



**ВЕСТНИК РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ДРУЖБЫ НАРОДОВ.
СЕРИЯ: ИНЖЕНЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Том 20 № 3 (2019)

DOI: 10.22363/2312-8143-2019-20-3

<http://journals.rudn.ru/engineering-researches>

Научный журнал

Издается с 2000 г.

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-61174 от 30.03.2015 г.

Учредитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов»

Главный редактор

Разумный Юрий Николаевич – доктор технических наук, профессор, директор Инженерной академии, директор департамента механики и мехатроники Инженерной академии, Российский университет дружбы народов

Заместитель главного редактора

Резник Сергей Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Ракетно-космические композитные конструкции», Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Ответственный секретарь

Ткаченко Ирина Михайловна – кандидат технических наук, доцент департамента механики и мехатроники Инженерной академии, Российский университет дружбы народов

Члены редакционной коллегии

Алифанов Олег Михайлович – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, заведующий кафедрой космических систем и ракетостроения, Московский авиационный институт

Галишикова Вера Владимировна – доктор технических наук, директор департамента строительства Инженерной академии, Российский университет дружбы народов

Дивеев Асхат Ибрагимович – доктор технических наук, профессор, заведующий сектором проблем кибернетики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление», Российская академия наук

Захаров Валерий Николаевич – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, директор Института проблем комплексного освоения недр, Российская академия наук

Калугин Владимир Тимофеевич – доктор технических наук, профессор, руководитель Научно-учебного комплекса специального машиностроения, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Коноплев Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии, Российский университет дружбы народов

Корнилова Анна Владимировна – доктор технических наук, профессор департамента строительства Инженерной академии, Российский университет дружбы народов

Мальшиев Вениамин Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой системного анализа, Московский авиационный институт

Омельченко Ирина Николаевна – доктор технических наук, доктор экономических наук, профессор, декан факультета инженерного бизнеса и менеджмента, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Попов Гарри Алексеевич – доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, директор Научно-исследовательского института прикладной механики и электродинамики, Московский авиационный институт

Рыльникова Марина Владимировна – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института проблем комплексного освоения недр, Российская академия наук

Фомин Валерий Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры автомобильных и тракторных двигателей, Московский государственный машиностроительный университет

Агравал Бридж – профессор Навал Постградуейт Скул, Монтерей, США

Варатараджу Ренугант – профессор Университета Путра Малайзия, Малайзия

Герман Анна – профессор Университета Бейра Интериор, Португалия

Грациани Филиппо – профессор Римского университета «Ла Сапиенца», Италия

Мисра Арун – профессор Университета МакГилл, Канада

Мортари Даниэль – профессор Техасского университета A&M, США

Спенсер Дэвид – профессор Университета Пенн Стейт, США

Фурфаро Роберто – профессор Университета Аризоны, США

Хоуэлл Кэтлин – профессор, Университет Пердью, Уэст-Лафайетт, США

Ясика Тетсуо – почетный профессор, Университет Кюсю, Япония

**ВЕСТНИК РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ДРУЖБЫ НАРОДОВ.
СЕРИЯ: ИНЖЕНЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

ISSN 2312-8143 (Print); ISSN 2312-8151 (Online)

Периодичность 4 выпуска в год.

Сайт журнала: <http://journals.rudn.ru/engineering-researches> (открытый доступ).

Языки: русский, английский.

Журнал индексируют: РИНЦ, DOAJ, Ulrich's Periodicals Directory, Cyberleninka, Google Scholar, WorldCat, East View, Dimensions, EBSCOhost.

Подписной индекс по каталогу агентства «Роспечать» – 18230.

Цель и тематика

В журнале публикуются результаты фундаментальных и прикладных научных исследований российских и зарубежных ученых в области авиационной и ракетно-космической техники, машиностроения и машиноведения, наук о земле. Цель журнала заключается в содействии развитию отечественных инженерных школ, продвижению и внедрению в практику современных перспективных исследований в указанных областях.

Научный журнал «Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования» адресован научным работникам, инженерам, аспирантам, студентам старших курсов технических вузов. Включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий ВАК при Минобрнауки России. Выпуски журнала в полнотекстовом виде доступны в базе данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) на платформе Научной электронной библиотеки (НЭБ) elibrary.ru, а также на сайте журнала <http://journals.rudn.ru/engineering-researches>

Редактор *Ю.А. Заикина*
Компьютерная верстка: *Ю.А. Заикина*

Адрес редакции:
Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3
Тел.: +7 (495) 955-07-16; e-mail: publishing@rudn.ru

Адрес редакционной коллегии журнала «Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования»:
Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3
Тел.: +7 (495) 955-07-92; e-mail: engj@rudn.ru

Подписано в печать 16.12.2019. Выход в свет 23.12.2019. Формат 60×84/8.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «Times New Roman».
Усл. печ. л. 6,51. Тираж 500 экз. Заказ № 1090. Цена свободная.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Российский университет дружбы народов»
Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

Отпечатано в типографии ИПК РУДН
Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3
Тел.: +7 (495) 952-04-41; e-mail: publishing@rudn.ru



RUDN JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCHES

Volume 20 Number 3 (2019)

DOI: 10.22363/2312-8143-2019-20-3

<http://journals.rudn.ru/engineering-researches>

Founded in 2000

Founder: Peoples' Friendship University of Russia

Editor-in-Chief

Yury N. Razumny – Professor, Director of the Academy of Engineering, Director of the Department of Mechanics and Mechatronics of the Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)

Associate Editor-in-Chief

Sergey V. Reznik – Professor, Head of the Department “Rocket and Space Composite Structures”, Bauman Moscow State Technical University

Assistant to the Editor-in-Chief

Irina M. Tkachenko – Associate Professor, Department of Mechanics and Mechatronics of the Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)

Editorial Board

Oleg M. Alifanov – Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department of Space Systems and Missile Design, Moscow Aviation Institute

Vera V. Galishnikova – Associate Professor, Director of the Department of Civil Engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)

Askhat I. Diveev – Professor, Head of the Sector of Problems of Cybernetics of Federal Research Center “Informatics and Control”, Russian Academy of Sciences

Valery N. Zaharov – Professor, Director of the Institute for Problems of Integrated Development of the Subsurface, Russian Academy of Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences

Vladimir T. Kalugin – Professor, Dean of the Departments of Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University

Vladimir N. Konoplev – Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering and Instrument Engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)

Anna V. Kornilova – Associate Professor, Professor of the Department of Civil Engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)

Veniamin V. Malyshev – Professor, Head of the Department of System Analysis, Moscow Aviation Institute

Irina N. Omelchenko – Professor, Dean of the Department of Engineering Business and Management, Bauman Moscow State Technical University

Harri A. Popov – Professor, Director of the Research Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics, Moscow Aviation Institute, Member of the Russian Academy of Sciences

Marina V. Rylnikova – Professor, Chief Researcher of the Institute for Problems of Integrated Development of the Subsurface, Russian Academy of Sciences

Valeriy M. Fomin – Professor, Moscow Polytechnic University

Brij Agrawal – Professor, Naval Postgraduate School, Monterey, USA

Renuganth Varatharajoo – Professor, University Putra Malaysia, Malaysia

Anna Guerman – Professor, Universidade da Beira Interior, Portugal

Filippo Graziani – Professor, University Roma “La Sapienza”, Italy

Arun Misra – Professor, McGill University, Canada

Daniele Mortari – Professor, Texas A&M University, USA

David Spencer – Professor, Penn State University, USA

Roberto Furfaro – Associate Professor, Professor, University of Arizona, USA

Kathleen Howell – Professor of the Purdue University, West Lafayette, USA

Tetsuo Yasaka – Professor Emeritus, Kyushu University, Japan

RUDN JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCHES
Published by the Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)

ISSN 2312-8143 (Print); ISSN 2312-8151 (Online)

Published 4 times a year.

Journal homepage: <http://journals.rudn.ru/engineering-researches> (Open Access).

Languages: Russian, English.

Indexed by DOAJ, RSCI (elibrary.ru), Ulrich's Periodicals Directory, Cyberleninka, Google Scholar, WorldCat, East View, Dimensions, EBSCOhost.

Aims and Scope

The journal publishes results of fundamental and applied research of Russian and foreign scientists on specific scientific research themes. The editorial board of the journal invites the cooperation of experts working in the field of aerospace engineering, mechanical engineering and machine science, Earth science. The purpose of the journal is to contribute the development of Russian engineering schools, promotion and implementation of modern promising research projects in these areas.

The scientific journal "RUDN Journal of Engineering Researches" is addressed to researchers, engineers, graduate students, senior students of polytechnical universities. The journal has been included in the list of the leading review journals and editions of the Highest Certification Committee of Ministry of Education and Science of Russian Federation in which the basic results of PhD and Doctoral Theses are to be published. The journal website operates on the Portal of RUDN University scientific journals: <http://journals.rudn.ru/engineering-researches>. The website contains full information about the journal, editorial policy and ethics, requirements for the preparation and publication of the articles, etc., as well as full-text issues of the journal since 2008 (Open Access).

Copy Editor *Iu.A. Zaikina*
Layout Designer *Iu.A. Zaikina*

Address of the editorial board:

3 Ordzhonikidze St., Moscow, 115419, Russian Federation
Ph.: +7 (495) 955-07-16; e-mail: publishing@rudn.ru

Address of the editorial board of RUDN Journal of Engineering Researches:

3 Ordzhonikidze St., Moscow, 115419, Russian Federation
Ph.: +7 (495) 955-07-92; e-mail: engj@rudn.ru

Printing run 500 copies. Open price.

Peoples' Friendship University of Russia
6 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russian Federation

Printed at RUDN Publishing House:

3 Ordzhonikidze St., Moscow, 115419, Russian Federation
Ph.: +7 (495) 952-04-41; e-mail: publishing@rudn.ru

СОДЕРЖАНИЕ

АВИАЦИОННАЯ И КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

- Ван Юй, Денисов О.В., Денисова Л.В.** Моделирование охлаждения процессора в наноспутнике с помощью контурных тепловых труб 211
- Баранов А.А., Чернов Н.В.** Анализ энергетических затрат на поддержание конфигурации спутниковой группы типа TerraSAR-X – TanDEM-X 220

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

- Abdulhussein I.A., Al-Asadi K., Qasim R.M.** Pier scouring reduction using a Strip Guide Flow Panel device (Уменьшение влияния процесса очистки пирса при использовании устройства Strip Guide Flow Panel) 229
- Попова И.М., Тимофеев С.В., Данилов И.К.** Применение интеллектуальных систем на транспорте 236

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

- Aluvihara S., Premachandra J.K.** The influences of the crude oils on the decay of metals (Влияние сырой нефти на разрушение металлов) 244
- Дроздов А.Н., Дроздов Н.А., Горбылева Я.А., Горелкина Е.И.** Повышение эффективности работы жидкостно-газового эжектора 254

CONTENTS

AEROSPACE ENGINEERING

- Wang Yu, Denisov O.V., Denisova L.V.** Simulation of cooling of a processor in nanosatellite using the loop heat pipes 211
- Baranov A.A., Chernov N.V.** Energy cost analysis to station keeping for satellite formation type “TerraSAR-X – TanDEM-X” 220

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

- Abdulhussein I.A., Al-Asadi K., Qasim R.M.** Pier scouring reduction using a Strip Guide Flow Panel device 229
- Popova I.M., Timofeev S.V., Danilov I.K.** Application of intelligent systems in transport 236

EARTH SCIENCE

- Aluvihara S., Premachandra J.K.** The influences of the crude oils on the decay of metals 244
- Drozdov A.N., Drozdov N.A., Gorbyleva Y.A., Gorelkina E.I.** Increasing efficiency of work of a liquid-gas ejector 254

АВИАЦИОННАЯ И КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА
AEROSPACE ENGINEERING

DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-3-211-219

УДК 629.7:620.22:536.2

Научная статья

Моделирование охлаждения процессора в наноспутнике
с помощью контурных тепловых труб

Ван Юй, О.В. Денисов, Л.В. Денисова

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет),
Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

История статьи:

Поступила в редакцию: 05 августа 2019

Доработана: 18 октября 2019

Принята к публикации: 25 октября 2019

Ключевые слова:

наноспутники, контурные тепловые трубы, композиционные материалы, углепластик, анизотропия коэффициента теплопроводности, математическое моделирование, метод конечных элементов

Одной из ключевых проблем при проектировании наноспутников является обеспечение заданного температурного диапазона работы радиоэлектронной аппаратуры, мощность тепловыделения которой может составлять десятки ватт. Традиционные для больших космических аппаратов системы терморегулирования не подходят для наноспутников из-за ограничений на массогабаритные характеристики. Заданный тепловой режим наноспутников можно обеспечить с помощью систем с удаленным стоком теплоты – миниатюрных контурных тепловых труб. В последние годы в России налажено их серийное производство, однако они еще не нашли широкого применения в наноспутниках. Целью работы является обоснование возможности использования миниатюрных контурных тепловых труб для отведения избыточной теплоты от процессора бортового компьютера на углепластиковый корпус наноспутника. В программе ANSYS проведено параметрическое моделирование влияния геометрических размеров и значений эффективного коэффициента теплопроводности контурных тепловых труб на температуру процессора. Расчеты показали, что использование контурных тепловых труб позволит снизить температуру процессора до допустимых значений. Анизотропия коэффициента теплопроводности в плоскости армирования композиционного материала корпуса наноспутника может оказывать существенное влияние на температуру процессора. Это открывает перспективы применения анизотропных композиционных материалов для обеспечения теплового режима наноспутника.

Введение

В последние годы для проведения научных экспериментов, мониторинга земной поверхности,

телекоммуникации и других целей применяются малые космические аппараты – микро- и наноспутники. Большой спрос на их использование обусловлен сравнительно низкой стоимостью выведения и большим потенциалом на мировом рынке космических товаров [1–3].

Ван Юй, магистрант кафедры СМ13 «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ имени Н.Э. Баумана.

Денисов Олег Валерьевич, доцент кафедры СМ13 «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ им. Н.Э. Баумана, кандидат технических наук; denisov.sm13@mail.ru; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7320-0201>, AuthorID: 176625, eLIBRARY SPIN-код: 6884-6227.

Денисова Лилиана Валентиновна, доцент кафедры СМ13 «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ им. Н.Э. Баумана, кандидат технических наук; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4748-5351>, eLIBRARY SPIN-код: 3508-7617.

© Ван Юй, Денисов О.В., Денисова Л.В., 2019

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Тепловой режим наноспутников обусловлен воздействием внешних тепловых нагрузок и выделением теплоты бортовым оборудованием [4–6]. В составе бортового оборудования важное место занимает бортовой компьютер с центральным процессором. В современных наноспутниках в качестве «начинки» в основном используется элемент-

ная база смартфонов. Постоянно возрастающая информационная нагрузка вызывает необходимость применения в бортовых компьютерах более совершенных процессоров, тепловая мощность (TDP) которых может составлять десятки ватт. Для нормального функционирования большинства процессоров их допустимая температура не должна превышать 80–90 °С [7].

В условиях космического пространства стандартная схема конвективного охлаждения процессора с помощью радиатора и вентилятора невозможна. Из-за высокой плотности компоновки оборудования и малого объема наноспутников отвод теплоты излучением затруднен. Низкая тепловая инертность наноспутников и продолжительное тепловыделение может привести к перегреву процессора и выходу из строя бортового компьютера.

Одним из способов решения данной проблемы может быть применение контурных теплопроводящих труб (КТТ), которые имеют высокую эффективную теплопроводность и легко адаптируются к условиям эксплуатации [8–11]. Они могут работать в условиях космического пространства, отличаются относительной простотой конструкции, незначительной массой, полной автоном-

ностью и способны передавать большое количество теплоты на необходимое расстояние. Конденсатор КТТ сбрасывает теплоту в окружающее пространство через корпус наноспутника. В настоящее время корпуса наноспутников изготавливаются в основном из алюминиевых сплавов, однако большой потенциал имеют высокотеплопроводные полимерные композиционные материалы из углеродных волокон [12]. При этом такие материалы (при меньшей плотности) имеют более высокую удельную прочность и удельную жесткость.

Цель настоящей работы – теоретическое обоснование возможности применения КТТ для обеспечения работоспособности процессора бортового компьютера наноспутника с корпусом из углепластика.

Постановка задачи. На первом этапе необходимо определить с типом процессора и, соответственно, его тепловой мощностью. Для моделирования была выбрана бескаркасная конструкция наноспутника в виде тонкостенного параллелепипеда, в центре которого установлена материнская плата с процессором и шестью устройствами памяти (рис. 1).

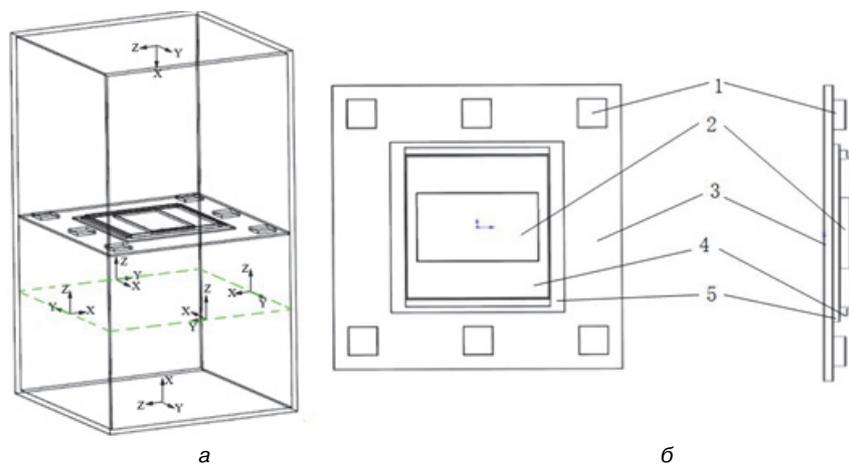


Рис. 1. Конструктивная схема наноспутника:

а – общий вид; *б* – вид сверху и сбоку; 1 – память; 2 – процессор; 3 – материнская плата; 4 – крышка процессора; 5 – плата процессора

[Figure 1. The structural diagram of the nanosatellite:

a – general view; *b* – top and side view; 1 – memory; 2 – processor; 3 – motherboard; 4 – processor cover; 5 – processor board]

Между процессором (2) и крышкой (4) нанесен тонкий слой термопасты типа Evercool Nano Diamond, который обеспечивает идеальный тепловой контакт между ними (табл. 1).

Полагалось, что процессор и элементы памяти являются единственными источниками тепловыделения. Все поверхности наноспутника диффузно

отражают и испускают излучение во внутреннее пространство, заполненное диатермической средой. С наружной поверхности теплота сбрасывается в окружающую среду, имеющую температуру 4 К. Оптические свойства поверхностей не зависят от температуры и длины волны излучения. Тепловые контакты граней корпуса меж-

ду собой и с материнской платой считаются идеальными. Материал корпуса наноспутника – ортотропный углепластик толщиной 1 мм. Принято, что λ_y и λ_z – коэффициенты теплопроводности в направлениях Y и Z плоскости армирования каждой грани корпуса наноспутника соответственно, а λ_x – коэффициент теплопроводности в направлении нормали X каждой грани корпуса наноспутника (табл. 2).

Таблица 1

Геометрические размеры конструкции наноспутника

Название	Материал	Размер, мм
Материнская плата	стеклотекстолит	100x100x1
Плата процессора	стеклотекстолит	60x60x0,8
Процессор	кремний	24x42x1,3
Память (6 штук)	кремний	10x10x1,5
Термопаста Evercool Nano Diamond	алмазные микрочастицы	24x42x0,1
Крышка процессора	алюминиевый сплав	53x53x0,5
Корпус наноспутника	углепластик	100x100x200 с толщиной листа 1 мм

Table 1

Geometrical dimensions of the nanosatellite design

Name	Material	Size, mm
Motherboard	fiberglass	100x100x1
Processor board	fiberglass	60x60x0.8
Processor	silicon	24x42x1.3
Memory (6 pcs.)	silicon	10x10x1.5
Thermal grease “Evercool Nano Diamond”	Diamond microparticles	24x42x0.1
Processor cover	Aluminium alloy	53x53x0.5
Nanosatellite case	Carbon fiber reinforced plastic	100x100x200 sheet thickness 1 mm

Значения тепловой мощности процессора $W_{про}$ варьировались в диапазоне 1–100 Вт. Тепловая мощность каждого элемента памяти принималась равной 5 Вт.

Задача решена в программе ANSYS в модуле Steady-State Thermal. Настройки нелинейного решателя для радиационного теплообмена использовались по умолчанию. Оценка сходимости показала, что при уменьшении размера конечных элементов в два раза точность решения отличалась не более чем на 5 %.

В результате моделирования установлено, что при $W_{про}$ менее 6 Вт температура процессора не превышает допустимую. При значениях $W_{про}$ про-

цессора 15–20 Вт (класс легких ноутбуков) его максимальная температура $T_{про}$ составляет 150–200 °С (рис. 2). В то же время большая часть поверхности корпуса остается холодной и имеет температуру –50–60 °С. Несмотря на то, что температура процессора превышает допустимую, низкая температура корпуса создает предпосылки для отвода на него избыточной теплоты с последующим сбросом ее в космическое пространство.

