296–306. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-296-306>

Original article

GATCGGenerator: New Software for Generation of Quasirandom Nucleotide Sequences

Olga Yu. Kiryanova¹ , Ravil R. Garafutdinov² , Irek M. Gubaydullin³ , Aleksei V. Chemeris² 

¹ Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation

² Institute of Biochemistry and Genetics, Ufa Federal Research Center, RAS, Ufa, Russian Federation

³ Institute of Petrochemistry and Catalysis, RAS, Ufa, Russian Federation

✉ olga.kiryanova27@gmail.com

Abstract

Introduction. In recent decades, knowledge about DNA has been increasingly used to solve biological problems (calculations using DNA, long-term storage of information). Principally, we are talking about cases when it is required to select artificial nucleotide sequences. Special programs are used to create them. However, existing generators do not take into account the physicochemical properties of DNA and do not allow obtaining sequences with a pronounced “non-biological” structure. In fact, they generate sequences by distributing nucleotides randomly. The objective of this work is to create a generator of quasirandom sequences with a special nucleotide structure. It should take into account some physicochemical features of nucleotide structures, and it will be involved in storing non-biological information in DNA.

Materials and Methods. A new GATCGGenerator software for generating quasirandom sequences of nucleotides was described. It was presented as SaaS (from “software as a service”), which provided its availability from various devices and platforms. The program generated sequences of a certain structure taking into account the guanine-cytosine (GC) composition and the content of dinucleotides. The performance of the new program algorithm was presented. The requirements for the generated nucleotide sequences were set using a chat in Telegram, the interaction with the user was clearly shown. The differences between the input parameters and the specific nucleotide structures obtained as a result of the program were determined and generalized. Also, the time costs of generating sequences for different input data were given in comparison. Short sequences differing in type, length, GC composition and dinucleotide content were studied. The tabular form shows how the input and output parameters are correlated in this case.

Results. The developed software was compared to existing nucleotide sequence generators. It has been established that the generated sequences differ in structure from the known DNA sequences of living organisms, which means that they can be used as auxiliary or masking oligonucleotides suitable for molecular biological manipulations (e.g., amplification reactions), as well as for storing non-biological information (images, texts, etc.) in DNA molecules. The proposed solution makes it possible to form specific sequences from 20 to 5 000 nucleotides long with a given number of dinucleotides and without homopolymer fragments. More stringent generation conditions remove known limitations and provide the creation of quasirandom sequences of nucleotides according to specified input parameters. In addition to the number and

length of sequences, it is possible to determine the GC composition, the content of dinucleotides, and the nature of the nucleic acid (DNA or RNA) in advance. Examples of short sequences differing in length, GC composition and dinucleotide content are given. The obtained 30-nucleotide sequences were tested. The absence of 100 % homology with known DNA sequences of living organisms was established. The maximum coincidence was observed for the generated sequences with a length of 25 nucleotides (similarity of about 80 %). Thus, it has been proved that GATCGGenerator can generate non-biological nucleotide sequences with high efficiency.

Discussion and Conclusion. The new generator provides the creation of nucleotide sequences *in silico* with a given GC composition. The solution makes it possible to exclude homopolymer fragments, which improves qualitatively the physicochemical stability of sequences.

Keywords: GATCGGenerator, nucleotide sequences generator, synthetic nucleic acids, random sequences, data storage in DNA, steganography, NYRN-oligonucleotides, calculations with DNA, cryptography, DNA-tagging in hydrology

Acknowledgements: the authors would like to thank the reviewers for valuable comments that contributed to the improvement of the article.

Funding information. The research is done on RFFI grant no. 20–07–00222.

For citation. Kiryanova OYu, Garafutdinov RR, Gubaydullin IM, Chemeris AV. GATCGGenerator: New Software for Generation of Quasirandom Nucleotide Sequences. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(3): 296–306. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-296-306>

Введение. ДНК является уникальным биополимером, обеспечивающим хранение, передачу и воспроизведение генетической информации в живых организмах. Молекулы ДНК состоят из четырех типов нуклеотидов, содержащих азотистые основания аденин (А), гуанин (Г), цитозин (С), тимин (Т). Их возможные комбинации обеспечивают нуклеотидные последовательности, формирующие функциональные генетические элементы. В молекулярной биологии и генетике основные работы ведутся с нуклеотидными последовательностями живых организмов, однако возрастает потребность в создании искусственных последовательностей, особенно при решении небиологических задач (например, ДНК-вычисления [1, 2], хранение в ДНК [3], криптография [4], ДНК-метки в гидрологии [5] и др.).

Как ожидается, к концу 2040 года объем информации достигнет нескольких йоттабайт (10^{24}), что требует ее структурирования и хранения. Оба этих процесса существенно влияют на потребление энергетических ресурсов, а также на производство устройств хранения данных и периферийных устройств (жесткие диски, твердотельные накопители). Для хранения такого количества информации требуется более 10^9 кг особо чистого кремния [6], которого может не хватить. Решение видится в использовании принципов ДНК для работы с масштабными объемами данных.

Нуклеотидные последовательности легко оцифровываются путем присвоения соответствующих двоичных кодов отдельным нуклеотидам [7–11] или блокам нуклеотидов [12–14], поэтому текстовые, графические или мультимедийные файлы можно преобразовывать в последовательности нуклеотидов [15–18]. Искусственные нуклеотидные последовательности можно составить вручную или сгенерировать с помощью специального программного обеспечения (генераторы ДНК) в зависимости от решаемых задач. Некоторые генераторы ДНК разрабатывались как самостоятельные приложения, другие — как часть программных пакетов, предназначенных для решения общих [19]^{1, 2, 3, 4, 5} или специфических задач [20]. Как правило, генераторы ДНК разработаны на основе комбинаторных подходов и производят случайные последовательности заданной длины гуанин-цитозинового (GC) состава. Однако такие программные решения не учитывают химические свойства нуклеотидов и не позволяют получать последовательности с определенной структурой (например, без гомополимерных участков или длинных повторяющихся мотивов). Поэтому создаваемые такими генераторами последовательности не всегда можно воспроизвести в лабораторных условиях. Кроме того, такие последовательности могут быть идентичны существующим в природе фрагментам ДНК, что вносит неоднозначность при попытках закодировать информацию небиологического характера.

¹ Nucleotide Sequence Generator // nucleotide-generator.herokuapp.com : [сайт]. URL: <https://nucleotide-generator.herokuapp.com/> (дата обращения: 01.12.2022).

² DNA Sequence Tools: Random Sequence Generator // molbiotools.com : [сайт]. URL: <http://www.molbiotools.com/randomsequencegenerator.html> (дата обращения: 01.12.2022).

³ Random DNA Sequence Generator // faculty.ucr.edu : URL: <http://www.faculty.ucr.edu/~mmaduro/random.htm> (дата обращения: 02.12.2022).

⁴ Random DNA Sequence GenScript // genscript.com : [сайт]. URL: https://www.genscript.com/sms2/random_dna.html (дата обращения: 04.12.2022).

⁵ Random DNA Generator // Computer software : [сайт]. URL: <http://54.235.254.95/cgi-bin/gd/gdRandDNA.cgi> (дата обращения: 04.12.2022).

Цель представленной работы — создание генератора нуклеотидных последовательностей особой структуры, которые можно применять при кодировании текстовой, графической и другой информации в молекулах ДНК.

Материалы и методы. Определены критерии, которые следует иметь в виду при создании последовательностей. Учтена необходимость варьировать GC-состав, задавать определенное количество динуклеотидов, исключить гомополимерные участки в последовательностях.

Коллектив авторов разработал программу GATCGGenerator на языке Python 3.6 (Anaconda distribution)⁶. Для создания бота⁷ в «Телеграм» (Telegram) использовали Numpy 1.19 [21] и библиотеку Python GATCGGenerator. Решение предоставляется как SaaS (от англ. software as a service — программное обеспечение как услуга), что открывает возможность доступа с разных устройств и платформ.

Входные параметры: количество последовательностей, их длина, GC-состав и содержание динуклеотидов. Генератор исключает повторы длиной от двух нуклеотидов более четырех раз. Результат представлен в виде файла CSV, который содержит следующую информацию: последовательность, GC-состав и количество всех нуклеотидов.

Повторы и гомополимерные фрагменты хранятся в виде отдельного списка. Сначала случайным образом генерируется последовательность из четырех элементов (random.choice(nuc), где nuc = 'ACGT'). Затем выполняется поиск повторов. Если встречается хотя бы один элемент из списка, выполняется новая случайная генерация. Далее рассчитывается GC- и NN-состав. Если NN-состав не соответствует заданному пользователем диапазону, парный нуклеотид заменяется случайным образом и пересчитывается GC-состав. Если последовательность соответствует входным параметрам, она записывается во множество последовательностей (sequences).

Ниже представлена работа алгоритма программы.

Типе — тип; GCmin, GCmax — диапазон возможного содержания GC; NNmin, NNmax — диапазон возможного содержания динуклеотидов NN%; N — количество; S — последовательность; l — длина последовательности; count — общее количество последовательностей

Псевдокод

Начало

Ввод (Type, GC, NN, N)

Генерация списка повторяющихся мотивов, гомополимерных участков rep.list

Count = 0

sequences = set()

IF $i \leq N$?

Шаг 1. S = random.choice('AGCT')

IF (rep.list(k) $\subset$ S?)

Возврат на шаг 1.

ELSE

NN = len(DI_REGEX.findall("".join(S)))

NN_perc = $(NN \times 2 / l) \times 100$

IF $NNmin \leq NN_perc \leq NNmax$

GC = $(S.count('G') + S.count('C') / l) \times 100$

IF $GCmin \leq GC \leq GCmax$

IF type == DNA

Шаг 2.

A_perc = $S.count('A') / l \times 100$

G_perc = $S.count('G') / l \times 100$

C_perc = $S.count('C') / l \times 100$

T_perc = $S.count('T') / l \times 100$

U_perc = $S.count('U') / l \times 100$

Count = count + 1

sequences.add(S)

ELSE S = S.replace('T', 'U')

Шаг 2.)

ELSE

Возврат на шаг 1.

⁶ Anaconda / Anaconda Inc. // anaconda.com : [сайт]. URL: <https://www.anaconda.com/> (дата обращения: 20.01.2023).

⁷ Python telegram bot // github.com : [сайт]. URL: <https://github.com/python-telegram-bot/python-telegram-bot> (дата обращения: 01.12.2022).

ELSE

Случайная замена второго повторяющегося символа,

$GC = S.count('G') + S.count('C') / 1 \times 100$

Вывод Sequences: (S, GC%, NN%, A%, G%, C%, T/U%)

Конец

Требования к сгенерированным нуклеотидным последовательностям задаются с помощью чата в Telegram. Пример взаимодействия с пользователем показан на рис. 1.

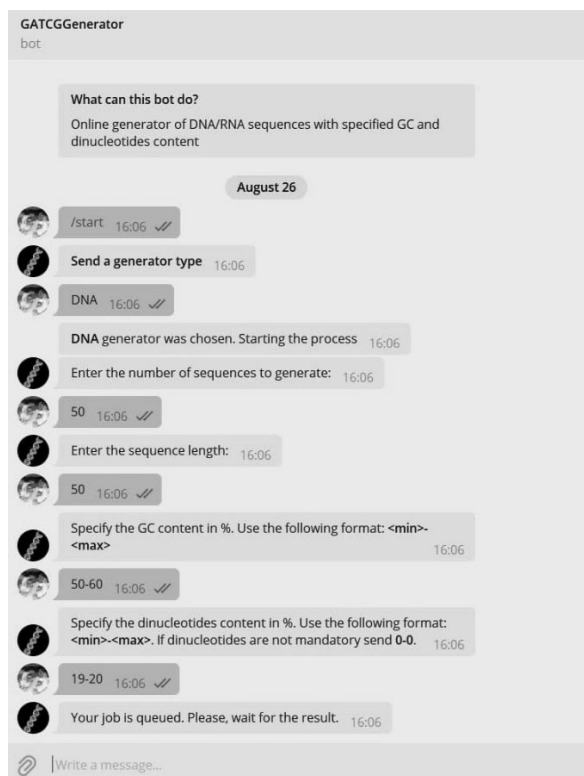


Рис. 1. Пример пользовательского чата в Telegram

В рамках представленной работы сравнивались функциональные возможности генераторов случайных последовательностей и GATCGGenerator. Определялись различия входных параметров и получаемых в результате работы программы конкретных нуклеотидных структур (таблица 1).

Таблица 1

Сравнение функциональных возможностей GATCGGenerator с другими генераторами нуклеотидных последовательностей

	GATCGGenerator [20]	Nucleotide Sequence Generator ⁸	DNA Sequence Tools: Random Sequence Generator ⁹	Random DNA Sequence Generator ¹⁰	Random DNA Sequence ¹¹	Random DNA Generator ¹²
Максимальная длина (нуклеотиды)	5 000	1 000 000			10 000	1 000
Число последовательностей	100	1			1; 10; 50; 100	100
Ввод GC-состава (%)	+	–	+		–	+(*)
GC- состав (%)	интервал		число		–	число
Ввод NN-состава (%)		–				
Отсутствие гомополимерных участков	+					
Тип последовательности	ДНК/РНК	ДНК	ДНК/РНК/ Протеин	ДНК		
Вывод результатов	.CSV file	Текст на экране				
(*) Пользователь вводит АТ-состав						

GATCGGenerator обладает более широким функционалом, дает возможность пользователю указывать количество динуклеотидов, создавать последовательности без протяженных гомополимерных участков и повторов, влияющих на успешность эксперимента. В существующих генераторах возможно только варьирование GC-состава.

Программа, созданная авторами данной научной работы, генерирует заданное количество квазислучайных последовательностей нуклеотидов, не имеющих гомологии с природной ДНК, но пригодных для молекулярно-биологических манипуляций.

Результаты исследования. GATCGGenerator позволяет генерировать специфические последовательности ДНК или РНК длиной от 20 до 5 000 нуклеотидов, содержащие заданное количество динуклеотидов и не содержащие гомополимерных участков (не более двух одинаковых нуклеотидов, расположенных рядом). Более жесткие условия генерации могут привести к длительному подбору последовательностей. В качестве примера приведем небольшой диапазон возможного содержания гуанина и цитозина и динуклеотидов (допустим, GC-состав 45–50 % и NN-состав 10–20 %). Продолжительность работы программы для различных входных данных представлена в таблице 2.

Таблица 2

Временные затраты генерации последовательностей при различных входных данных

Входные данные				Время, с
Длина	Число	GC, %	NN, %	
20	10	50–60	20–50	3,45
30	10	50–60	20–50	3,91
20	10	50–60	40–50	9,74
30	10	50–60	40–50	9,53
30	10	40–50	20–20	8,80
1 000	100	45–50	40–50	11,49
2 000	100	45–50	10–20	240,25
5 000	100	50–60	20–50	11,57

GATCGGenerator благодаря более жестким условиям генерации последовательностей снимает ограничения известных генераторов ДНК и создает квазислучайные последовательности нуклеотидов в зависимости от заданных входных параметров. Можно указать необходимое количество последовательностей, их длину, GC-состав и содержание динуклеотидов, а также природу нуклеиновой кислоты (ДНК или РНК). Например, созданные с помощью GATCGGenerator последовательности могут быть использованы в ДНК-стеганографии, применяемой для защиты и передачи информации путем сокрытия содержания сообщения в последовательности нуклеотидов [3].

Предлагаемое программное решение (GATCGGenerator) позволяет получать набор квазислучайных последовательностей нуклеотидов в зависимости от заданных пользователем входных параметров (тип нуклеиновой кислоты, длина последовательности, GC- и динуклеотидный состав). GATCGGenerator исключает наличие любых нуклеотидных повторов и гомополимерных участков длиннее трех элементов. Сгенерированные последовательности могут быть использованы как служебные или маскирующие (например, в ДНК-стеганографии) и подходят для любых небиологических ферментативных манипуляций. Можно сгенерировать множество искусственных нуклеотидных последовательностей и использовать их для создания универсальной олиготеки, пригодной для многократного кодирования небиологических данных и их длительного хранения.

Данные, представленные в таблице 3, обобщенно демонстрируют результаты работы программы. Для определенного типа нуклеиновой кислоты (в данном случае ДНК) показаны: содержание динуклеотидов (NN %), количество сгенерированных последовательностей, их длина (нуклеотиды — нт) и GC-состав.

Полученные 30-нуклеотидные последовательности проверили с помощью инструмента Blast от NCBI. Выявлено отсутствие 100-процентной гомологии с известными ДНК-последовательностями живых организмов. Максимальное совпадение наблюдалось для сгенерированных последовательностей длиной 25 нуклеотидов (сходство около 80 %). Это свидетельствует о способности GATCGGenerator с высокой эффективностью генерировать небиологические нуклеотидные последовательности. Можно считать, что сгенерированные таким образом последовательности не имеют абсолютного совпадения с нуклеотидными фрагментами живых организмов.

Таблица 3

Примеры коротких последовательностей, различающихся по длине, GC-составу и содержанию динуклеотидов, %

Входные параметры					Нуклеотидная последовательность, 5'→3'	Выходные параметры		
Тип	Число	Длина, нт	GC, %	NN, %*		Длина, нт	GC, %	NN, %*
ДНК	5	30	41–50	20	CTGG**TATATCGGAATCATATCGCGCAGTGT	30	46,7	20,0
					AATCAGCTAGTAGGACGCAGTAGTGAATCA	30	43,3	20,0
					GAATGTAGTCCTAGGCACATACTACGTAGC	30	46,7	20,0
					AGTTGCACTGAAGTCTATGATCTGGCATGC	30	46,7	20,0
					GACACACTACTATGGACGTGAGGCACTTAC	30	50,0	20,0
	TCAGCTCAGCGCCAATCGAGCTTATAGTGC		30		53,3	20,0		
	GAGGCTATCGTCAAGCATAGACCGTGTGCT		30		53,3	20,0		
	GACTCAGTAGCTGCTCCGGACATACAGCCT		30		56,7	20,0		
	TCGCGCGTTAGACTTAGGTCTCATCGCAGC		30		56,7	20,0		
	ACGCTCACAGGAGTTTCGCATCGAACGATGC		30		56,7	20,0		
	5	41–50	0	ACGACAGTGATATAGCACGACGTGCTCATA	30	46,7	0,0	
				GACTACATCTGATAGTACACGTGCTGCACT	30	46,7	0,0	
				TCTATCTCTGCTAGAGCGCTCGTCACTCTA	30	50,0	0,0	
				TCTGATCTACTATAGCGATACGTGAGAGTG	30	43,3	0,0	
				ACACATATATCGACGCACGCGTCGTTAGTAC	30	50,0	0,0	
	5	50	41–60	20	TGCATGACCATGCTTGC GG TAGACAT TC CAGACGCGCAATAGTAG G ACGA	50	52,0	20,0
					GCATACGAGT G GCATACATATTAGACTATAC G GTAGTGCATAT G GTGCAA	50	42,0	20,0
					CTGAGACTCCTCTCTGT G GAGCTCCTAGTACCGTCACGCGTGCTCTGAAG	50	58,0	20,0
					CTGTGTGAACATACGATGCAT T CTCATCTCG G TAT G GCTGAAGTGCACAT	50	46,0	20,0
					GCGCTGACGTCAT G GTTCATACCAATGTAGCATGATGTGCGATAG G CACA	50	50,0	20,0

*NN показывает долю (%) содержащихся динуклеотидов в нуклеотидной последовательности.

**Динуклеотиды выделены жирным шрифтом.

*NN показывает долю (%) содержащихся динуклеотидов в нуклеотидной последовательности.

**Динуклеотиды выделены жирным шрифтом.

В этом случае в качестве удобного носителя информации можно задействовать специальные ДНК-олигонуклеотиды искусственного происхождения, содержащие информативную и служебную части. Недавно авторы данной работы предложили использовать NYRN-олигонуклеотиды [14], состоящие из:

- внутренней части (YR)_n, кодирующей зашифрованную информацию;
- служебных (вспомогательных) частей S1 и S2, фланкирующих последовательность (YR)_n (рис. 2).

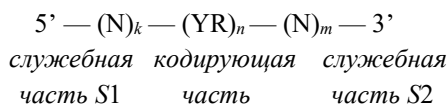


Рис. 2. Структура NYRN-олигонуклеотидов: N — вырожденные нуклеотиды; Y — пиримидины (С или Т); R — пурины (А или G); k, n, m — индексы, соответствующие длине части

Длина участков (n, k и m) может варьироваться, но структура служебных частей должна обеспечивать успешное протекание реакций амплификации (длина более 18 нт, 40–60 % GC-состав, отсутствие гомополимерных участков и повторов). GATCGGenerator позволяет включать динуклеотиды NN, содержащие одинаковые парные нуклеотиды (например, AA, GG, CC, TT или UU для РНК), которые могут повысить специфичность молекулярной гибридизации нуклеиновых кислот.

Обсуждение и заключение. Итак, по итогам выполненной научной работы предложено программное решение (GATCGGenerator), которое в сравнении с традиционными подходами предполагает более жесткие

условия генерации последовательностей. Благодаря этой его особенности снимаются ограничения известных генераторов ДНК и формируются квазислучайные последовательности нуклеотидов в зависимости от заданных входных параметров. Исследованы полученные 30-нуклеотидные последовательности. Проверка позволила установить отсутствие 100-процентной гомологии с известными ДНК-последовательностями живых организмов. Максимально (примерно на 80 %) совпали сгенерированные последовательности длиной 25 нуклеотидов.

Отметим также, что для сокрытия информации в NYRN-олигонуклеотидах, необходимо их смешать с маскирующей ДНК. Маскирующие последовательности должны быть аналогичны последовательностям NYRN-олигонуклеотидов, чтобы при попытке считывания скрытой информации невозможно было их распознать без ключевых последовательностей. Адресату должны быть известны ключевые последовательности — праймеры к служебным участкам NYRN-олигонуклеотидов. Адресат может расшифровать переданное сообщение путем выделения информативных последовательностей нуклеотидов с помощью полимеразной цепной реакции с последующим секвенированием. Набор NYRN- и маскирующих олигонуклеотидов можно легко получить с помощью GATCGGenerator, синтезировать, а затем сохранить в виде олиготеки. Для этого достаточно определить оптимальные NYRN-олигонуклеотиды с последующим заполнением олиготеки. В дальнейшем планируется проведение лабораторных экспериментов с целью апробации предложенного метода хранения небологической информации и проверки жизнеспособности олиготек, получаемых с помощью генератора.