Таблица 2

Теплофизические и оптические характеристики материалов

Материал	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)	Степень черноты ϵ
Стеклотекстолит	0,244	0,9
Кремний	148,0	0,9
Алмазные микрочастицы	8,0	–
Алюминиевый сплав	144,0	0,7
Углепластик	$\lambda_x = 0,5; \lambda_y = 6,0; \lambda_z = 4,0$	0,8

Table 2

Thermophysical and optical characteristics of materials

Material	Thermal conductivity coefficient λ , W/(m·K)	Emissivity ϵ
Fiberglass	0.244	0.9
Silicon	148.0	0.9
Diamond microparticles	8.0	-
Aluminium alloy	144.0	0.7
Carbon fiber reinforced plastic	$\lambda_x = 0.5; \lambda_y = 6.0; \lambda_z = 4.0$	0.8

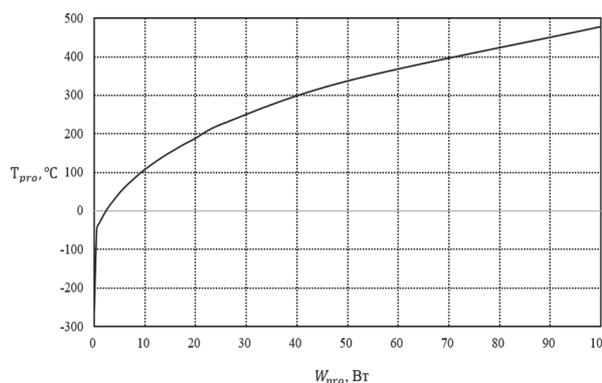


Рис. 2. Зависимость максимальной температуры процессора от его тепловой мощности [Figure 2. The dependence of the processor maximum temperature on its thermal power]

Накопленный опыт использования КТТ позволяет с оптимизмом рассматривать возможность

их применения в пассивной системе терморегулирования наноспутников.

Применение процессоров с $W_{про}$ более 20 Вт в наноспутнике заданных размеров может быть затруднительно, поэтому при дальнейших расчетах был использован прототип процессора для ноутбуков Intelcore i 7-8650U мощностью 15 Вт.

Расчет теплоотвода с помощью контурных тепловых труб

Контурные тепловые трубы работают по замкнутому испарительно-конденсационному циклу и используют капиллярное давление для прокачки

теплоносителя. Устройство выполнено в виде замкнутого контура, который состоит из испарителя с капиллярно-пористой структурой и конденсатора, соединенными между собой трубопроводами для отдельного циркулирующего движения паровой (паропровод) и жидкостной (конденсаторопровод) фаз теплоносителя (рис. 3, табл. 3). Теплота, выделяемая процессором (3), через алюминиевую крышку (4) передается в медный интерфейс (2), внутри которого находится испаритель (1). Для увеличения площади контакта между конденсатором (7) тепловой трубы и внутренней поверхностью стенки корпуса наноспутника (9) применяется термопаста (8).

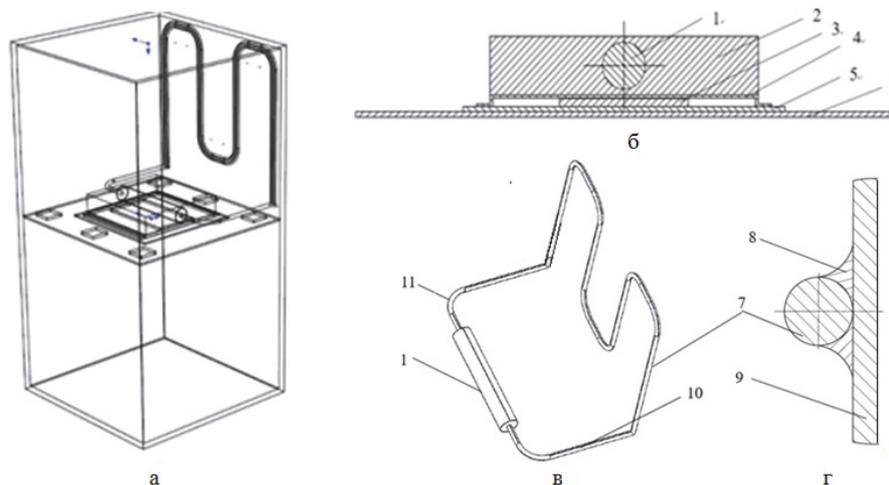


Рис. 3. Схема теплоотвода с помощью контурной тепловой трубы:

а – общий вид; б – сборка интерфейса испарителя; в – элементы КТТ; г – схема контакта конденсатора с поверхностью корпуса наноспутника; 1 – испаритель; 2 – интерфейс испарителя; 3 – процессор; 4 – крышка процессора; 5 – плата процессора; 6 – материнская плата; 7 – конденсатор; 8 – термопаста; 9 – корпус наноспутника; 10, 11 – трубопроводы (паропровод и конденсаторопровод соответственно)

[Figure 3. Processor cooling circuit using a loop heat pipe:

а – general view; б – assembly of the evaporator interface; в – loop heat pipe elements; г – contact diagram of the condenser with the surface of the nanosatellite case; 1 – evaporator; 2 – evaporator interface; 3 – processor; 4 – processor cover; 5 – processor board; 6 – motherboard; 7 – condenser; 8 – thermal grease; 9 – nanosatellite case; 10, 11 – pipelines (varopline and liquidline respectively)]

Таблица 3

Основные конструктивные параметры контурной тепловой трубы

Компонент	Характеристика	Значение, мм
Испаритель	диаметр	8,0
	длина	50,0
Конденсаторопровод	диаметр	3,0
	длина	68,5
Паропровод	диаметр	3,0
	длина	68,5
Конденсатор	диаметр	3,0
	длина	400,0
Интерфейс испарителя	длина	50,0
	ширина	50,0
	толщина	10,0

Table 3

Structural parameters of the loop heat pipe

Component	Characteristic	Value, mm
Evaporator	diameter	8.0
	length	50.0
Liquidline	diameter	3.0
	length	68.5
Varopline	diameter	3.0
	length	68.5
Condenser	diameter	3.0
	length	400.0
	length	50.0
Evaporator interface	width	50.0
	thickness	10.0

При построении конечно-элементной модели для корпуса, материнской платы, платы процессора, памяти, интерфейса, термопасты между процессором и крышкой применялся Hex Dominant Method, а для КТТ и слоя термопасты между конденсатором и корпусом наноспутника – Patch Conforming Method и Sweep Method соответственно (рис. 4). Полагалось, что КТТ – монолитное тело с коэффициентом эффективной теплопроводности λ_{ef} .

Точный расчет характеристик КТТ, в частности коэффициента эффективной теплопроводности λ_{ef} , представляет собой достаточно сложную инженерную задачу [13–19]. Анализ литературы показал, что значение λ_{ef} может превышать коэффициент теплопроводности алюминия в 10...100 раз. Так, коэффициент эффективной теплопроводности плоской тепловой трубы может изменяться от 10 000 до 17 000 Вт/(м·К) в зависимости от температуры области отвода теплоты [19].

В связи с неопределенностью λ_{ef} были проведены параметрические исследования его влияния на температурное состояние наноспутника. Исходные данные по геометрическим размерам наноспутника, теплофизическим и оптическим характеристикам материалов принимались такими же, как и в предыдущем примере (табл. 1, 2), а основные конструктивные параметры контурной тепловой трубы были, как в табл. 3.

При значениях λ_{ef} от 5000 до 20 000 Вт/(м·К) температура процессора изменяется незначительно и составляет 65 и 59 °С соответственно, что ниже его допустимой температуры (рис. 5). Температура элементов памяти, расположенных между интерфейсом и конденсатором КТТ, может превышать 100 °С, поэтому на дальнейших этапах проектирования наноспутника необходимо определить более рациональное место расположения элементов памяти на монтажной плате или изменить конструкцию интерфейса КТТ с целью обеспечения для них дополнительного теплоотвода.

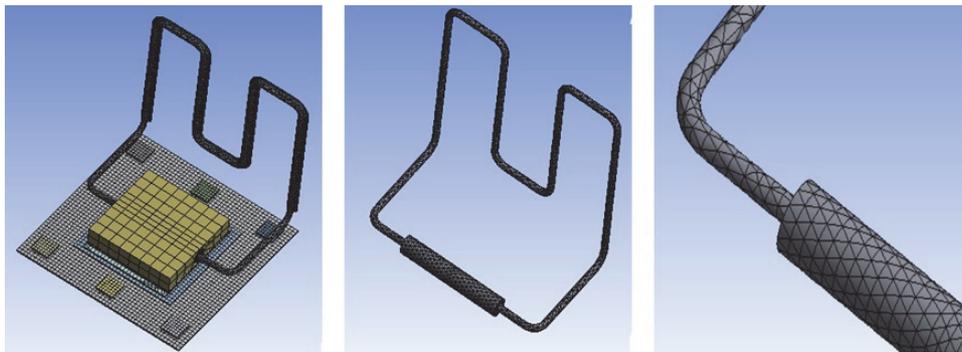


Рис. 4. Конечно-элементная модель в ANSYS
[Figure 4. Finite element model in ANSYS]

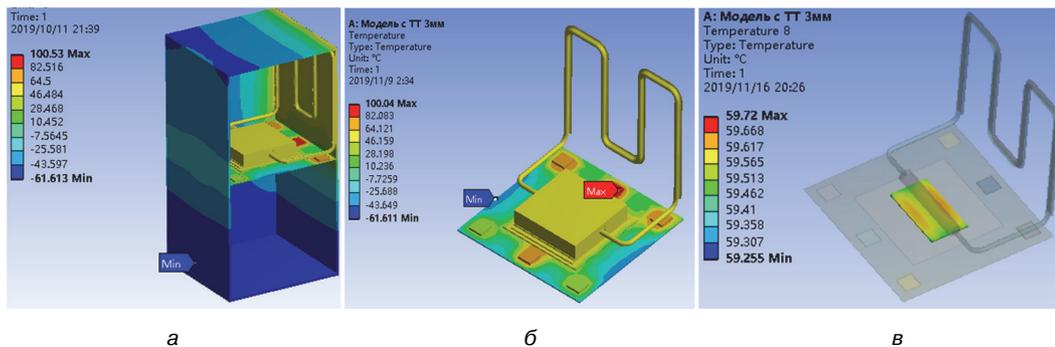


Рис. 5. Температурное состояние наноспутника при $\lambda_{ef} = 20\,000$ Вт/(м·К), $d = 3$ мм:
а – общий вид; б – элементы внутренней компоновки; в – процессор
[Figure 5. The temperature state of the nanosatellite at $\lambda_{ef} = 20\,000$ W/(m·К):
а – general view; б – interior elements; в – processor]

Для исследования возможности уменьшения массы КТТ проведен расчет температурного состояния процессора с различными диаметрами d

трубопроводов и конденсатора (рис. 6). При уменьшении значения d с 3 до 2 мм температура процессора возрастает примерно на 30 °С и может

превысить допустимую. Тепловые трубы с диаметром трубопроводов и конденсатора 2 мм и длиной конденсатора 400 мм могут обеспечить заданный тепловой режим процессора при значениях λ_{ef} , превышающих 10 000 Вт/(м·К).

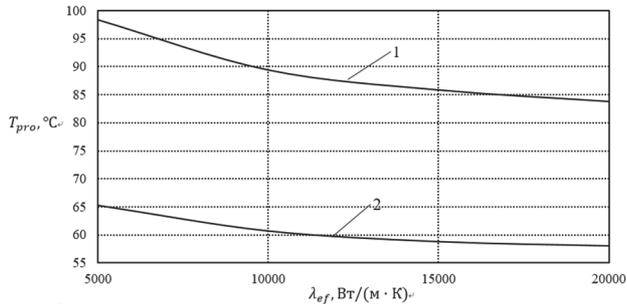


Рис. 6. Зависимость температуры процессора от размеров трубопроводов и конденсатора:
1 – $d_1 = 2$ мм; 2 – $d_2 = 3$ мм

[Figure 6. The dependence of the processor temperature on the size of the pipelines and condenser:
1 – $d_1 = 2$ mm; 2 – $d_2 = 3$ mm]

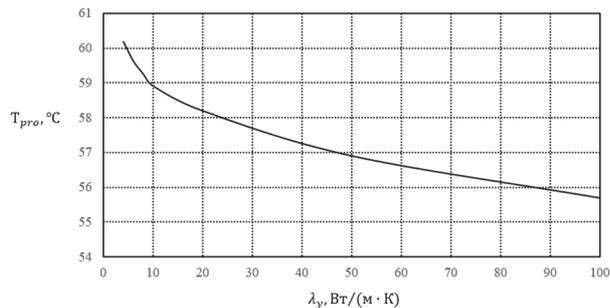


Рис. 7. Зависимость температуры процессора от коэффициента теплопроводности λ_y

[Figure 7. The dependence of the processor temperature on the thermal conductivity coefficient λ_y]

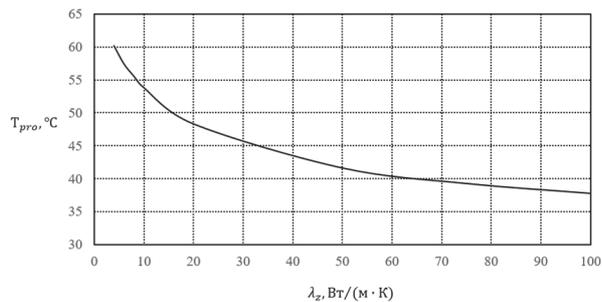


Рис. 8. Зависимость температуры процессора от коэффициента теплопроводности λ_z

[Figure 8. The dependence of the processor temperature on the thermal conductivity coefficient λ_z]

Исследовано влияние анизотропии коэффициента теплопроводности в плоскости армирова-

ния [20; 21] каждой грани углепластикового корпуса на температурное состояние наноспутника. Расчеты проводились для диаметра трубопроводов и конденсатора $d_2 = 3$ мм и $\lambda_{ef} = 20\,000$ Вт/(м·К) (рис. 7, 8). Установлено, что для рассмотренной конструкции λ_z оказывает более сильное влияние на температуру процессора, чем λ_y . Увеличение коэффициента теплопроводности в направлении Z каждой грани корпуса (рис. 1) с 4 до 100 Вт/(м·К) уменьшает температуру процессора на 22 °С, а в направлении Y, соответственно, на 5 °С. Следует отметить, что при изменении λ_z от 4 до 50 Вт/(м·К) процессор охлаждается на 18 °С, и дальнейшее двукратное увеличение λ_z до 100 Вт/(м·К) уменьшает его температуру всего на 4 °С.

Заключение

Теоретически обоснована возможность применения в наноспутниках контурных тепловых труб для охлаждения процессора с тепловой мощностью 15 Вт (класс легких ноутбуков). Установлено, что при диаметрах трубопроводов и конденсатора 3 мм температура процессора составляет примерно 60 °С в широком диапазоне значений эффективной теплопроводности КТТ. Для рассмотренной конструкции наноспутника желательно применять углепластики с более высоким коэффициентом теплопроводности в направлении Z плоскости армирования каждой грани корпуса, чем в направлении Y. Однако увеличение коэффициента теплопроводности λ_z с 50 до 100 Вт/(м·К) слабо влияет на изменение температуры процессора.

Благодарности

Авторы благодарят доктора технических наук, профессора П.В. Просунцова за советы и ценные замечания при работе над данной статьей.

Список литературы

1. Макриденко Л.А., Боярчук К.А. Микроспутники. Тенденция развития. Особенности рынка и социальное значение // Вопросы электромеханики. 2005. Т. 102. С. 12–27.
2. Анализ рынка наноспутников и микроспутников на 2019–2025 г. // Grand View Research. 2019. URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/nanosatellite-microsatellite-market>
3. Блинов В.Н., Иванов Н.Н., Сеченов Ю.Н., Шалай В.В. Малые космические аппараты: в 3 кн. Кн. 3.

Миниспутники. Унифицированные космические платформы для малых космических аппаратов: справочное пособие. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. 348 с.

4. *Никольский В.В.* Проектирование сверхмалых космических аппаратов: учебное пособие. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2012. 59 с.

5. *Чеботаев В.Е., Косенко В.Е.* Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения: учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. 488 с.

6. *Цаплин С.В., Большечев С.А.* Исследование тепловых режимов оптико-электронного телескопического модуля наноспутника в условиях эксплуатации // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18. № 2. С. 96–111. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-2-96-111.

7. Современные мобильные технологии. URL: https://www.notebook-center.ru/processor_tdp.html

8. *Дан П., Рей Д.* Тепловые трубы. М.: Энергия, 1979. 272 с.

9. *Майданик Ю.Ф.* Достижения и перспективы развития контурных тепловых труб // Труды 4-й конф. по тепломассообмену. М.: МЭИ, 2006. С. 84–92.

10. *Майданик Ю.Ф.* Контурные тепловые трубы – высокоэффективные теплопередающие устройства для охлаждения электроники // Электроника: НТБ. 2017. № 6. С. 122–130.

11. *Майданик Ю.Ф., Вершинин С.В., Чернышева М.А.* Разработка и исследование аммиачной миниатюрной контурной тепловой трубы при различных внешних условиях // Тепловые процессы в технике. 2016. № 7. С. 312–320.

12. *Михайловский К.В., Просунцов П.В., Резник С.В.* Разработка высокотеплопроводных полимерных композиционных материалов для космических конструкций // Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2012. № 9. С. 98–106.

13. *Ren Chuan, Wu Qing-Song, Hu Mao-Bin.* Heat transfer with flow and evaporation in loop heat pipe's wick at low or moderate heat fluxes // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2007. Vol. 50. No. 11–12. Pp. 2296–2308.

14. *Агеенко А.В., Мазюк В.В.* Метод расчета порошковой капиллярной структуры испарителя контурной тепловой трубы с перевернутым мениском // Вестник

БНТУ. Metallurgy. Metalloobrabotka. Mashinostroyeniye. 2011. № 4. С. 20–25.

15. *Николаев Г.П., Изотеева О.Ю.* Расчет рабочих характеристик контурных тепловых труб // Молодой ученый. 2012. № 3 (38). С. 17–25.

16. *Афанасьев В.Н., Недайвозов А.В., Якомаскин А.А.* Экспериментальное исследование процессов в «контурных» тепловых трубах // Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2014. № 2. С. 44–61.

17. *Пожилков А.А., Зайцев Д.К., Смирнов Е.М., Смирновский А.А.* Численное моделирование тепло-массопереноса в трехмерной модели испарителя контурной тепловой трубы // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2017. Т. 10. № 3. С. 52–61.

18. *Chernysheva M.A., Vershinin S.V., Maydanik Y.F.* Operating Temperature and Distribution of a Working Fluid in LHP // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2007. Vol. 50. No. 13–14. Pp. 2704–2713.

19. *Деревянко В.А., Нестеров Д.А., Косенко В.Е., Звонарь В.Д., Чеботарев В.Е., Фаткуллин Р.Ф., Суницев С.Б.* Плоские тепловые трубы для отвода тепла от электронной аппаратуры в космических аппаратах // Вестник СибГАУ. 2013. № 6 (52). С. 111–116.

20. *Резник С.В., Просунцов П.В., Денисов О.В., Петров Н.М., Шуляковский А.В., Денисова Л.В.* Расчетно-экспериментальное определение теплопроводности углепластика в плоскости армирования на основе бесконтактного измерения температуры // Тепловые процессы в технике. 2016. Т. 8. № 12. С. 557–563.

21. *Резник С.В., Просунцов П.В., Денисов О.В., Петров Н.М., Ли Вонхеонг.* Расчетно-экспериментальная методика определения теплопроводности композиционного материала корпуса наноспутника // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2017. Т. 18. № 3. С. 345–352.

Для цитирования

Ван Юй, Денисов О.В., Денисова Л.В. Моделирование охлаждения процессора в наноспутнике с помощью контурных тепловых труб // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. № 3. С. 211–219. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-3-211-219>

Simulation of cooling of a processor in nanosatellite using the loop heat pipes

Wang Yu, Oleg V. Denisov, Liliana V. Denisova

Bauman Moscow State Technical University (National Research University of Technology),
5 2-ya Baumanskaya St., bldg. 1, Moscow, 105005, Russian Federation

Article history:

Received: August 05, 2019

Revised: October 18, 2019

Accepted: October 25, 2019

Keywords:

nanosatellite, loop heat pipes, composite materials, carbon fiber reinforced plastic, anisotropy of thermal conductivity coefficient, math modeling

One of the key problems in the development of nanosatellites is to provide a given temperature range for the operation of electronic equipment, the heat transfer of which can be tens of watts. Thermoregulation systems traditional for large spacecraft are not suitable for nanosatellites due to limitations on their mass and size characteristics. The indicated thermal regime of nanosatellites can be achieved using remote heat removal systems – miniature loop heat pipes. In recent years, their mass production has been established in Russia, but they have not yet found wide application in nanosatellites. The aim of the paper is to substantiate the possibility of using miniature loop heat pipes to remove excess heat from the on-board computer processor to the carbon-plastic case of the nanosatellite. Parametric modeling of the influence of geometric dimensions and the values of the effective thermal conductivity coefficient of loop heat pipes on the processor temperature was carried out in the ANSYS program. Calculations showed that the use of contour heat pipes will reduce the processor temperature to acceptable values. The anisotropy of the thermal conductivity coefficient in the reinforcement plane of the composite material of the nanosatellite case can have a significant effect on the temperature of the processor. This opens up prospects for the use of anisotropic composite materials to ensure the thermal regime of the nanosatellite.

Acknowledgements

The writers would like to express their gratitude to the Doctor of Engineering Sciences, Professor P.V. Prosunsov for advice and valuable comments when working on this article.

References

1. Makridenko LA, Boyarchuk KA. Mikrospjutniki. Tendentsii razvitiya. Osobennosti rynka i sotsial'noe znachenie [Microsatellites. Development trend. Market features and social significance]. *Voprosy elektromekhaniki*. 2005;102:12–27. (In Russ.)
2. San Francisco: Nanosatellite and Microsatellite Market Analysis Report By Mass, By End Use (Defense & Security), By Application (Communication & Navigation, Scientific Research), And Segment Forecasts, 2019–2025.

Grand View Research. Available from: www.grandviewresearch.com/industry-analysis/nanosatellite-microsatellite-market (Accessed May 2019).

3. Blinov VN, Ivanov NN, Sechenov YuN, Shal' VV. *Malye kosmicheskie apparati: v 3 kn. Kn. 3. Minisputniki. Unifitsirovannye kosmicheskie platformy dlya malykh kosmicheskikh apparatov* [Small space vehicles: in 3 books. Book 3. Minisatellite. Unified space platforms for small space vehicles]: reference book. Omsk: OmSTU Publishing Office; 2010. (In Russ.)

4. Nikolskii VV. *Proektirovanie sverhmalih kosmicheskikh apparatov* [Designing of ultra-small spacecrafts]: training manual. Saint Petersburg: Baltic State Technical University; 2012. (In Russ.)

5. Chebotarev VE, Kosenko VE. *Osnovi proektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya* [The basics of designing a spacecraft information support]: tutorial. Krasnoyarsk; 2011. (In Russ.)

6. Tsaplin SV, Bolychev SA. Issledovanie teplovih rezhimov optiko-elektronnogo teleskopicheskogo modulya v usloviyah ekspluatatsii [Investigation of the thermal conditions of the optoelectronic telescopic module of a nanosatellite in operating conditions]. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2019;(2): 96–111. (In Russ.)

Wang Yu, master student of the Department SM13 “Rocket and Space Composite Structures” of the Bauman MSTU.

Oleg V. Denisov, associate professor of the Department SM13 “Rocket and Space Composite Structures” of the Bauman MSTU, Candidate of Technical Sciences; denisov.sm13@mail.ru; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7320-0201>, AuthorID: 176625, eLIBRARY SPIN-code: 6884-6227.

Liliana V. Denisova, associate professor of the Department SM13 “Rocket and Space Composite Structures” of the Bauman MSTU, Candidate of Technical Sciences; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4748-5351>, eLIBRARY SPIN-code: 3508-7617.

7. *Modern mobile technology*. Available from: https://www.notebook-center.ru/processor_tdp.html
8. Dunn PD, Reay DA. *Heat Pipes*. Oxford – New York – Toronto – Sydney – Paris – Braunschweig: Pergamon Press; 1976.
9. Maydanik YuF. Dostizheniya i perspektivi razvitiya konturnih teplovih trub [Achievements and development prospects of loop heat pipes]. *Proc. of 4th Conf. on Heat Mass Transfer*. Moscow. 2006. p. 84–92. (In Russ.)
10. Maydanik YuF. Konturnie teplovie trubi – visokoeffektivnie teploperedayushie ustroystva dlya ohlazhdeniya elektroniki [Loop Heat Pipes: highlyefficient heat transfer devices for cooling systems of electronics]. *Electronics: Science, Technology, Business*. 2017;(6):122–130. (In Russ.)
11. Maydanik YuF., Vershinin SV, Chernysheva MA. Razrabotka i issledovanie ammiachnoi miniaturnoi konturnoi teplovoi trubi pri razlichnih vneshnih uslovieah [Development and Research of Ammonia Miniature Loop Heat Pipe under Various External Conditions]. *Journal of Thermal Processes in Engineering*. 2016;(7):312–320. (In Russ.)
12. Mikhailovskii KV, Prosuntsov PV, Reznik SV. Razrabotka visokoteploprovodnih polimernih kompozitsionnih materialov dlya kosmicheskikh konstruksii [Development of high-conductivity polymer composite materials for space structures]. *Vestnik MGTU imeni N.E. Baumana. Seriya: Mashinostroenie*. 2012;(9):98–106. (In Russ.)
13. Ren Chuan, Wu Qing-Song, Hu Mao-Bin. Heat transfer with flow and evaporation in loop heat pipe's wick at low or moderate heat fluxes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2007;50(11–12):2296–2308.
14. Ageenko AV, Maziuk VV. Metod rascheta poroshkovoi kapillyarnoi strukturi isparatelya konturnoi teplovoi trubi s perevernutim meniskom [Theoretical Calculation Method for Powder Capillary Structure of Loop Heat Pipe with Inverted Meniscus]. *Science & Technique*. 2011;(4):20–25. (In Russ.)
15. Nikolaev GP, Izoteeva OYu. Raschet rabochih harakteristik konturnih teplovih trub [Calculation of performance characteristics of loop heat pipes]. *Molodoi Ucheniy*. 2012;3(38):17–25. (In Russ.)
16. Afanas'ev VN, Nedaivozov AV, Yakomaskin AA. Eksperimental'noe issledovanie protsessov v konturnih teplovih trubah [Experimental Study of Processes in Loop Heat Pipes]. *Vestnik MGTU imeni N.E. Baumana. Seriya: Mashinostroenie*. 2014;(2):44–61. (In Russ.)
17. Pozhilov AA, Zaitsev DK, Smirnov EM, Smirnovsky AA. Chislennoe modelirovanie tepломassopere-nosa v trehmernoi modeli isparatelya konturnoi teplovoi trubi [Numerical simulation of heat and mass transfer in a 3D model of a loop heat pipe evaporator]. *Saint Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics*. 2017;10(3):52–61. DOI: 10.18721/JPM.10305. (In Russ.)
18. Chernysheva MA, Vershinin SV, Maydanik YF. Operating Temperature and Distribution of a Working Fluid in LHP. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2007;50(13–14):2704–2713.
19. Derevyanko VA, Nesterov DA, Kosenko VE, Zvonar VD, Chebotarev VE, Fatkulin RF, Suntsov SB. Ploskie teplovie trubi dlya otvoda tepla ot elektronnoi apparatury v kosmicheskikh apparatah [Flat heat pipes for heat removal from electronic equipment in space vehicles]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2013; 6(52):111–116. (In Russ.)
20. Reznik SV, Prosuntsov PV, Denisov OV, Petrov NM, Shulyakovskiy AV, Denisova LV. Raschetno-eksperimental'noe opredelenie teploprovodnosti ugleplastica v ploskosti armirovaniya na osnove beskontaktnogo izmereniya temperature [Numerical and experimental estimation of heat conductivity of carbon plastic in a reinforcement plane on the basis of contactless measurement of temperature]. *Journal of Thermal Processes in Engineering*. 2016;(12):557–563. (In Russ.)
21. Reznik SV, Prosuntsov PV, Denisov OV, Petrov NM, Vonheong Lee. Raschetno-eksperimental'naya metodika opredeleniya teploprovodnosti kompozitsionnogo materiala korpusa nanosputnika [Nanosatellite body composite material thermal conductivity determination computational and theoretical method]. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2017;18(3):345–352. DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-345-352. (In Russ.)

For citation

Wang Yu, Denisov OV, Denisova LV. Simulation of cooling of a processor in nanosatellite using the loop heat pipes. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(3):211–219. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-3-211-219>. (In Russ.)



DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-3-220-228
УДК 629.78

Научная статья

Анализ энергетических затрат на поддержание конфигурации спутниковой группы типа TerraSAR-X – TanDEM-X

А.А. Баранов

Российский университет дружбы народов, *Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6*
Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН, *Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., 4*

Н.В. Чернов

Российский университет дружбы народов, *Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6*

История статьи:

Поступила в редакцию: 15 августа 2019

Доработана: 10 октября 2019

Принята к публикации: 18 октября 2019

Ключевые слова:

группа спутников, поддержание орбиты, поддержание относительной конфигурации, суммарная характеристическая скорость, межорбитальные перелеты, маневры переходов, маневры встречи

Рассмотрено поддержание заданной конфигурации спутниковой группы типа TerraSAR-X – TanDEM-X. Предполагается, что ведущий спутник выполняет только маневры поддержания рабочей орбиты, а ведомый спутник совершает идентичные маневры для поддержания рабочей орбиты и дополнительно выполняет маневры, обеспечивающие поддержание заданной относительной конфигурации группы. Для рабочей орбиты ведущего спутника исследована зависимость затрат суммарной характеристической скорости на поддержание в заданных диапазонах большой полуоси, эксцентриситета, наклона и их различных сочетаний от точности поддержания. Установлены минимальные границы точности поддержания по каждому из элементов, при которых маневрирование не требуется. Данное исследование носит общий характер и позволяет спланировать будущие миссии, обеспечив необходимый компромисс между точностью поддержания и затратами суммарной характеристической скорости, которые растут при повышении точности поддержания. Также проведено исследование затрат на относительное поддержание при условии, что двигатели у ведущего и ведомого спутников работают практически одинаково. Показано, что относительное поддержание требует существенно меньших затрат топлива, даже при точностях, требуемых в проекте. Разработанный для данного исследования программный продукт имеет универсальное применение и будет использован для исследования затрат на поддержание более сложной системы из четырех спутников, в которой три спутника вращаются относительно базового спутника.

Введение

Для спутниковых систем решаются два основных типа задач маневрирования: маневры создания спутниковой системы и маневры под-

держания созданной конфигурации спутниковой системы.

Маневры формирования *спутниковых систем* (Satellite Constellation, SC) и *спутниковых групп* (Satellite Formation, SF) имеют свои особенности. Можно выделить два типа задач формирования спутниковых систем. В первом типе задач плоскости начальной и конечной орбит близки, и для расчета маневров, переводящих космический аппарат (КА) в заданную позицию, достаточно решить классическую задачу встречи [1–3]. Если долгота восходящего узла начальной и конечной орбиты отличается на несколько десятков

Баранов Андрей Анатольевич, ведущий научный сотрудник в ИПМ имени М.В. Келдыша РАН, профессор департамента механики и мехатроники Института космических технологий Инженерной академии РУДН, доктор физико-математических наук; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1823-9354>, e-LIBRARY SPIN-код: 6606-3690.

Чернов Никита Владимирович, старший преподаватель департамента механики и мехатроники Института космических технологий Инженерной академии РУДН; nikita145@yandex.ru; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8421-9768>, e-LIBRARY SPIN-код: 5425-7960.

© Баранов А.А., Чернов Н.В., 2019



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

градусов, что имеет место, когда спутник необходимо перевести в другую рабочую плоскость, требуются специальные методы расчета параметров маневров [4–7]. При расчете маневров формирования спутниковых групп возникает необходимость учитывать возможность столкновения спутников [8; 9].

Для поддержания конфигурации спутниковых систем различают две основных стратегии: жесткое и гибкое поддержание (в зарубежной литературе используются термины абсолютное и относительное поддержание). При жестком поддержании движение каждого из спутников согласуется с некоторым заданным движением, что позволяет рассчитывать параметры маневров каждого спутника независимо от положения других спутников, входящих в систему. При гибком поддержании – обеспечивается согласованное движение всех спутников системы. Гибкое поддержание требует меньших затрат суммарной характеристической скорости и меньшего числа импульсов скорости [10].

Наиболее сложной является задача поддержания заданной конфигурации спутниковой группы. Объекты данного вида спутниковых систем находятся в непосредственной близости друг от друга и ошибка в управлении их движением может привести к столкновению этих объектов и тем самым к потере этой системы. Кроме того, для успешного выполнения задач спутниковой группой требуется высочайшая точность поддержания ее конфигурации. В нашей стране еще нет примера успешного создания и эксплуатации спутниковой группы. На западе спутниковые группы успешно эксплуатируются уже более двух десятков лет, хотя число таких успешных систем относительно невелико.

Для спутниковых групп одновременно применяются оба типа поддержания. Для орбиты основного (ведущего) спутника используется жесткое (абсолютное) поддержание, в то время как для второго спутника (остальных спутников группы) кроме аналогичного жесткого поддержания используется и гибкое (относительное) поддержание.

1. Общие принципы поддержания заданной конфигурации спутниковой группы

В процессе поддержания ведущий спутник должен находиться в заданном диапазоне по каждому из контролируемых элементов орбиты (находиться в боксе заданного размера). Когда спутник в

процессе эволюции его орбиты достигает одной из стенок бокса, с помощью маневров его переводят на противоположную стенку. Ведомый спутник (или спутники) должен одновременно выполнять точно такие же маневры, чтобы поддерживать свою орбиту.

Дополнительно, для ведомого спутника задаются номинальные значения отклонений элементов его орбиты от элементов орбиты ведущего спутника и диапазоны допустимых отклонений от этих номинальных значений. Когда значения относительных отклонений элементов его орбиты от элементов орбиты ведущего спутника выходят из допустимого диапазона, рассчитываются параметры маневров, возвращающих ведомый спутник на его номинальную орбиту относительно ведущего спутника. Ведущий спутник в этот момент не маневрирует. Сколько бы не было спутников в спутниковой группе, если каждый из них поддерживает заданное положение относительно ведущего спутника, то все спутники поддерживают заданное положение и относительно друг друга.

2. Выбор безопасной конфигурации Satellite Formation TerraSAR-X – TanDEM-X

Примером чрезвычайно успешного создания и функционирования спутниковой группы является SF TerraSAR-X – TanDEM-X [11–13]. Основная цель запуска данной спутниковой группы – создание глобальной цифровой модели высот повышенной точности для широкого диапазона научных исследований и коммерческого использования. Эта задача была успешно выполнена.

Нас в первую очередь интересует выбор конфигурации этой спутниковой группы и поддержание с высокой точностью этой заданной конфигурации.

Даже небольшое расхождение в величинах больших полуосей орбит спутников постепенно приводит к существенному изменению их взаимного положения вдоль орбиты и, следовательно, развалу системы. Наличие разных значений наклона и/или большой полуоси также приводит к развалу конфигурации системы из-за увеличения расхождения по долготе восходящего узла (ДВУ). Обеспечить безопасное и продолжительное функционирование близко расположенной группы спутников можно за счет разнесения следа орбит в плоскости, перпендикулярной вектору скорости и/или их сдвигу вдоль траектории движения. Напри-

мер, для создания устойчивой SF можно использовать разницу в ДВУ и разницу в векторе эксцентриситета. Разница в ДВУ приведет к обеспечивающему безопасности смещению вдоль экватора, однако в апексе и вертексе орбиты это смещение исчезнет. Исправить ситуацию поможет разница в векторе эксцентриситета, направленная на апекс или вертекс орбиты. Тогда в точках, наиболее удаленных от экватора, будет максимальное относительное смещение в радиальном направлении. Подбором величин отклонений по ДВУ и вектору эксцентриситета можно добиться, чтобы ведомый спутник двигался относительно ведущего почти по окружности в плоскости, перпендикулярной вектору скорости ведущего спутника. Именно такая схема отклонений была применена в спутниковой группе TerraSAR-X – TanDEM-X. Отклонение в горизонтальном направлении было 362 м, а в вертикальном 400 м. Для предотвращения смещения трассы отклонение вдоль орбиты было уменьшено до 5,5 км, что соответствует разнице во времени пересечения экватора 0,72 с.

Чтобы получить радиальное смещение в апексе 400 м, надо приложить на экваторе радиальный импульс скорости, направленный вверх (1). Этот импульс скорости даст направленное вниз изменение вектора эксцентриситета:

$$\Delta V_r = \frac{\Delta r}{r_0} V_0 = \frac{0,4}{6886} 7609,2 \approx 0,5 \text{ м/с},$$

$$\Delta e = \frac{\Delta V_r}{V_0} = \frac{0,5}{7609,2} = 0,000066. \quad (1)$$

В результате действия этого импульса скорости произойдет смещение спутника вдоль орбиты (2) в нисходящем узле (будет отставать от ведущего спутника) за счет того, что ведомый спутник от восходящего до нисходящего узла летит по более высокой орбите:

$$\Delta n = \Delta u r_0 = -4 \frac{\Delta V_r}{V_0} r_0 \approx 1600 \text{ м}. \quad (2)$$

Расстояние между спутниками вдоль орбиты увеличится в нисходящем узле до 7,1 км. На участке траектории ниже плоскости экватора ведомый спутник будет лететь ближе к Земле, и это отставание будет компенсировано.

Необходимое смещение по ДВУ ($\Delta\Omega$) в восходящем узле:

$$\Delta\Omega = \frac{\Delta r}{r_0} = \frac{0,4}{6886} = 0,000053, \quad (3)$$

таким образом, $\Delta\Omega \approx 0,003^\circ$.

В результате действия этих отклонений относительная траектория спутника лежит на поверхности отрезка трубы радиусом примерно 400 м и длиной 1600 м (см. рисунок).

В табл. 1 приведены параметры орбит ведущего (объект 1) и ведомого (объект 2) спутников, отклонения вектора эксцентриситета и ДВУ которых соответствуют вычисленным отклонениям.

Таблица 1

Параметры орбит ведущего (объект 1) и ведомого (объект 2) спутников
 [Table 1. The orbital parameters of the master (object 1) and slave (object 2) satellites]

	Объект 1 [Object 1]	Объект 2 [Object 2]
a	6892,93	6892,93
ex	0,000468	0,000468
ey	0,001238	0,001171
i	97,44	97,44
Ω	66,733	66,736
U	360	359,95
Дата [Date]	7/1/2005 20:31:56,14	7/1/2005 20:31:56,14
Баллистический коэффициент [Ballistic coefficient]	0,01	0,01

Эти начальные условия были использованы для изучения движения первого аппарата (ведущего спутника) и относительного движения ведомого спутника.

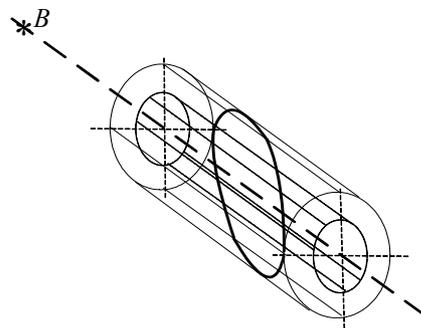


Рисунок. Траектория ведомого спутника относительно траектории ведущего спутника
 [Figure. The trajectory of the slave satellite relative to the trajectory of the master satellite]

Сама относительная траектория движения ведомого спутника по поверхности трубы изображена на рисунке сплошной жирной линией, а траектория движения ведущего спутника жирной пунктирной линией. Положение ведущего спутника *B* обозначено звездочкой.

3. Поддержание заданной орбиты ведущего спутника

Задача поддержания рабочей конфигурации группы спутников разбивается на две подзадачи. В первой подзадаче требуется обеспечить синхронизированное поддержание рабочей орбиты каждого из спутников, входящих в группировку, во второй – обеспечить необходимую конфигурацию положения спутников внутри самой группировки.

Предполагается, что текущая орбита ведущего спутника должна находиться в пределах трубы радиусом 250 м вокруг номинальной орбиты (на рисунке основание трубы и ее образующие нарисованы линиями, состоящими из точек). Очень важно, что маневры, исполняемые ведущим спутником, не должны выводить его за круг радиуса 250 м в плоскости, перпендикулярной вектору скорости. Таким образом, останется не менее 150 м между TSX и TDX в плоскости, перпендикулярной направлению движения спутника, что обеспечивает безопасное функционирование SF. Чтобы удовлетворить ограничению в 250 м в плоскости, перпендикулярной направлению движения спутника, изменение большой полуоси не должно превышать 250 м ($\Delta V_r < 0,16$ м/с), изменение наклона $\Delta i < 0,002^\circ$ ($\Delta V_z < 0,27$ м/с), изменение эксцентриситета $\Delta e < 0,000041$ ($\Delta V_r < 0,31$ м/с, $\Delta V_t < 0,16$ м/с), изменение ДВУ $\Delta \Omega < 0,002^\circ$ ($\Delta V_z < 0,27$ м/с).

Для того чтобы заданная конфигурация спутниковой группы не распадалась, необходимо одновременно выполнять идентичные маневры поддержания орбиты не только ведущего, но и ведомого спутника. Если для поддержания орбиты корректируются большая полуось и/или наклонение, то для их коррекции достаточно одного импульса скорости, прикладываемого в районе экватора. Если одновременно корректируется еще и вектор эксцентриситета, то необходимо использовать два или три импульса скорости. Расчет параметров таких маневров не представляет собой сложности [14; 15].

Далее на основании нескольких примеров анализируются частота выполнения маневров и

затраты суммарной характеристической скорости (СХС) в зависимости от точности поддержания орбиты ведущего КА. Перед каждым примером указано, отклонение каких элементов контролируется, а также величина самих максимальных контролируемых отклонений. Поддержание рассматривается на интервале времени длиною в пять месяцев.

Файлы с результатами в программе достаточно большие, содержат много промежуточной информации о параметрах орбиты до и после каждого маневра, поэтому в статье приводится только наиболее важная информация, которая позволяет понять, сколько маневров и какие затраты СХС требуются на поддержание орбиты.

Для каждого примера (табл. 2–5) приводится число маневров, число подъемов (если двухимпульсный маневр, то число маневров в 2 раза больше числа подъемов), затем суммарная характеристическая скорость всех маневров и отдельно затраты на маневрирование в плоскости орбиты и на поворот плоскости орбиты.

Затем идет информация о каждом из маневров: его номер, номер витка, на котором выполнялся маневр, аргумент широты начала маневра, составляющие импульса скорости, угловая продолжительность маневра. Поскольку маневров может быть очень много, то приводится информация о двух первых и двух последних маневрах.