Список литературы

1. Малинецкий Г.Г., Митин Н.А., Науменко С.А. Нанобиология и синергетика. Проблемы и идеи. *Препринты Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН*. 2005;29:1–26. URL: <http://mi.mathnet.ru/ipmp722> (дата обращения: 01.06.2023).
2. Katz E. (ed) *DNA- and RNA-Based Computing Systems*, 1st ed. Weinheim: Wiley-VCH; 2021. 408 p.
3. Ceze L., Nivala J., Strauss K. Molecular Digital Data Storage Using DNA. *Nature Reviews Genetics*. 2019;20:456–466. <https://doi.org/10.1038/s41576-019-0125-3>
4. Kaundal A.K., Verma A.K. DNA Based Cryptography: A Review. *International Journal of Information and Computation Technology*. 2014;4(7):693–698.
5. Aquilanti L., Clementi F., Landolfo S., Nanni T., Palpacelli S., Tazioli A. A DNA Tracer Used in Column Tests for Hydrogeology Applications. *Environmental Earth Sciences*. 2013;70:3143–3154. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2379-y>
6. Zhirnov V., Zadegan R.M., Sandhu G.S., Church G.M., Hughes W. Nucleic Acid Memory. *Nature Materials*. 2016;15:366–370. <https://doi.org/10.1038/nmat4594>
7. Yetisen A.K., Davis J., Coskun A.F., Church G.M., Seok Hyun Yun. Bioart. *Trends in Biotechnology*. 2015;33(12):724–734. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2015.09.011>
8. Dokyun Na. DNA Steganography: Hiding Undetectable Secret Messages within the Single Nucleotide Polymorphisms of a Genome and Detecting Mutation-Induced Errors. *Microbial Cell Factories*. 2020;19(128):1–9. <https://doi.org/10.1186/s12934-020-01387-0>
9. Shuhong Jiao, Goutte R. Code for Encryption Hiding Data into Genomic DNA of Living Organisms. In: *Proc. 9th International Conference on Signal Processing*. Beijing: IEEE; 2008. P. 2166–2169. <https://doi.org/10.1109/ICOSP.2008.4697576>
10. Masanori Arita. Writing Information into DNA. In book: N. Jonoska, G. Păun, G. Rozenberg (eds). *Aspects of Molecular Computing. Lecture Notes in Computer Science*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2004. P. 23–35. https://doi.org/10.1007/978-3-540-24635-0_2
11. Church G.M., Yuan Gao, Sriram Kosuri. Next-Generation Digital Information Storage in DNA. *Science*. 2012;337(6102):1628. <https://doi.org/10.1126/science.1226355>
12. K.A. Schouhamer Immink, Kui Cai. Design of Capacity-Approaching Constrained Codes for DNA Based Storage Systems. *IEEE Communications Letters*. 2018;22(2):224–227. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2017.2775608>
13. Nozomu Yachie, Kazuhide Sekiyama, Junichi Sugahara, Yoshiaki Ohashi, Masaru Tomita. Alignment-Based Approach for Durable Data Storage into Living Organisms. *Biotechnology Progress*. 2007;23(2):501–505. <https://doi.org/10.1021/bp060261y>
14. Garafutdinov R.R., Sakhabutdinova A.R., Slominsky P.A. Aminev F.G., Chemeris A.V. A New Digital Approach to SNP Encoding for DNA Identification. *Forensic Science International*. 2020;317:110520. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2020.110520>
15. Ailenberg M., Rotstein O.D. An Improved Huffman Coding Method for Archiving Text, Images, and Music Characters in DNA. *BioTechniques*. 2009;47(3):747–754. <https://doi.org/10.2144/000113218>

16. Doricchi A., Platnich C.M., Gimpel A., Horn F., Earle M., Lanzavecchia G., et al. Emerging Approaches to DNA Data Storage: Challenges and Prospects. *ACS Nano*. 2022;16(11):17552–17571. <https://doi.org/10.1021/acsnano.2c06748>
17. Sakhabutdinova A.R., Mikhailenko K.I., Garafutdinov R.R., Kiryanova O.Yu., Sagitova M.A., Sagitov A.M., et al. Non-Biological Application of DNA Molecules. *Biomics*. 2019;11(3):344–377. <https://doi.org/10.31301/2221-6197.bmcs.2019-28>
18. Garafutdinov R.R., Chemeris D.A., Sakhabutdinova A.R., Chemeris A.V., Kiryanova O.Yu., Mikhaylenko C.I. Encoding of Non-Biological Information for its Long-Term Storage in DNA. *Biosystems*. 2022;(215–216):104664. <https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2022.104664.9>
19. Кирьянова О.Ю., Кирьянов И.И., Гарафутдинов Р.Р., Чемерис А.В., Губайдуллин И.М. *GATCGGenerator*. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № RU 2021667097. 2021.
20. Borzov E.A., Marakhonov A.V., Ivanov M.V., Drozdova P.B., Baranova A.V., Skoblov M.Yu. RANDTRAN: Random Transcriptome Sequence Generator that Accounts for Partition Specific Features in Eukaryotic mRNA Datasets. *Molecular Biology*. 2014;48:749–756. <https://doi.org/10.1134/S0026893314050021>
21. Harris C.R., Millman K.J., van der Walt S.J., Gommers R., Virtanen P., Cournapeau D., et al. Array Programming with NumPy. *Nature*. 2020;585:357–362. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>

References

1. Malinetski GG, Mitin NA, Naumenko SA. Nanobiology and Synergetics. Problems and Ideas. Part 2. *Keldysh Institute Preprints*. 2005;29:1–26. URL: <http://mi.mathnet.ru/ipmp722> (accessed: 01.06.2023).
2. Katz E. (ed) *DNA- and RNA-Based Computing Systems*, 1st ed. Weinheim: Wiley-VCH; 2021. 408 p.
3. Ceze L, Nivala J, Strauss K. Molecular Digital Data Storage Using DNA. *Nature Reviews Genetics*. 2019;20:456–466. <https://doi.org/10.1038/s41576-019-0125-3>
4. Kaundal AK, Verma AK. DNA Based Cryptography: A Review. *International Journal of Information and Computation Technology*. 2014;4(7):693–698.
5. Aquilanti L, Clementi F, Landolfo S, Nanni T, Palpacelli S, Tazioli A. A DNA Tracer Used in Column Tests for Hydrogeology Applications. *Environmental Earth Sciences*. 2013;70:3143–3154. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2379-y>
6. Zhirnov V, Zadegan RM, Sandhu GS, Church GM, Hughes W. Nucleic Acid Memory. *Nature Materials*. 2016;15:366–370. <https://doi.org/10.1038/nmat4594>
7. Yetisen AK, Davis J, Coskun AF, Church GM, Seok Hyun Yun. Bioart. *Trends in Biotechnology*. 2015;33(12):724–734. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2015.09.011>
8. Na D. DNA Steganography: Hiding Undetectable Secret Messages within the Single Nucleotide Polymorphisms of a Genome and Detecting Mutation-Induced Errors. *Microbial Cell Factories*. 2020;19(128):1–9. <https://doi.org/10.1186/s12934-020-01387-0>
9. Shuhong Jiao, Goutte R. Code for Encryption Hiding Data into Genomic DNA of Living Organisms. In: *Proc. 9th International Conference on Signal Processing*. Beijing: IEEE; 2008. P. 2166–2169. <https://doi.org/10.1109/ICOSP.2008.4697576>
10. Masanori Arita. Writing Information into DNA. In book: N. Jonoska, G. Păun, G. Rozenberg (eds). *Aspects of Molecular Computing. Lecture Notes in Computer Science*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2004. P. 23–35. https://doi.org/10.1007/978-3-540-24635-0_2
11. Church GM, Yuan Gao, Sriram Kosuri. Next-Generation Digital Information Storage in DNA. *Science*. 2012;337(6102):1628. <https://doi.org/10.1126/science.1226355>
12. KA Schouhamer Immink, Kui Cai. Design of Capacity-Approaching Constrained Codes for DNA Based Storage Systems. *IEEE Communications Letters*. 2018;22(2):224–227. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2017.2775608>
13. Nozomu Yachie, Kazuhide Sekiyama, Junichi Sugahara, Yoshiaki Ohashi, Masaru Tomita. Alignment-Based Approach for Durable Data Storage into Living Organisms. *Biotechnology Progress*. 2007;23(2):501–505. <https://doi.org/10.1021/bp060261y>
14. Garafutdinov RR, Sakhabutdinova AR, Slominsky PA, Aminev FG, Chemeris AV. A New Digital Approach to SNP Encoding for DNA Identification. *Forensic Science International*. 2020;317:110520. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2020.110520>
15. Ailenberg M, Rotstein OD. An Improved Huffman Coding Method for Archiving Text, Images, and Music Characters in DNA. *BioTechniques*. 2009;47(3):747–754. <https://doi.org/10.2144/000113218>

16. Doricchi A, Platnich CM, Gimpel A, Horn F, Earle M, Lanzavecchia G, et al. Emerging Approaches to DNA Data Storage: Challenges and Prospects. *ACS Nano*. 2022;16(11):17552–17571. <https://doi.org/10.1021/acsnano.2c06748>
17. Sakhabutdinova AR, Mikhailenko KI, Garafutdinov RR, Kiryanova OYu, Sagitova MA, Sagitov AM, et al. Non-Biological Application of DNA Molecules. *Biomimetics*. 2019;11(3):344–377. <https://doi.org/10.31301/2221-6197.bmcs.2019-28>
18. Garafutdinov RR, Chemeris DA, Sakhabutdinova AR, Chemeris AV, Kiryanova OYu, Mikhaylenko CI. Encoding of Non-Biological Information for its Long-Term Storage in DNA. *Biosystems*. 2022;(215–216):104664. <https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2022.104664.9>
19. Kiryanova OYu, Kiryanova II, Garafutdinov RR, Chemeris DA, Gubaidullin IM. *GATCGGenerator*. Certificate of Software Registration No. RU 2021667097. 2021. (In Russ.)
20. Borzov EA, Marakhonov AV, Ivanov MV, Drozdova PB, Baranova AV, Skoblov MYu. RANDTRAN: Random Transcriptome Sequence Generator that Accounts for Partition Specific Features in Eukaryotic mRNA Datasets. *Molecular Biology*. 2014;48:749–756. <https://doi.org/10.1134/S0026893314050021>
21. Harris CR, Millman KJ, van der Walt SJ, Gommers R, Virtanen P, Cournapeau D, et al. Array Programming with NumPy. *Nature*. 2020;585:357–362. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>

Поступила в редакцию 07.06.2023

Поступила после рецензирования 29.06.2023

Принята к публикации 03.07.2023

Об авторах:

Ольга Юрьевна Кириянова, ассистент кафедры цифровых технологий и моделирования Уфимского государственного нефтяного технического университета (РФ, 450064, Уфа, ул. Космонавтов, 1), [Researcher ID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), [AuthorID](#), olga.kiryanova27@gmail.com

Равиль Ринатович Гарафутдинов, кандидат химических наук, заведующий лабораторией физико-химических методов анализа биополимеров Института биохимии и генетики — обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Уфимский федеральный исследовательский центр» (РФ, 450054, Уфа, пр. Октября, 71), [ScopusID](#), [ORCID](#), [AuthorID](#), garafutdinovr@mail.ru

Ирек Марсович Губайдуллин, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией математической химии Института нефтехимии и катализа — обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Уфимский федеральный исследовательский центр» (РФ, 450075, Уфа, пр. Октября, 141), [ScopusID](#), [ORCID](#), [AuthorID](#), irekmars@mail.ru

Алексей Викторович Чемерис, доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник Института биохимии и генетики — обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Уфимский федеральный исследовательский центр» (РФ, 450054, Уфа, пр. Октября, 71), [ScopusID](#), [ORCID](#), [AuthorID](#), chemeris@anrb.ru

Заявленный вклад соавторов:

О.Ю. Кириянова — разработка программного обеспечения, подготовка текста, расчеты, формулировка выводов.

Р.Р. Гарафутдинов — консультирование по предметной области, тестирование ПО, доработка текста, корректировка выводов.

И.М. Губайдуллин — научное руководство, корректировка выводов, доработка текста статьи.

А.В. Чемерис — формирование основной концепции, целей и задач исследования, анализ результатов исследования, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 07.06.2023

Revised 29.06.2023

Accepted 03.07.2023

About the Authors:

Olga Yu. Kiryanova, Teaching assistant of the Department of Digital Technologies and Modeling, Ufa State Aviation Technical University (1, Kosmonavtov St., Ufa, 450064, RF), [Researcher ID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), [AuthorID](#), olga.kiryanova27@gmail.com

Ravil R. Garafutdinov, Cand.Sci. (Chemistry), Head of the Laboratory of Physico-Chemical Methods of Analysis of Biopolymer, Institute of Biochemistry and Genetics — a separate structural subdivision of the Ufa Federal Research Centre, RAS (71, Oktyabrya Av., Ufa, 450054, Bashkortostan Rep., RF), [ScopusID](#), [ORCID](#), [AuthorID](#), garafutdinovr@mail.ru

Irek M. Gubaydullin, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Laboratory of Mathematical Chemistry, Institute of Petrochemistry and Catalysis — a separate structural subdivision of the Ufa Federal Research Centre, RAS (141, Oktyabrya Av., Ufa, 450075, Bashkortostan Rep., RF), [ScopusID](#), [ORCID](#), [AuthorID](#), irekmars@mail.ru

Aleksei V. Chemeris, Dr.Sci. (Biology), Professor, Chief Research Fellow, Institute of Biochemistry and Genetics — a separate structural subdivision of the Ufa Federal Research Centre, RAS (71, Oktyabrya Av., Ufa, 450054, Bashkortostan Rep., RF), [ScopusID](#), [ORCID](#), [AuthorID](#), chemeris@anrb.ru

Claimed Contributorship:

OYu Kiryanova: software development, text preparation, calculations, formulation of conclusions.

RR Garafutdinov: consulting on the subject area, software testing, revision of the text, correction of the conclusions.

IM Gubaydullin: academic advising, correction of the conclusions, revision of the text.

AV Chemeris: formulation of the basic concept, research objectives and tasks; analysis of the research results, revision of the text, correction of the conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT



<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-307-316>

Original article

Sensitivity of Diffusion-Weighted Image Combined with T2 Turbo Inversion Recovery Magnitude Sequence and as an Alternative to Contrast-Enhanced MRI in the Detection of Perianal Fistula

Noor Fadhil Baqir¹ ✉, Rasha Sabeeh Ahmed¹ , Khaleel Ibraheem Mohsen²

¹ College of Medicine, Al-Nahrain University, Baghdad, Iraq

² National Cancer Research Center, University of Baghdad, Baghdad, Iraq

✉ lavendrtechnologist2017@gmail.com

Abstract

Introduction. Perianal fistula rapidly develops an abscess, requiring surgical decompression. However, simple cases must be managed. However, for patients with renal insufficiency, MRI with contrast is contraindicated. It is proposed to use diffusion-weighted images that can diagnose anal fistulae, showing areas of high signal intensity (inflammatory tissues). The aim is to determine sensitivity of diffusion-weighted image combined with T2 turbo inversion recovery magnitude and as an alternative technique to contrast-enhanced MRI using clinical examination as a reference.

Materials and Methods. Study included fifty patients with a clinical diagnosis of perianal fistula. MRI sequences were T2 turbo inversion recovery magnitude in oblique coronal and axial planes, diffusion-weighted image, and T1 weighted image turbo spin echo (fat suppression) pre- and post-administration of contrast agents in oblique axial planes. Three radiologists evaluated the MR imaging data using a questionnaire of parameters that necessitated a binary response, “yes” or “no” answer.

Results. Diffusion-weighted image combined with axial T2 turbo inversion recovery magnitude sequence had 96.7 %. All raters agreed that it is sensitive enough to correctly identify perianal fistula with a moderate Kappa agreement ($k = 0.586$) and p -value <0.001 . The mean value of rater's responses was 76.7 % represents sensitivity of diffusion-weighted images + T2 turbo inversion recovery magnitude as an alternative technique to T1-enhanced contrast with moderate ($k = 0.553$) agreement between raters and P -value <0.001 .

Discussion and Conclusion. Diffusion-weighted images and T2 turbo inversion recovery magnitude sequences exhibit comparable efficacy to T1-enhanced contrast sequences in detecting perianal fistula. This may be an option for patients with renal impairment who cannot receive an MRI contrast.

Keywords: magnetic resonance imaging; diffusion-weighted image; T1-enhanced contrast

Acknowledgements: the authors would like to thank the Editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved the quality of the article.

For citation. Noor Fadhil Baqir, Rasha Sabeeh Ahmed, Khaleel Ibraheem Mohsen. Sensitivity of Diffusion-Weighted Image Combined with T2 Turbo Inversion Recovery Magnitude Sequence and as an Alternative to Contrast-Enhanced MRI in the Detection of Perianal Fistula. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(3):307–316. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-307-316>

Чувствительность диффузионно-взвешенного изображения в сочетании с последовательностью восстановления турбо-инверсии T2 в качестве альтернативы МРТ с контрастным усилением при обнаружении параректального свища

Noor Fadhil Baqir¹ ✉, Rasha Sabeeh Ahmed¹ , Khaleel Ibraheem Mohsen²

¹ Медицинский колледж, университет Аль-Нахрейн, Багдад, Ирак

² Национальный онкологический центр, Багдадский университет, Багдад, Ирак

✉ javendrtechnologist2017@gmail.com

Аннотация

Введение. Параректальный свищ быстро переходит в абсцесс, требующий хирургической декомпрессии. Тем не менее, простые случаи подлежат лечению. Однако, для пациентов с почечной недостаточностью МРТ с контрастированием противопоказана. Предлагается применение диффузионно-взвешенного изображения, которое способно диагностировать анальные свищи, показывая на снимках области с высокой интенсивностью сигнала (очаг воспаления). Цель работы заключается в том, чтобы определить степень чувствительности изображения диффузионной спектральной томографии в сочетании с величиной восстановления турбо-инверсии T2 и возможность применения данного метода в качестве альтернативного метода МРТ с контрастным усилением, используя клиническое обследование в качестве стандарта сравнения.

Материалы и методы. В ходе работы были обследованы 50 пациентов с клиническим диагнозом «параректальный свищ». Последовательности МРТ представляли собой турбо-инверсию T2 с величиной восстановления в косых коронарных и аксиальных плоскостях, изображение диффузионной МРТ и взвешенное изображение быстрого спин-эха (жироподавление) до и после введения контрастных веществ в косые аксиальные плоскости. Три радиолога оценили данные МРТ, используя анкету параметров, которая требовала бинарного ответа, ответа «да» или «нет».

Результаты исследования. Диффузионно-взвешенное изображение в сочетании с последовательностью восстановления аксиальной турбо-инверсии T2 показало 96,7 %. Все эксперты согласились с тем, что данный метод, показавший умеренное согласие Каппа ($k = 0,586$) и значение $p < 0,001$, достаточно чувствителен для того, чтобы верно идентифицировать параректальный свищ. Среднее значение экспертной оценки составило 76,7 %. Это подтверждает, что чувствительность предложенного метода – диффузионно-взвешенные изображения + величина восстановления турбо-инверсии T2 — является альтернативой методу контрастного усиления T1 с умеренным ($k = 0,553$) согласием между экспертами и значением $P < 0,001$.

Обсуждение и заключение. Диффузионно-взвешенные изображения и последовательности величин восстановления при турбо-инверсии T2 демонстрируют сравнимую эффективность с последовательностями контрастного усиления T1 для обнаружения параректального свища. Предложенный метод может служить вариантом для пациентов с почечной недостаточностью, которым противопоказана МРТ с контрастированием.

Ключевые слова: магнитно-резонансная томография, диффузионно-взвешенное изображение, контрастное усиление T1

Благодарности: авторы благодарят редакцию и рецензентов за внимательное отношение к статье и за указанные замечания, позволившие улучшить качество статьи.

Для цитирования. Noor Fadhil Baqir, Rasha Sabeeh Ahmed, Khaleel Ibraheem Mohsen. Sensitivity of Diffusion-Weighted Image Combined with T2 Turbo Inversion Recovery Magnitude Sequence and as an Alternative to Contrast-Enhanced MRI in the Detection of Perianal Fistula. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(3): 307–316. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-307-316>

Introduction. Perianal fistula is a rare condition that is difficult to treat and is associated with patient morbidity. It is the connection between the mucosal lining of the anal canal and the perianal epidermis [1]. The rate of occurrence is approximately two times higher in males than in females. The male-female ratio is 2:1. Perianal discharge that comes and goes, itchiness, discomfort, fever, and localized pain are the most typical symptoms [2]. Perianal fistula is associated with the rapid development of an abscess, necessitating timely surgical intervention for decompression. Consequently, the management of uncomplicated cases is crucial [3]. The treatment of anal fistula involves the excision of the primary fistula opening, any associated tracts, and any supplementary openings while ensuring the preservation of continence [4]. This requires accurate identification of the fistula's internal opening and any secondary abscesses or extensions. Imaging techniques, including magnetic resonance imaging (MRI), are increasingly important in perianal fistula diagnosis [5, 6]

because they provide the most precise and reliable data regarding the anatomical characteristics of the fistula tract and its association with the anal sphincter muscles. Providing these specific details by MRI has enhanced surgical success rates and reduced the likelihood of recurrence in perianal fistulas [7, 8]. T2-weighted with fat suppression (Turbo spin echo or turbo inversion recovery magnitude) MRI is very good at showing a fistula track. Still, some reports have pointed out how hard it is to distinguish between real abscesses that need to be drained by surgery and inflamed masses that cannot be drained and need anti-inflammatory medicine. Gadolinium chelate-enhanced T1-weighted MR scans are often used as a tool to help solve problems [9, 10]. Post-contrast MR imaging is the optimal sequence for detecting and characterizing perianal fistula. It is considered the gold standard by various institutions [5, 11].

Nonetheless, using gadolinium contrast agents increases expenses and duration and poses a risk of nephrogenic systemic fibrosis in patients already experiencing renal insufficiency. In addition, several studies have found evidence of gadolinium accumulation in the brain's deep nuclei after repeated contrast agent injections [1, 12, 13]. In recent years, Diffusion-Weighted Imaging (DWI) has provided high differentiation between pathological lesions, such as cancer or inflammatory processes, and the adjacent normal tissue [14]. DWI is a technique that captures variations in water mobility resulting from interactions with macromolecules, cell membranes, and changes in the tissue environment. Therefore, inflammatory tissues may also demonstrate limited diffusivity, resulting in the appearance of high signal areas on DWI, which takes advantage of this property. This sequence has the potential to be helpful in the diagnosis of anal fistulae [15, 16].

Moreover, Diffusion-Weighted Imaging can be integrated into customary Magnetic Resonance Imaging (MRI) scans of the perianal fistula, as it removes the need for a contrast agent, has shorter sequence duration, and does not necessitate additional equipment. The diffusion-weighted imaging technique has a naturally low spatial resolution, one of the method's drawbacks. Therefore, the T2 turbo inversion recovery magnitude (TIRM) sequence was added to DWI to assess the perianal fistula to overcome these drawbacks [16, 17]. In the T2 TIRM imaging technique, the fistulous tracts are commonly visualized as highly intense linear structures [18]. Additionally, it should be noted that pus, fluid, and granulation tissue manifest as areas of high signal intensity against a background of low signal intensity fat [6, 19].

Boruah et al. [20] evaluated the efficacy of diffusion-weighted magnetic resonance imaging (MRI) as a diagnostic tool for perianal fistulae. The study consisted of 47 participants diagnosed with perianal fistula. The MRI results were correlated with the clinical evaluation or the surgical findings. The performance of DWI alone was inferior to that of T2W imaging. Nevertheless, the most notable outcome was the assessment of combined DWI-T2W images, despite the lack of statistical significance compared to DWI or T2W images individually.

Gu et al. [21] explored an alternative technique comparable to Gadolinium-contrast enhancement to assess any morphological changes in the preoperative evaluation of anal fistulas. The study comprised 46 individuals who had received a diagnosis of anal fistula. The gold standard for comparison will involve outcomes derived from surgical pathology. The utilization of FS T2-weighted and diffusion-weighted imaging exhibited similar effectiveness when compared to FS T1-weighted contrast-enhanced imaging for evaluating changes in the morphology of anal fistulas.

This study aims to determine the sensitivity of diffusion-weighted images combined with T2 turbo inversion recovery magnitude (TIRM) and as an alternative technique to contrast-enhanced MRI using the clinical examination as a gold standard reference.

Patients and Methods. The study was carried out between December 2022 and May 2023 at the MRI department of the oncology teaching hospital located in Medical City, Baghdad, Iraq. The research was carried out as a cross-section and utilized a non-randomized design. After a thorough clinical evaluation of each patient, the surgical outpatient clinics sent fifty patients who were thought to have perianal fistulas to the MRI department. Each participant gave their informed written agreement, and the institution's ethical committee gave its stamp of approval before the study was carried out.

The inclusion criteria for this study include adult patients, regardless of gender, who have been diagnosed with a perianal fistula during a clinical examination and have been referred from outpatient surgical clinics.

The exclusion criteria for this study include individuals who fall into specific categories, namely children, pregnant women, and patients who are contraindicated for MRI examinations. This includes patients with cardiac pacemakers or metallic shells and those who experience claustrophobia.

The MRI examinations were performed using 1.5 T scanners (Magnetom Aera, Siemens Healthcare, Germany) equipped with a phased-array surface coil comprising 18 channels. There was no requirement for patient preparation before the examination. During the MRI, patients take a supine position on the examination table, with a phased array surface coil positioned over their pelvic region. It is crucial to ensure correct orientation when using magnetic resonance imaging (MRI) for imaging the anal canal. The planning of the images is performed with the assistance of a sagittal T2-weighted localizer that passes through the middle of the patient. The oblique transverse and coronal sections are orthogonally and parallel to the anal sphincter.

The following MRI sequence parameters were utilized for this investigation: T2 TIRM in the coronal oblique plane (TR/TE: 5000/50, slice thickness: 3 mm, flip angle: 140°, interstice gap: 20 %, number of slices: 34, FOV: 390mm, matrix

size: 384×288, signal averages: 1, inversion time (TI): 160 s, acquisition time: 2:27 (min: sec)). T2 TIRM performed in the oblique axial plane (TR/TE: 5040/50 ms, slice thickness: 3 mm, interstice gap: 20 %, flip angle: 140°, number of slices: 36, FOV: 380 mm, matrix size: 384×234, signal averages: 1; inversion time (TI): 160 s, acquisition time: 2:02 (min: sec)). Single shot echo planar imaging (EPI) imaging (DWI) in an oblique axial plane (TR/TE: 2600/70, FOV: 380 mm, distance factor: 20 %, slice thickness: 3 mm number of slices: 30, matrix size: 128×128, b-value 50–400–800 with signal averages of 1 for 50, 3 for 400, and 800, acquisition time: 2:22 (min: sec)). And T1 FS TSE in an oblique axial plane before and after administration of contrast agent (TR/TE: 619/20, slice thickness: 3 mm, number of slices: 27, interstice gap: 20 %, flip angle: 160°, FOV: 239 mm, signal averages: 1, matrix size: 192×163, acquisition time: 1:55 (min: sec)).

Three radiologists, each with an advanced radio diagnosis degree and over five years of experience in MRI reporting, were carefully selected for employment at the oncology teaching hospital based on their superior rankings among other radiologists. Furthermore, these individuals consistently produce a substantial volume of over 40 reports per week. They were provided information regarding the patient's clinical suspicion of perianal fistula while unaware of the surgical and prior MRI reports. The radiologists reviewed the MR imaging data sets using a questionnaire of parameters requiring a binary response (yes or no) as follows:

- diffusion-weighted image (3 mm slice thickness) combined with T2 TIRM;
- diffusion-weighted image replaces T1 enhanced contrast with fat suppression.

The data were inputted, categorized, and examined using the SPSS (statistical package for social sciences) software program version 26. The data were presented using frequencies and percentages. A significance level of 0.05 or lower was used to determine statistical significance. The study employed the Fleiss kappa test to evaluate the reliability and inter-rater agreement among multiple raters.

Results. The findings of this study were derived from the analysis of a sample of fifty individuals who presented with a perianal fistula as determined through clinical assessment. Most individuals diagnosed with anal fistula were male, comprising 82 % of the cases, while females constituted the remaining 18 % as shown in Figure 1. The mean age of the entire patient population was 39.80 years, and the standard deviation was 12.46 years.

According to the prepared questionnaire, the three rater's responses about the best visualization of perianal fistula by diffusion-weighted image combined with T2 TIRM and as an alternative method to T1 enhanced contrast. The frequency distribution of the three raters is demonstrated in Table 1. The three raters' responses according to the constructed questionnaire; regarding the best visualization of the perianal fistula compared to the positive clinical examination (standard reference) is represented in Fig. 2.

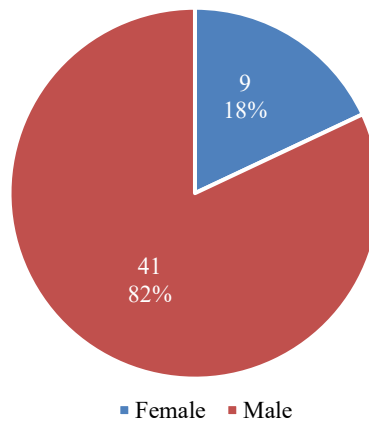


Fig. 1. Frequency distribution of the gender for the 50 participant patients

Table 1
Frequency and percentage of DWI+T2 TIRM and DWI as an alternative to T1 enhanced contrast images for three raters

	DWI+T2 TIRM freq. (%)	DWI image as an alternative to T1 enhanced contrast freq. (%)
Rater 1	47(94 %)	37(74 %)
Rater 2	49(98 %)	36(72 %)
Rater 3	49(98 %)	42(84 %)
Total	50 (100 %)	

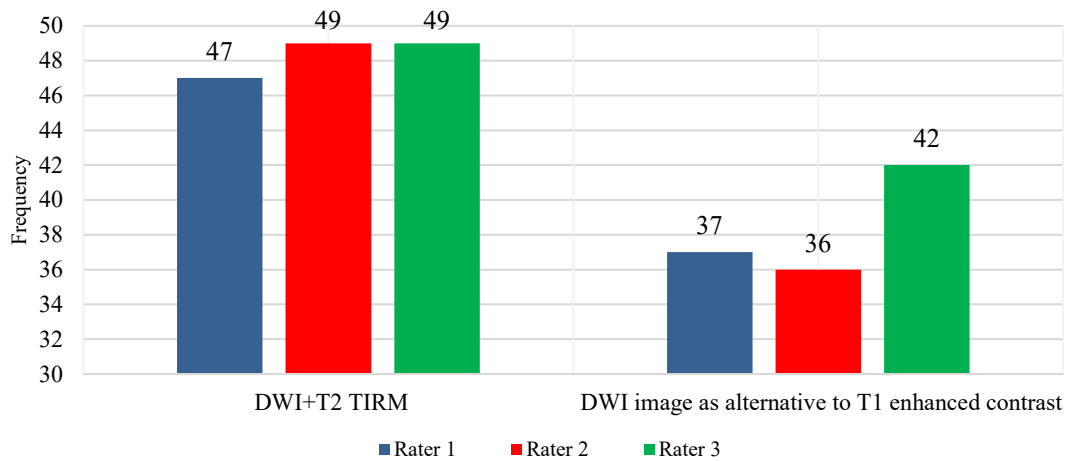


Fig. 2. Bar chart frequency distribution of the raters' opinions about using diffusion-weighted image combined with T2 TIRM and as an alternative to T1 enhanced contrast in detecting perianal fistula

The average of the three raters for detecting cases of perianal fistula by each reported MRI sequence is demonstrated in Figure 3. It was found that DWI+ axial T2 TIRM had a higher percentage (96.7 %), which corresponded to the sensitivity of this sequence in the detection of true cases of perianal fistula by the three raters. The average of raters' answers for replacing the T1 FS TSE enhanced contrast with DWI in detecting anal fistula was 76.7 % (sensitivity of DWI +T2 TIRM as an alternative technique to T1 enhanced contrast). The inter-rater kappa agreement was performed to test the reliability of the questionnaire used to evaluate MRI sequences obtained for the visualization of 50 patients clinically diagnosed with perianal fistula, as shown in Table 2. A significant (P -value<0.001) moderate ($k=0.586$) agreement was found for the question related to the use of optimized DWI + T2 TIRM. Also, significant (P -value<0.001) moderate ($k=0.553$) agreement between raters when asked to use DWI versus T1 enhanced contrast.

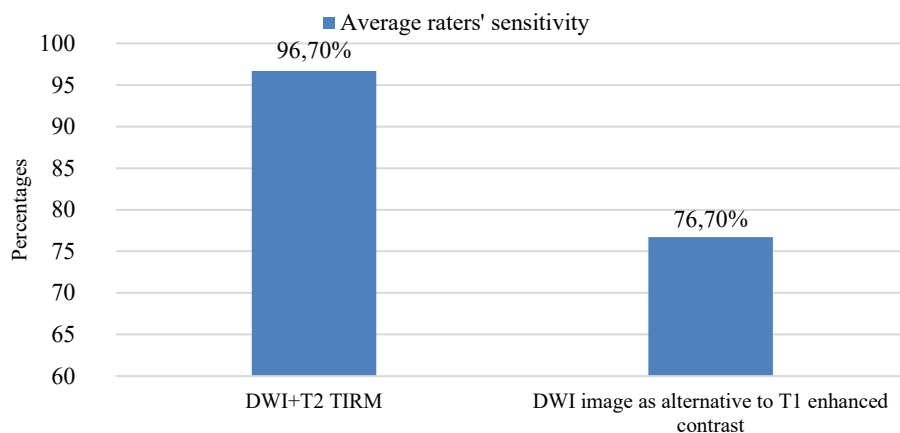


Fig. 3. Bar chart of overall average sensitivity of the raters' opinions (%) about using different MRI sequences in detecting anal fistula

Table 2

Inter-rater reliability and overall agreement between radiologists in the diagnosis of anal fistula among 50 patients

Sequence used	Kappa	95 % CI	<i>P</i> -value
DWI versus T1 enhanced contrast	0.553	0.548–0.558	<0.001
DWI + T2 TIRM	0.586	0.581–0.591	<0.001

DWI diffusion-weighted image, TIRM turbo inversion recovery magnitude, CI confident interval.

The presence of a perianal fistula can be seen in a variety of MRI sequences, as shown in Figure 4 and Figure 5, and Figure 6 demonstrates the abscess collection of patients with perianal fistula that shows the well-defined restricted diffusion of the abscess and hyper-signal intensity on T2 TIRM as an alternative technique to T1 enhanced contrast.

Discussion. The primary purpose of magnetic resonance imaging (MRI) in the context of perianal fistulas is to establish the extent of the tract, identify any side branches, and determine the presence of deep abscesses, especially at the supra levator level [22]. The utilization of Gadolinium-enhanced T1-weighted images and fat suppression confers distinct advantages in differentiating a fluid-filled tract from an area of inflammation. The wall of the tract displays increased enhancement, whereas the central region exhibits a hypo-intense appearance. Post-contrast gadolinium images exhibit high efficacy in visually representing abscesses [23]. However, the gadolinium contrast agent does have certain limitations. These include an extended duration of magnetic resonance examination, additional costs, the potential deposition of gadolinium contrast in the brain, and contraindications for patients with renal insufficiency (1).

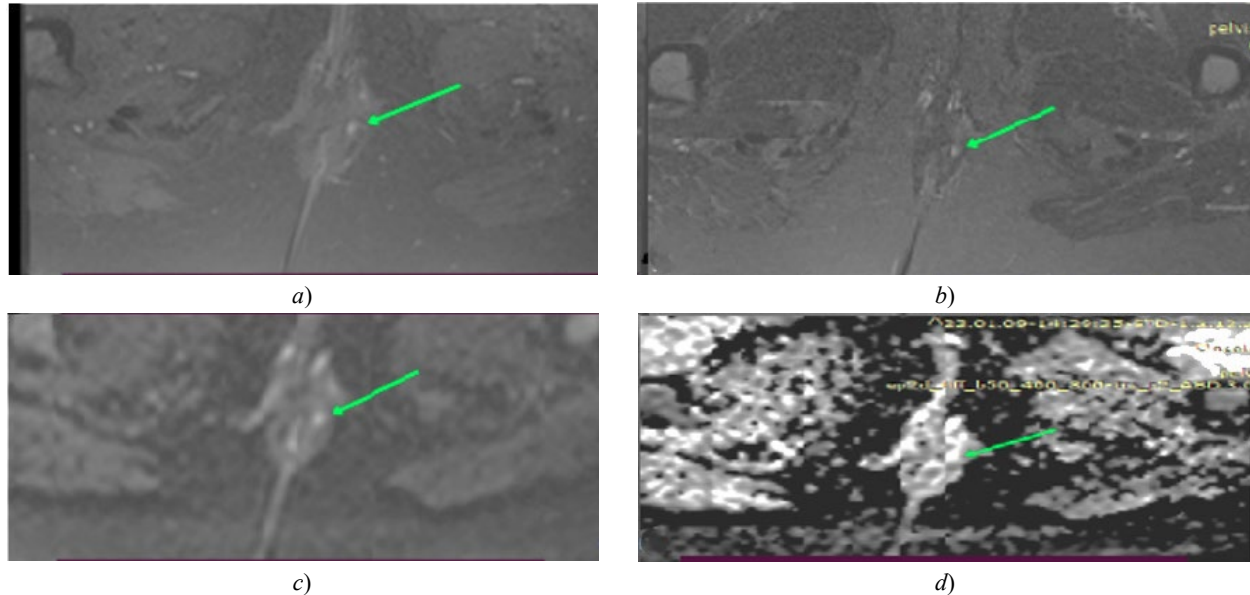


Fig. 4. A 41-year-old female patient presenting with a left-sided supra sphincteric fistula at 2 o'clock (green arrow); *a* — shows the T1 FSTSE enhanced contrast; *b* — shows the T2 TIRM; *c* — shows the diffusion-weighted image (3 mm slice thickness); *d* — shows the ADC map

Diffusion-weighted imaging has been proposed as a noteworthy alternative due to its ability to identify inflammatory lesions as areas exhibiting high signal intensity. The fistulous tracks demonstrate increased intensity in diffusion-weighted images, whereas the background signal is significantly attenuated. Consequently, the identification and extent of the fistula can be easily determined [24]. One limitation of diffusion-weighted imaging is its inherent drawback of having a relatively low spatial resolution. Diffusion-weighted imaging was not evaluated as an independent variable in our study. In this study, we evaluated the supplementary benefits of the technique in fat-suppressed T2-weighted imaging, specifically T2 TIRM (16). In our study, it was observed that all three raters concurred on the suitability of the majority of images derived from the sequences of Diffusion-Weighted Imaging (DWI) combined with T2 Turbo Inversion Recovery Magnitude (TIRM) to delineate anal fistula. Both rater two and rater three reported a percentage of 98, while rater 1 reported a slightly lower percentage of 94 for the images. Hence, the DWI+T2 TIRM sequence exhibited the highest percentage (96.7 %), aligning with the sensitivity of DWI combined with T2 TIRM compared to the clinical examination as the gold standard. The inter-rater kappa agreement was moderate ($k = 0.586$), with a significant P-value of less than 0.001. It is agreed Fahmy et al. (5) that is conducted a study that revealed a sensitivity of 92.12 % for the detection of perianal fistula when using a combination of diffusion-weighted imaging (DWI) and T2-weighted imaging (T2WI).

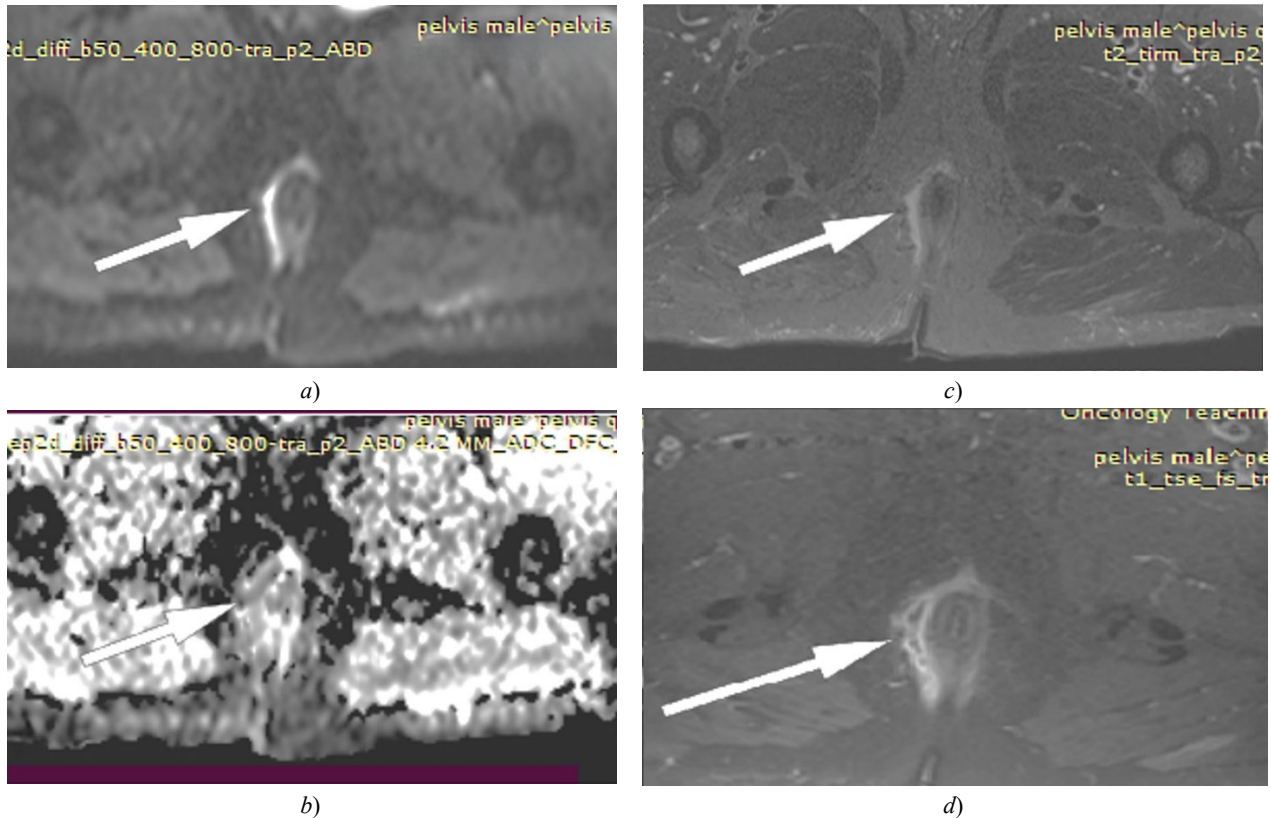


Fig. 5. A 51-year-old male presenting with a right-sided supra sphincteric branching fistula with extensive inflammatory changes and multiple extra sphincteric abscess collections (white arrow), *a* — optimized DWI; *b* — ADC map shows restricted diffusion; *c* — T2 TIRM shows hyper signal intensity; *d* — T1FSTSE post-contrast shows peripheral enhancement. All the images are in the oblique axial plane