Таблица 2

Примеры результатов при поддержании большой полуоси
 [Table 2. Examples of results when maintaining a large semi-axis]

Пример 1. Точность поддержания: $a = 0,200$ км
 [Example 1. Maintenance accuracy: $a = 0.200$ km]

Num. of Imp.	$N_{\text{ит}}$	dV_{sum} (m/s)	dV_{plsum} (m/s)	dV_{zsum} (m/s)
392	196	23.186899	23.186899	0.000000

Num. Imp.	REV	U (deg.)	dV_r (m/s)	dV_t (m/s)	dV_z (m/s)	dU (deg.)
1	59	70,413095	0,00000000	0,06242040	0,00000000	3,957064
2	59	250,413095	0,00000000	0,06271513	0,00000000	3,957064
391	2257	67,940506	0,00000000	-0,05718145	0,00000000	3,583502
392	2257	247,940506	0,00000000	-0,05745051	0,00000000	3,583502

Пример 2. Точность поддержания: $a = 0,250$ км
 [Example 2. Maintenance accuracy: $a = 0.250$ km]

Num. of Imp.	$N_{\text{ит}}$	dV_{sum} (m/s)	dV_{plsum} (m/s)	dV_{zsum} (m/s)
2	1	0,139744	0,139744	0,000000

Num. Imp.	REV (deg.)	U (m/s)	dV _r (m/s)	dV _t (m/s)	dV _z (m/s)	dU (deg.)
1	89	70,289161	0,00000000	0,06970808	0,00000000	4,419048
2	89	250,289161	0,00000000	0,07003587	0,00000000	4,419048

Таблица 3

Примеры результатов при поддержании большой полуоси и наклона
 [Table 3. Examples of results in maintaining a large semi-axis and inclination]

Пример 3. Точность поддержания: $a = 0,250$ км, $i = 0,0040^\circ$
 [Example 3. Maintenance accuracy: $a = 0.250$ km, $i = 0.0040^\circ$]

Num. of Imp.	N _{fit}	dV _{sum} (m/s)	dV _{plsum} (m/s)	dV _{zsum} (m/s)
102	102	55,649149	4,636243	55,346186

Num. Imp.	REV (deg.)	U (m/s)	dV _r (m/s)	dV _t (m/s)	dV _z (m/s)	dU (deg.)
1	88	360,000000	0,00000000	0,13922012	0,48351157	31,830354
2	92	360,000000	0,00000000	-0,06287404	0,54503071	34,699967
101	2229	360,000000	0,00000000	0,07273763	-0,53638274	33,317671
102	2293	360,000000	0,00000000	-0,07333842	0,53656962	33,326187

Пример 4. Точность поддержания: $a = 0,250$ км, $i = 0,0043^\circ$
 [Example 4. Maintenance accuracy: $a = 0.250$ km, $i = 0.0043^\circ$]

Num. of Imp.	N _{fit}	dV _{sum} (m/s)	dV _{plsum} (m/s)	dV _{zsum} (m/s)
32	32	18,566270	2,285957	18,372802

Num. Imp.	REV (deg.)	U (m/s)	dV _r (m/s)	dV _t (m/s)	dV _z (m/s)	dU (deg.)
1	88	360,000000	0,00000000	0,13922012	-0,483512	31,830354
2	122	360,000000	0,00000000	-0,028862	0,583749	36,965446
31	1333	360,000000	0,00000000	0,111494	-0,580231	37,048646
32	1367	360,000000	0,00000000	-0,028437	0,571256	35,855597

Таблица 4

Поддержание большой полуоси и эксцентриситета
 [Table 4. Maintaining a large semi-axis and eccentricity]

Пример 5. Точность поддержания: $a = 0,200$ км, $e = 0,00004$
 [Example 5. Maintenance accuracy: $a = 0.200$ km, $e = 0.00004$]

Num. of Imp.	N _{fit}	dV _{sum} (m/s)	dV _{plsum} (m/s)	dV _{zsum} (m/s)
100	50	8,393690	8,393690	0,000000

Num. Imp.	REV (deg.)	U (m/s)	dV _r (m/s)	dV _t (m/s)	dV _z (m/s)	dU (deg.)
1	59	70,413064	0,00000000	0,09552725	0,00000000	6,055792
2	59	250,413064	0,00000000	0,02946955	0,00000000	1,859329
99	2284	254,699446	0,00000000	0,07966285	0,00000000	5,005170
100	2285	74,699446	0,00000000	-0,08158077	0,00000000	5,150533

Пример 6. Точность поддержания: $a = 0,250$ км, $e = 0,000040$
 [Example 6. Maintenance accuracy: $a = 0.250$ km, $e = 0.000040$]

Num. of Imp.	N _{fit}	dV _{sum} (m/s)	dV _{plsum} (m/s)	dV _{zsum} (m/s)
92	46	7,658421	7,658421	0,000000

Num. Imp.	REV (deg.)	U (m/s)	dV _r (m/s)	dV _t (m/s)	dV _z (m/s)	dU (deg.)
1	89	70,289119	0,00000000	0,12456869	0,00000000	7,896774
2	89	250,289119	0,00000000	0,01494584	0,00000000	0,942972
91	2284	254,698455	0,00000000	0,07960424	0,00000000	5,003325
92	2285	74,698455	0,00000000	-0,08151828	0,00000000	5,148478

Пример 7. Точность поддержания: $a = 0,250$ км, $e = 0,000050$
 [Example 7. Maintenance accuracy: $a = 0.250$ km, $e = 0.000050$]

Num. of Imp.	N _{fit}	dV _{sum} (m/s)	dV _{plsum} (m/s)	dV _{zsum} (m/s)
36	18	3,436308	3,436308	0,000000

Num. Imp.	REV (deg.)	U (m/s)	dV _r (m/s)	dV _t (m/s)	dV _z (m/s)	dU (deg.)
1	89	70,289119	0,00000000	0,12456869	0,00000000	7,896774
2	89	250,289119	0,00000000	0,01494584	0,00000000	0,942972
35	2284	253,190702	0,00000000	0,09585113	0,00000000	6,037372
36	2285	73,190702	0,00000000	-0,10079034	0,00000000	6,379022

Таблица 5

Поддержание большой полуоси, наклона и эксцентриситета
 [Table 5. Maintaining the large semi-axis, inclination and eccentricity]

Пример 8. Точность поддержания: $a = 0,200$ км, $e = 0,000040$, $i = 0,0050^\circ$
 [Example 8. Maintenance accuracy: $a = 0.200$ km, $e = 0.000040$, $i = 0.0050^\circ$]

Num. of Imp.	N _{fit}	dV _{sum} (m/s)	dV _{plsum} (m/s)	dV _{zsum} (m/s)
84	42	8,356246	7,399970	3,061436

Num. Imp.	REV (deg.)	U (m/s)	dV _r (m/s)	dV _t (m/s)	dV _z (m/s)	dU (deg.)
1	59	360,000000	0,00000000	0,04211674	-0,35432236	22,573248
2	60	126,773035	0,00000000	0,04979374	0,00000000	3,039900
83	2223	76,000000	0,00000000	-0,09911209	-0,00087498	6,258485
84	2223	252,795666	0,00000000	0,09984579	-0,00089311	6,274116

Пример 9. Точность поддержания: $a = 0,250$ км, $e = 0,000040$, $i = 0,0070^\circ$
 [Example 9. Maintenance accuracy: $a = 0.250$ km, $e = 0.000040$, $i = 0.0070^\circ$]

Num. of Imp.	N _{fit}	dV _{sum} (m/s)	dV _{plsum} (m/s)	dV _{zsum} (m/s)
130	65	13,256772	11,461227	5,602099

Num. Imp.	REV (deg.)	U (m/s)	dV _r (m/s)	dV _t (m/s)	dV _z (m/s)	dU (deg.)
1	89	360,000000	0,00000000	0,03193747	-0,45166000	28,643946
2	90	88,821038	0,00000000	0,09470102	0,00000000	6,002449
129	2268	94,000000	0,00000000	-0,11033447	0,03132133	7,225086
130	2268	221,273429	0,00000000	0,06262888	0,04754978	4,934365

4. Поддержание относительного положения ведомого спутника

При поддержании положения ведомого спутника относительно ведущего выполнялась одно-временная коррекция всех элементов орбиты. Таким образом, по существу, решалась задача неком-

планарной встречи. Рассмотрим процедуру определения параметров оптимальных двухимпульсных маневров встречи, когда КА необходимо перевести в заданную точку на произвольной некопланарной орбите за фиксированное время.

В этой задаче имеется восемь свободных переменных (два угла приложения импульсов скорости φ_1, φ_2 и шесть составляющих импульсов $\Delta V_{r1}, \Delta V_{r2}, \Delta V_{z1}, \Delta V_{z2}$) и шесть ограничений в виде равенств. Система из шести линейных уравнений, которую необходимо решить, приведена в [16]. Можно зафиксировать значение двух переменных, например углы приложения первого и второго импульсов скорости $\varphi_1 = \varphi_{1f}$ и $\varphi_2 = \varphi_{2f}$, а затем, решив систему линейных уравнений, определить величины составляющих импульсов скорости $\Delta V_{r1}, \Delta V_{r2}, \Delta V_{z1}, \Delta V_{z2}$.

Далее достаточно перебором провести оптимизацию по двум переменным φ_1, φ_2 , чтобы найти параметры оптимального решения. Чтобы обеспечить необходимую методическую точность решения задачи, параметры маневров уточнялись с помощью известной итерационной процедуры [17].

В первом примере отклонения для орбиты ведущего КА брались номинальные, чтобы он не выходил за пределы круга радиуса 250 м. Поддержание рассматривалось на интервале в один месяц. Потребовалось 123 раза (табл. 6) изменить орбиту ведущего КА, в основном из-за нарушения ограничения по наклонению, но иногда и по эксцентриситету.

Таблица 6

Пример результатов при поддержании положения ведомого спутника
[Table 6. Example of results when maintaining the position of the slave satellite]

	Num. of Imp.	N_{fit}	dV_{sum} (m/s)	dV_{plsum} (m/s)	dV_{zsum} (m/s)
КА 1	246	123	56,631043	16,776420	50,576005

Относительное поддержание потребовало существенно меньше коррекций движения. Ниже приведены значения поддерживаемых относительных отклонений (обозначены буквой d) и точностей поддержания соответствующих отклонений (обозначены буквами dd): $da = 0,0$ км, $dda = 0,15$ км, $dex = 0$, $ddex = 0,000025$, $dex = 0,000066$, $ddey = 0,000025$, $di = 0,0^\circ$, $ddi = 0,00115^\circ$, $dOMG = -0,003^\circ$, $ddOMG = 0,00115^\circ$, $dn = -5,5$ км, $ddn = 0,1$ км.

Ограничения были нарушены всего шесть раз, два раза нарушено ограничение ddn (положение

вдоль орбиты) и четыре раза нарушено ограничение $ddex$ (составляющая вектора эксцентриситета). Было произведено шесть изменений орбиты (12 маневров). Затраты составили всего 1,67 м/с, 1,00 м/с в плоскости орбиты и 0,96 м/с на поворот плоскости орбиты.

В табл. 7 приведена информация об импульсах скорости.

Таблица 7

Информация об импульсах скорости при поддержании положения ведомого спутника
[Table 7. Information about speed pulses while maintaining the position of the slave satellite]

Num. Imp.	REV	U (deg.)	dV_r (m/s)	dV_t (m/s)	dV_z (m/s)	dU (deg.)
1	0	52,44	0,001	-0,015	0,001	0,94
2	1	356,44	-0,02	0,015	0,001	1,54
3	4	15,01	-0,004	-0,003	-0,03	1,69
4	5	179,01	-0,045	0,002	0,45	28,43
5	101	86,12	0,17	-0,001	0,001	10,82
6	102	350,12	0,001	0,011	-0,001	0,68
7	198	86,08	0,17	-0,011	0,002	10,77
8	199	350,08	0,001	0,011	0,001	0,67
9	295	86,05	0,17	-0,010	-0,0014	10,74
10	296	350,05	0,001	0,010	-0,001	0,65
11	392	40,90	0,068	0,024	-0,16	10,93
12	393	340,90	-0,281	0,054	-0,318	26,47
12	393	340,900006	-0,28189176	0,05404431	-0,31841602	26,471034

Относительное поддержание не требует коррекций, если допустимые относительные отклонения больше следующих значений: $dda = 0,15$, $ddex = 0,000066$, $ddey = 0,000132$, $ddi = 0,001120$, $ddOMG = 0,001120$, $ddn = 3,300000$.

Заключение

Проведенные исследования показали высокую зависимость затрат СХС на поддержание орбиты ведущего КА и, соответственно, на аналогичное поддержание орбиты ведомого КА от точности поддержания рабочей орбиты.

Если при точности поддержания большой полуоси (табл. 2) орбиты 200 м на интервале в пять месяцев требуется 196 изменений орбиты (392 маневра) и затраты 23,19 м/с, то при точности поддержания большой полуоси рабочей орбиты 250 м на этом же интервале требуется всего одно изменение орбиты (2 маневра) и затраты 0,139 м/с. Изменение точности поддержания всего на 50 м делает практически нулевыми затраты на поддержание большой полуоси.

Для точности поддержания большой полуоси орбиты 250 м была исследована зависимость затрат СХС от *точности поддержания наклона* (табл. 3). При точности поддержания наклона 0.004° на интервале в пять месяцев требуется 102 изменения орбиты (102 маневра) и затраты 55,65 м/с (4,63 м/с в плоскости орбиты и 55,34 м/с на поворот плоскости орбиты). При точности поддержания наклона 0.0043° требуется 32 изменения орбиты (32 маневра), затраты 18,57 м/с (2,29 м/с в плоскости орбиты и 18,37 м/с на поворот плоскости орбиты). Однако уже при точности поддержания наклона 0.0045° коррекция наклона не требуется.

Была исследована также зависимость затрат СХС от *точности поддержания большой полуоси орбиты и эксцентриситета* (табл. 4). Для точности поддержания большой полуоси орбиты 200 м и точности поддержания эксцентриситета $0,00004$ требуется 50 изменений орбиты (100 маневров) и затраты СХС 8,39 м/с. Для точности поддержания большой полуоси орбиты 250 м и точности поддержания эксцентриситета $0,00004$ требуется 46 изменений орбиты (92 маневра) и затраты СХС 7,66 м/с. Маневрирование происходит в основном из-за нарушения ограничения по эксцентриситету. Маневры чередуются через один. Один маневр увеличивает эксцентриситет, когда достигается нижняя граница, следующий уменьшает эксцентриситет, когда достигается верхняя граница. Интересно, что коррекция эксцентриситета существенно меняет картину коррекции большой полуоси. Точность поддержания большой полуоси практически не влияет на частоту проведения маневров. При точности поддержания эксцентриситета $0,00005$ требуется 18 изменений орбиты (36 маневров) и затраты СХС 3,43 м/с, а при точности поддержания эксцентриситета $0,000051$ коррекция эксцентриситета не требуется.

Та же картина имеет место и при *одновременном поддержании большой полуоси орбиты, эксцентриситета и наклона* (табл. 5). При одинаковой точности поддержания эксцентриситета $0,00004$ для точности поддержания большой полуоси орбиты 200 м и точности поддержания наклона $0,005^\circ$ требуется 42 изменения орбиты (84 маневра) и затраты СХС 8,36 м/с (7,40 м/с в плоскости орбиты и 3,06 м/с на поворот плоскости орбиты), а для точности поддержания большой полуоси орбиты 250 м и точности поддержания наклона $0,007^\circ$ требуется

65 изменений орбиты (130 маневров) и затраты СХС 13,26 м/с (11,46 м/с в плоскости орбиты и 5,60 м/с на поворот плоскости орбиты). Результат довольно парадоксальный, так как точность поддержания большой полуоси орбиты и точность поддержания наклона уменьшились, а число маневров увеличилось. Все маневры нужны для коррекции эксцентриситета, причем они попеременно уменьшают и увеличивают эксцентриситет, что явно не является оптимальным. Такая картина была и при неоптимальном поддержании большой полуоси орбиты.

Исследование показало, что при уменьшении точности поддержания по эксцентриситету до $\Delta e = 0,000056$ необходимость в маневрировании практически исчезает. Остается только один маневр для поднятия высоты.

Данные результаты свидетельствуют о чрезвычайной важности правильного выбора максимальных точностей поддержания по каждому из элементов орбиты, при которых затраты на поддержание минимальны. Для рассматриваемой системы это $\Delta a = 0,250$ м, $\Delta i = 0,0045^\circ$, $\Delta e = 0,000056$.

Следовательно, диаметр трубы, внутри которой должен находиться ведущий спутник, целесообразно увеличить до 600 м вместо 250 м, что практически избавит от необходимости проводить маневры поддержания. Увеличение диаметра до этих размеров в первую очередь связано с ограничением по эксцентриситету.

Относительное поддержание требует существенно меньших затрат, даже при точностях, требуемых в проекте.

Для поддержания заданной конфигурации спутников в течение одного месяца затраты суммарной характеристической скорости составили всего 1,67 м/с, 1,00 м/с в плоскости орбиты и 0,96 м/с на поворот плоскости орбиты.

Относительное поддержание не требует коррекций, если допустимые относительные отклонения больше следующих значений: $dda = 0.15$, $ddex = 0,000066$, $ddey = 0,000132$, $ddi = 0.001120$, $ddOMG = 0,001120$, $ddn = 3,300000$.

Список литературы

1. *Marec J.-P.* Optimal Space Trajectories // Studies in Astronautics. Amsterdam – Oxford – New York: Elsevier Sci. Pub. Co., 1979. Vol. 1. P. 329.
2. *Jones J.B.* Optimal Rendezvous in the Neighborhood of a Circular Orbit // Journal of the Astronautical Sciences. 1976. Vol. XXIV. No. 1. Pp. 55–90.

3. Баранов А.А. Численно-аналитическое определение параметров маневров многовитковой встречи КА на близких околокруговых некомпланарных орбитах // Космические исследования. 2008. Т. 46. № 5. С. 430–439.

4. Damario L., Bollman W., Lee W., Roncoli R., Smith J. Mars Orbit Rendezvous Strategy for the Mars 2003/2005 Sample Return Mission // AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference (Girwood, Alaska, 16–19 August 1999). Paper AAS 99-306. Pp. 1–19.

5. Ocampo C., Guinn J., Breeden J. Rendezvous options and dynamics for the Mars sample return mission // AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference. Paper AAS 01-415. 2001. Pp. 1–20.

6. Баранов А.А., Баранов А.А. Алгоритм расчета параметров маневров формирования спутниковых систем // Космические исследования. 2009. Т. 47. № 3. С. 256–262.

7. Разумный В.Ю., Баранов А.А. Планирование обслуживания разнородных спутниковых систем // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2016. Т. 17. № 4. С. 16–26.

8. Boutonnet A., Baranov A., Martinot V., Escudier B., Noailles J. Optimal Small Formation Flying Initialization in Circular Orbit // Proceedings of the 17th International Symposium on Space Flight Dynamics (16–20 June 2003). Moscow, 2003. Pp. 83–96.

9. Boutonnet A., Martinot V., Baranov A., Escudier B. Optimal Invariant Spacecraft Formation Deployment with Collision Risk Management // Journal of Spacecraft and Rockets. Vol. 42. No. 5. Pp. 913–920.

10. Можяев Г.В. Решение некоторых задач оптимизации процессов гибкой коррекции движения спутниковых систем. Ч. I // Космические исследования. 2001. Т. 39. № 5. С. 518–530.

11. Можяев Г.В. Решение некоторых задач оптимизации процессов гибкой коррекции движения спут-

никовых систем. Ч. II // Космические исследования. 2001. Т. 39. № 6. С. 634–647.

12. Krieger G., Moreira A., Fiedler H., Hajnsek I., Eineder M., Zink M., Werner M. TanDEM-X: A Satellite Formation for High Resolution SAR Interferometry // FRINGE 2005 Workshop. ESA/ESRIN (Frascati, Italy, 28 November – 2 December 2005). URL: http://earth.esa.int/fringe2005/proceedings/papers/382_krieger.pdf

13. Krieger G., Moreira A., Fiedler H., Hajnsek I., Werner M., Younis M., Zink M. TanDEM-X: A Satellite Formation for High-Resolution SAR Interferometry // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2007. Vol. 45. No. 11. Pp. 3317–3341.

14. Edelbaum T.N. Minimum Impulse Transfer in the Vicinity of a Circular Orbit // Journal of the Astronautical Sciences. 1967. Vol. XIV. No. 2. Pp. 66–73.

15. Баранов А.А. Маневрирование космических аппаратов в окрестности круговой орбиты. М.: Спутник+, 2016. 512 с.

16. Баранов А.А. Алгоритм расчета параметров многовитковых маневров дальнего наведения // Космические исследования. 1990. Т. 28. № 1. С. 69–76.

17. Баранов А.А. О геометрическом решении задачи встречи на близких почти круговых компланарных орбитах // Космические исследования. 1989. Т. 27. № 6. С. 808–816.

Для цитирования

Баранов А.А., Чернов Н.В. Анализ энергетических затрат на поддержание конфигурации спутниковой группы типа TerraSAR-X – TanDEM-X // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. № 3. С. 220–228. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-3-220-228>

Research paper

Energy cost analysis to station keeping for satellite formation type “TerraSAR-X – TanDEM-X”

Andrey A. Baranov

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russian Federation
Keldysh Institute of Applied Mathematics Russian Academy of Sciences, 4 Miusskaya Sq., Moscow, 125047, Russian Federation

Nikita V. Chernov

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russian Federation

Article history:

Received: August 15, 2020

Revised: October 10, 2020

Accepted: October 18, 2020

The maintenance of a given configuration of the satellite formation of the “TerraSAR-X – TanDEM-X” type is considered. It is assumed that the master satellite performs only maneuvers to maintain the working orbit, and the slave satellite performs identical maneuvers to maintain the working orbit and additionally performs maneuvers to maintain a given relative

Andrey A. Baranov, leading researcher at KIAM RAS, Professor at the Department of Mechanics and Mechatronics of Institute of Space Technologies at Academy of Engineering in RUDN University, PhD (Physics and Mathematics); ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1823-9354>, eLIBRARY SPIN-code: 6606-3690.
Nikita V. Chernov, senior lecturer at the Department of Mechanics and Mechatronics of Institute of Space Technologies at Academy of Engineering in RUDN University; nikita145@yandex.ru; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8421-9768>, eLIBRARY SPIN-code: 5425-7960.