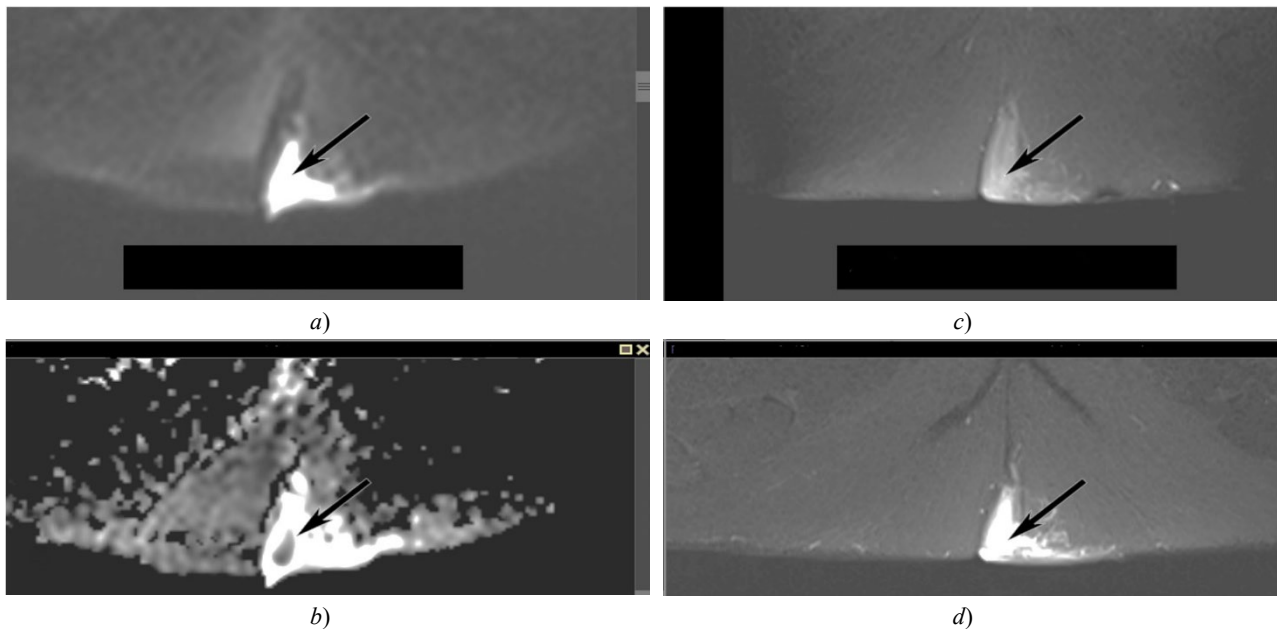


Fig. 6. A 36-year-old male presenting with a left gluteal abscess collection with surrounding significant soft tissue edema (black arrow), *a* — diffusion weighted image; *b* — ADC map shows restricted diffusion; *c* — T1FSTSE post-contrast shows peripheral enhancement; *d* — T2 TIRM shows hyper signal intensity. All the images are in the oblique axial plane

However, they regarded T1-weighted imaging (T1WI) post-contrast as the reference standard for comparison. Additionally, Mohsen and Osman [25] evaluated the combined utilization of diffusion-weighted imaging (DWI) and T2-weighted (T2W) sequences to obtain optimal outcomes. The perianal fistulas and abscesses were accurately diagnosed in 97.8 per cent of cases using T2-weighted imaging (T2WI) and T1-weighted imaging post-contrast (T1WI post-contrast) as the established benchmark. Regarding the sensitivity of DWI combined with T2TIRM as an alternative technique to

T1 FS TSE post-contrast, our research revealed that rater 3 said that it is sensitive for 42 (84 %), followed by rater one and rater two in the same order, who reported 74 % and 72 % of the sensitivity, respectively. Therefore, an average raters' sensitivity of 76.7 %; there was a significant (P -value 0.001 fair ($k=0.370$)) agreement between the three raters in selecting DWI as an alternative to post-contrast sequence for the detection of perianal fistula. Therefore, it reflects the capability of DWI in clearly delineating perianal fistula, making it comparable to contrast enhancement MRI in the detection of perianal fistula and possibly making it superior to contrast enhancement MRI in the detection of perianal fistula by reducing the amount of time an MRI examination takes and by reducing the adverse effects of contrast agents, particularly in patients with renal impairment. Our findings agree with those of Hori et al. (16), who established that there was not a statistically significant difference (p -value less than 0.05) in the sensitivity between combined contrast-enhanced sequences with T2WI and DWI coupled with T2WI. Also, according to the findings of Fahmy and Dawoud (5), the utilization of a combination of diffusion-weighted imaging (DWI) and turbo inversion recovery magnitude (TIRM) is deemed equivalent to the utilization of post-contrast images in the detection of primary and complicated fistula. The application of Diffusion-Weighted Imaging (DWI) has demonstrated its utility in differentiating between abscesses and inflammatory reactions and assessing the extent of disease activity. Active granulation tissue will exhibit enhancement on post-contrast T1-weighted imaging compared to the fluid in the fistula. Rim enhancement indicates an abscess, while diffuse enhancement is typical of granulation tissue (5). In comparison, diffusion-weighted imaging is a technique that depicts changes in the mobility of water molecules caused by their interactions with cell membranes, macromolecules, and environmental changes in the tissue. On diffusion-weighted imaging (DWI), inflammatory tissues may exhibit reduced diffusivity, resulting in hyper-intense signal regions [26]. The apparent diffusion coefficient (ADC) values observed in abscesses are estimated to be lower than those in healthy tissues. As reported in the scientific literature, this is due to pus, which inhibits the unrestricted diffusion of water molecules (9). As inflammatory tissues typically demonstrate enhanced signal intensity, diffusion-weighted imaging may hold promise as a diagnostic sequence for anal fistulas (6).

Our study has the limitation of not making a quantitative comparison by calculating ADC values in the diffusion-weighted images to diagnose active and inactive perianal fistula compared with the T1 enhanced contrast because of the overloaded work in the institution where the study was conducted. Therefore, we recommend future research to evaluate the ADC value of diffusion-weighted images to diagnose active and inactive perianal fistula compared with the T1 enhanced contrast with a larger sample size.

Conclusion. The sensitivity of diffusion-weighted images in conjunction with T2 turbo inversion recovery magnitude (TIRM) sequences demonstrates a similar level of effectiveness as T1 enhanced contrast sequences in identifying and assessing perianal fistula. This combination of imaging techniques may serve as a viable alternative, particularly for individuals with renal impairment who are contraindicated to administer MRI contrast agents.

References

1. Cattapan K, Chulroek T, Kordbacheh H, Wancharoenrung D, Harisinghani M. Contrast-vs. Non-Contrast Enhanced MR Data Sets for Characterization of Perianal Fistulas. *Abdominal Radiology*. 2019;44:446–455. <https://doi.org/10.1007/s00261-018-1761-3>
2. Gurung G. 3T MR Imaging Evaluation of Perianal Fistulas: an Initial Experience in Nepal. *Journal of Society of Surgeons of Nepal*. 2016;19(1):25–30. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:199464071> (accessed: 10.04.2023).
3. Singh K, Singh N, Thukral C, Singh KP, Bhalla V. Magnetic Resonance Imaging (MRI) Evaluation of Perianal Fistulae with Surgical Correlation. *Journal of Clinical and Diagnostic Research (JCDR)*. 2014;8(6):RC01–04. <https://doi.org/10.7860/JCDR/2014/7328.4417>
4. Kee Ho Song. New Techniques for Treating an Anal Fistula. *Journal of the Korean Society of Coloproctology*. 2012;28(1):7–12. <https://doi.org/10.3393/jksc.2012.28.1.7>
5. Fahmy DM, Dawoud MG. Value of Diffusion Weighted MRI in Assessment of Simple and Complicated Perianal Fistula. *The Egyptian Journal of Radiology and Nuclear Medicine*. 2017;48(3):553–562. <https://doi.org/10.1016/j.ejrm.2017.03.010>
6. Jaime de Miguel Criado, Laura Garcia del Salto, Patricia Fraga Rivas, Luis Felipe Aguilera del Hoyo, Leticia Gutiérrez Velasco, M Isabel Díez Pérez de las Vacas, et al. MR Imaging Evaluation of Perianal Fistulas: Spectrum of Imaging Features. *RadioGraphics*. 2012;32(1):175–194. <https://doi.org/10.1148/rg.321115040>
7. Akyel NG, Akın K, Kösehan D, Kökten A. Perianal Fistula Imaging: A Comparison between Two-Channel Superficial Flex Coil and Eight-Channel Body Coil. *Polish Journal of Radiology*. 2019;84:e430–e435. <https://doi.org/10.5114/pjr.2019.89906>
8. Omer HK, Jalab HA, Hasan AM, Tawfiq NE (eds.) Combination of Local Binary Pattern and Face Geometric Features for Gender Classification from Face Images. In: *Proc. 9th IEEE International Conference on Control System*,

Computing and Engineering (ICCSCE). New York City, NY: IEEE; 2019. <https://doi.org/10.1109/ICCSCE47578.2019.9068593>

9. Dohan A, Eveno C, Oprea R, Pautrat K, Placé V, Pocard M, et al. Diffusion-Weighted MR Imaging for the Diagnosis of Abscess Complicating Fistula-in-ano: Preliminary Experience. *European Radiology*. 2014;24:2906–2915. <https://doi.org/10.1007/s00330-014-3302-y>

10. Hasan AM, Meziane F, Aspin R, Jalab HA (eds.) MRI brain scan classification using novel 3-D statistical features. In: *Proceedings of the Second International Conference on Internet of things, Data and Cloud Computing*. New York, NY: ACM; 2017. P. 1–5. <https://doi.org/10.1145/3018896.3036381>

11. Jiyeon Baik, Seung Ho Kim, Yedaun Lee, Jung-Hee Yoon. Comparison of T2-weighted Imaging, Diffusion-Weighted Imaging and Contrast-Enhanced T1-weighted MR Imaging for Evaluating Perianal Fistulas. *Clinical Imaging*. 2017;44:16–21. <https://doi.org/10.1016/j.clinimag.2017.03.019>

12. Marckmann P, Skov L, Rossen K, Dupont A, Damholt MB, Heaf JG, et al. Nephrogenic Systemic Fibrosis: Suspected Causative Role of Gadodiamide Used for Contrast-Enhanced Magnetic Resonance Imaging. *Journal of the American Society of Nephrology*. 2006;17(9):2359–2362. <https://doi.org/10.1681/ASN.2006060601>

13. Cansu A, Bekircavusoglu S, Oguz S, Bulut E, Fidan S. Can Diffusion Weighted Imaging Be Used as an Alternative to Contrast-Enhanced Imaging on Magnetic Resonance Enterography for the Assessment of Active Inflammation in Crohn Disease. *Medicine*. 2020;99(8):e19202. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000019202>

14. Yoshizako T, Wada A, Takahara T, Kwee TC, Nakamura M, Uchida K, et al. Diffusion-Weighted MRI for Evaluating Perianal Fistula Activity: Feasibility Study. *European Journal of Radiology*. 2012;81(9):2049–2053. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2011.06.052>

15. Cavusoglu M, Duran S, Cılız DS, Tufan G, Çetin HH, Ozsoy A, et al. Added Value of Diffusion-Weighted Magnetic Resonance Imaging for the Diagnosis of Perianal Fistula. *Diagnostic and Interventional Imaging*. 2017;98(5):401–408. <https://doi.org/10.1016/j.diii.2016.11.002>

16. Hori M, Oto A, Orrin S, Suzuki K, Baron RL. Diffusion-Weighted MRI: A New Tool for the Diagnosis of Fistula in ano. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. 2009;30(5):1021–1026. <https://doi.org/10.1002/jmri.21934>

17. Hilal SR, Hasan HS, Hasan AM. Magnetic Resonance Imaging Breast Scan Classification Based on Texture Features and Long Short-Term Memory Model. *NeuroQuantology*. 2021;19(7):41–47. <https://doi.org/10.14704/nq.2021.19.7.NQ21082>

18. Balcı S, Onur MR, Karaosmanoğlu AD, Karçaaltınçaba M, Akata D, Konan A, et al. MRI Evaluation of Anal and Perianal Diseases. *Diagnostic and Interventional Radiology*. 2019;25(1):21–27. <https://doi.org/10.5152/dir.2018.17499>

19. Hasan AM, Qasim AF, Jalab HA, Ibrahim RW. Breast Cancer MRI Classification Based on Fractional Entropy Image Enhancement and Deep Feature Extraction. *Baghdad Science Journal*. 2022;20(1):0221. <https://doi.org/10.21123/bsj.2022.6782>

20. Boruah DK, Hazarika K, Ahmed H, Borah KK, Borah S, Malakar S, et al. Role of Diffusion-Weighted Imaging in the Evaluation of Perianal Fistulae. *Indian Journal of Radiology and Imaging*. 2021;31(01):091–101. <https://doi.org/10.1055/s-0041-1729673>

21. Chao Gu, Yu Wang, Lixia Lai, Weiwei Han, Jiansheng Li, Haichang Xing, et al. A Comparable Method to Gd-contrast Enhancement in the Preoperative Evaluation of Anal Fistula. *Medicine*. 2019;98(44):e17807. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000017807>

22. Jean AA, Reddy AK, Elavarasi JA, Siddhartha N. Assessment of Role of Diffusion-Weighted Imaging in the Evaluation of Perianal Fistulae. *International Journal of Academic Medicine and Pharmacy*. 2023;5(3):461–464. <http://dx.doi.org/10.47009/jamp.2023.5.3.99>

23. Khera PS, Badawi HA, Afifi AH. MRI in Perianal Fistulae. *Indian Journal of Radiology and Imaging*. 2010;20(01):53–57. <https://doi.org/10.4103/0971-3026.59756>

24. Sharma A, Yadav P, Sahu M, Verma A. Current Imaging Techniques for Evaluation of Fistula in ano: a Review. *Egyptian Journal of Radiology and Nuclear Medicine*. 2020;51(1):1–18. <https://doi.org/10.1186/s43055-020-00252-9>

25. Mohsen LA, Osman NM. Diffusion-Weighted Imaging in the Evaluation of Perianal Fistula and Abscess. *Egyptian Journal of Radiology and Nuclear Medicine*. 2020;51:1–9. <https://doi.org/10.1186/s43055-020-00193-3>

26. Yoshizako T, Kitagaki H. A Pictorial Review of the Impact of Adding Diffusion-Weighted MR Imaging to Other MR Sequences for Assessment of Anal Fistulae. *Japanese Journal of Radiology*. 2013;31:371–376. <https://doi.org/10.1007/s11604-013-0204-x>

Received 26.05.2023

Revised 22.06.2023

Accepted 28.06.2023

About the Authors:

Noor F. Baqir, BSc. (Radiological Engineering), College of Medical and Health Techniques, Middle Technical University (Muasker, Al Rashid Street, Baghdad, Iraq), MRI technologist, Oncology Teaching Hospital in Medical City, Baghdad, Iraq. lavendrtechnologist2017@gmail.com

Rasha S. Ahmed, BSc. (Physics), M.Sc. (Atomic Physics), Mustansiriyah University, Iraq, Ph.D. (Nuclear Physics), Baghdad University, Professor at Physiology and Medical Physics Department, College of Medicine, Al-Nahrain University (Al-Jadria, Baghdad, 10072, Iraq), [Scopus ID](#), [Researcher ID](#), [ORCID](#), rasha.sabeehahmed@colmed-alnahrain.edu.iq

Khaleel I. Mohson, MD, Assistant Professor of the Radiology Department, Head of Clinical Department, National Cancer Research Center, University of Baghdad, Iraq (Al-Jadria, Baghdad, 10072, Iraq), khalelcabm@gmail.com

Claimed contributorship:

NF Baqir: experimental base, samples and equipment; computational analysis; discussion of the results, and writing—original draft.

RS Ahmed: planning and organization of experiments; analysis of the results obtained; correction of the conclusions.

KI Mohson: academic advising; basic concept formulation; research objectives and tasks; discussion of the results; text preparation; formulation of conclusions.

Conflict of interest statement: the authors declare that they do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Об авторах:

Noor F. Baqir, Бакалавр наук (радиологическая инженерия), Колледж медицины и оздоровительных технологий Среднего технического университета, Ирак (Muasker, Al Rashid Street, Baghdad, Iraq), технолог МРТ в Учебной онкологической больнице в Медицинском городке, Багдад, Ирак, lavendrtechnologist2017@gmail.com

Rasha S. Ahmed, Бакалавр наук (физика), Магистр наук (атомная физика), Университет Мустансирия, Ирак, Доктор философии (ядерная физика), Багдадский университет, Профессор кафедры физиологии и медицинской физики в Медицинском колледже Университета Аль-Нахрейн, Багдад, Ирак (Al-Jadria, Baghdad, 10072, Iraq), [Scopus ID](#), [Researcher ID](#), [ORCID](#), rasha.sabeehahmed@colmed-alnahrain.edu.iq

Khaleel I. Mohson, доктор медицинских наук, доцент кафедры радиологии, руководитель клинического отделения Национального центра исследования рака, Багдадский университет, Ирак (Al-Jadria, Baghdad, 10072, Iraq), khalelcabm@gmail.com

Заявленный вклад соавторов:

N.F. Baqir — экспериментальная база, образцы и оборудование; проведение расчетов; обсуждение результатов; написание чернового варианта статьи.

R.S. Ahmed — планирование и организация экспериментов; анализ полученных результатов; корректировка выводов.

K.I. Mohson — научное руководство; формирование основной концепции; цели и задачи исследования; обсуждение результатов; подготовка текста; формулирование выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT



УДК 004.9

Научная статья

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-317-328>

Метод трехмерного захвата движений человека на основе компьютерного зрения

А.Д. Обухов , Д.Л. Дедов , Е.О. Суркова , И.Л. Коробова 

Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация

✉ obuhov.art@gmail.com

Аннотация

Введение. Проведенный анализ существующих подходов к отслеживанию тела человека выявил наличие проблем при захвате движений в трехмерной системе координат. Отмечена перспективность систем захвата движений на основе компьютерного зрения. В существующих исследованиях по безмаркерным системам захвата движений рассматривается позиционирование только в двумерном пространстве. Поэтому целью исследования являлось повышение точности определения координат человеческого тела в трехмерных координатах за счет разработки метода захвата движения на основе компьютерного зрения и алгоритмов триангуляции.

Материалы и методы. Представлен метод захвата движений, включающий калибровку нескольких камер и формализацию процедур обнаружения человека в кадре с использованием сверточной нейронной сети. На основе полученных от нейронной сети скелетных точек осуществляется трехмерная реконструкция модели тела человека с использованием различных алгоритмов триангуляции.

Результаты исследования. Проведены экспериментальные исследования по сравнению четырех алгоритмов триангуляции: прямого линейного переноса, линейного метода наименьших квадратов, L2 триангуляции и полиномиального методов. Определен оптимальный алгоритм триангуляции (полиномиальный), обеспечивающий погрешность не более 2,5 пикселей или 1,67 сантиметров.

Обсуждение и заключение. Выявлены недостатки существующих систем захвата движения. Предложенный метод направлен на повышение точности захвата движений в трехмерных координатах с использованием компьютерного зрения. Полученные результаты интегрированы в программное обеспечение позиционирования тела человека в трехмерных координатах для удаленного мониторинга, использования в виртуальных тренажерах и системах захвата движений.

Ключевые слова: захват движений, виртуальная реальность, триангуляция, компьютерное зрение, машинное обучение

Благодарности: авторы выражают благодарность редакционной коллегии журнала и рецензенту за профессиональный анализ и рекомендации по корректировке текста статьи.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22–71–10057, <https://rscf.ru/project/22-71-10057/>

Для цитирования. Обухов А.Д., Дедов Д.Л., Суркова Е.О., Коробова И.Л. Метод трехмерного захвата движений человека на основе компьютерного зрения. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(3):317–328. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-317-328>

3D Human Motion Capture Method Based on Computer Vision

Artem D. Obukhov , Denis L. Dedov , Ekaterina O. Surkova , Irina L. Korobova 

Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation

 obuhov.art@gmail.com

Abstract

Introduction. The analysis of approaches to tracking the human body identified problems when capturing movements in a three-dimensional coordinate system. The prospects of motion capture systems based on computer vision are noted. In existing studies on markerless motion capture systems, positioning is considered only in two-dimensional space. Therefore, the research objective is to increase the accuracy of determining the coordinates of the human body in three-dimensional coordinates through developing a motion capture method based on computer vision and triangulation algorithms.

Materials and Methods. A method of motion capture was presented, including calibration of several cameras and formalization of procedures for detecting a person in a frame using a convolutional neural network. Based on the skeletal points obtained from the neural network, a three-dimensional reconstruction of the human body model was carried out using various triangulation algorithms.

Results. Experimental studies have been carried out comparing four triangulation algorithms: direct linear transfer, linear least squares method, L2 triangulation, and polynomial methods. The optimal triangulation algorithm (polynomial) was determined, providing an error of no more than 2.5 pixels or 1.67 centimeters.

Discussion and Conclusion. The shortcomings of existing motion capture systems were revealed. The proposed method was aimed at improving the accuracy of motion capture in three-dimensional coordinates using computer vision. The results obtained were integrated into the human body positioning software in three-dimensional coordinates for use in virtual simulators, motion capture systems and remote monitoring.

Keywords: motion capture, virtual reality, triangulation, computer vision, machine learning

Acknowledgements: the authors would like to thank the editorial board of the journal and the reviewer for their professional analysis and recommendations for correcting the text of the article.

Funding information. The research was done on grant of the Russian Science Foundation No. 22–71–10057, <https://rscf.ru/project/22-71-10057/>

For citation. Obukhov AD, Dedov DL, Surkova EO, Korobova IL. 3D Human Motion Capture Method Based on Computer Vision. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(3):317–328. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-317-328>

Введение. В области компьютерного зрения в настоящее время достигнут значительный прогресс. Разработаны технологии, позволяющие решать задачи обнаружения объектов, определения их состояния, геометрической оценки изображенного на кадре пространства и многие другие. Благодаря этому компьютерное зрение получило широкое распространение в различных сферах деятельности человека, начиная от здравоохранения и образования, заканчивая сферой развлечений. Достаточно перспективным направлением является применение технологий компьютерного зрения для трехмерной реконструкции и позиционирования различных объектов, в том числе и людей. Существует достаточно большое количество систем для определения абсолютного положения человека в пространстве, которые можно разделить по следующим категориям:

– системы, использующие инерциальные датчики и позволяющие определить величину их перемещения, а также изменение углов между ними, что предполагает использование гироскопов и акселерометров [1]. Известным представителем данной категории является Noitom Mocar Perception Neuron [2], включающий до 32 инерциальных датчиков;

– лазерные системы позиционного слежения, основанные на использовании базовых станций, установленных на противоположных сторонах помещения и излучающих инфракрасные лучи, которые позволяют точно определять положение и ориентацию датчиков в пространстве. Примером таких систем являются комплекты виртуальной реальности от компании HTC [3], обладающие погрешность до 0,1 мм;

– системы, использующие магнитные датчики [4], основанные на применении магнитного поля для захвата движения человека, которые предполагают наличие носимых датчиков на теле пользователя. К данной категории относится Polhemus Liberty — портативная электромагнитная система отслеживания движений, считающаяся одной из самых быстрых (частота дискретизации 240 Гц);

– оптические системы на основе маркеров — определяют положение объектов по маркерам с использованием набора камер. Примером является Vicon, обладающий достаточно низкой погрешностью: средние абсолютные ошибки отслеживания маркера составляют 0,15 мм при статических испытаниях и 0,2 мм (с соответствующими угловыми ошибками 0,3°) — при динамических испытаниях [5];

– безмаркерные оптические системы, основанные на использовании компьютерного зрения и машинного обучения. Примерами таких технологий являются OpenPose, MediaPipe, Movenet. С их помощью движения человека могут отслеживаться с точностью до 30 мм [6].

Анализируя перечисленные категории систем захвата движений, можно сделать вывод, что большинство решений, используемых для распознавания человеческих действий и движений предполагает наличие различных носимых устройств, таких как сенсоры или перчатки. Основная масса этих устройств являются громоздкими из-за большого количества датчиков и необходимости проводного подключения. Некоторые такие системы обладают высокой точностью, но при этом не могут быть использованы из-за размеров или наличия электромагнитных помех [7]. Инерциальные системы имеют ряд проблем, связанных с накоплением ошибок, что ограничивает их использование только относительным позиционированием в пространстве.

Поэтому большой популярностью пользуются оптические системы для распознавания и отслеживания действий пользователя. Для получения информации о действиях и положении пользователя используются кадры, полученные с камеры. Среди оптических систем стоит отметить те, которые используют маркеры (пользователь может быть одет в специальную одежду или на нем закреплены определенные метки), что затрудняет их использование в реальных условиях и больше применимо для специально подготовленных помещений (например, киностудий).

Системы, не использующие какие-либо маркеры, позволяют пользователям более свободно взаимодействовать с окружающей средой и больше подходят для применения в реальных условиях. К существенным недостаткам систем этого направления можно отнести относительно невысокую точность, ненадежность и низкую производительность. Во многом это может быть обусловлено недостатками алгоритмов компьютерного зрения, используемых для распознавания человека в кадре, а также следующими причинами: изменчивостью внешнего вида человека и условий освещения, частичными окклюзиями из-за наложения объектов в сцене, сложностью человеческой скелетной структуры.

В основе работы безмаркерных систем захвата движения, как правило, используется алгоритм оценки позы человека. Подходы к решению задачи оценки позы человека можно разделить на нисходящие и восходящие. В нисходящих подходах сначала происходит обнаружение людей в кадре, затем оценка позы каждого найденного человека. Алгоритмы, которые относятся к восходящим подходам, на первом этапе выполняют поиск частей тела в кадре, затем производят их группировку в позы. Как правило, для этой задачи применяются сверточные нейронные сети, такие как YOLO (You Look Only Once) [8], SSD (Single Shot Detection) [9], R-CNN (Region CNN) [10] и другие. Они позволяют распознавать множество различных объектов, включая человека или отдельные части тела с высокой точностью. Однако одним из недостатков решений, перечисленных выше, можно назвать их низкую производительность и медленную работу. Для решения этой проблемы существуют специальные фреймворки (MoveNet [11], MediaPipe [12], OpenPose [13]), также использующие нейронные сети, оптимизированные для работы в режиме реального времени.

Необходимо отметить, что вышеуказанные алгоритмы, технологии и подходы безмаркерных систем захвата движения позволяют осуществить позиционирование в двумерном пространстве, что затрудняет как определение расстояния до объектов и их размеров, так и отслеживание сложных движений, когда, например, руки пользователя скрыты его телом. Существующие решения в области стереокамер могут быть эффективны, но не отличаются большой точностью при значительном удалении объекта от камеры, что происходит при отслеживании всего тела человека. Кроме того, они не решают проблемы окклюзий. Таким образом, актуальным направлением исследований является разработка метода захвата движений с использованием нескольких камер и технологий компьютерного зрения. При реализации многокамерных систем захвата движений неизбежно возникает проблема совмещения объектов с нескольких изображений, т.е. необходимость выполнения триангуляции. Среди методов триангуляции можно выделить линейные и итеративные линейные алгоритмы.

Линейная триангуляция наиболее распространённый подход к выполнению реконструкции объектов в трёхмерном пространстве, включающая такие методы как линейно-собственный метод, линейный метод наименьших квадратов, прямое линейное преобразование, отличающиеся разной степенью устойчивости к шуму [14].

Итеративные линейные методы представляют собой более надёжную версию линейной триангуляции. Обычные линейные методы могут быть менее точны при решении задач триангуляции совокупности точек, так как при решении систем минимизируемая ошибка не имеет геометрического смысла (не учитывает форму

скелета и правила соединения точек). Основная идея итерационных линейных методов заключается в адаптивном изменении весов линейных уравнений таким образом, что взвешенные уравнения соответствуют ошибкам. К итеративным линейным методам можно отнести L_2 и L_∞ триангуляцию [15].

Таким образом, в рамках данного исследования ставится следующая задача: необходимо разработать метод захвата движений человека, позволяющий позиционировать тело пользователя в трехмерных координатах с минимальной погрешностью и с использованием технологий компьютерного зрения. Предлагаемый метод может использоваться как замена существующих систем захвата движений, так и входить в состав других алгоритмов, например, для последующей классификации состояния человека. Целью данной работы является повышение точности определения поз и координат человеческого тела в трехмерных координатах за счет разработки методов захвата движения на основе компьютерного зрения. Для достижения поставленной цели необходимо формализовать основные этапы процесса захвата точек тела человека с нескольких камер, интегрировать алгоритмы триангуляции, выбрав среди них оптимальный с точки зрения точности, осуществить программную реализацию предложенного метода.

Материалы и методы. Решение задачи трехмерного позиционирования человека в пространстве включают следующие основные этапы:

- предварительная калибровка набора камер;
- реализация процедур обнаружения человека в кадре и расчет скелетных точек;
- расчет трехмерной реконструкции модели тела человека.

Рассмотрим их более подробно.

Процесс калибровки включает в себя выполнение системой камер нескольких снимков калибровочного шаблона, на котором можно легко выделить ключевые точки с известными для них относительными положениями в пространстве. После осуществляется расчет внутренних и внешних параметров для каждой камеры. Внутренние параметры постоянны для конкретной камеры, внешние — зависят от расположения камер относительно друг друга [16]. Поэтому данный шаг необходимо выполнять перед первым использованием системы камер в заданном расположении.

Для вычисления значений координат точки в трёхмерном пространстве необходимо знать координаты её проекций на изображениях и проективные матрицы камер [17]. Проективная матрица P некоторой камеры может быть представлена в виде комбинации матриц A (содержащей внутренние параметры камеры) и R (вращения), а также вектора перемещения T , которые описывают изменение координат из мировой системы координат в систему координат относительно камеры:

$$P = A[R | T] = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где (x, y) — координаты проекции трёхмерной точки на изображении в пикселях; (c_x, c_y) — координаты центральной точки камеры; (f_x, f_y) — фокусное расстояние в пикселях.

На втором этапе необходимо получить непосредственно ключевые (скелетные) точки тела человека на каждой их камер. Для извлечения скелетных точек тела из кадра возможно применение различных технологий машинного обучения, например, MoveNet, MediaPipe, OpenPose и других [18]. В рамках данного исследования предлагается использовать высокоэффективный и производительный модуль Pose из библиотеки MediaPipe. MediaPipe Pose использует машинное обучение для высокоточного отслеживания позы тела человека, определения трехмерных ориентиров и маски сегментации фона на всем теле из видеок кадров RGB. Данный подход позволяет отслеживать до 33 точек и обеспечивает работу в реальном времени на большинстве современных устройств.

Таким образом, в рамках второго этапа формируется набор из 33 точек для каждой i -ой камеры:

$$\{x_{ij} = \langle u_{ij}, v_{ij} \rangle \mid j \in \{1, 2, \dots, 33\}, i \in \{1, 2, \dots, K\}\}, \quad (2)$$

где u_{ij} — координата j -ой точки по оси X на i -ом изображении; v_{ij} — координата j -ой точки по оси Y на i -ом изображении; K — общее количество камер и изображений.

На третьем этапе выполняется расчёт положений ключевых скелетных точек в трёхмерном пространстве. Для получения данных о положении скелетных точек человека в пространстве выполняется триангуляция — нахождение координат трёхмерной точки по координатам её проекций. Триангуляция — одна из важнейших задач в компьютерном зрении, её решение является решающим этапом в 3D-реконструкции и влияет на точность всего результата [19].

В основе трехмерной реконструкции точек объекта по значениям положений проекций точек на изображениях со всех камер лежит эппиполярная геометрия. Основная её идея заключается в том, что 3D-точки в сцене проецируются на линии в плоскости изображения каждой камеры — эппиполярные линии. Эти линии соответствуют пересечению плоскости изображения с плоскостью, проходящей через центры камер и 3D-точку. Данная идея обеспечивает условие для поиска пар соответствующих точек на двух изображениях: если известно, что точка x на плоскости первого изображения соответствует точке x' на плоскости другого изображения, то ее проекция должна лежать на соответствующей эппиполярной линии. Согласно этому условию, для всех соответствующих пар точек $x \leftrightarrow x'$ будет справедливо следующее отношение:

$$x'Fx = 0, \quad (3)$$

где F — фундаментальная матрица, имеющая размер 3×3 и ранг равный 2.

Для некоторой точки X , заданной в трёхмерном пространстве, справедлива следующая формула проецирования, выражающаяся в однородных координатах:

$$x_i = P_i X, \quad (4)$$

где $x_i = w(u_i, v_i, 1)^T$ — однородные координаты некоторой точки на плоскости i -го изображения (полученной с i -ой камеры в ходе второго этапа), включающие положение на изображении u_i (по оси X) и v_i (по оси Y); w — коэффициент масштабирования; P_i — проекционная матрица i -й камеры, полученная на первом этапе.

Для упрощения вычислений проекционная матрица камеры зачастую представляется в следующем виде:

$$P_i = \begin{bmatrix} p_i^{1T} \\ p_i^{2T} \\ p_i^{3T} \end{bmatrix} (P_i \in \mathbb{R}^{3 \times 4}), \quad (5)$$

где p_i^{jT} — j -ая строка матрицы P_i .

Следовательно, уравнение (4) может быть представлено следующим образом:

$$\begin{aligned} wu_i &= p_i^{1T} X, \\ wv_i &= p_i^{2T} X, \\ w &= p_i^{3T} X. \end{aligned} \quad (6)$$

Так как w — коэффициент масштабирования, получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} u_i p_i^{3T} X - p_i^{1T} X &= 0, \\ v_i p_i^{3T} X - p_i^{2T} X &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Так как X является однородным представлением координат в трёхмерном пространстве, то для их вычисления необходимо получить x_i и P_i как минимум для двух камер. Для решения системы уравнений (7) рассмотрено 4 алгоритма [14]:

- прямой линейный перенос (DLT);
- линейный метод наименьших квадратов;
- L2 триангуляция;
- оптимальный (полиномиальный) метод.

DLT относится к линейным алгоритмам триангуляции, главным достоинством которого является простота его реализации. Так, например, в библиотеке компьютерного зрения OpenCV существует готовая реализация данного алгоритма в методе `triangulatePoints`.

Линейный метод наименьших квадратов также относится к линейным и состоит в том, что система однородных уравнений (7) сводится к системе, состоящей из неоднородных уравнений, для решения которой используется метод наименьших квадратов.

L2 триангуляция является итеративным методом трехмерной реконструкции, решение которой сводится к минимизации ошибки перепроецирования:

$$\sum_i d(x_i, \hat{x}_i) \rightarrow \min, \quad (8)$$

где x_i — координата проекции оцениваемой точки на изображении; $\hat{x}_i$ — координата проекции, вычисленная по формуле (4) для уже рассчитанной пространственной точки; $d(\bullet)$ — расстояние между двумя точками.

Алгоритм оптимальной (полиномиальной) триангуляции относят к неитеративным подходам. Для его решения требуется полином шестого порядка. Критерий минимизации для выполнения трёхмерной реконструкции в данном методе можно определить следующим образом:

$$\sum_i d(x_i, \lambda_i) \rightarrow \min, \quad (9)$$

где λ_i — эпиполярная линия, соответствующая точке x_i .

При использовании системы из двух камер для минимизации ошибки (9) необходимо выполнить следующую последовательность действий:

- параметризовать пучок эпиполярных линий на первом изображении с помощью параметра t . Таким образом эпиполярная линия на первом изображении может быть выражена как $\lambda_0(t)$;
- используя фундаментальную матрицу F , вычислить соответствующую эпиполярную линию $\lambda_1(t)$ на втором изображении;
- выразить функцию расстояния (9) как функцию от t ;
- выполнить поиск значения t , при котором (9) стремится к минимуму.

Используя методы элементарного исчисления, можно свести решение задачи минимизации к нахождению корней полинома шестого порядка. Вычисление предполагаемой пространственной точки осуществляется с помощью метода прямого линейного переноса (DLT) [17].

Подводя итог третьему этапу, получим, что после успешного решения системы (7) и получения мировых координат ключевых точек целевого объекта (тела человека) формируется следующее множество точек H :

$$H = \{X_j \mid \forall i (x_{ij} = P_i X_j)\}, \quad (10)$$

где X_j — мировые координаты скелетной точки тела человека, полученные после решения задачи триангуляции, выраженные в сантиметрах.

Таким образом, задача оптимизации в данном исследовании при использовании двух камер сводится к нахождению такого метода триангуляции $MT: \{x_{ij}\} \rightarrow H$, при котором ошибка перепроецирования стремится к минимуму:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^K d(x_{ij}, \hat{x}_{ij})}{K} \rightarrow \min. \quad (11)$$

Результаты исследования. Решение задачи оптимизации (11) осуществляется при выполнении триангуляции двумерных точек объекта, полученных с изображений нескольких камер, в рамках данного исследования — с двух камер с использованием различных алгоритмов, перечисленных в предыдущем разделе.

Перечисленные методы триангуляции были реализованы с использованием библиотек OpenCV и NumPy. Для сравнения алгоритмы были интегрированы в программное обеспечение, реализующее метод трёхмерного захвата движений. Пример работы метода для реконструкции всего скелета человека представлен на рис. 1.

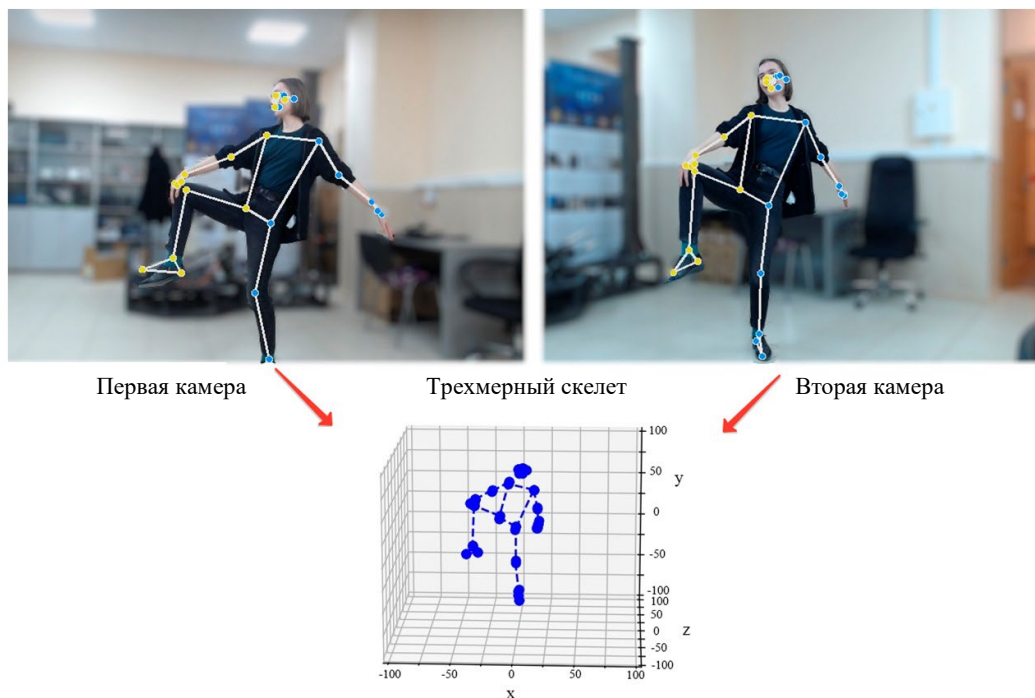


Рис. 1. Пример работы метода, включающий распознавание человека на двух камерах и построение трёхмерного скелета

Затем было выполнено сравнение данных алгоритмов по значению функции ошибки перепроецирования (11) для всех точек скелета с двух изображений. Проведено сравнение выбранных методов триангуляции по величине ошибки, а также по времени получения решения (вычислительной сложности) для всей совокупности точек скелета. Сводные сравнительные диаграммы представлены на рис. 2.

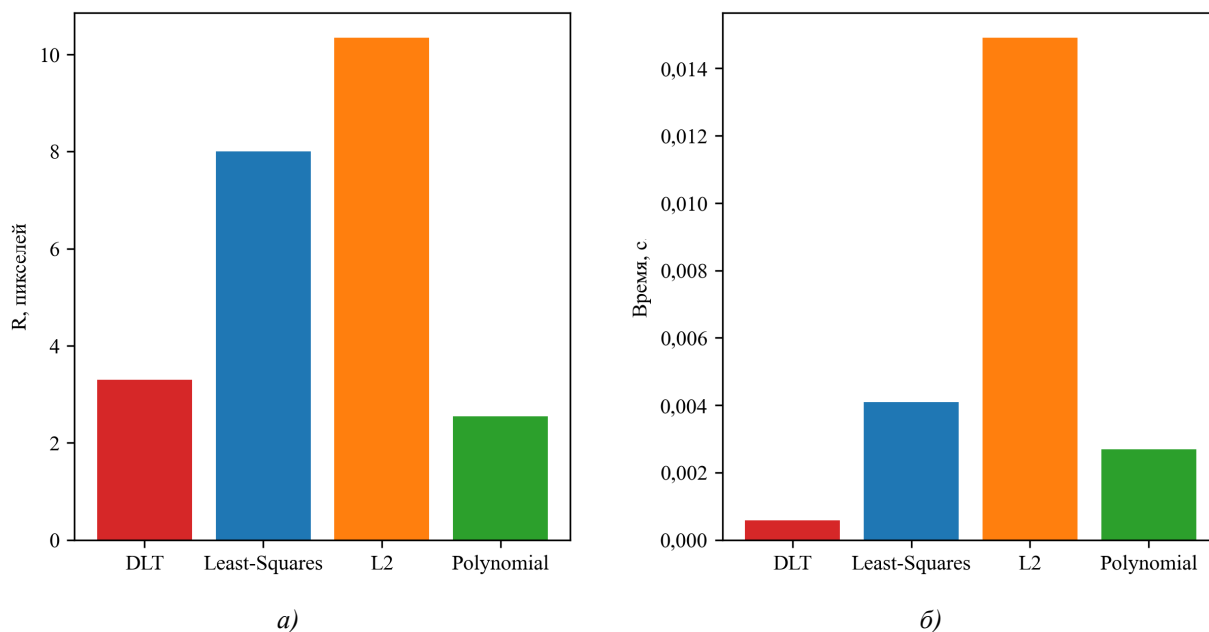


Рис. 2. Сравнение методов триангуляции по метрикам: *а* — по ошибке перепроецирования; *б* — по времени вычислений

Для выбранных методов триангуляции также проведен ряд экспериментальных тестов, в ходе которых для каждого подхода замерялись рассчитанные длины конечностей пользователя и абсолютное отклонение полученных значений от реальных. Сравнение представлено в таблице 1.

Таблица 1

Сравнение точности определения размеров конечностей в процессе триангуляции

Сегмент тела	DLT	Least-Squares	L2	Polynomial	Реальное значение
Предплечье	$25,2 \pm 1,6$	$30,8 \pm 0,2$	$26,6 \pm 0,5$	$24,3 \pm 0,4$	26
Голень	$42,2 \pm 2,0$	$65,3 \pm 1,1$	$44,6 \pm 0,7$	$38,7 \pm 1,8$	41
Бедро	$45,7 \pm 2,7$	$59,5 \pm 0,49$	$48,7 \pm 1,3$	$44,1 \pm 0,6$	45
Среднее отклонение	2,43	14,58	2,26	1,67	0
Представлены средние значения (в сантиметрах) после в выборке из 10 измерений $\pm$ среднее отклонение в выборке					

Разработанное программное обеспечение включает следующие модули:

- для работы с устройствами ввода (камерами);
- для выполнения калибровки и получения основных параметров камер;
- для синхронизации нескольких камер;
- для распознавания объектов (тело и руки пользователя);
- для анализа расположения найденных скелетных точек;
- для построения визуализации в режиме реального времени.

При реализации программного обеспечения использовался язык программирования Python, библиотеки OpenCV и Matplotlib. Функционирование системы осуществляется в нескольких потоках: один отвечает за получение данных с камер, второй — за визуализацию, третий — за отправку полученных мировых координат тела человека во внешние системы или модули. Использование унифицированного протокола с пакетом данных в формате JSON позволяет интегрировать программное обеспечение в сторонние системы (например, игровые среды разработки Unity, Unreal Engine и т.д.) [20, 21].

Обсуждение и заключение. Проанализируем результаты сравнения алгоритмов триангуляции по выбранным метрикам, представленные на рис. 2 и в таблице 1.