Keywords:

satellite formation, maintaining orbit, station keeping of relative configuration, total delta-v, inter-orbital flights, transfer maneuvers, rendezvous maneuvers

configuration of the group. For the working orbit of the master satellite, the dependence of the total characteristic velocity costs for maintaining a large semi-axis, eccentricity, inclination, and their various combinations on the maintenance accuracy is studied. The minimum limits of accuracy at which maneuvering is not required are set for each of the elements. This study is general in nature and allows future missions to be planned, providing the necessary trade-offs between the accuracy of maintenance and the total characteristic speed costs that increase as maintenance accuracy increases. Also, a study of the energy costs of relative maintenance, provided that the engines of the master and slave satellites operate almost the same. It is shown that the relative maintenance requires significantly lower fuel costs, even with the accuracy required in the project. The software product developed for this study is of universal application and will be used to investigate the cost of maintaining a more complex system of four satellites, in which three satellites rotate relative to the base satellite.

References

1. Marec JP. Optimal Space Trajectories. *Studies in Astronautics*. 1979;1:329.
2. Jones JB. Optimal Rendezvous in the Neighborhood of a Circular Orbit. *Journal of the Astronautical Sciences*. 1976;XXIV(1):55–90.
3. Baranov AA. Numerical and analytical determination of the parameters of multi-turn rendezvous maneuvers spacecrafts in close nearly circular non-coplanar orbits. *Space research*. 2008;46(5):430–439. (In Russ.)
4. Damario L, Bollman W, Lee W, Roncoli R, Smith J. Mars Orbit Rendezvous Strategy for the Mars 2003/2005 Sample Return Mission. *AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference (Girwood, Alaska, 16–19 August 1999)*. Paper AAS 99-306. pp. 1–19.
5. Ocampo C, Guinn J, Breeden J. Rendezvous options and dynamics for the Mars sample return mission. *AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference*. Paper AAS 01-415. 2001. pp. 1–20.
6. Baranov AA, Baranov AA. Algorithm of calculation of parameters of maneuvers of formation of satellite systems. *Space researches*. 2009;47(3):256–262. (In Russ.)
7. Razoumny VYu, Baranov AA. Planning for on-orbit servicing of various satellite systems. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2016;17(4):16–26. (In Russ.)
8. Boutonnet A, Baranov AA, Martinot V, Escudier B, Noailles J. Optimal Small Formation Flying Initialization in Circular Orbit. *Proceedings of the 17th International Symposium on Space Flight Dynamics (16–20 June 2003)*. Moscow; 2003. pp. 83–96.
9. Boutonnet A, Martinot V, Baranov A, Escudier B. Optimal Invariant Spacecraft Formation Deployment with Collision Risk Management. *Journal of Spacecraft and Rockets*. 2005;42(5):913–920.
10. Mozhaev GV. Decision of some problems of optimization of processes of relative correction of motion of satellite systems. Part I. *Space researches*. 2001;39(5): 518–530. (In Russ.)
11. Mozhaev GV. Decision of some problems of optimization of processes of relative correction of motion of satellite systems. Part. II. *Space researches*. 2001; 39(6): 634–647. (In Russ.)
12. Krieger G, Moreira A, Fiedler H, Hajnsek I, Eineder M, Zink M, Werner M. TanDEM-X: A Satellite Formation for High Resolution SAR Interferometry. *FRINGE 2005 Workshop, ESA/ESRIN (Frascati, Italy, 28 November – 2 December 2005)*. Available from: http://earth.esa.int/fringe2005/proceedings/papers/382_krieger.pdf
13. Krieger G, Moreira A, Fiedler H, Hajnsek I, Werner M, Younis M, Zink M. TanDEM-X: A Satellite Formation for High-Resolution SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2007; 45(11):3317–3341.
14. Edelbaum TN. Minimum Impulse Transfer in the Vicinity of a Circular Orbit. *Journal of the Astronautical Sciences*. 1967;XIV(2):66–73.
15. Baranov AA. The maneuvering of the spacecraft in the vicinity of a circular orbit. Moscow: Sputnik+ Publ.; 2016. (In Russ.)
16. Baranov AA. An Algorithm for Calculating the Parameters of Multi-orbit Maneuvers in Remote Guidance. *Cosmic research*. 1990;28(1):69–76. (In Russ.)
17. Baranov AA. Geometric Solution of the Problem of a Rendezvous on Close Nearly Circular Coplanar Orbits. *Space research*. 1989;27(6):808–816. (In Russ.)

For citation

Baranov AA, Chernov NV. Energy cost analysis to station keeping for satellite formation type “TerraSAR-X – TanDEM-X”. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(3):220–228. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-3-220-228>. (In Russ.)

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-3-229-235

UDC 624

Research paper

Pier scouring reduction using a Strip Guide Flow Panel device

Ihsan A. Abdulhussein, Rafi M. Qasim

Southern Technical University, Al-Zubair Road, Basrah, Republic of Iraq

Khalid Al-Asadi

University of Basrah, Karmat Ali Road, Basrah, Republic of Iraq

Article history:

Received: June 01, 2019

Revised: July 27, 2019

Accepted: September 06, 2019

Keywords:

scour reduction, bridge piers, hydraulic structures

A set of laboratory experiments were conducted to study the effect of using a Strip Guide Flow Panel device to reduce scour process effects around a bridge pier. Three cylindrical piers of different diameter values and three different Strip Guide Flow Panel devices were used. Every Strip Guide Flow Panel device is simulated by two arms connected together at one of their edges at a right angle. The length of every arm is selected in a way to cover the pier diameter. Every Strip Guide Flow Panel was mounted on the upstream face of the corresponding cylindrical pier diameter at elevation adjacent to the flume bed. A uniform sized sediment were used as a bed material. Based on the experimental data, an acceptable range of scour reduction efficiency (35.71–66.67%) and high hydraulic safety factors were obtained when using Strip Guide Flow Panel. Also it is found that the scour depth when using Strip Guide Flow Panel is small comparing with corresponding potential and maximum scour depth values. So it can be concluded that the Strip Guide Flow Panel device can work like a turbulence kinetic energy dissipater to reduce the risk of scour around the pier during the serviceability life of bridge structure.

Introduction

Local scouring around bridge piers is considered the most risky problem that affects the bridge safety. In order to decrease the effect of this problem, extensive efforts have been spent to develop

suitable scour reduction measures. The main purpose for developing these scour reduction measures is to increase the resistance against the scour phenomena and modifying the flow. Reference [1] has classified the scour reduction measures into two types; the first type is flow altering reduction measure, whereas the second is bed armoring reduction measure. The study has focused on an application of the flow altering scour reduction measure.

To reduce the scour depth around bridge pier, several scour reduction measure devices have been proposed such as, collar, bed sill, and pier slot. A lot of studies have been conducted to investigate the efficiency of collar such as in [2–6]. The collar efficiency is slightly related to its thickness (t_c), and for

Ihsan A. Abdulhussein, Assistant Professor of Department of Environment and Pollution, Basrah Engineering Technical College, Southern Technical University, Ph.D.; drengihssan@stu.edu.iq

Khalid Al-Asadi, lecturer of Civil Engineering Department, College of Engineering, University of Basrah, Ph.D.

Rafi M. Qasim, lecturer of Department of Environment and Pollution, Basrah Engineering Technical College, Southern Technical University, M.Sc.

© Abdulhussein I.A., Al-Asadi K., Qasim R.M., 2019

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

large value of (tc/Dp) the effective pier diameter (Dp) increases which causes an increase in scour depth. Bed sill scour reduction measure can be considering as an example of the passive control technique of flow altering reduction measure. There are two types of bed sill scour reduction measures: upstream and downstream. Several research studies were carried out in order to investigate the bed sill efficiency such as in [7–10]. Many studies were carried out in order to investigate the efficiency of slot such as in [11], [3], [8], and [10].

In this study, a Strip Guide Flow Panel (SGFP) device which located at a specified location at the bridge pier has been used to reduce the local scour process effect. The SGFP device is one of the altering scour reduction measure that used adequately to prevent and/or deflect the local scour mechanisms in order to reduce the local scour adjacent to the pier. So this study has been investigated the effect and efficiency of SGFP device in reducing the local scour depth that formed around bridge pier. This study is based on several experimental runs that using a physical hydraulic model. The study is limited to clear water scour condition and a uniform cohesion less material.

1. Experimental work

A set of 18 experimental runs were conducted in an open channel flume at the hydraulic laboratory, Department of Civil Engineering, University of Basrah. The flume is 5.72 m long, 0.61 m width and 0.97 m height and is made of fiber glass reinforced plastic with steel reinforcement. The inlet tank 0.2 m long which located at the downstream side of the flume and the working section is 4.37 m long and 0.2 m depth. The working section is filled with sand as bed materials of 8 cm depth. A pump of maximum capacity 5.4 l/sec was used to provide water to the flume and the flow rate was controlled by a control valve installed at the inlet pipe. A sharp crested suppressed rectangular weir located at the beginning of the flume was used to measure flow rate (Q).

All experimental runs were conducted with a single cylindrical pier. The cylindrical pier has 22 cm height and three different diameter (Dp) values of 2.5, 5, 7.5 cm and placed at the midpoint of the working section. All three cylindrical piers were made of wood with smooth surface and painted to prevent any roughness or/and swelling when submerged in water for a long time. The ratio of the flume width to the pier diameter is more than 8, so that blockage effects were minimized for clear water scour conditions [12].

For all experiments, the SGFP was mounted on the upstream face of cylindrical pier at elevation adjacent to the bed as shown in Figure 1, *A* and 1, *C*. Three SGFPs were used with one SGFP for every cylindrical pier diameter. All three SGFPs were made of iron arms connected at one of their edged with a constant angle (a_{sg}) of 90° . The length of each side (L_{sg}) is selected in a way to cover the diameter of the pier as shown in Figure 1, *B*.

A uniform sized sediment with the mean size (d_{50}) of 0.385 mm was used as a bed material. The geometric standard deviation of the sediment size ($\sigma_g = \sqrt{d_{84}/d_{16}}$) is equal to (1.296), which is indicate that the sand is of a uniform size distribution. According to [13], sediment mixture with the value of σ_g less than 1.4 can be considered as uniformed.

The Dp values indicated earlier were carefully chosen so that the effect of sediment size on the local scour can be negligible. The minimum ratio between pier diameter and d_{50} is more than 25 in the present study which satisfy the criteria of Melville and Sutherland as in [14].

Several preliminary experiments were conducted in order to find the discharge calibration curve and the limiting time at which the scour hole will reach the equilibrium state. These experiments reveal that there is a reduction in scour at the upstream nose of the pier at specific time intervals during runs. It is observed that the depth of scour hole increases clearly at the first one-third time period of the experiments' time duration and then becomes approximately constant (or develops at a constant rate). It is concluded that the approximately 95% of the local scour depth has achieved in 2-hours and this matches the conclusion that reached by Melville and Chiew [15]. For more accuracy of the equilibrium time, 3-hours' time duration is adopted for all experimental runs.

Nine experiments were conducted for case without SGFP device and the other nine ones were conducted for case with SGFP device as shown in Table 1. Same flow characteristics, flow velocity (V) and flow depth (H), were used for every two experiments, with and without SGFP, to study the effect of SGFP on scour process around the pier. All measurements of V and H values, shown in Table 1, were taken after the flow has reached the steady state. The maximum scour depths for cases without and with SGFP, d_s and d_{sw} respectively, were measured when the experiments reach the equilibrium time. Hereafter any variable with subscript (w) means that this variable is measured at the case with using SGFP device.

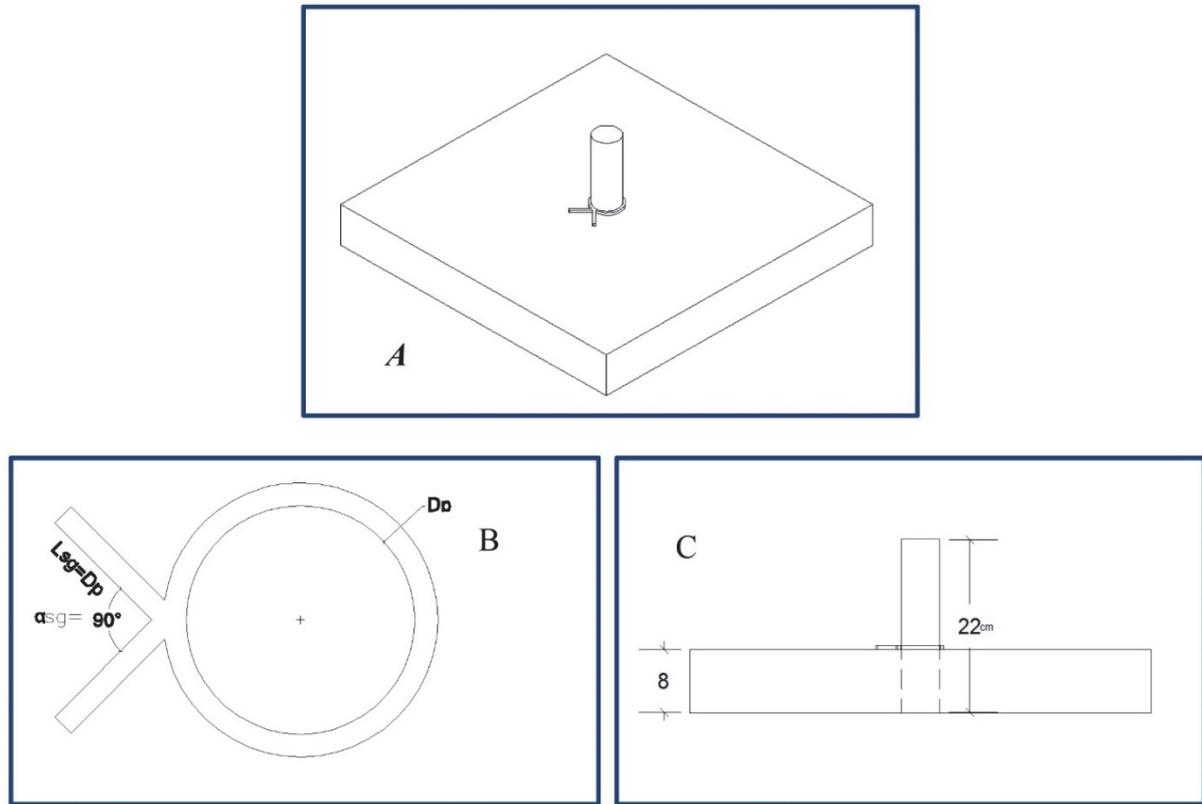


Figure 1. Pier and SGFP configuration

Table 1

Experimental runs data						
Run number (without & with SGFP)	d_{50} (mm)	D_p (cm)	V (m/sec)	H (m)	d_s (cm)	d_{sw} (cm)
1 & 2	0.385	2.5	0.1965	0.028	1.70	0.65
3 & 4	0.385	2.5	0.2276	0.032	2.50	1.60
5 & 6	0.385	2.5	0.2531	0.036	2.80	1.80
7 & 8	0.385	5.0	0.11.965	0.028	1.80	0.60
9 & 10	0.385	5.0	0.2276	0.032	2.60	1.00
11 & 12	0.385	5.0	0.2562	0.036	3.00	1.50
13 & 14	0.385	7.5	0.2001	0.028	2.65	1.00
15 & 16	0.385	7.5	0.2327	0.033	3.90	1.90
17 & 18	0.385	7.5	0.2465	0.036	4.55	2.70

2. Finding the SGFP performance and critical velocity

To find the performance of the SGFP, the maximum efficiency, maximum possible and potential maximum scour depths, and safety factor were computed.

The efficiency of the SGFP protection in terms of the maximum reduction in scour depth is computed using the following equation:

$$E (\%) = \frac{d_s - d_{sw}}{d_s} * 100, \quad (1)$$

where, E is the efficiency of scour reduction.

Reference [16] proposed the following equation to calculate the maximum possible value of local scour depth (d_{smax}) at piers:

$$d_{smax} = 2.4 K_s * K_\Theta * D_p, \quad (2)$$

where K_s and K_Θ are the pier shape and alignment factors and they are equal to 1 for piers of circular cross-section.

To find the potential maximum scour depth (d_{pot}) value, the following equation is proposed as in [17];

$$\frac{d_{pot}}{D_p} = 2.5 \tanh \left[\left(\frac{H}{D_p} \right)^{0.4} \right]. \quad (3)$$

The Safety Factor (SF) against scouring is calculated using the following equation;

$$SF = \frac{l_s}{d_s}, \quad (4)$$

where l_s represents total penetrating length of pier in soil media and it is equal to 8 cm in this study.

Reference [18] proposed the following equation to calculate the critical flow velocity:

$$\frac{V_c}{V_{*c}} = 5.75 \log(5.53 * \frac{H}{d_{50}}), \quad (5)$$

where V_c is the critical flow velocity (m/sec); V_{*c} is the critical shear velocity (m/sec) for sediment particles.

Reference [19] proposed the following equation to calculate the V_{*c} :

$$V_{*c} = 0.0115 + 0.0125 * (d_{50})^{1.4} \quad 0.1 \text{ mm} < d_{50} < 1 \text{ mm} \quad (6)$$

After calculating the V_c value, flow intensity (V/V_c) is determined. If ($V/V_c < 0.5$) there is no scour, whereas if ($0.5 \leq V/V_c \leq 1$) the local scour happens and it is in the type of clear water scour. If ($V/V_c > 1$) the local scour happens and it is in the type of live bed scour as in [20]. Also, if ($V \leq V_c$) the clear water scour happens, whereas if ($V > V_c$) the live bed scour happens [21].

3. Results and discussion

Any structural elements that have direct contact with water and soil media can suffer from the action of scour processes as a result of flow in porous media, fluid interaction with soil and structure. The purpose of this study is to reduce the scour processes around any constructed pier without damaging it. This can be achieved by using the SGFP to dissipate the flow energy and modifying the flow.

Figure 2 shows the variation of scour depth with time for different pier diameter values with and without using SGFP for constant values of V and H . It is shown from this figure that the scour depth increases with increasing in pier diameter for both cases with and without SGFP. For constant H , as the pier diameter increases, the pier wetted area increase and this led to increasing in eroding forces that exerted on the sand material close to pier and then increasing the scour depth. For every pier diameter and at every time step, the scour depth for case with SGFP is less than that for the case without SGFP. This means that there is a reduction in turbulence energy and eddies effects at the pier face when using SGFP and it works as an energy dissipater.

Figure 3 expresses the variation of scour depth with time for D_p value of 7.5 cm at different water depth values for cases with and without SGFP. It can be shown from this figure that the scour depth increases with increasing in water depth for both cases with and without SGFP. For constant pier diameter and with increasing in water depth, the wetted area of the pier is increased and this in turn causes an increasing in eroding force at the pier face which causes an increase in scour depth as indicated earlier. Also for every water depth and at every time step, the scour

depth for case with SGFP is less than that for the case without SGFP and this means that there is dissipation in turbulence energy due to using the SGFP device.

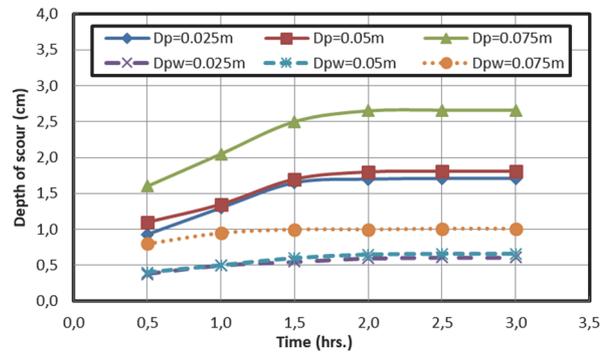


Figure 2. Variation of scour depth with time for different values of pier diameter with (D_p) and without (D_p) using SGFP ($V = 0.196$ m/sec, $H = 0.028$ m)

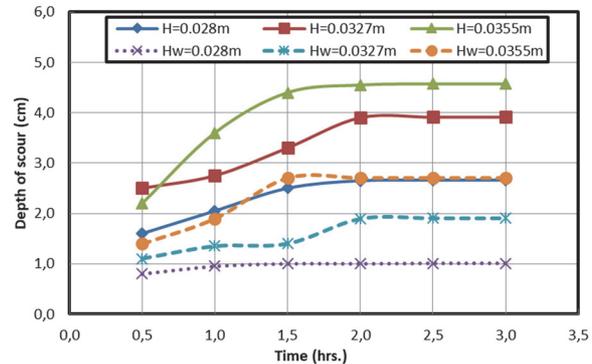


Figure 3. Variation of scour depth with time for different H values with (H_w) and without (H) SGFP ($D_p = 0.075$ m)

Figure 4 shows the time variation of scour depth for D_p value of 5 cm with various flow intensity (V/V_c) values for cases with and without SGFP. The V_c value is computed using equations 5 and 6. The flow intensity values of ($V/V_c = 0.88$), ($V/V_c = 1$), and ($V/V_c = 1.11$) represent clear water scour, critical, and live bed scour conditions as indicated earlier. Figure 4 clarifies that the scour depth increases with increasing in flow intensity for cases with and without SGFP. For case without SGFP, there is a high variation in scour depths during the first two hours especially for intensity values of ($V/V_c = 1$), and ($V/V_c = 1.11$) and after that the scour depth becomes approximately constant. Whereas for case with SGFP, the scour depth has less variation for all intensity values during the first two hours and then becomes constant. At all time periods and for the same flow intensity, the scour depth for case with SGFP

is less than that for case without SGFP. It is very important to take into consideration that the flow velocity and particle size have major effect on flow intensity.