В ходе сравнения обнаружено, что оптимальным алгоритмом для трехмерной реконструкции является полиномиальный метод. Значение ошибки составляет порядка 2,55 пикселей. В реальных испытаниях при определении роста человека ошибка составила не более 3 %, с учетом того, что MediaPipe Pose не фиксирует верхнюю точку головы и она рассчитывается примерно на основе положения глаз. При измерении конечностей погрешность составила от 0,9 см до 2,3 см, средняя — 1,67 (таблица 1). Таким образом, реальные испытания подтверждают правильность выбора полиномиального метода.

Далее сравним полученные результаты с существующими исследованиями, например, описанными в работе [22]. Авторы также используют обученные сети (OpenPose) для реализации безмаркерной системы распознавания человека, процедуру калибровки камер, извлечение скелетных точек, но располагают камеры рядом друг с другом для имитации стереозрения. Это ключевое отличие позволяет распознавать в рамках данного исследования позы человека, когда одни части тела перекрывают другие. Кроме того, использование MediaPipe Pose позволяет отслеживать 33 скелетные точки, а не 18, как в методе на основе OpenPose. Полученные значения ошибок в целом соответствуют существующим исследованиям (наилучший результат в работе [22] составляет 2 см), что позволяет сделать вывод о возможности практического использования предложенного подхода. Прочие безмаркерные системы, например, на основе Kinect [23], также показывают сравнимые результаты по величине погрешности измерений (2–5 см). Таким образом, полученное решение в целом соответствует по точности существующим разработкам.

Сравнение времени вычисления набора точек, представленное на рис. 2 справа, показывает, что алгоритм DLT обеспечивает наибольшую производительность, однако, все алгоритмы показывают приемлемые результаты (для обеспечения быстродействия в 30 и даже 60 кадров в секунду). Поэтому данная метрика не является определяющей.

Разработанное программное обеспечение может использоваться в различных предметных областях прежде всего, как замена систем захвата движений, основанных на инерциальных датчиках. Преимуществами предлагаемого решения являются низкие экономические затраты на реализацию и доступность (переход от узкоспециализированных костюмов motion capture к распространенным средствам на основе камер), возможность параллельного захвата моделей тел нескольких пользователей [24].

Научная новизна исследования состоит в комплексном подходе к формализации процесса трехмерного позиционирования человека с использованием технологий компьютерного зрения, включая предварительную калибровку набора из нескольких камер, формализацию процедур обнаружения человека в кадре с использованием произвольной нейронной сети для получения скелетных точек, а также расчет трехмерной реконструкции модели тела человека с использованием различных алгоритмов триангуляции. Исследование включает все необходимые расчетные формулы и подробно изложенные этапы, позволяющие достичь поставленной цели — повышения точности определения поз и координат человеческого тела в трехмерных координатах с использованием технологий компьютерного зрения. Представленные теоретические результаты достаточно универсальны и могут быть использованы для практической реализации систем захвата движений, основанных на различных моделях нейронных сетей, а не только MediaPipe Pose.

Список литературы

1. Lind C.M., Abtahi F., Forsman M. Wearable Motion Capture Devices for the Prevention of Work-Related Musculoskeletal Disorders in Ergonomics – An Overview of Current Applications, Challenges, and Future Opportunities. *Sensors*. 2023;23(9):4259. <https://doi.org/10.3390/s23094259>
2. Sers R., Forrester S., Moss E., Ward S., Ma J., Zecca M. Validity of the Perception Neuron Inertial Motion Capture System for Upper Body Motion Analysis. *Measurement*. 2020;149:107024. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107024>
3. Bauer P., Lienhart W., Jost S. Accuracy Investigation of the Pose Determination of a VR System. *Sensors*. 2021;21(5):1622. <http://dx.doi.org/10.3390/s21051622>
4. Irshad M.T., Nisar M.A., Gouverneur P., Rapp M., Grzegorzec M. AI Approaches towards Prechtl's Assessment of General Movements: A Systematic Literature Review. *Sensors*. 2020;20(18):5321. <http://dx.doi.org/10.3390/s20185321>
5. Merriault P., Dupuis Y., Boutteau R., Vasseur P., Savatier X. A Study of Vicon System Positioning Performance. *Sensors*. 2017;17(7):1591. <https://doi.org/10.3390/s17071591>

6. Nakano N., Sakura T., Ueda K., Omura L., Kimura A., Iino Y., et al. Evaluation of 3D Markerless Motion Capture Accuracy Using OpenPose with Multiple Video Cameras. *Frontiers in Sports and Active Living*. 2020;2:50. <https://doi.org/10.3389/fspor.2020.00050>
7. Coronado E., Fukuda K., Ramirez-Alpizar I.G., Yamanobe N., Venture G., Harada K. Assembly Action Understanding from Fine-Grained Hand Motions, a Multi-camera and Deep Learning Approach. In: *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. New York, NY: IEEE; 2021. P. 2628–2634. <http://dx.doi.org/10.1109/IROS51168.2021.9636715>
8. Tausif Diwan, Anirudh G., Tembhurne J.V. Object Detection Using YOLO: Challenges, Architectural Successors, Datasets and Applications. *Multimedia Tools and Applications*. 2023;82(6):9243–9275. <https://doi.org/10.1007/s11042-022-13644-y>
9. Wei Liu, Anguelov D., Erhan D., Szegedy C., Reed S., Cheng-Yang Fu., et al. SSD: Single Shot MultiBox Detector. In book: Leibe B., Matas J., Sebe N., Welling M. (eds). *Computer Vision – ECCV 2016*. Cham: Springer. 2016;9905:21–37. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46448-0_2
10. Bharati P., Pramanik A. Deep Learning Techniques—R-CNN to Mask R-CNN: A Survey. In book: Das A., Nayak J., Naik B., Pati S., Pelusi D. (eds). *Computational Intelligence in Pattern Recognition*. New York, NY: Springer. 2020;999:657–668. http://dx.doi.org/10.1007/978-981-13-9042-5_56
11. Bajpai R., Joshi D. MoveNet: A Deep Neural Network for Joint Profile Prediction across Variable Walking Speeds and Slopes. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2021;70:1–11. <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2021.3073720>
12. Ghanbari S., Ashtyani Z.P., Masouleh M.T. User Identification Based on Hand Geometrical Biometrics Using Media-Pipe. In: *Proc. 30th International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*. New York, NY: IEEE; 2022. P. 373–378. <http://dx.doi.org/10.1109/ICEE55646.2022.9827056>
13. Weijian Mai, Fengjie Wu, Ziqian Guo, Yuhan Xiang, Gensheng Liu, Xiaobin Chen. A Fall Detection Alert System Based on Lightweight Openpose and Spatial-Temporal Graph Convolution Network. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2035:012036. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2035/1/012036>
14. Szeliski R. Recognition. In book: *Computer Vision: Algorithms and Applications*. London: Springer; 2011. P. 575–640. https://doi.org/10.1007/978-1-84882-935-0_14
15. Kahl F., Hartley R. Multiple-View Geometry Under the L_∞ -Norm. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2008;30(9):1603–1617. <http://dx.doi.org/10.1109/TPAMI.2007.70824>
16. Luhmann T., Fraser C., Maas H.-G. Sensor Modelling and Camera Calibration for Close-Range Photogrammetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2016;115:37–46. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.006>
17. Кудинов И.А., Павлов О.В., Холопов И.С. Реализация алгоритма определения пространственных координат и угловой ориентации объекта по реперным точкам, использующего информацию от одной камеры. *Компьютерная оптика*. 2015;39(3):413–419. <https://doi.org/10.18287/0134-2452-2015-39-3-413-419>
18. Jen-Li Chung, Lee-Yeng Ong, Meng-Chew Leow. Comparative Analysis of Skeleton-Based Human Pose Estimation. *Future Internet*. 2022;14(12):380. <https://doi.org/10.3390/fi14120380>
19. Jia Chen, Dongli Wu, Peng Song, Fuqin Deng, Ying He Y., Shiyang Pang. Multi-View Triangulation: Systematic Comparison and an Improved Method. *IEEE Access*. 2020;8:21017–21027. <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2969082>
20. Obukhov A., Dedov D., Volkov A., Teselkin D. Modeling of Nonlinear Dynamic Processes of Human Movement in Virtual Reality Based on Digital Shadows. *Computation*. 2023;11(5):85. <https://doi.org/10.3390/computation11050085>
21. Abella J., Demircan E. A Multi-Body Simulation Framework for Live Motion Tracking and Analysis within the Unity Environment. In: *Proc. 16th International Conference on Ubiquitous Robots (UR)*. New York, NY: IEEE; 2019. P. 654–659. <http://dx.doi.org/10.1109/URAI.2019.8768659>
22. Zago M., Luzzago M., Marangoni T., De Cecco M., Tarabini M., Galli M. 3D Tracking of Human Motion Using Visual Skeletonization and Stereoscopic Vision. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2020;8:181. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00181>
23. Latorre J., Llorens R., Colomer C., Alcañiz M. Reliability and Comparison of Kinect-Based Methods for Estimating Spatiotemporal Gait Parameters of Healthy and Post-Stroke Individuals. *Journal of Biomechanics*. 2018;72:268–73. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2018.03.008>
24. Обухов А.Д., Волков А.А., Вехтева Н.А., Патутин К.И., Назарова А.О., Дедов Д.Л. Метод формирования цифровой тени процесса перемещения человека на основе объединения систем захвата движений. *Информатика и автоматизация*. 2023;22(1):168–189. <https://doi.org/10.15622/ia.22.1.7>

References

1. Lind CM, Abtahi F, Forsman M. Wearable Motion Capture Devices for the Prevention of Work-Related Musculoskeletal Disorders in Ergonomics – An Overview of Current Applications, Challenges, and Future Opportunities. *Sensors*. 2023;23(9):4259. <https://doi.org/10.3390/s23094259>
2. Sers R, Forrester S, Moss E, Ward S, Ma J, Zecca M. Validity of the Perception Neuron Inertial Motion Capture System for Upper Body Motion Analysis. *Measurement*. 2020;149:107024. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107024>
3. Bauer P, Lienhart W, Jost S. Accuracy Investigation of the Pose Determination of a VR System. *Sensors*. 2021;21(5):1622. <http://dx.doi.org/10.3390/s21051622>
4. Irshad MT, Nisar MA, Gouverneur P, Rapp M, Grzegorzec M. AI Approaches towards Prechtl's Assessment of General Movements: A Systematic Literature Review. *Sensors*. 2020;20(18):5321. <http://dx.doi.org/10.3390/s20185321>
5. Merriault P, Dupuis Y, Boutteau R, Vasseur P, Savatier X. A Study of Vicon System Positioning Performance. *Sensors*. 2017;17(7):1591. <https://doi.org/10.3390/s17071591>
6. Nakano N, Sakura T, Ueda K, Omura L, Kimura A, Iino Y, et al. Evaluation of 3D Markerless Motion Capture Accuracy Using OpenPose with Multiple Video Cameras. *Frontiers in Sports and Active Living*. 2020;2:50. <https://doi.org/10.3389/fspor.2020.00050>
7. Coronado E, Fukuda K, Ramirez-Alpizar IG, Yamanobe N, Venture G, Harada K. Assembly Action Understanding from Fine-Grained Hand Motions, a Multi-camera and Deep Learning Approach. In: *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. New York, NY: IEEE; 2021. P. 2628–2634. <http://dx.doi.org/10.1109/IROS51168.2021.9636715>
8. Tausif Diwan, Anirudh G, Tembhurne JV. Object Detection Using YOLO: Challenges, Architectural Successors, Datasets and Applications. *Multimedia Tools and Applications*. 2023;82(6):9243–9275. <https://doi.org/10.1007/s11042-022-13644-y>
9. Wei Liu, Anguelov D, Erhan D, Szegedy C, Reed S, Cheng-Yang Fu, et al. SSD: Single Shot MultiBox Detector. In book: Leibe B, Matas J, Sebe N, Welling M. (eds). *Computer Vision – ECCV 2016*. Cham: Springer. 2016;9905:21–37. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46448-0_2
10. Bharati P, Pramanik A. Deep Learning Techniques—R-CNN to Mask R-CNN: A Survey. In book: Das A., Nayak J., Naik B., Pati S., Pelusi D. (eds). *Computational Intelligence in Pattern Recognition*. New York, NY: Springer. 2020;999:657–668. http://dx.doi.org/10.1007/978-981-13-9042-5_56
11. Bajpai R, Joshi D. MoveNet: A Deep Neural Network for Joint Profile Prediction across Variable Walking Speeds and Slopes. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2021;70:1–11. <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2021.3073720>
12. Ghanbari S, Ashtyani ZP, Masouleh MT. User Identification Based on Hand Geometrical Biometrics Using Media-Pipe. In: *Proc. 30th International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*. New York, NY: IEEE; 2022. P. 373–378. <http://dx.doi.org/10.1109/ICEE55646.2022.9827056>
13. Weijian Mai, Fengjie Wu, Ziqian Guo, Yuhan Xiang, Gensheng Liu, Xiaobin Chen. A Fall Detection Alert System Based on Lightweight Openpose and Spatial-Temporal Graph Convolution Network. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2035:012036. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2035/1/012036>
14. Szeliski R. Recognition. In book: *Computer Vision: Algorithms and Applications*. London: Springer; 2011. P. 575–640. https://doi.org/10.1007/978-1-84882-935-0_14
15. Kahl F, Hartley R. Multiple-View Geometry Under the L_∞ -Norm. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2008;30(9):1603–1617. <http://dx.doi.org/10.1109/TPAMI.2007.70824>
16. Luhmann T, Fraser C, Maas H-G. Sensor Modelling and Camera Calibration for Close-Range Photogrammetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2016;115:37–46. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.006>
17. Kudinov IA, Pavlov OV, Holopov IS. Implementation of an Algorithm for Determining the Spatial Coordinates and the Angular Orientation of an Object Based on Reference Marks Using Information from a Single Camera. *Computer Optics*. 2015;39(3):413–419. <https://doi.org/10.18287/0134-2452-2015-39-3-413-419>
18. Jen-Li Chung, Lee-Yeng Ong, Meng-Chew Leow. Comparative Analysis of Skeleton-Based Human Pose Estimation. *Future Internet*. 2022;14(12):380. <https://doi.org/10.3390/fi14120380>
19. Jia Chen, Dongli Wu, Peng Song, Fuqin Deng, Ying He Y, Shiyang Pang. Multi-View Triangulation: Systematic Comparison and an Improved Method. *IEEE Access*. 2020;8:21017–21027. <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2969082>
20. Obukhov A, Dedov D, Volkov A, Teselkin D. Modeling of Nonlinear Dynamic Processes of Human Movement in Virtual Reality Based on Digital Shadows. *Computation*. 2023;11(5):85. <https://doi.org/10.3390/computation11050085>

21. Abella J, Demircan E. A Multi-Body Simulation Framework for Live Motion Tracking and Analysis within the Unity Environment. In: *Proc. 16th International Conference on Ubiquitous Robots (UR)*. New York, NY: IEEE; 2019. P. 654–659. <http://dx.doi.org/10.1109/URAI.2019.8768659>
22. Zago M, Luzzago M, Marangoni T, De Cecco M, Tarabini M, Galli M. 3D Tracking of Human Motion Using Visual Skeletonization and Stereoscopic Vision. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2020;8:181. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00181>
23. Latorre J, Llorens R, Colomer C, Alcañiz M. Reliability and Comparison of Kinect-Based Methods for Estimating Spatiotemporal Gait Parameters of Healthy and Post-Stroke Individuals. *Journal of Biomechanics*. 2018;72:268–273. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2018.03.008>
24. Obuhov AD, Volkov AA, Vekhteva NA, Patutin KI, Nazarova AO, Dedov DL. The Method of Forming a Digital Shadow of the Human Movement Process Based on the Combination of Motion Capture Systems. *Informatics and Automation*. 2023;22(1):168–189. <https://doi.org/10.15622/ia.22.1.7>

Поступила в редакцию 18.05.2023

Поступила после рецензирования 13.06.2023

Принята к публикации 19.06.2023

Об авторах:

Артём Дмитриевич Обухов, доктор технических наук, доцент кафедры системы автоматизированной поддержки принятия решений Тамбовского государственного технического университета, (392036, РФ, г. Тамбов, ул. Ленинградская, 1), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [AuthorID](#), [ORCID](#), obuhov.art@gmail.com

Денис Леонидович Дедов, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Тамбовского государственного технического университета, (392000, РФ, г. Тамбов, ул. Советская, 116), [ScopusID](#), [AuthorID](#), [ORCID](#), hammer68@mail.ru

Екатерина Олеговна Суркова, студентка 4 курса кафедры системы автоматизированной поддержки принятия решений Тамбовского государственного технического университета, (392036, РФ, г. Тамбов, ул. Ленинградская, 1), [ScopusID](#), [AuthorID](#), [ORCID](#), esur2506@yandex.ru

Ирина Львовна Коробова, кандидат технических наук, заведующая кафедрой системы автоматизированной поддержки принятия решений Тамбовского государственного технического университета, (392036, РФ, г. Тамбов, ул. Ленинградская, 1), [ScopusID](#), [AuthorID](#), [ORCID](#), ira.sapr.tstu@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

А.Д. Обухов — формирование основной концепции, научное руководство, формулирование цели и задач исследования, подготовка текста, формирование выводов.

Д.Л. Дедов — организация экспериментальных исследований, подготовка текста.

Е.О. Суркова — проведение экспериментальных исследований, разработка программного обеспечения.

И.Л. Коробова — анализ результатов исследования, доработка текста.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

Received 18.05.2023

Revised 13.06.2023

Accepted 19.06.2023

About the Authors:

Artem D. Obukhov, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Automated Systems for Decision-Making Support, Tambov State Technical University (1, Leningradskaya St., Tambov, 392036, RF), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [AuthorID](#), [ORCID](#), obuhov.art@gmail.com

Denis L. Dedov, Cand.Sci. (Eng.), Senior Researcher, Tambov State Technical University (116, Sovetskaya St., Tambov, 392000, RF), [ScopusID](#), [AuthorID](#), [ORCID](#), hammer68@mail.ru

Ekaterina O. Surkova, 4th year student of the Department of Automated Systems for Decision-Making Support, Tambov State Technical University (1, Leningradskaya St., Tambov, 392036, RF), [ScopusID](#), [AuthorID](#), [ORCID](#), esur2506@yandex.ru

Irina L. Korobova, Cand.Sci. (Eng.), Head of the Department of Automated Systems for Decision-Making Support, Tambov State Technical University (1, Leningradsкая St., Tambov, 392036, RF), [ScopusID](#), [AuthorID](#), [ORCID](#), ira.sapr.tstu@mail.ru

Claimed contributorship:

AD Obukhov: basic concept formulation, academic advising, formulation of the research objective and tasks, text preparation, formulation of conclusions.

DL Dedov: organization of experimental research, text preparation.

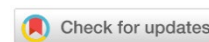
EO Surkova: experimental research, software development.

IL Korobova: analysis of research results, revision of the text.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of the manuscript.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT



УДК 004.272.22

Научная статья

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-329-339>

Разработка модели параллельно-конвейерного вычислительного процесса для решения системы сеточных уравнений

В.Н. Литвинов¹ , Н.Б. Руденко² , Н.Н. Грачева² ¹ Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация,² Азово-Черноморский инженерный институт, ДГАУ, г. Зерноград, Российская Федерация LitvinovVN@rambler.ru

Аннотация

Введение. Экологические проблемы, возникающие на мелководных водоёмах и вызываемые как природными, так и техногенными факторами, ежегодно наносят существенный ущерб аквасистемам и прибрежным территориям. Своевременно определить эти проблемы, а также пути их устранения возможно с использованием современных вычислительных систем. Но проведённые ранее исследования показали, что ресурсов вычислительных систем, использующих только центральный процессор, недостаточно для решения больших научных задач, в частности, по прогнозированию крупных экологических происшествий, оценке нанесенного ими ущерба и определению возможностей их устранения. Для этих целей предлагается использовать модели вычислительной системы и декомпозиции расчётной области для разработки алгоритма параллельно-конвейерных вычислений. Целью данной работы является создание модели параллельно-конвейерного вычислительного процесса для решения системы сеточных уравнений модифицированным попеременно-треугольным итерационным методом с использованием декомпозиции трёхмерной равномерной расчётной сетки, учитывающей технические характеристики используемого для расчетов оборудования.

Материалы и методы. Разработаны математические модели вычислительной системы и расчётной сетки. Модель декомпозиции расчётной области выполнена с учётом характеристик гетерогенной системы. Предложен параллельно-конвейерный метод решения системы сеточных уравнений модифицированным попеременно-треугольным итерационным методом.

Результаты исследования. На языке CUDA C написана программа, реализующая параллельно-конвейерный метод решения системы сеточных уравнений модифицированным попеременно-треугольным итерационным методом. Проведённые эксперименты показали, что с увеличением числа потоков время вычислений уменьшается и при декомпозиции расчётной сетки рациональным является разбиение на фрагменты по координате z на величину, не превышающую 10. Результаты экспериментов подтвердили эффективность разработанного параллельно-конвейерного метода.

Обсуждение и заключение. По итогам проведенных исследований разработана модель параллельно-конвейерного вычислительного процесса на примере одного из самых трудоёмких этапов решения системы сеточных уравнений модифицированным попеременно-треугольным итерационным методом. Её построение основано на моделях декомпозиции трёхмерной равномерной расчётной сетки, учитывающей технические характеристики используемого в расчетах оборудования. Применение программы позволит ускорить процесс расчёта и равномерно по времени загрузить программные потоки. Проведенные численные эксперименты подтвердили математическую модель декомпозиции расчётной области.

Ключевые слова: параллельный алгоритм, вычислительный процесс, сеточные уравнения

Благодарности: авторы выражают благодарность редакционной коллегии журнала и рецензенту за профессиональный анализ и рекомендации для корректировки статьи.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 21–71–20050).

Для цитирования. Литвинов В.Н., Руденко Н.Б., Грачева Н.Н. Разработка модели параллельно-конвейерного вычислительного процесса для решения системы сеточных уравнений. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(3):329–339. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-329-339>

Original article

Model of a Parallel-Pipeline Computational Process for Solving a System of Grid Equations

Vladimir N. Litvinov¹  , Nelli B. Rudenko² , Natalya N. Gracheva² 

¹ Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

² Azov-Black Sea Engineering Institute, Don State Agrarian University, Zernograd, Russian Federation

 LitvinovVN@rambler.ru

Abstract

Introduction. Environmental problems arising in shallow waters and caused by both natural and man-made factors annually do significant damage to aquatic systems and coastal territories. It is possible to identify these problems in a timely manner, as well as ways to eliminate them, using modern computing systems. But earlier studies have shown that the resources of computing systems using only a central processor are not enough to solve large scientific problems, in particular, to predict major environmental accidents, assess the damage caused by them, and determine the possibilities of their elimination. For these purposes, it is proposed to use models of the computing system and decomposition of the computational domain to develop an algorithm for parallel-pipeline calculations. The research objective was to create a model of a parallel-conveyor computational process for solving a system of grid equations by a modified alternating-triangular iterative method using the decomposition of a three-dimensional uniform computational grid that takes into account technical characteristics of the equipment used for calculations.

Materials and Methods. Mathematical models of the computer system and computational grid were developed. The decomposition model of the computational domain was made taking into account the characteristics of a heterogeneous system. A parallel-pipeline method for solving a system of grid equations by a modified alternating-triangular iterative method was proposed.

Results. A program was written in the CUDA C language that implemented a parallel-pipeline method for solving a system of grid equations by a modified alternating-triangular iterative method. The experiments performed showed that with an increase in the number of threads, the computation time decreased, and when decomposing the computational grid, it was rational to split into fragments along coordinate z by a value not exceeding 10. The results of the experiments proved the efficiency of the developed parallel-pipeline method.

Discussion and Conclusion. As a result of the research, a model of a parallel-pipeline computing process was developed using the example of one of the most time-consuming stages of solving a system of grid equations by a modified alternating-triangular iterative method. Its construction was based on decomposition models of a three-dimensional uniform computational grid, which took into account the technical characteristics of the equipment used in the calculations. This program can provide you for the acceleration of the calculation process and even loading of program flows in time. The conducted numerical experiments validated the mathematical model of decomposition of the computational domain.

Keywords: parallel algorithm, computational process, grid equations

Acknowledgements: the authors would like to thank the editorial board of the journal and the reviewer for their professional analysis and recommendations for correcting the article.

Funding information. The research was done with the support of the Russian Science Foundation (project No. 21–71–20050).

For citation. Litvinov VN, Rudenko NB, Gracheva NN. Model of a Parallel-Pipeline Computational Process for Solving a System of Grid Equations. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(3):329–339. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-329-339>.

Введение. В последнее время на территории Ростовской области отмечается возникновение ряда серьезных экологических проблем. К ним, в частности, относится эвтрофикация вод Азовского моря и Цимлянского водохранилища, которая вызывает рост вредоносных и токсичных видов популяций фитопланктона [1]. Инженерные работы в акваториях рек и морей приводят к загрязнению прилегающих территорий, изменению популяционной структуры биоты и ухудшению условий воспроизводства ценных и промысловых рыб. Изменение климата на юге России привело к увеличению количества случаев затопления некоторых территорий в районе Таганрогского залива и поймы реки Дон, вызванных сгонно-нагонными явлениями. В последнее

десятилетие в летний период несколько раз наблюдалось практически полное осушение русла реки Дон, что приводило к полной остановке судоходства. Чтобы спрогнозировать возникновение и развитие подобных случаев, спланировать пути устранения их последствий, оценить нанесенный ими ущерб, требуются современные программные комплексы, построенные с использованием высокоточных математических моделей, численных методов, алгоритмов и структур данных [2].

В основе математических моделей, используемых при прогнозировании природных и техногенных катастроф, лежат системы дифференциальных уравнений в частных производных, например уравнения Пуассона, Навье-Стокса, диффузии-конвекции-реакции, теплопроводности. Численное решение таких систем приводит к необходимости оперативного хранения больших объёмов данных (в массивах различной структуры) и решения систем сеточных уравнений высокой размерности, превышающих 10^9 . Объём оперативной памяти, требуемой для хранения массивов данных при численном решении только одного уравнения Пуассона для трёхмерной области размерностью $10^3 \times 10^3 \times 10^3$ попеременно-треугольным итерационным методом, составляет более 64 Гб. В случае численного решения комбинированных задач требуются сотни гигабайт оперативной памяти, которые могут быть доступны лишь при использовании суперкомпьютерных систем.

Проведенное ранее исследование показало, что ресурсов вычислительной системы, использующей только CPU, недостаточно для решения подобных научных задач [3]. Увеличение мощности и видеопамати GPU позволило использовать для расчетов ресурсы видеоадаптеров [4]. Эффективность использования GPU зависит от применения параллельных алгоритмов для решения вычислительно-трудоемких задач водной экологии [5–7]. Частично решить проблемы нехватки памяти и вычислительной мощности на рабочих станциях можно установкой дополнительных видеоадаптеров в слоты PCI-E X16 непосредственно и в слоты PCI-E X1 с помощью переходников PCI-E X1–PCI-E X16. Таким образом, количество видеоадаптеров, установленных на одной рабочей станции, можно довести до 12 [8–11].

Всё большую популярность в научном сообществе приобретают гетерогенные вычислительные системы, которые позволяют использовать ресурсы CPU и GPU совместно. Применение таких систем дает возможность уменьшить время расчета научных задач [12–14]. Однако эффективное использование гетерогенной вычислительной среды предполагает модернизацию математических моделей, алгоритмов и программ, их численно реализующих. Гетерогенная система позволяет организовать процесс вычислений в параллельном режиме. При этом должны быть учтены принципиальные различия в построении программных систем, использующих совместно CPU и GPU.

Материалы и методы. Опишем предложенные математические модели вычислительной системы, расчетной сетки, а также метод декомпозиции расчетной области.

Пусть D — множество технических характеристик вычислительной системы, тогда:

$$D = D^1 \cup D^2 \cup D^3, \quad (1)$$

где D^1 — подмножество характеристик центральных процессоров (CPU) вычислительной системы; D^2 — подмножество характеристик видеоадаптеров (GPU) вычислительной системы; D^3 — подмножество характеристик оперативной памяти.

$$D^1 = \langle d^{1,1}, d^{1,2}, d^{1,3}, d^{1,4} \rangle, \quad (2)$$

где $d^{1,1}$ — суммарное число ядер CPU; $d^{1,2}$ — количество потоков, одновременно обрабатываемых одним ядром процессора CPU; $d^{1,3}$ — тактовая частота, МГц; $d^{1,4}$ — частота шины центрального процессора, МГц.

$$D^2 = \bigcup_{k_{GPU} \in K_{GPU}} D^2_{k_{GPU}} = \{d^2 \mid \exists k_{GPU} \in K_{GPU}, d^2 \in D^2_{k_{GPU}}\}, \quad (3)$$

где $K_{GPU} = \{1, \dots, N_{GPU}\}$ — множество индексов видеоадаптеров; N_{GPU} — количество видеоадаптеров вычислительной системы; k_{GPU} — индекс видеоадаптера.

Каждый видеоадаптер представим в виде кортежа:

$$D^2_{k_{GPU}} = \langle d^{2,1}_{k_{GPU}}, d^{2,2}_{k_{GPU}} \rangle, \quad (4)$$

где $d^{2,1}_{k_{GPU}}$ — объём видеопамати видеоадаптера с индексом k_{GPU} , Гб; $d^{2,2}_{k_{GPU}}$ — количество потоковых мультипроцессоров.

$$D^3 = \langle d^{3,1}, d^{3,2} \rangle, \quad (5)$$

где $d^{3,1}$ — суммарный объём оперативной памяти, Гб; $d^{3,2}$ — тактовая частота оперативной памяти, МГц.

Пусть S — множество программных потоков, задействованных в вычислительном процессе, тогда:

$$\begin{aligned} S &= S^1 \cup S^2, \\ S^1 &= \{1, \dots, N_{S^1}\}, \\ S^2 &= \bigcup_{k_{GPU} \in K_{GPU}} S^2_{k_{GPU}}, \quad S^2_{k_{GPU}} = \{1, \dots, N_{S^2_{k_{GPU}}}\}, \end{aligned} \quad (6)$$

где S^1 — подмножество программных потоков, реализующих процесс расчета на CPU; S^2 — подмножество потоковых блоков CUDA, реализующих процесс расчета на потоковых мультипроцессорах GPU; N_{S^1} — количество задействованных программных потоков CPU; $S^2_{k_{GPU}}$ — подмножество потоковых блоков CUDA, реализующих процесс расчета на потоковых мультипроцессорах GPU с индексом k_{GPU} ; $K_{GPU} = \{1, \dots, N_{GPU}\}$ — множество индексов GPU; N_{GPU} — количество GPU в вычислительной системе; $N_{S^2_{k_{GPU}}}$ — количество задействованных потоковых блоков CUDA, реализующих процесс расчета на потоковых мультипроцессорах GPU с индексом k_{GPU} .

Пусть E — множество идентификаторов программных потоков. Тогда для идентификации программных потоков в вычислительной системе каждому элементу множества программных потоков S поставим в соответствие кортеж e из двух элементов:

$$\forall s \in S \quad \exists e \in E: e = \langle n_d, n_t \rangle, \quad (7)$$

где n_d — индекс вычислительного устройства в вычислительной системе; n_t — индекс программного потока CPU или потокового блока GPU.

$$n_d = \begin{cases} 0, & s \in S^1 \\ K_{GPU}, & s \in S^2 \end{cases}, \quad (8)$$

$$n_t = \begin{cases} K_{S^1}, & s \in S^1 \\ K_{S^2_{k_{GPU}}}, & s \in S^2_{k_{GPU}} \end{cases}. \quad (9)$$

Возьмём расчётную область со следующими параметрами: l_x — характерный размер по оси Ox ; l_y — по оси Oy ; l_z — по оси Oz . Сопоставим с указанной областью равномерную расчётную сетку следующего вида:

$$\begin{aligned} W &= \{x_i = ih_x, y_j = jh_y, z_k = kh_z; \\ i &= 0, n_x - 1, j = 0, n_y - 1, k = 0, n_z - 1; \\ (n_x - 1)h_x &= l_x, (n_y - 1)h_y = l_y, (n_z - 1)h_z = l_z\}, \end{aligned} \quad (10)$$

где h_x, h_y, h_z — шаги расчётной сетки по соответствующим пространственным направлениям; n_x, n_y, n_z — количество узлов расчётной сетки по соответствующим пространственным направлениям.

Тогда множество узлов расчётной сетки представим в виде:

$$\begin{aligned} G &= \{g_{i,j,k}, i = 0, n_x - 1, j = 0, n_y - 1, k = 0, n_z - 1\}, \\ g_{i,j,k} &= \langle x_i, y_j, z_k \rangle, \end{aligned} \quad (11)$$

где $g_{i,j,k}$ — узел расчётной сетки.

Число узлов расчётной сетки N_G вычисляется по формуле:

$$N_G = n_x \cdot n_y \cdot n_z. \quad (12)$$

Под подразделом расчётной сетки $G^{k_1} \subset G$ (далее — подраздел) будем понимать подмножество узлов расчётной сетки G .

$$G = \bigcup_{k_1 \in K_{k_1}} G^{k_1} = \{g^{k_1}_{i,j,k} | \exists k_1 \in K_{k_1}, g^{k_1}_{i,j,k} \in G^{k_1}\}, \quad \bigcap_{k_1 \in K_{k_1}} G^{k_1} = \emptyset, \quad (13)$$

где $K_{k_1} = \{1, \dots, N_{k_1}\}$ — множество индексов подразделов G^{k_1} расчётной сетки G ; N_{k_1} — количество подразделов G^{k_1} ; $K_{k_1}, N_{k_1} \subset N$; N — множество натуральных чисел; k_1 — индекс подраздела G^{k_1} .

Так как $G^{k_1} \subset G$, тогда:

$$G^{k_1} = \{g^{k_1}_{i,j,k}, i = 0, n_x - 1, \tilde{j} = 0, n_y^{k_1} - 1, k = 0, n_z - 1\}, \quad (14)$$

где $g^{k_1}_{i,j,k}$ — узел подраздела k_1 ; знак $\sim$ обозначает принадлежность к подразделу; $\tilde{j}$ — индекс узла подраздела k_1 по координате y ; $n_y^{k_1}$ — количество узлов в подразделе k_1 по координате y .

$$\begin{aligned} g^{k_1}_{i,j,k} &= \langle x_i, y_j, z_k \rangle, \\ x_i &= ih_x, y_j = \left(\sum_{\tilde{h}=1}^{k_1-1} n_y^{\tilde{h}} + \tilde{j} \right) \cdot h_y, z_k = kh_z, \end{aligned} \quad (15)$$

где $n_y^{b_1}$ — количество узлов по координате y b_1 -го раздела.

Под блоком расчётной сетки G^{k_1, k_2} (далее — блок) будем понимать подмножество узлов расчётной сетки подраздела G^{k_1} .

$$G^{k_1} = \bigcup_{k_2 \in K_{k_1, k_2}} G^{k_1, k_2} = \{g^{k_1, k_2} \mid \exists k_2 \in K_{k_1, k_2}, g^{k_1, k_2} \in G^{k_1, k_2}\}, \quad \bigcap_{k_2 \in K_{k_1, k_2}} G^{k_1, k_2} = \emptyset, \quad (16)$$

где $K_{k_1, k_2} = \{1, \dots, N_{k_1, k_2}\}$ — множество индексов блоков G^{k_1, k_2} подраздела G^{k_1} ; N_{k_1, k_2} — количество блоков G^{k_1, k_2} ;

$K_{k_1, k_2}, N_{k_1, k_2} \subset N$; k_2 — индекс блока G^{k_1, k_2} подраздела G^{k_1} .

Так как $G^{k_1, k_2} \subset G^{k_1}$, тогда:

$$G^{k_1, k_2} = \{g_{i, j, k}^{k_1, k_2}, i = \overline{0, n_x - 1}, j = \overline{0, n_y^{k_1, k_2} - 1}, k = \overline{0, n_z - 1}\}, \quad (17)$$

где $g_{i, j, k}^{k_1, k_2}$ — узел блока k_1, k_2 ; знак $\wedge$ обозначает принадлежность к блоку; j — индекс узла блока k_1, k_2 по координате y ; $n_y^{k_1, k_2}$ — количество узлов в блоке k_1, k_2 по координате y .

$$g_{i, j, k}^{k_1, k_2} = \langle x_i, y_j, z_k \rangle, \quad (18)$$

$$x_i = ih_x, \quad y_j = \left(\sum_{b_1=1}^{k_1-1} \sum_{b_2=1}^{N_{k_1, b_2}} n_y^{b_1, b_2} + j \right) \cdot h_y, \quad z_k = kh_z,$$

где $n_y^{b_1, b_2}$ — количество узлов блока b_1, b_2 .

Под фрагментом расчётной сетки G^{k_1, k_2, k_3} (далее — фрагмент) будем понимать подмножество узлов расчётной сетки блока G^{k_1, k_2} подраздела G^{k_1} .

$$G^{k_1, k_2} = \bigcup_{k_3 \in K_{k_1, k_2, k_3}} G^{k_1, k_2, k_3} = \{g^{k_1, k_2, k_3} \mid \exists k_3 \in K_{k_1, k_2, k_3}, g^{k_1, k_2, k_3} \in G^{k_1, k_2, k_3}\}, \quad (19)$$

$$\bigcap_{k_3 \in K_{k_1, k_2, k_3}} G^{k_1, k_2, k_3} = \emptyset,$$

где $K_{k_1, k_2, k_3} = \{1, \dots, N_{k_1, k_2, k_3}\}$ — множество индексов фрагментов G^{k_1, k_2, k_3} блока G^{k_1, k_2} подраздела G^{k_1} ; N_{k_1, k_2, k_3} — количество фрагментов G^{k_1, k_2, k_3} ; $K_{k_1, k_2, k_3}, N_{k_1, k_2, k_3} \subset N$; k_3 — индекс фрагмента G^{k_1, k_2, k_3} блока G^{k_1, k_2} подраздела G^{k_1} .

Каждому индексу k_3 фрагмента G^{k_1, k_2, k_3} поставим в соответствие кортеж индексов $\langle k_4, k_5 \rangle$, предназначенный для хранения координат фрагмента в плоскости xOz , где k_4 — индекс фрагмента по координате x ; k_5 — индекс фрагмента по координате z .

$$k_3 = k_4 + K_{k_4} \cdot k_5, \quad (20)$$

где k_4 — индекс фрагмента по координате x ; k_5 — индекс фрагмента по координате z .

Количество фрагментов G^{k_1, k_2, k_3} блока G^{k_1, k_2} вычислим по формуле:

$$K_{k_3} = K_{k_4} \cdot K_{k_5}, \quad (21)$$

где K_{k_4} — количество фрагментов по оси Ox ; K_{k_5} — количество фрагментов по координате z .

Так как $G^{k_1, k_2, k_3} \subset G^{k_1, k_2}$, тогда:

$$G^{k_1, k_2, k_3} = \{\tilde{g}_{\tilde{i}, \tilde{j}, \tilde{k}}, \tilde{i} = \overline{0, \tilde{n}_x - 1}, \tilde{j} = \overline{0, \tilde{n}_y - 1}, \tilde{k} = \overline{0, \tilde{n}_z - 1}\}, \quad (22)$$

где $\tilde{g}_{\tilde{i}, \tilde{j}, \tilde{k}}$ — узел фрагмента; знак $\sim$ обозначает принадлежность к фрагменту; $\tilde{i}, \tilde{k}$ — индексы узла фрагмента по координатам x, z ; $\tilde{n}_x, \tilde{n}_z$ — количество узлов расчётной сетки в фрагменте по координатам x, z ; $\tilde{l}_x, \tilde{l}_z$ — размеры фрагмента по координатам x, z .

$$\tilde{g}_{\tilde{i}, \tilde{j}, \tilde{k}} = \langle x_{\tilde{i}}, y_{\tilde{j}}, z_{\tilde{k}} \rangle, \quad (23)$$

$$x_{\tilde{i}} = \left(\sum_{b=1}^{\tilde{k}_4-1} \tilde{n}_b + \tilde{i} \right) h_x, \quad y_{\tilde{j}} = \tilde{j} h_y, \quad z_{\tilde{k}} = \left(\sum_{b=1}^{\tilde{k}_5-1} \tilde{n}_b + \tilde{k} \right) h_z,$$

где $\tilde{n}_b$ — количество узлов b -го фрагмента.

Введем множество сопоставлений блоков расчётной сетки программным потокам M^1

$$M^1 = \bigcup_{k_1 \in K_{k_1}} \left(\bigcup_{k_2 \in K_{k_1, k_2}} M_{k_1, k_2}^1 \right), \quad (24)$$

где M_{k_1, k_2}^1 — элемент множества M^1 .

Пусть M_{k_1, k_2}^1 — сопоставление блока G_{k_1, k_2} программному потоку s_{k_1, k_2} , тогда:

$$M_{k_1, k_2}^1 = \langle G_{k_1, k_2}, s_{k_1, k_2} \rangle, \quad (25)$$

где $s_{k_1, k_2} \in S$ — программный поток, вычисляющий блок G_{k_1, k_2} .

В процессе решения задач гидродинамики на трехмерных расчетных сетках большой размерности необходимы высокопроизводительные вычислительные системы и огромные объемы памяти для хранения данных. Ресурсов одного вычислительного устройства недостаточно для вычислений и хранения трехмерной расчетной сетки со всеми ее данными. Для решения этой проблемы предложены различные способы декомпозиции расчетных сеток с последующим применением параллельных алгоритмов расчета в гетерогенных вычислительных средах [15].

Для декомпозиции расчётной сетки необходимо учитывать производительность вычислительных устройств, участвующих в расчётах. Под производительностью будем понимать количество узлов расчётной сетки, рассчитываемых с помощью заданного алгоритма в единицу времени.

Предположим, что все вычислительные устройства используются для расчётов. Тогда суммарная производительность вычислительной системы P_Σ вычисляется по формуле:

$$P_\Sigma = P_{CPU} \cdot N_{s^1} + \sum_{b=1}^{N_{GPU}} P_{GPU}^b \cdot N_{s^2}^b, \quad (26)$$

где P_{CPU} — производительность одного потока CPU; N_{s^1} — число программных потоков, реализующих процесс расчета на CPU; P_{GPU}^b — производительность GPU с индексом b на одном потоковом мультимикропроцессоре; $N_{s^2}^b$ — количество потоковых блоков CUDA, реализующих процесс расчета на потоковых мультимикропроцессорах GPU.

Тогда рассчитать количество узлов расчётной сетки n_y^b в подразделе по координате y для каждого GPU с индексом b можно по формуле:

$$n_y^b = \left\lfloor \frac{P_{GPU}^b}{P_\Sigma} \right\rfloor \cdot n_y. \quad (27)$$

В процессе вычисления по формуле (27) получим остаток — некоторое количество узлов расчётной сетки. Эти узлы будут располагаться в оперативной памяти. Количество оставшихся узлов n_y^b по координате y рассчитывается по формуле:

$$n_{yL}^b = n_y - \sum_{b=1}^{N_{GPU}} n_y^b. \quad (28)$$

Для вычисления количества узлов по координате y в блоках расчётной сетки, обрабатываемых потоковыми мультимикропроцессорами GPU, воспользуемся формулами:

$$n_{yGT}^b = \left\lfloor \frac{n_y^b}{N_{s^2}^b - 1} \right\rfloor, \quad b = \overline{1, N_{s^2}^b - 1}, \quad (29)$$

$$n_{yGTL}^b = n_y^b - \sum_{b=1}^{N_{s^2}^b - 1} n_{yGT}^b,$$

где n_{yGT}^b — количество узлов по координате y в блоках расчётной сетки, обрабатываемых потоковыми мультимикропроцессорами GPU с индексом b , кроме последнего блока; n_{yGTL}^b — количество узлов по координате y в последнем блоке расчётной сетки, обрабатываемом потоковыми мультимикропроцессорами GPU с индексом b .