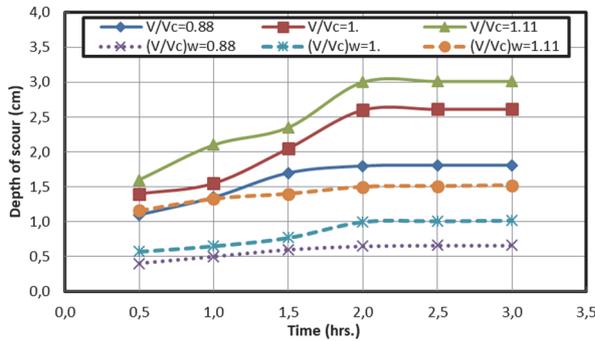


Figure 4. Variation of scour depth with time for different values of flow intensity with $((V/V_c)w)$ and without (V/V_c) SGFP ($D_p = 0.05$ m)

Figure 5 shows the relationship between scour depth and Froude number ($Fr = \frac{V}{\sqrt{gH}}$) for pier for cases with and without SGFP. All Fr values are less than 1, which means that the flow is subcritical. For case without SGFP, it is obvious that the scour depth around pier increases and decreases with a low variation rate when Fr changes from 0.375 to 0.41, whereas it increases and decreases with a high variation rate when Fr changes from 0.41 to 0.43. Whereas for case with SGFP, the scour depth increases when Fr varies from 0.375 to 0.409 and then decreases rapidly when Fr is 0.41. And after that the scour depth takes the same trend as in the case without SGFP but with less values. The same trend of scour depth. The reason for the above relations is related to the complex interaction among the factors the affecting the scour depth and these factors are: geometrical dimensions of pier (pier diameter), bed material (particle size), and flow velocity and water depth.

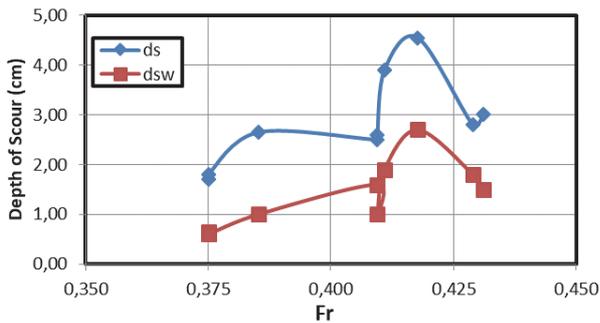


Figure 5. Variation of scour depth with Froud number for cases with and without SGFP

Figure 6 shows the relationship between scour depth and Reynolds number ($(Re = \frac{V D_p}{\nu})$ where ν is the water kinematic viscosity) for pier with and without SGFP. Generally Re value describes the flow turbulence and represents the capability of water recirculation zone (eddies) to erode bed material. As in Figure 5, Figure 6 expresses a complex non-linear relationship. It is evident as Reynolds number increases the scour depth will increase take inconsideration the major effect of flow velocity.

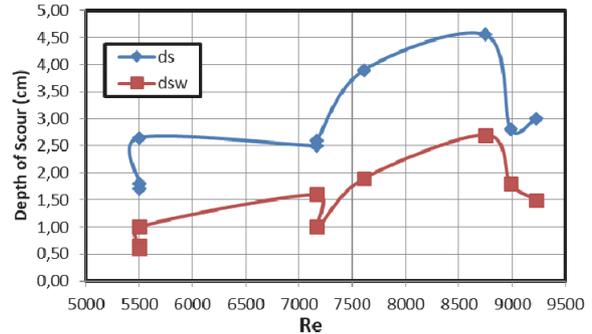


Figure 6. Variation of scour depth with Reynolds number for cases with and without SGFP

Table 2 shows the efficiency (E) of using SGFP and possible maximum (d_{smax}) and potential (d_{pot}) scour depth values. The above values were computed using equations (1), (2), and (3), respectively. It is clear from Table 2 that the range of E values is between (35.71–66.67%) which considers a good indicator for adopting the SGFP device to reduce the risk of scour around the pier during the serviceability life of bridge structure. Also it can be shown from this table that the scour depth for case with SGFP (d_{sw}) gives a good result comparing with the corresponding d_{smax} and d_{pot} values.

Table 2

SGFP efficiency, maximum and potential scour depths

Run number (without & with SGFP)	D_p (cm)	H (m)	d_s (cm)	d_{sw} (cm)	E (%)	d_{smax} (cm)	d_{pot} (cm)
1 & 2	2.5	0.028	1.70	0.65	61.76	6	4.88
3 & 4	2.5	0.032	2.50	1.60	36.00	6	5.00
5 & 6	2.5	0.036	2.80	1.80	35.71	6	5.11
7 & 8	5.0	0.028	1.80	0.60	66.67	12	8.25
9 & 10	5.0	0.032	2.60	1.00	61.54	12	8.51
11 & 12	5.0	0.036	3.00	1.50	50.00	12	8.81
13 & 14	7.5	0.028	2.65	1.00	62.26	18	10.96
15 & 16	7.5	0.033	3.90	1.90	51.28	18	11.54
17 & 18	7.5	0.036	4.55	2.70	40.66	18	11.81

Table 3

Safety factor of whole system

Run number (without & with SGFP)	Dp (cm)	d _s (cm)	d _{sw} (cm)	(SF)	(SF) _w
1 & 2	2.5	1.70	0.65	4.71	12.31
3 & 4	2.5	2.50	1.60	3.20	5.00
5 & 6	2.5	2.80	1.80	2.86	4.44
7 & 8	5.0	1.80	0.60	4.44	13.33
9 & 10	5.0	2.60	1.00	3.08	8.00
11 & 12	5.0	3.00	1.50	2.67	5.33
13 & 14	7.5	2.65	1.00	3.02	8.00
15 & 16	7.5	3.90	1.90	2.05	4.21
17 & 18	7.5	4.55	2.70	1.76	2.96

Table 3 shows the values of safety factor (SF) against scouring for cases with and without SGFP. The SF values were estimated using equation (4). Safety factor with SGFP gives excellent response of pier under turbulent flow regime. Also, as the pier diameter, flow velocity, and depth of water increase the safety factor decreases.

Conclusion

A series of laboratory experiments were conducted in an open channel flume to study the effect of the SGFP device in reducing the scour effects around a bridge pier. Regardless of using SGFP device, it is found that the scour depth increases with time until it reach the equilibrium value. Also the scour depth increases with increasing in pier diameter, water depth, and flow intensity. Complex non-linear relations were obtained for scour depth versus Froude number and scour depth versus Reynolds number for both cases with and without SGFP device. For the same flow characteristics, flow velocity and depth, the scour depth for case with SGFP was reduced clearly compared with that for case without SGFP. An acceptable range of scour reduction efficiency (35.71–66.67%) was obtained when using SGFP. Also high safety factors were obtained with adopting SGFP. Also it is found that the scour depth for case with SGFP is small comparing with corresponding potential and maximum scour depth values. This means that the SGFP device has great effect in dissipating the turbulence kinetic energy of vertices and eddies that generated around the pier and in turns reducing the risk of scour.

References

1. Tafarojnoruz A, Gaudio R, Dey S. Flow-Altering Countermeasures Against Scour at Bridge Piers: Review. *Journal of Hydraulic Research*. 2010;48(4):441–452.

2. Singh CP, Setia B, Verma DVS. Collar-Sleeve Combination as a Scour Protection Device around a Circular Pier. *Proceedings of Theme D, 29th Congress on Hydraulics of Rivers, Water Works and Machinery, Chinese Hydraulic Engineering Society, Beijing, China*. 2001;16(21): 202–209.

3. Moncada MAT, Aguirre-Pe J, Bolivar JC, et al. Scour Protection of Circular Bridge Piers with Collars and Slots. *Journals of Hydraulic Research*. 2009;47(1): 119–126.

4. Shariaty H. *Effect of the Shape of the Collar on Local Scour around Bridge Piers* (M.Sc. Thesis, Islamic Azad University). 2010.

5. Khassaf SI, Abed MS. Experimental Study of Local Scour around Circular Pier Fitted with Collar. *Kufa Journal of Engineering*. 2012;3(2):87–100.

6. Nohani E, Bahadoribirgani B, Hahisharafi R. Evaluation and Comparison of Collar and Collar with Slot Methods in Reducing Local Scour of Cylindrical Bridge Piers. *Applied Research Journal*. 2015;1(5):348–353.

7. Chiew Y, Lim S. Protection of Bridge Piers Using a Sacrificial ill. *Water & Maritime Engineering Journal, Proceedings of the Institute of Civil Engineers, Thomas Telford Journals*. 2003;156(1):53–62.

8. Grimaldi C, Gaudio R, Calomino F, et al. Countermeasures Against Local Scouring at Bridge Piers: Slot and Combined System of Slot and Bed Sill. *J. of Hydraulic Engineering*. 2009;135(5):425–431.

9. Abdulwahed AA. *Experimental Investigation of Control Local Scour at Bridge Piers Using Bed Sill* (M.Sc. Thesis, Kufa University, Iraq). 2012.

10. Tafarojnoruz A, Gaudio R, Calomino F. Evaluation of Flow-Altering Countermeasures against Bridge Pier Scour. *J. of Hydraulic Engineering*. 2012;138(3):297–305.

11. Chiew YM. Scour Protecting at Bridge Piers. *J. of Hydraulic Engineering, ASCE*. 1992;118(9):1260–1269.

12. Shen HW, Schneider VR. Local Scour around Bridge Piers. *Journal of Hydraulic Division, Proceeding of the ASCE*. 1969;95(6):1919–1941.

13. Parker G. Transport of gravel and sediment mixtures. *Sedimentation engineering: processes, measurements, modeling and practice, ASCE Manual of Practice*. 2008;110:165–251.

14. Melville BW, Sutherland AJ. Design Method for Local Scour at Bridge Piers. *J. of Hydraulic Engineering*. 1988;114(10):210–1226.

15. Melville BW, Chiew YM. Time Scale for Local Scour at Bridge Piers. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1999;125(1):59–65.

16. Melville BW, Coleman SE. *Bridge Scour*. Water Resources Publications, LLC; 2000.

17. Ettema R, Constantinrscu G, Melville BW. Evaluation of Bridge Research: Pier Scour Processes and Predictions. *NCHRP Web-Only Document 175*. 2011. Available from: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.463.6646&rep=rep1&type=pdf>

18. Melville BW, Sutherland AJ. Design method for local scours at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1988;114(10):1210–1226.

19. Melville BW. Pier and abutment scour: Integrated approach. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1997; 123(2):125–136.

20. Breusers HNC, Nicollet G, Shen HW. Local Scour around Cylindrical Piers. *J. of Hydraulic Research*. 1977; 15(3):211–252.

21. Raudkivi AJ. Functional Trends of Scour at Bridge Piers. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1986;112(1):1–13.

For citation

Abdulhussein IA, Al-Asadi K, Qasim RM. Pier scouring reduction using a Strip Guide Flow Panel device. RUDN Journal of Engineering Researches. 2019;20(3):229–235. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-3-229-235>

Научная статья

Уменьшение влияния процесса очистки пирса при использовании устройства Strip Guide Flow Panel

Ихсан А. Абдулхусейн, Рафи М. Касим

Южный технический университет, Республика Ирак, Басра, ул. Аль-Зубайр

Халид Аль-Асади

Университет Басры, Республика Ирак, Басра, шоссе Кармат Али

История статьи:

Поступила в редакцию: 01 июня 2019

Доработана: 27 июля 2019

Принята к публикации: 06 сентября 2019

Ключевые слова:

уменьшение размыва, опоры моста, гидротехнические сооружения

С целью изучения эффекта использования устройства Strip Guide Flow Panel (SGFP) для уменьшения влияния процесса очистки вокруг пирса был проведен ряд лабораторных экспериментов. Применялись три цилиндрических пирса разного диаметра и три различных устройства SGFP. Каждое устройство SGFP моделировалось с 2 рычагами, соединенными на одном из их краев под прямым углом. Длина каждого рычага была выбрана таким образом, чтобы покрыть диаметр пирса. Каждое устройство SGFP устанавливалось на восходящей поверхности соответствующего диаметра цилиндрического пирса на уровне желоба. В качестве основного материала выступал осадок однородного размера. На основании экспериментальных данных получен приемлемый диапазон снижения влияния очистки (35,71–66,67 %) и высокие коэффициенты гидравлической безопасности при использовании устройства SGFP. Также установлено, что глубина очистки при использовании SGFP мала по сравнению с соответствующими потенциальными и максимальными значениями глубины очистки. Следовательно, устройство SGFP может работать как рассеиватель кинетической энергии турбулентности, уменьшая риск размыва вокруг пирса в течение срока службы мостовой конструкции

Для цитирования

Abdulhussein I.A., Al-Asadi K., Qasim R.M. Pier scouring reduction using a Strip Guide Flow Panel device (Уменьшение влияния процесса очистки пирса при использовании устройства Strip Guide Flow Panel) // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. № 3. С. 229–235. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-3-229-235>

Ихсан А. Абдулхусейн, доцент департамента экологии и загрязнения окружающей среды Инженерно-технического колледжа Басры Южного технического университета, кандидат технических наук; drengihssan@stu.edu.iq

Халид Аль-Асади, преподаватель факультета гражданского строительства Инженерного колледжа Университета Басры, кандидат технических наук.

Рафи М. Касим, преподаватель департамента экологии и загрязнения окружающей среды Инженерно-технического колледжа Басры Южного технического университета, магистр.



DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-3-236-243

УДК 629.052

Научная статья

Применение интеллектуальных систем на транспорте

И.М. Попова, С.В. Тимофеев

Филиал Самарского государственного университета путей сообщения в г. Саратове,
Российская Федерация, 410004, Саратов, ул. Астраханская, 1А

И.К. Данилов

Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

История статьи:

Поступила в редакцию: 05 сентября 2019

Доработана: 07 октября 2019

Принята к публикации: 25 октября 2019

Ключевые слова:

железнодорожный транспорт, интеллектуальная транспортная система, эффективность работы, техническое состояние локомотивного оборудования, автоматизированная система контроля параметров работы, межремонтный пробег

В статье рассматривается применение интеллектуальных транспортных систем на транспорте. Целями разработки интеллектуальных транспортных систем на железнодорожном транспорте являются неукоснительное выполнение требований по обеспечению безопасности перевозок, сокращение уровня влияния на окружающую среду, существенное повышение эффективности производственной деятельности. На основе полученных данных программное обеспечение производит автоматический учет, контроль и анализ расхода топливно-энергетических ресурсов. При этом на экране монитора наглядно в режиме реального времени отражается динамика изменения показателей топливоиспользования, фактические и расчетные затраты дизтоплива. В случае необходимости система поможет выявить причины несостыковки этих параметров и оперативно связаться с локомотивной бригадой для оказания квалифицированной помощи по их устранению. Важно, что конструкция аппаратной части и структура программного обеспечения предусматривает расширение ее функциональных возможностей, в том числе за счет организации непрерывного видеонаблюдения за действиями локомотивных и ремонтных бригад, увеличения количества измеряемых параметров, создания замкнутой системы контроля расхода топлива в локомотивном хозяйстве. Применение данных систем позволяет получить интегральную оценку теплотехнического состояния локомотива с дальнейшей научно-обоснованной коррекцией межремонтных пробегов, проконтролировать его местонахождение и решить множество других задач, что способствует увеличению межремонтных пробегов и сроков эксплуатационной работы локомотива.

Введение

В настоящее время железнодорожный транспорт является сложной организационно-технической системой, управление которой при помощи

традиционных подходов практически невозможно. Сложность транспортной инфраструктуры и ее объектов (железнодорожных узлов, станций, транспортных коридоров и т. д.) не позволяет осуществлять работу в полностью автоматическом режиме [1–3]. Эффективное управление данной системой с привлечением только классических методов решения задач математического моделирования невозможно, поэтому возникает вопрос о применении интеллектуальных систем, которые наряду с точными математическими моделями используют данные и знания, накопленные в процессе их деятельности.

Попова Ирина Михайловна, заместитель директора по высшему образованию, заведующая кафедрой инженерных, гуманитарных, естественно-научных и общепрофессиональных дисциплин филиала СамГУПС в г. Саратове, кандидат экономических наук, доцент; imporova@mail.ru; eLIBRARY SPIN-код: 1537-0026.

Тимофеев Сергей Валерьевич, старший преподаватель кафедры инженерных, гуманитарных, естественно-научных и общепрофессиональных дисциплины филиала СамГУПС в г. Саратове; eLIBRARY SPIN-код: 3770-2933.

Данилов Игорь Кеворкович, директор департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН; доктор технических наук, профессор; eLIBRARY SPIN-код: 1633-2700.

© Попова И.М., Тимофеев С.В., Данилов И.К., 2019

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

1. Постановка задачи

В процессе производства новых локомотивов и модернизации старых на них устанавливаются бортовые (встроенные) системы управления и диагностики, которые, помимо решения задач оперативного диагностирования всех систем тепловоза, способны контролировать и накапливать целый ряд параметров оборудования. Детальный анализ зарегистрированных данных помогает определить текущее техническое состояние локомотивного оборудования и вплотную подойти к обоснованной корректировке сроков планово-предупредительных ремонтов локомотивов на основе учета текущего технического состояния. К тому же при наличии удаленного беспроводного контроля параметров локомотива возможно выявление неисправностей еще в процессе его эксплуатации прямо во время поездки, что позволяет обеспечить оперативный ремонт и эффективное использование всего рабочего времени специалистов в депо по прибытии локомотива.

2. Материалы и методы

В ОАО «ВНИКТИ» разработана и в настоящее время внедряется на новых тепловозах автоматизированная система контроля параметров работы дизельного подвижного состава и учета дизельного топлива (АСК).

Данная система предназначена для измерения и регистрации в автоматическом режиме на борту локомотива основных параметров, характеризующих режим и экономичность работы силовой установки, передачи этих данных по беспроводному каналу связи на сервер автоматизированной системы мониторинга работы тепловозов (АС МРТ) [4]. Кроме того, система АСК осуществляет сбор, регистрацию и передачу всей оперативной диагностической информации, получаемой от бортовых систем управления и диагностики локомотива, по беспроводному каналу связи в соответствующую базу данных автоматизированного рабочего места (АРМ), устанавливаемую в депо эксплуатации и ремонта (рис. 1).

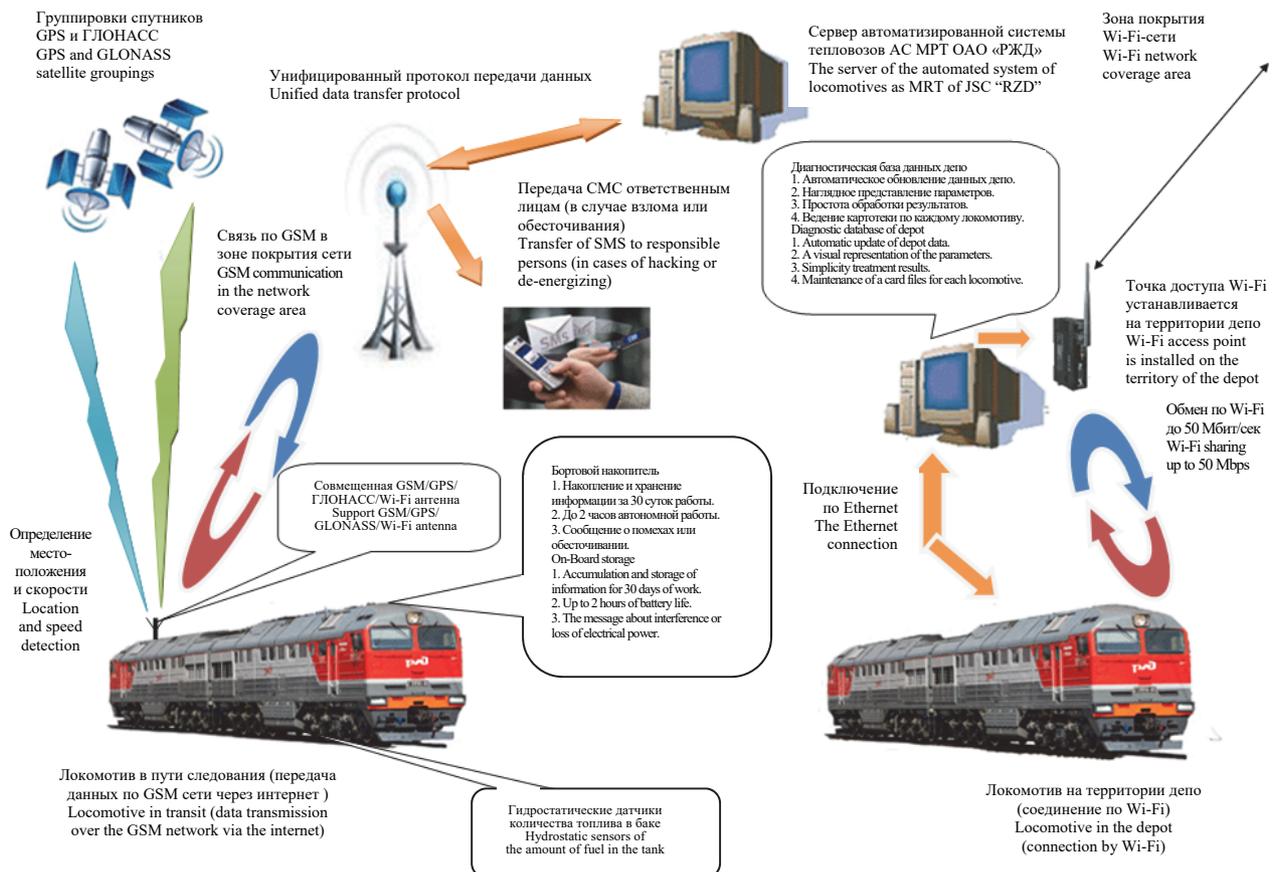


Рис. 1. Принцип работы системы АСК
[Figure 1. Principle of operation of ASC system]

В системе АСК реализованы два независимых беспроводных канала передачи информации стандартов GSM (GPRS) и IEEE 802.11 b/g (Wi-Fi). Передача параметров может осуществляться как в пути следования локомотива с использованием мобильного GPRS-Интернет соединения, так и по прибытии в депо с использованием технологии Wi-Fi или же проводного соединения Internet. В целях сокращения объема передаваемых через сеть GSM данных предусмотрена возможность передачи на стационарный АРМ не всех параметров, а только выбранных за определенный промежуток времени и при определенных условиях путем SQL-запроса [4]. Так, оператор АРМ диагностики может запросить интересующие его данные о мощности тягового генератора и количестве топлива в баке на 15-й позиции контроллера при температуре воды выше 70 °С и масла выше 60 °С за заданный отрезок времени, то есть любой интересующий параметр тепловоза и его энергетической установки в режиме реального времени (онлайн). Это позволяет значительно снизить расходы на оплату GPRS-Internet-трафика, уменьшить время ожидания на обмен данными с локомотивом и необходимые объемы памяти для хранения информации, сократить время ее обработки. При нахождении тепловоза в пути следования система АСК непрерывно фиксирует все диагностические параметры бортовой системы, а также измеряет количество (массу) топлива в баке, скорость движения, географическую координату. АСК осуществляет накопление ресурсных показателей работы основного оборудования тепловоза (выполненная работа дизель-генератором,

время работы основного оборудования локомотива, число циклов включения/отключения компрессора, вентиляторов, время работы оборудования на предельных режимах по току и температуре, расход топлива, наработка коммутационной аппаратуры, срабатывание аппаратов защиты).