Для вычисления количества узлов расчётной сетки по координате y в блоках, обрабатываемых программными потоками, реализующими процесс расчета на CPU, воспользуемся формулами:

$$n_{yCT} = \left\lfloor \frac{n_y^{CPU}}{N_{s^1} - 1} \right\rfloor, \quad (30)$$

$$n_{yCTL} = n_y^{CPU} - n_{yCT} \cdot (N_{s^1} - 1),$$

где n_{yCT} — количество узлов расчётной сетки по координате y , обрабатываемых программными потоками CPU, кроме последнего потока; n_{yCTL} — количество узлов расчётной сетки по координате y , обрабатываемых программными потоками CPU, в последнем потоке.

Рассчитаем количество фрагментов расчётной сетки по координате y :

$$N_y^f = N_{s^1} + \sum_{b=1}^{N_{GPU}} N_{s^2}^b. \quad (31)$$

Пусть задано количество фрагментов N_x^f и N_z^f по координатам x и z соответственно. Тогда количество узлов расчётной сетки по координате x вычисляется по формулам:

$$\begin{aligned} n_x^f &= \left\lfloor \frac{n_x}{N_x^f - 1} \right\rfloor, \\ n_x^{fL} &= n_x - n_x^f \cdot (N_x^f - 1), \end{aligned} \quad (32)$$

где n_x^f — количество узлов расчётной сетки по координате x во всех фрагментах, кроме последнего; n_x^{fL} — количество узлов расчётной сетки по координате x в последнем фрагменте.

Аналогично вычисляется количество узлов расчётной сетки по координате z :

$$\begin{aligned} n_z^f &= \left\lfloor \frac{n_z}{N_z^f - 1} \right\rfloor, \\ n_z^{fL} &= n_z - n_z^f \cdot (N_z^f - 1), \end{aligned} \quad (33)$$

где n_z^f — количество узлов расчётной сетки по координате z во всех фрагментах, кроме последнего; n_z^{fL} — количество узлов расчётной сетки по координате z в последнем фрагменте.

Опишем модель параллельно-конвейерного метода. Пусть на M^1 необходимо организовать параллельный процесс вычислений некоторой функции F , причем вычисления в каждом фрагменте G^{k_1, k_2, k_3} зависят от значений в соседних фрагментах, каждый из которых имеет хотя бы один из индексов по координатам x , y и z на единицу меньший, чем у текущего (рис. 1).

Для организации параллельно-конвейерного метода введём множество кортежей A , задающих соответствия a между идентификаторами программных потоков e , обрабатывающих фрагменты G^{k_1, k_2, k_3} , номерам шагов параллельно-конвейерного метода r :

$$\forall e \in E \exists a \in A: a = \langle e, G^{k_1, k_2, k_3}, r \rangle, \quad (34)$$

где $r = \overline{1, N_r}$ — номер шага параллельно-конвейерного метода; N_r — число шагов параллельно-конвейерного метода, вычисляемое по формуле:

$$N_r = N_x^f N_z^f + N_y^f - 1. \quad (35)$$

Полная загрузка всех вычислителей в предлагаемом параллельно-конвейерном методе начинается с шага $r_{100START} = N_y^f$ и заканчивается на шаге $r_{100STOP} = N_x^f N_z^f$. При этом общее количество шагов с полной загрузкой вычислителей N_{rPAR} составит:

$$N_{rPAR} = r_{100STOP} - r_{100START} + 1 = N_x^f N_z^f - N_y^f + 1. \quad (36)$$

Время вычислений некоторой функции F параллельно-конвейерным методом запишем в виде:

$$T_{M^1} = \sum_{r=1}^{N_r} \max(T_a), \quad (37)$$

где T_a — вектор значений затрат времени на обработку фрагментов в параллельном режиме.

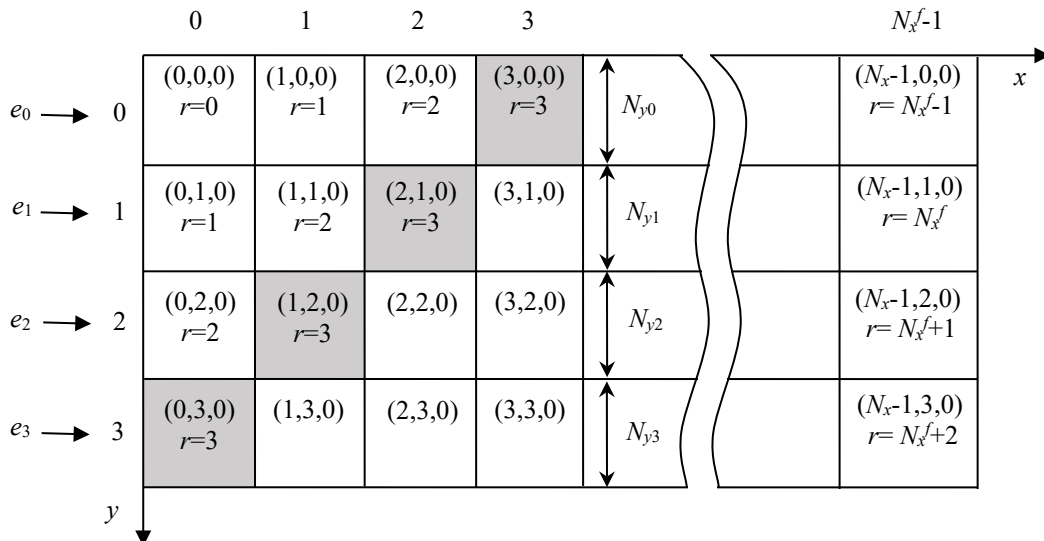


Рис. 1. Параллельно-конвейерный вычислительный процесс

Результаты исследования. Вычислительные эксперименты проводились на высокопроизводительной вычислительной системе К-60 Института прикладной математики им. М. В. Келдыша Российской академии наук. Использовалась секция с GPU, каждый узел которой оснащён двумя процессорами Intel Xeon Gold 6142 v4, четырьмя видеоадаптерами Nvidia Volta GV100GL и 768 Гб оперативной памяти.

Вычислительный эксперимент состоял из двух этапов — подготовительного и основного. На подготовительном этапе проверялась корректность декомпозиции расчетной области на подразделы, блоки и фрагменты путем поэлементного сравнения значений в узлах исходной сетки и в фрагментах, полученных в результате декомпозиции. Затем проверялась работа алгоритма управления потоками, в процессе которого фиксировалось время, затрачиваемое на расчет 1, 8, 16 и 32 фрагментов расчетной сетки размерностью 50 узлов по пространственным координатам x , y и z тем же количеством потоков CPU N_{s1} итерационным попеременно-треугольным методом в параллельном режиме. Выполнялось 10 повторов с вычислением среднего арифметического T_a и стандартного отклонения σ . По полученным данным вычислялось время $T_a^1 = T_a / N_{s1}$, затрачиваемое каждым потоком на обработку одного фрагмента расчетной сетки и ускорение $E = T_a^1(N_{s1}) / T_a^1(1)$, равное отношению времени $T_a^1(N_{s1})$ обработки одного фрагмента N_{s1} потоками к соответствующему времени обработки одним потоком $T_a^1(1)$. Экспериментальные данные приведены в таблице 1. Проведённый эксперимент показал, что стандартное отклонение имеет наименьшее значение в случае использования 32 параллельных потоков CPU и составляет 0,026 мс, то есть использование 32 параллельных потоков CPU при расчёте 32 фрагментов расчётной сетки даёт более равномерную по времени загрузку программных потоков, что в целом повышает эффективность работы вычислительного узла. При этом среднее значение расчета одного фрагмента составило 4,14 мс. Зависимость ускорения E от числа потоков получилась линейная $E = 0,603 + 0,804N_{s1}$, с коэффициентом детерминации, равным 0,99. Получили, что с увеличением числа потоков ускорение разработанного алгоритма возрастает. Это свидетельствует об эффективном использовании подсистемы при работе с памятью.

Таблица 1

Результаты подготовительного этапа вычислительного эксперимента

N_{s1}	$\max(T_a)$, мс	σ , мс	T_a , мс	E
1	3,38	0,141	3,38	1,00
8	3,66	0,042	0,46	7,39
16	3,94	0,028	0,25	13,73
32	4,14	0,026	0,13	26,13

На основном этапе вычислительного эксперимента трёхмерная расчетная область, имеющая размеры 1600, 1600, 200 по пространственным координатам x , y и z соответственно, разбивалась на 32 фрагмента по 50 узлов по каждой из координат x и y . Разбиение на фрагменты по координате z приведено в таблице 2. Для каждого варианта декомпозиции с десятикратной повторностью замерялось время обработки всей расчетной сетки предлагаемым параллельно-конвейерным методом и вычислялось его среднее значение T_{pm} . Ускорение E_{pm} вычислялось как отношение T_{pm} ко времени T_{sm} расчета последовательной версией алгоритма, равному 6963 мс. Получено уравнение регрессии $E_{pm} = 7,35 + 1,97 \ln(N_z^f)$ с коэффициентом детерминации, равным 0,94. Анализ результатов основного этапа вычислительного эксперимента показал существенное замедление роста E_{pm} при $N_z^f > 10$. Поэтому делаем вывод о том, что оптимальным является разбиение на фрагменты по координате z на величину, не превышающую 10.

Таблица 2

Результаты основного этапа вычислительного эксперимента

N_z^f	n_z^f	T_{pm} , мс	E_{pm}
1	200	1033,20	6,74
2	100	779,00	8,94
4	50	651,90	10,68
8	25	588,35	11,84
20	10	550,22	12,66

Обсуждение и заключение. В результате проведённых исследований разработана модель параллельно-конвейерного вычислительного процесса на примере одного из самых трудоёмких этапов решения системы сеточных уравнений модифицированным попеременно-треугольным итерационным методом. Её построение основано на моделях декомпозиции трёхмерной равномерной расчётной сетки, учитывающей технические характеристики используемого в расчетах оборудования.

Результаты, полученные в ходе вычислительных экспериментов, подтверждают эффективность разработанного метода. Подтверждена и корректность декомпозиции расчетной области на подразделы, блоки и фрагменты. Проверена работа алгоритма управления потоками, при этом выявлено, что стандартное отклонение имеет наименьшее значение в случае использования 32 параллельных потоков CPU и составляет 0,026 мс, то есть использование 32 параллельных потоков CPU при расчёте 32 фрагментов расчётной сетки даёт более равномерную по времени загруженность программных потоков. При этом среднее значение расчета одного фрагмента составило 4,14 мс.

Результаты обработки замеров времени расчетов предлагаемым параллельно-конвейерным методом показали существенное замедление роста ускорения при разбиении на фрагменты по координате z при $N_z^f > 10$. Получили, что оптимальным является разбиение на фрагменты по координате z на величину, не превышающую 10.

Список литературы

1. Shiganova T.A., Alekseenko E., Kazmin A.S. Predicting Range Expansion of Invasive Ctenophore *Mnemiopsis leidyi* A. Agassiz 1865 under Current Environmental Conditions and Future Climate Change Scenarios. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2019;227:106347. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106347>
2. Sukhinov A.I., Chistyakov A.E., Nikitina A.V., Filina A.A., Lyashchenko T.V., Litvinov V.N. The Use of Supercomputer Technologies for Predictive Modeling of Pollutant Transport in Boundary Layers of the Atmosphere and Water Bodies. In book: L. Sokolinsky, M. Zymbler (eds). *Parallel Computational Technologies*. Cham: Springer; 2019. P. 225–241. https://doi.org/10.1007/978-3-030-28163-2_16
3. Rodriguez D., Gomez D., Alvarez D., Rivera S. A Review of Parallel Heterogeneous Computing Algorithms in Power Systems. *Algorithms*. 2021;14(10):275. <https://doi.org/10.3390/a14100275>
4. Osman A.M. Abdelrahman. GPU Computing Taxonomy. In ebook: Wen-Jyi Hwang (ed). *Recent Progress in Parallel and Distributed Computing*. London: InTech; 2017. <https://doi.org/10.5772/intechopen.68179>
5. Parker A. GPU Computing: The Future of Computing. In: *Proceedings of the West Virginia Academy of Science*. Morgantown, WV: WVAS; 2018. Vol. 90 (1). <https://doi.org/10.55632/pwvas.v90i1.393>
6. Nakano Koji. Theoretical Parallel Computing Models for GPU Computing. In book: Koç Ç. (ed). *Open Problems in Mathematics and Computational Science*. Cham: Springer; 2014. P. 341–359. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10683-0_14
7. Bhargavi K., Sathish Babu B. GPU Computation and Platforms. In book: Ganesh Chandra Deka (ed). *Emerging Research Surrounding Power Consumption and Performance Issues in Utility Computing*. Hershey, PA: IGI Global; 2016. P. 136–174. [10.4018/978-1-4666-8853-7.ch007](https://doi.org/10.4018/978-1-4666-8853-7.ch007)
8. Ebrahim Zarei Zefreh, Leili Mohammad Khanli, Shahriar Lotfi, Jaber Karimpour. 3-D Data Partitioning for 3-Level Perfectly Nested Loops on Heterogeneous Distributed System. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*. 2017;29(5):e3976. [10.1002/cpe.3976](https://doi.org/10.1002/cpe.3976)
9. Fan Yang, Tongnian Shi, Han Chu, Kun Wang. The Design and Implementation of Parallel Algorithm Accelerator Based on CPU-GPU Collaborative Computing Environment. *Advanced Materials Research*. 2012;529:408–412. [10.4028/www.scientific.net/AMR.529.408](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.529.408)
10. Varshini Subhash, Karran Pandey, Vijay Natarajan. A GPU Parallel Algorithm for Computing Morse-Smale Complexes. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 2022. P. 1–15. [10.1109/TVCG.2022.3174769](https://doi.org/10.1109/TVCG.2022.3174769)
11. Leiming Yu., Fanny Nina-Paravecino, David R. Kaeli, Qianqian Fang. Scalable and Massively Parallel Monte Carlo Photon Transport Simulations for Heterogeneous Computing Platforms. *Journal of Biomedical Optics*. 2018;23(1):010504. [10.1117/1.JBO.23.1.010504](https://doi.org/10.1117/1.JBO.23.1.010504)
12. Fujimoto R.M. Research Challenges in Parallel and Distributed Simulation. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*. 2016;26(4):1–29. [10.1145/2866577](https://doi.org/10.1145/2866577)
13. Qiang Qin, ChangZhen Hu, TianBao Ma. Study on Complicated Solid Modeling and Cartesian Grid Generation Method. *Science China Technological Sciences*. 2014;57:630–636. [10.1007/s11431-014-5485-5](https://doi.org/10.1007/s11431-014-5485-5)
14. Seyong Lee, Jeffrey Vetter. Moving Heterogeneous GPU Computing into the Mainstream with Directive-Based, High-Level Programming Models. In: *Proc. DOE Exascale Research Conference*. Portland, Or; 2012.

15. Thoman P., Dichev K., Heller Th., Iakymchuk R., Aguilar X., Hasanov Kh., et al. A Taxonomy of Task-Based Parallel Programming Technologies for High-Performance Computing. *Journal of Supercomputing*. 2018;74(2):1422–1434. [10.1007/s11227-018-2238-4](https://doi.org/10.1007/s11227-018-2238-4)

References

1. Shiganova TA, Alekseenko E, Kazmin AS. Predicting Range Expansion of Invasive Ctenophore *Mnemiopsis leidyi* A. Agassiz 1865 under Current Environmental Conditions and Future Climate Change Scenarios. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2019;227:106347. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106347>
2. Sukhinov AI, Chistyakov AE, Nikitina AV, Filina AA, Lyashchenko TV, Litvinov VN. The Use of Supercomputer Technologies for Predictive Modeling of Pollutant Transport in Boundary Layers of the Atmosphere and Water Bodies. In book: L Sokolinsky, M Zymbler (eds). *Parallel Computational Technologies*. Cham: Springer; 2019. P. 225–241. [10.1007/978-3-030-28163-2_16](https://doi.org/10.1007/978-3-030-28163-2_16)
3. Rodriguez D, Gomez D, Alvarez D, Rivera S. A Review of Parallel Heterogeneous Computing Algorithms in Power Systems. *Algorithms*. 2021;14(10):275. [10.3390/a14100275](https://doi.org/10.3390/a14100275).
4. Abdelrahman AM Osman. GPU Computing Taxonomy. In ebook: Wen-Jyi Hwang (ed). *Recent Progress in Parallel and Distributed Computing*. London: InTech; 2017. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.68179>
5. Parker A. GPU Computing: The Future of Computing. In: *Proceedings of the West Virginia Academy of Science*. Morgantown, WV: WVAS; 2018. Vol. 90 (1). [10.55632/pwvas.v90i1.393](https://doi.org/10.55632/pwvas.v90i1.393)
6. Nakano Koji. Theoretical Parallel Computing Models for GPU Computing. In book: Koç Ç. (ed). *Open Problems in Mathematics and Computational Science*. Cham: Springer; 2014. P. 341–359. [10.1007/978-3-319-10683-0_14](https://doi.org/10.1007/978-3-319-10683-0_14)
7. Bhargavi K, Sathish Babu B. GPU Computation and Platforms. In book: Ganesh Chandra Deka (ed). *Emerging Research Surrounding Power Consumption and Performance Issues in Utility Computing*. Hershey, PA: IGI Global; 2016. P.136–174. [10.4018/978-1-4666-8853-7.ch007](https://doi.org/10.4018/978-1-4666-8853-7.ch007)
8. Ebrahim Zarei Zefreh, Leili Mohammad Khanli, Shahriar Lotfi, Jaber Karimpour. 3-D Data Partitioning for 3-Level Perfectly Nested Loops on Heterogeneous Distributed System. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*. 2017;29(5):e3976. [10.1002/cpe.3976](https://doi.org/10.1002/cpe.3976)
9. Fan Yang, Tongnian Shi, Han Chu, Kun Wang. The Design and Implementation of Parallel Algorithm Accelerator Based on CPU-GPU Collaborative Computing Environment. *Advanced Materials Research*. 2012;529:408–412. [10.4028/www.scientific.net/AMR.529.408](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.529.408)
10. Varshini Subhash, Karran Pandey, Vijay Natarajan. A GPU Parallel Algorithm for Computing Morse-Smale Complexes. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 2022. P. 1–15. [10.1109/TVCG.2022.3174769](https://doi.org/10.1109/TVCG.2022.3174769)
11. Leiming Yu, Fanny Nina-Paravecino, David R Kaeli, Qianqian Fang. Scalable and Massively Parallel Monte Carlo Photon Transport Simulations for Heterogeneous Computing Platforms. *Journal of Biomedical Optics*. 2018;23(1):010504. [10.1117/1.JBO.23.1.010504](https://doi.org/10.1117/1.JBO.23.1.010504)
12. Fujimoto RM. Research Challenges in Parallel and Distributed Simulation. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*. 2016;26(4):1–29. [10.1145/2866577](https://doi.org/10.1145/2866577)
13. Qiang Qin, ChangZhen Hu, TianBao Ma. Study on Complicated Solid Modeling and Cartesian Grid Generation Method. *Science China Technological Sciences*. 2014;57:630–636. [10.1007/s11431-014-5485-5](https://doi.org/10.1007/s11431-014-5485-5)
14. Seyong Lee, Jeffrey Vetter. Moving Heterogeneous GPU Computing into the Mainstream with Directive-Based, High-Level Programming Models. In: *Proc. DOE Exascale Research Conference*. Portland, Or; 2012.
15. Thoman P, Dichev K, Heller Th, Iakymchuk R, Aguilar X, Hasanov Kh, et al. A Taxonomy of Task-Based Parallel Programming Technologies for High-Performance Computing. *Journal of Supercomputing*. 2018;74(2):1422–1434. [10.1007/s11227-018-2238-4](https://doi.org/10.1007/s11227-018-2238-4)

Поступила в редакцию 11.07.2023

Поступила после рецензирования 14.08.2023

Принята к публикации 18.08.2023

Об авторах:

Владимир Николаевич Литвинов, кандидат технических наук, доцент кафедры математики и информатики Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ResearcherID](https://orcid.org/0000-0001-9151-1111), [ScopusID](https://orcid.org/0000-0001-9151-1111), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9151-1111), LitvinovVN@rambler.ru

Нелли Борисовна Руденко, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры математики и биоинформатики Азово-Черноморского инженерного института, ДГАУ (347740, РФ, г. Зерноград, ул. Ленина, 19), [ScopusID](https://orcid.org/0000-0001-9151-1111), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9151-1111), nelli-rud@yandex.ru

Наталья Николаевна Грачева, кандидат технических наук, доцент кафедры математики и биоинформатики Азово-Черноморского инженерного института, ДГАУ (347740, Ростовская область, г. Зерноград, ул. Ленина, 19), [ScopusID](#), [ORCID](#), grann72@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

В.Н. Литвинов — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, разработка алгоритмов для выполнения вычислительного эксперимента, проведение расчетов.

Н.Б. Руденко — анализ результатов исследований, формирование выводов, подготовка текста.

Н.Н. Грачева — написание программного кода для выполнения вычислительного эксперимента, подготовка иллюстраций, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 11.07.2023

Revised 14.08.2023

Accepted 18.08.2023

About the Authors:

Vladimir N. Litvinov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Mathematics and Informatics, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), [ResearcherID](#), [ScopusID](#), [ORCID](#), LitvinovVN@rambler.ru

Nelli B Rudenko, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Mathematics and Bioinformatics Department, Azov-Black Sea Engineering Institute, Don State Agrarian University (21, Lenina St., Zernograd, 347740, RF), [ScopusID](#), [ORCID](#), nellyi-rud@yandex.ru

Natalya N Gracheva, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Mathematics and Bioinformatics Department, Azov-Black Sea Engineering Institute, Don State Agrarian University (21, Lenina St., Zernograd, 347740, RF), [ScopusID](#), [ORCID](#), grann72@mail.ru

Claimed Contributorship:

VN Litvinova: basic concept formulation, research objectives and tasks, development of algorithms for performing a computational experiment, calculation analysis.

NB Rudenko: analysis of research results, drawing conclusions, text preparation.

NN Gracheva: writing program code for performing a computational experiment, preparing illustrations, finalizing the text, correction of the conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.