3. Расчет расхода топлива

Информация, передаваемая на сервер АС МРТ, предназначена для службы эксплуатации и может использоваться для контроля потребления топлива тепловозами [4]. При этом расчетный расход затраченного дизельного топлива на каждом из участков пути необходимо определить на основании предварительно выстроенных диаграмм скорости $v = f(s)$ и времени $t = f(s)$ и имеющихся для каждого тепловоза данных о расходе топлива при определенном режиме работы дизеля, то есть

$$G = f(v, \Pi_k), \tag{1}$$

где Π_k – позиция управления контроллера.

Общий расход дизельного топлива за одну поездку определяем по формуле [5]:

$$E = \sum_{i=1}^n G_i \cdot \Delta t_i + g_x \cdot \Delta t_x, \tag{2}$$

где $G_i \cdot \Delta t_i$ – расход в тяговом режиме за промежуток времени Δt_i ; $g_x \cdot \Delta t_x$ – расход на холостом ходе тепловоза.

Расчеты приведены в таблице.

Таблица

Технико-эксплуатационные показатели
[Table. Technical and operational indicators]

Номер элемента пути [The number of the road element]	V_{start} км/ч [km/h]	V_{final} км/ч [km/h]	$V_{average}$ км/ч [km/h]	G_i кг/мин [kg/min]	t_i мин [min]	$G_i \cdot t_i$ кг [kg]
1	2	3	4	5	6	7
1	60	65	62,5	20,4	0,5	10,2
2	70	71	70,5	20,4	0,3	6,12
3	55	51	53	20,4	0,3	6,12
4	45	36,5	41,25	20,4	1,5	30,6
5	45	50	47,5	20,4	0,6	12,24
6	26,6	26,6	26,6	20,4	4,1	83,64
7	50	53	51,5	20,4	0,4	8,16
8	70	73	71,5	20,4	0,3	6,2
9	73	75	74	20,4	0,5	10,2
10	74	65	69,5	20,4	0,8	16,32
11	65	67,5	66,25	20,4	1,6	32,64
12	67,5	60	63,75	20,4	2,3	46,92
ИТОГО [TOTAL]					31,1	631,32

Для каждого временного промежутка определяется средняя скорость движения поезда:

$$V_{cp} = \frac{V_{ni} + V_{ki}}{2}. \quad (3)$$

По рассчитанной средней скорости из характеристики локомотива определяется расход дизельного топлива за одну минуту G_i на наивысшей позиции контроллера управления [5]. Расход топлива на холостом ходу составил $g \cdot 0,54$ кг/мин. Расход дизельного топлива на тягу поезда:

$$G_i \cdot t_i = 631,32 \text{ кг},$$

$$g_x \cdot t_x = 0,54 \cdot 8,5 = 4,59 \text{ кг},$$

$$E = 631,32 + 4,59 = 635,91 \text{ кг}.$$

Для того чтобы сравнить расход топлива разными локомотивами необходимо использовать удельный расход топлива на измеритель выполненной работы 10^4 т-км брутто:

$$e = \frac{E}{m_c \cdot L} \cdot 10^4 \text{ [кг/10}^4 \text{ т-км брутто]},$$

где e – удельный расход топлива, кг/10⁴ т-км брутто; E – расход топлива на тягу поезда, кг; L – длина заданного участка, км.

$$e = \frac{635,91}{5734 \cdot 32,75} \cdot 10^4 = 33,86 \text{ [кг/10}^4 \text{ т-км брутто]}.$$

Для сравнения расхода разных марок и сортов дизельного топлива, имеющих разную температуру сгорания, используют так называемое условное топливо:

$$e_y = e \cdot \mathcal{E}, \quad (4)$$

где e_y – удельный расход условного топлива, кг/10⁴ т-км брутто; $\mathcal{E} = 1,43$ – тепловой эквивалент дизельного топлива.

$$e_y = 33,86 \cdot 1,43 = 48,42 \text{ [кг/10}^4 \text{ т-км брутто]}.$$

Разработанные алгоритмы работы системы обработки данных и регистрации позволяют расшифровывать и анализировать исходные файлы регистрации (ФР) с выводом результатов в виде графиков и таблиц по всем ФР и с разбивкой по сменам работы машинистов. Так, расчетный рас-

ход топлива B_p за смену определяется как сумма расходов на режимах холостого хода – B_{p_xx} и нагрузки – $B_{p_н}$ дизеля:

$$B_p = B_{p_xx} + B_{p_н}. \quad (5)$$

Расчетный расход топлива на холостом ходу за смену – B_{p_xx} (кг) определяется как

$$B_{p_xx} = \sum_p B_{cp} \cdot \frac{\Delta t_{xxp}}{3600}, \quad (6)$$

где B_{cp} – часовой расход топлива на холостом ходу по нормативной характеристике дизеля для позиции контроллера – p , кг/ч; Δt_{xxp} – зарегистрированное время работы дизеля на холостом ходу при позиции контроллера – p , ч.

Расчетный расход топлива на режимах номинальной нагрузки $B_{p_н}$, кг определяется на основе уравнения баланса энергии на коленчатом валу дизеля, выработанной при расходе топлива за время работы в данном режиме – $\Delta t_{н}$, с [6]:

$$B_{p_н} = \frac{\sum_i^n P_{всп}(w_i) \cdot \Delta t_i + \frac{1}{\eta_r} \cdot \sum_i^n I_{ri} \cdot U_{ri} \cdot \Delta t_i}{Q \cdot f(P_E)}, \quad (7)$$

где $P_{всп}(w_i)$ – мощность на привод вспомогательных агрегатов в i -й момент времени, Вт; Δt_i – шаг изменения времени регистрации параметров, с; U_{ri} – напряжение генератора в i -й момент времени, В; Q – низшая теплота сгорания дизельного топлива, Дж/кг; w_i – частота вращения коленчатого вала в i -й момент времени, мин⁻¹; I_{ri} – ток тягового генератора в i -й момент времени, А; η_r – средний КПД тягового генератора; $f(P_E)$ – эффективный КПД дизеля при реализации средней эффективной мощности дизеля P_E , определяемой из выражения

$$P_E = \frac{\sum_i^n P_{всп}(w_i) \cdot \Delta t_i}{t_H} + \frac{1}{\eta_r} \cdot \frac{\sum_i^n I_{ri} \cdot U_{ri} \cdot \Delta t_i}{t_H}. \quad (8)$$

Заключение

Установлено, что после внедрения систем АСК-РПРТ (РПРТ – регистратор параметров работы тепловоза) снижение удельного расхода дизельного топлива в июне 2018 г. по сравнению с

июнем 2017 г. на рассмотренных пятнадцати участках работы тепловозов составило 12,8 %. После внедрения систем АСК в локомотивное депо на этих же участках по статистике за 4 месяца снижение фактических удельных расходов топлива изменялось от 3,5 до 12,4 %. Кроме того, в процессе эксплуатации локомотива осуществляется передача оперативных данных системы диагностики на сервер диагностики [7]. Помимо основных параметров работы контролируемого оборудования передается информация о зарегистрированных неисправностях тепловоза (аварийные и предупредительные сообщения и связанные с ними

контролируемые параметры), ресурсных показателей работы оборудования [8–10]. Информация, хранящаяся в сервере диагностики, предназначена для использования службой ремонта, разработчиками и изготовителями оборудования тепловозов. Передача данных по каналам сети Интернет осуществляется с использованием защищенного VPN-соединения (Virtual Private Network) [11–13]. При заходе тепловоза в депо и обнаружении системой АСК беспроводной сети происходит автоматическая выгрузка всего архива накопленных параметров в диагностическую базу данных (рис. 2).

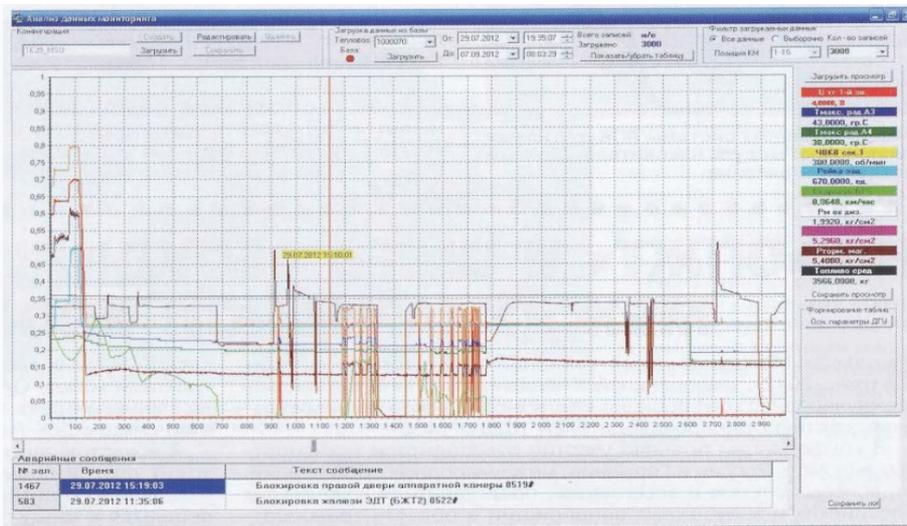


Рис. 2. Скриншот программы для обработки архивов данных АСК
Figure 2. Screenshot of the program for processing archives of ASC data

Данная информация предназначена для дальнейшей обработки с целью определения технического состояния контролируемого оборудования. Для этого в локомотивное депо оборудовано АРМ диагностики с базой данных и развернута сеть беспроводной передачи данных IEEE 802.11 b/g (Wi-Fi). Система АСК контролирует количество топлива в баке тепловоза при помощи двух датчиков давления, устанавливаемых по диагонали или оси топливного бака. В датчиках используется цифровой выходной сигнал с интерфейсом RS-485, обмен с платой процессора АСК осуществляется по протоколу HART [14–15]. В состав системы АСК входят модуль накопителя, два датчика количества топлива, антенна, комплект кабелей. Внешнее питание модуля-накопителя осуществляется от бортовой сети локомотива, к модулю подключается совмещенная GSM/Wi-Fi/

GPS/ГЛОНАСС-антенна. Встроенный энергонезависимый накопитель рассчитан на хранение объема данных, регистрируемых в течение 30 суток работы тепловоза с последующим кольцевым обновлением информации. В настоящее время определение географической координаты и скорости тепловоза в модуле накопителя осуществляется по данным системы GPS. Однако модуль может быть легко адаптирован для использования навигационных данных от системы ГЛОНАСС. Модуль накопителя имеет источник автономного питания, рассчитанный на 2 часа работы системы в случае отключения АСК от аккумуляторной батареи тепловоза [16]. При отключении внешнего питания АСК или вскрытии модуля-накопителя производится информирование ответственных лиц путем отправки SMS на два телефонных номера. В системе АСК реализована функция самодиагностики.

агностики. Осуществляется контроль ряда параметров платы процессора, температуры внутри модуля-накопителя, последовательных каналов связи (обмен с системой диагностики, датчиками топлива), наличия GSM-сети, связи со спутниками системы GPS [16].

Таким образом, интеллектуальные транспортные системы позволяют получить интегральную оценку теплотехнического состояния локомотива с дальнейшей научно обоснованной коррекцией межремонтных пробегов и постановкой локомотива в ремонт, что увеличивает сроки его эксплуатационной работы. Одним из важных аспектов применения системы непрерывного удаленного контроля технических параметров является снижение расхода дизельного топлива в среднем на 5–10 %, что позволит сделать работу предприятий железнодорожного транспорта более эффективной.

Список литературы

1. Kulik A., Dergachov K., Lytvynenko T. Development and research of differential mode GNSS model for intelligent transport functioning providing // *Transport problems*. 2012. Vol. 7. No. 4. Pp. 71–77.

2. Koropets P. The influence of electromagnetic processes on stability of locomotives traction drive in the slipping mode // *Transport problems*. 2014. Vol. 9. No. 2. Pp. 41–48.

3. Fellner A., Banaszek K., Trómiński P. The satellite based augmentation system – EGNOS for non-precision approach global navigation satellite system // *Transport problems*. 2012. Vol. 7. No. 1. Pp. 5–20.

4. Попова И.М., Данилов И.К., Попова Е.А. Навигационные системы как средства повышения безопасности перевозок на пассажирских автопредприятиях // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2013. № 61–62. С. 284–288.

5. Давыдов С.С. Экономические аспекты цифровой железной дороги // *Транспортные системы и технологии*. 2017. Т. 3. № 2. С. 39–41.

6. Белозеров В.Л. Социально-экономические аспекты инновационных проектов на транспорте // *Транспортные системы и технологии*. 2016. Т. 2. № 1. С. 5–15.

7. Капитанов В.Т., Чубуков А.Б. О рационализации процесса внедрения интеллектуальной транспорт-

ной системы // *Мир транспорта и технологических машин*. 2015. № 2 (49). С. 117–123.

8. Лахметкина Н.Ю., Щелкунова И.В., Рогова Д.А. Развитие транспортных систем в цифровой повестке // *Интеллект. Инновации. Инвестиции*. 2019. № 4. С. 114–120.

9. Осокин О.В. Интеллектуальное сопровождение производственных процессов на железнодорожном транспорте // *Транспорт Урала*. 2013. № 4 (39). С. 3–7.

10. Розенберг Е.Н., Батраев В.В. Интеллектуальная система управления и обеспечения безопасности движения на ВСМ // *Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД»*. 2017. № 1. С. 10–22.

11. Розенберг И.Н. Интеллектуальное управление транспортными системами // *Государственный советник*. 2016. № 3 (15). С. 26–32.

12. Плеханов П.А., Шматченко В.В. Стандартизация магнитолевитационных транспортных систем в России // *Транспортные системы и технологии*. 2018. Т. 4. № 4. С. 32–43.

13. Поляков В.А., Хачапуридзе Н.М. Модель процесса реализации тяговой силы двигателя магнитолевитирующего поезда // *Наука и прогресс транспорта*. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени акад. В. Лазаряна. 2016. № 4 (64). С. 55–62.

14. Ланидус Б.М., Мачерет Д.А. Методология оценки и обеспечения эффективности инновационных транспортных систем // *Экономика железных дорог*. 2016. № 7. С. 16–25.

15. Kulik A., Dergachov K., Lytvynenko T. Methods for diagnostic of the technical condition of vehicles employing high precise satellite data // *Transport problems*. 2014. Vol. 9. No. 1. Pp. 119–128.

16. Zaitsev A.A., Rolle I.A., Evstafeva M.V., Sychugov A.N., Telichenko S.A. Determination of the energy indices of alternating current electric rolling stock using computer simulation // *Russian electrical engineering*. 2018. No. 89 (10). Pp. 612–616.

Для цитирования

Попова И.М., Тимофеев С.В., Данилов И.К. Применение интеллектуальных систем на транспорте // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. № 3. С. 236–243. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-3-236-243>

Application of intelligent systems in transport

Irina M. Popova, Sergey V. Timofeev

Branch of Samara State University of Railway Transport in Saratov, *1A Astrahanskaya St., Saratov, 410004, Russian Federation*

Igor K. Danilov

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), *6 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russian Federation*

Article history:

Received: September 05, 2019

Revised: October 07, 2019

Accepted: October 25, 2019

Keywords:

railway transport, intelligent transport system, efficiency, technical condition of locomotive equipment, automated control system of operation parameters, system, overhaul mileage

The article discusses the application of intelligent transport systems for railway transport. The purpose of developing intelligent transport systems on railway transport is to strictly comply with the requirements for ensuring transport safety, reducing the level of environmental impact, significantly improving the efficiency of production activities. The software makes automatic accounting, control and analysis of fuel and energy resources consumption on the basis of the obtained data. At the same time, the dynamics of changes in fuel consumption indicators, actual and estimated costs of diesel fuel are visually reflected in real time on the monitor screen. If necessary, the system will help to identify the reasons for non-matching of these parameters and quickly contact the locomotive team to provide qualified assistance in their elimination. It is important that the hardware structure and the structure of the system software expand functionality, providing continuous operation and repair work, increasing the number of measured parameters, creating a closed fuel consumption control system in a locomotive economy. The use of these systems makes it possible to obtain an integrated assessment of the heat engineering condition of a locomotive with further scientifically substantiated correction of overhaul runs, to control its location and solve many other problems, which contributes to an increase in overhaul runs and the operational life of the locomotive.

References

1. Kulik A, Dergachov K, Lytvynenko T. Development and research of differential mode GNSS model for intelligent transport functioning providing. *Transport problems*. 2012;7(4):71–77.
2. Koropets P. The influence of electromagnetic processes on stability of locomotives traction drive in the slipping mode. *Transport problems*. 2014;9(2):41–48.
3. Fellner A, Banaszek K, Trómiński P. The satellite based augmentation system – EGNOS for non-precision approach global navigation satellite system. *Transport problems*. 2012;7(1):5–20.
4. Popova IM, Danilov IK, Popova EA. Navigacionnye sistemy kak sredstva povysheniya bezopasnosti perevozok na passazhirskih avtopredpriyatijah [Navigation systems as a means of improving transport safety in passenger transport enterprises]. *Bulletin of Kharkiv national automobile and road university*. 2013;(61–62):284–288. (In Russ.)
5. Davydov SS. Jekonomicheskie aspekty cifrovoj zheleznoj dorogi [Economic aspects of digital railway]. *Transportation systems and technology*. 2017;3(2):39–41. (In Russ.)
6. Belozarov VL. Social'no-jekonomicheskie aspekty innovacionnyh proektov na transporte [Socio-economic aspects of innovative transport projects]. *Transportation systems and technology*. 2016;2(1):5–15. (In Russ.)
7. Capitanov VT, Chubukov AB. O racionalizacii processa vnedrenija intellektual'noj transportnoj sistemy [On streamlining the process of introducing an intelligent transport system]. *The world of transport and technological machines*. 2015;2(49):117–123. (In Russ.)

Irina M. Popova, Deputy Director for higher education, Head of the Department of Engineering, Humanities, Natural Science and General Professional Disciplines of SSURT branch in Saratov, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor; impopova@mail.ru; eLIBRARY SPIN-code: 1537-0026.

Sergey V. Timofeev, senior lecturer of the Department of Engineering, Humanities, Natural Science and General Professional Disciplines of SSURT branch in Saratov; eLIBRARY SPIN-code: 3770-2933.

Igor K. Danilov, Director of the Department of Mechanical Engineering and Instrumentation at Academy of Engineering in RUDN University, Doctor of Technical Sciences, Professor; eLIBRARY SPIN-code: 1633-2700.

8. Lakhmetkina NYu, Schelkunova IV, Rogova DA. Razvitie transportnyh sistem v cifrovoj povestke [Development of digital infrastructure transport systems]. *Intelligence. Innovation. Investments*. 2019;(4):114–120. (In Russ.)

9. Osokin OV. Intellektual'noe soprovozhdenie proizvodstvennyh processov na zheleznodorozhnom transporte [Intellectual support of production processes in railway transport]. *Transport of the Urals*. 2013;4(39):3–7. (In Russ.)

10. Rosenberg EN, Batraev VV. Intellektual'naja sistema upravlenija i obespechenija bezopasnosti dvizhenija na VSM [Intelligent control system and ensuring traffic safety on the high-speed rail]. *Bulletin of the Joint Scientific Council of Russian Railways*. 2017;(1):10–22. (In Russ.)

11. Rosenberg IN. Intellektual'noe upravlenie transportnymi sistemami [Intelligent Transport Management]. *State advisor*. 2016;3(15):26–32. (In Russ.)

12. Plekhanov PA, Shmatchenko VV. Standartizacija magnitolevitacionnyh transportnyh sistem v Rossii [Standardization of maglev transportation systems in Russia]. *Transportation systems and technology*. 2018;4(4):32–43. (In Russ.)

13. Polyakov VA, Khachapuridze NM. Model' processa realizacii tjagovoj sily dvigatelja magnitolevitirujushhego poezda [The process model of implementation

of the traction engine train magnetoresitive]. *Science and transport progress. Bulletin of Acad. V. Lazaryan Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. 2016; 4(64):55–62. (In Russ.)

14. Lapidus BM, Macheret DA. Metodologija ocenki i obespechenija jeffektivnosti innovacionnyh transportnyh sistem [Methodology for assessing and ensuring the effectiveness of innovative transport systems]. *Economy of railways*. 2016;(7):16–25. (In Russ.)

15. Kulik A, Dergachov K, Lytvynenko T. Methods for diagnostic of the technical condition of vehicles employing high precise satellite data. *Transport problems*. 2014;9(1):119–128.

16. Zaitsev AA, Rolle IA, Evstafeva MV, Sychugov AN, Telichenko SA. Determination of the energy indices of alternating current electric rolling stock using computer simulation. *Russian electrical engineering*. 2018; 89(10):612–616.

For citation

Popova IM, Timofeev SV, Danilov IK. Application of intelligent systems in transport. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(3):236–243. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-3-236-243>. (In Russ.)

НАУКИ О ЗЕМЛЕ
EARTH SCIENCE

DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-3-244-253

UDC 620.193.47

Research paper

The influences of the crude oils on the decay of metals**Suresh Aluvihara**

University of Peradeniya, Peradeniya, 20400, Democratic Socialist Republic of Sri Lanka

Jagath K. Premachandra

University of Moratuwa, Katubedda, 10400, Democratic Socialist Republic of Sri Lanka

Article history:

Received: October 11, 2019

Revised: October 29, 2019

Accepted: October 31, 2019

Keywords:

crude oils, corrosive properties, ferrous metals, decay, weight loss

Crude oils are the essential resources for the usages of industrial purposes in various forms and the refining is a key process of separating the mixture of raw crude oils. In the existing research there were expected to investigate the impact of salts, organic acids, mercaptans and elemental sulfur of crude oils on the corrosion rates of seven different types of ferrous metals in both qualitatively and quantitatively. The chemical compositions of such selected ferrous metals and the above mentioned corrosive properties of two different types of crude oils were measured by the standard instruments and methodologies. A set of similar sized metal coupons were prepared from seven different types of metals and the corrosion rates of such metals were determined by the relative weight loss method. In addition, that the corroded metal surfaces were analyzed under the microscope, decayed metal concentrations and deductions of the initial hardness of metal coupons were measured. According to the obtained results that there were observed the lower corrosion rates from stainless steels with at least 12% of chromium and nickel, higher corrosive impact from salt, formations of FeS, Fe₂O₃, corrosion cracks and pitting corrosion.

Introduction

Crude oils are the mixture of hydrocarbons that containing some of various traces compounds such as corrosive compounds since the occurrence. In fact, that the corrosive compounds play a considerable

role in the most of metal based industries such as the crude oils refining because there are vast range of applications of metals. Usually the term of corrosion is defined as the formations of metal oxides, sulphide or the sulphide on the metal surfaces as a result of either chemical or electrochemical process. According to the mechanism of such corrosion processes the metal need to expose either strong oxidizing agent or any kind of medium which is containing both oxygen and water even in the form of moisture [1–6]. According to the chemical compositions of crude oils they are containing various corrosive compounds foremost of the sulphur com-

Suresh Aluvihara, postgraduate student, Department of Chemical and Process Engineering, University of Peradeniya; sureshaluvihare@gmail.com; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3535-1201>.

Jagath K. Premachandra, Professor, Department of Chemical and Process Engineering, University of Moratuwa.

© Aluvihara S., Premachandra J.K., 2019



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

pounds, salts and organic acids in various forms since the occurrence of crude oils because of the abundance of such compounds in the various interior parts of the earth. The impact of such corrosive compounds may be varied with the different physical and chemical conditions such as the temperature and concentrations [2–15].

In the existing research there were expected to investigate the impact of the salts, organic acids, elemental sulphur and mercaptans of two different types of crude oils on the corrosion rates of seven different types of ferrous metals which are applicable in the industry of crude oil refining for the various tasks under different conditions mainly under different temperature and concentrations. The major experiments were based on the analysis of corrosion of such metals as both qualitatively and quantitatively [1–18].

1. Materials and methods

According to the scope of the research and the requirements seven different types of metals were selected as the samples which are applicable in the industry of crude oil refining at around different units as given in the below:

- Carbon Steel (High) – transportation tubes, storage tanks;
- Carbon Steel (Medium) – storage tanks, vessels;
- Carbon Steel (Mild Steel) – storage tanks, crude distillation units;
- 410-MN: 1.8 420-MN: 2.8 (Stainless Steel) – heat exchangers;
- 410-MN: 1.7 420-MN: 1.7 (Stainless Steel) – crude distillation columns;
- 321-MN:1.4 304-MN:1.9 (Stainless Steel) – crude distillation columns;
- Monel 400 – pre heaters, de-Salter.

The chemical compositions of such metals were detected by the X-ray fluorescence (XRF) detector as the percentages of each composite metal and most of nonmetals excluding carbon.

In the selections of the crude oils two different types of crude oils were selected as the fluids namely as Murban and Das Blend which are slightly different in their chemical compositions including corrosive compounds. Regarding the classifications Das Blend is known as a “sour” crude oil because of the high sulphur content of such crude oils which a predominant factor for the corrosion [2; 4; 9]. The concentrations of the foremost corrosive compounds of both crude oils were measured by the stan-

dard methodologies and instruments as discussed in the Table 1.

Table 1

Analysis of the corrosive compounds of crude oils		
Property	Method	Readings
Sulfur content	Directly used the crude oil samples to the XRF analyzer.	Direct reading
Acidity	Each sample was dissolved in a mixture of toluene and isopropyl and titrated with potassium hydroxide.	End point
Mercaptans content	Each sample was dissolved in sodium acetate and titrated with silver nitrate.	End point
Salt content	Each sample was dissolved in organic solvent and exposed to the cell of analyzer.	Direct reading

A batch of similar sized metals coupons was prepared by the seven different types of selected ferrous metals as six metal coupons from each metal type and altogether forty two metal coupons also the surfaces of such metal coupons were cleaned, weighted, measured the dimensions and observed by the optical microscope until free of any other compounds such as the corroded particles. The prepared metal coupons are shown in the Figure 1.

The prepared metal coupons were immersed in both crude oil containers separately as three homogeneous metal coupons per one crude oil container. The apparatus setup is shown in the Figure 2.

After the 15 days from the immersion one metal coupon from each crude oil container was taken out altogether fourteen metal coupons from all crude oil containers. The corroded metal surfaces were observed under the 400X lens of an optical microscope and the corroded metal surfaces were cleaned by isooctane and sand papers and also measured the final weight of each metal coupon. The corrosion rate of each metal was determined by the relative weight loss method as explained in the below [9; 10].

$$CR = W * k / (D * A * t),$$

where W – weight loss due to the corrosion in grams; k – constant (22,300); D – metal density in g/cm^3 ; A – area of metal piece ($inch^2$); t – time (days); CR – corrosion rate of metal piece.

The same procedure was repeated again twice for another two similar batches of metal coupons in order of after 30 and 45 days immersion time periods to determine the corrosion rates of such metal coupons.

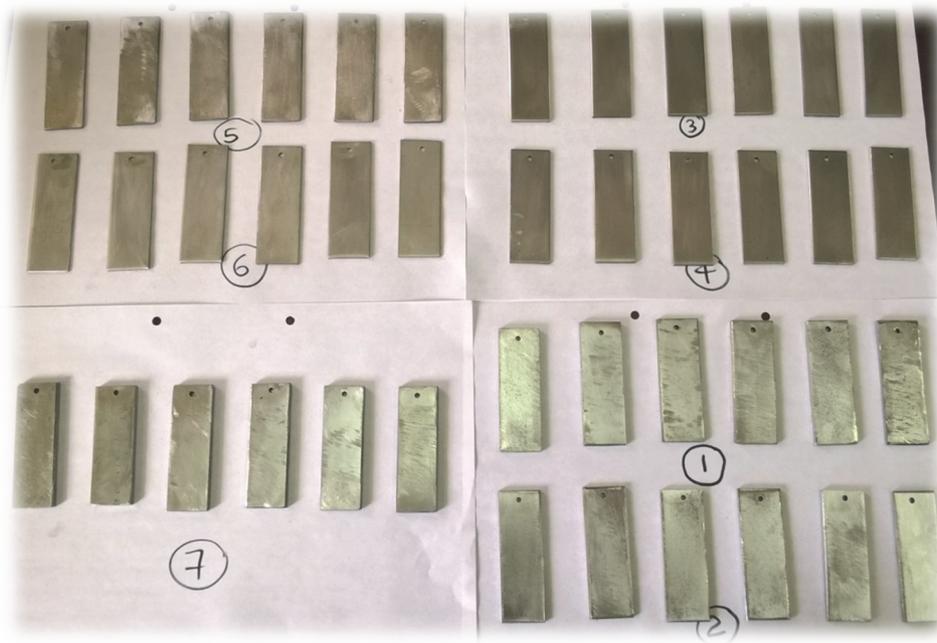


Figure 1. Prepared metal coupons



Figure 2. Apparatus setup

Apart from the determinations of the corrosion rates of metals the decay of metallic elements from metal coupons during the immersion into crude oils were measured by the atomic absorption spectroscopy (AAS). According to the purpose of the current research the decayed ferrous and copper concentrations from metals in to crude oils were measured. In the sample preparation 1 ml of each crude oil sample was diluted with 9 ml of 2-propanol and filtered.

Finally, the variations of the initial hardness of metal coupons due to the corrosion of the metals were analyzed. The initial hardness and the hardness after the corrosion of each metal coupon were measured by the Vicker's hardness tester. The working prin-

ciples of Vicker's hardness tester are shown in the Figure 3 [1; 3; 5].

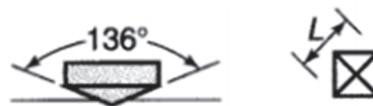


Figure 3. Indenter of the Vicker's hardness tester

$$HV = 1.854 * P^2 / L^2,$$

where P – applied load on the surface of metal; L – diagonal length of square; HV – hardness.

For the one measurement of hardness at least three positions of the metal surfaces were selected randomly and measured the hardness of such points and the average values were interpreted.

2. Results and discussion

The obtained results for the analysis of chemical compositions of selected ferrous metals by the X-ray fluorescence (XRF) have been shortlisted in the Table 2.

According to the results mainly there were identified relatively higher ferrous compositions from car-

bon steels, moderate ferrous concentrations in stainless steels and trace ferrous concentrations in Monel. As a special observation the trace amounts of *d*-block elements were observed from stainless steels such as nickel and chromium. The doping of trace metals into the major raw metal is based on some enhancements of the essential properties of those metals such as the improvements of the strength and the reduction of the corrosion [1; 3–6].

The obtained results for the analysis of major corrosive properties of both crude oils have been interpreted in the Table 3.

Table 2

Chemical compositions of metals												
Metal	Fe (%)	Mn (%)	Co (%)	Ni (%)	Cr (%)	Cu (%)	P (%)	Mo (%)	Si (%)	S (%)	Ti (%)	V (%)
(1) Carbon Steel (High)	98.60	0.43	–	0.17	0.14	0.37	0.12	0.086	0.09	–	–	–
(2) Carbon Steel (Medium)	99.36	0.39	–	–	–	–	0.109	–	0.14	<0.02	<0.04	–
(3) Carbon Steel (Mild Steel)	99.46	0.54	<0.30	–	<0.07	–	–	–	–	–	<0.19	<0.07
(4) 410-MN: 1.8 420-MN: 2.8 (Stainless Steel)	88.25	0.28	–	0.18	10.92	0.10	0.16	–	0.11	–	–	–
(5) 410-MN: 1.7 420-MN: 1.7 (Stainless Steel)	87.44	0.30	–	–	11.99	–	0.18	–	0.09	–	–	–
(6) 321-MN: 1.4; 304-MN: 1.9 (Stainless Steel)	72.47	1.44	–	8.65	17.14	–	0.18	–	0.12	–	–	–
(7) Monel 400	1.40	0.84	0.11	64.36	<0.04	33.29	–	–	–	–	–	–

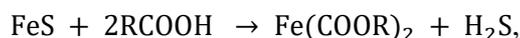
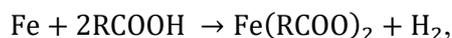
Table 3

Corrosive properties of crude oils		
Property	Murban	Das Blend
Sulfur content (Wt. %)	0.758	1.135
Salt content (ptb)	4.4	3.6
Acidity (mg KOH/g)	0.01	0.02
Mercaptans content (ppm)	25	56

According the obtained results the Das Blend crude oils was composed relatively higher amounts of sulphur, mercaptans, organic acids and relatively lower amount of salts. But according to the most of related researches there were investigated the impact of such compounds may not depend only on the amount or the concentrations and they are highly sensitive in the environmental conditions as well such as the temperature. Therefore, in the discussions of the impacts of such corrosive compounds on the metallic corrosion the supportive conditions also mandatory to be mentioned with the observations.

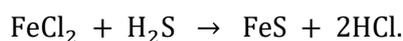
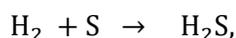
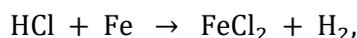
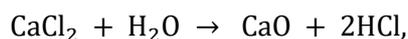
Organic acids are the major corrosive compounds that presence in the crude oils since the occurrences

also known as the naphthenic acids which are having a formula of RCOOH. The total acid content of some crude oil is known as the acidity or total acid number (TAN) of such crude oil [2; 4; 9; 12; 15].



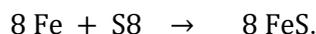
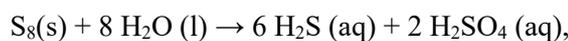
Salts are the dominant corrosive compounds found in crude oils since the occurrences because of the abundance of the interior part of the earth. Basically, such

salts are found from crude oils in the forms of NaCl, MgCl₂ and CaCl₂ and also the total amount of such halides presence in some crude oil is known as the salt content of that crude oil. When increasing the temperature of crude oils such salts tend to be broken into HCl molecules although show some inert properties at that occasion. But later on with the reductions of the temperature such HCl molecules react with water and even moisture presence in crude oils and tend to form hydrochloric acid. It is highly corrosive compound because of the strong oxidizing ability of that and on the other hand it is a strong acid. The general chemical reactions for the corrosion process of metals due to the slats are given in the following chemical reactions [2; 4; 7; 18].



Sulphur is an element that abundance in the interior part of the earth and possible to find from most of various crude oils in different forms such as the elemental sulphur, sulfoxides, thiophenes, mercaptans and hydrogen sulphides. Most of them are corrosive compounds and their corrosion process also may be varied with the functional groups and reactivity of

that functional groups. The corrosion process due to the elemental sulphur is known as the “localized corrosion” which is occurred at about 80 °C properly and formed FeS as the major corrosion compound. Mercaptans are the active sulphur compounds that presence in crude oils which are having a molecular formula of “RSH” and the corrosion process due to the mercaptans is known as the “sulfidation” also happened in the temperature range between 230–460 °C. The initiations of above corrosion process is normally happened with the contributions of water or even moisture to produce the sulphuric acid or hydrogen sulphides which are corrosive compounds and strong oxidizing agents. The general chemical reactions for above processes are given in the following equations [2; 4; 13; 14; 16; 17].



By considering the progress of corrosion of above corrosion reactions it is impossible to concluded or estimate the overall corrosive impact of all corrosive compounds because the required conditions are dissimilar and their might be affected some various corrosive compounds on the metallic corrosion which were not investigated in the current research.

According to the determinations of the corrosion rates of metals in order of after 15, 30 and 45 days from the immersion time have been interpreted in the Tables 4 and 5.

Table 4

Corrosion rates of metals in Murban

Metal	Corrosion rate after 15 days (cm ³ inch ⁻¹ day ⁻¹)	Corrosion rate after 30 days (cm ³ inch ⁻¹ day ⁻¹)	Corrosion rate after 45 days (cm ³ inch ⁻¹ day ⁻¹)	Average corrosion rate (cm ³ inch ⁻¹ day ⁻¹)
(1) Carbon Steel (High)	0.811971	0.466425	0.068794	0.4490632
(2) Carbon Steel (Medium)	0.817791	0.180339	0.073358	0.3571623
(3) Carbon Steel (Mild Steel)	0.10973	0.048244	0.038592	0.0655217
(4) 410-MN: 1.8 420-MN: 2.8 (Stainless Steel)	0.041784	0.016075	0.011801	0.02322
(5) 410-MN: 1.7 420-MN: 1.7 (Stainless Steel)	0.11626	0.011968	0.007574	0.0452676
(6) 321-N:1.4 304-MN:1.9 (Stainless Steel)	0.016612	0.007453	0.005599	0.009888
(7) Monel 400	0.356263	0.034877	0.026729	0.13929

Table 5

Corrosion rates of metals in Das Blend

Metal	Corrosion rate after 15 days ($\text{cm}^3 \text{inch}^{-1} \text{day}^{-1}$)	Corrosion rate after 30 days ($\text{cm}^3 \text{inch}^{-1} \text{day}^{-1}$)	Corrosion rate after 45 days ($\text{cm}^3 \text{inch}^{-1} \text{day}^{-1}$)	Average corrosion rate ($\text{cm}^3 \text{inch}^{-1} \text{day}^{-1}$)
(1) Carbon Steel (High)	0.350249	0.224901	0.024738	0.1999627
(2) Carbon Steel (Medium)	0.481055	0.140654	0.05911	0.2269396
(3) Carbon Steel (Mild Steel)	0.162883	0.141093	0.100635	0.1348702
(4) 410-MN: 1.8 420-MN: 2.8 (Stainless Steel)	0.044146	0.034035	0.006149	0.0281102
(5) 410-MN: 1.7 420-MN: 1.7 (Stainless Steel)	0.053701	0.034841	0.016363	0.0349681
(6) 321-MN:1.4 304-MN:1.9 (Stainless Steel)	0.022894	0.006503	0.002825	0.0107404
(7) Monel 400	0.061554	0.037655	0.016067	0.0384254

As the summary of above interpreted results the average corrosion rates of metal coupons with respect to crude oils have been shown in the Figure 4.

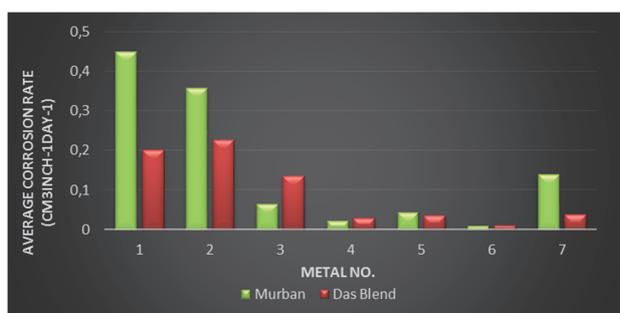


Figure 4. Average corrosion rates of metals

According to the above conclusion there were observed higher corrosion rates from carbon steels, moderate corrosion rates from Monel metal and least corrosion rates from stainless steels. Among the lower corrosion rates of stainless steels, the least corrosion rates were observed from 321-MN: 1.4 304-MN: 1.9 (Stainless Steel) with respect to both crude oils. When considering the chemical composition of that metal it was composed ~18% of chromium and ~8.5% of nickel. According to the combination of both nickel and at least 12% of chromium tends to be created some self-corrosive protection film on the metal surfaces and it is able act as a barrier of corrosion. Therefore, with the obtained results that it can be concluded the higher performance of the corrosion protection when having the higher amount of chromium with sufficient amount of nickel [1; 3; 5; 6; 17].

When comparing the corrosion rates of metals with respect to the crude oils four types of metals showed their higher corrosion rates in Murban crude oil while other three types of metals were showing their higher corrosion rates in Das Blend. The comparison of the corrosive strengths of crude oils and corrosion rates of metals in both crude oils it seems the corrosive impact of salts is high at the room temperatures because of the less progressiveness of sulphur compounds at the lower temperatures. By referring the basic results it is possible to recommend to be continued even the same methodology for the investigation of the more different corrosive compounds in various crude oils and also it is better to perform the experiments to investigate the impact of such corrosive compounds at different temperatures for the further research works for more advanced results [2; 4; 9; 12; 15; 18].

The variations of the corrosion rates of metals with the exposure time in both crude oils have been interpreted in the graphs which are shown in the Figures 5 and 6.

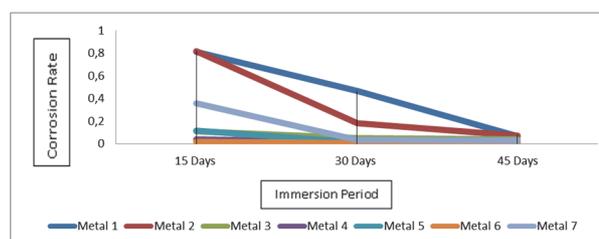


Figure 5. Variations of the corrosion rates of metals with the exposure time in Murban

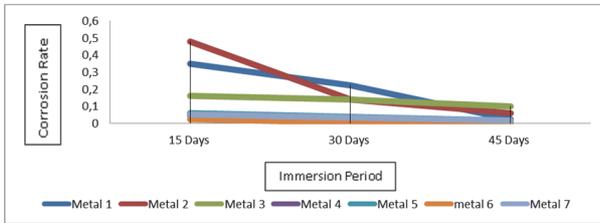


Figure 6. Variations of the corrosion rates of metals with the exposure time in Das Blend

By referring the above variations that it is possible to conclude the applicability of the weight loss method for the various kinds of materials because in here there were observed approximately similar curves for the corrosion rates of each metal. In each distribution it can be found the inversely proportional relationship between the two parameters of the corrosion rate and the exposure time [9; 10].

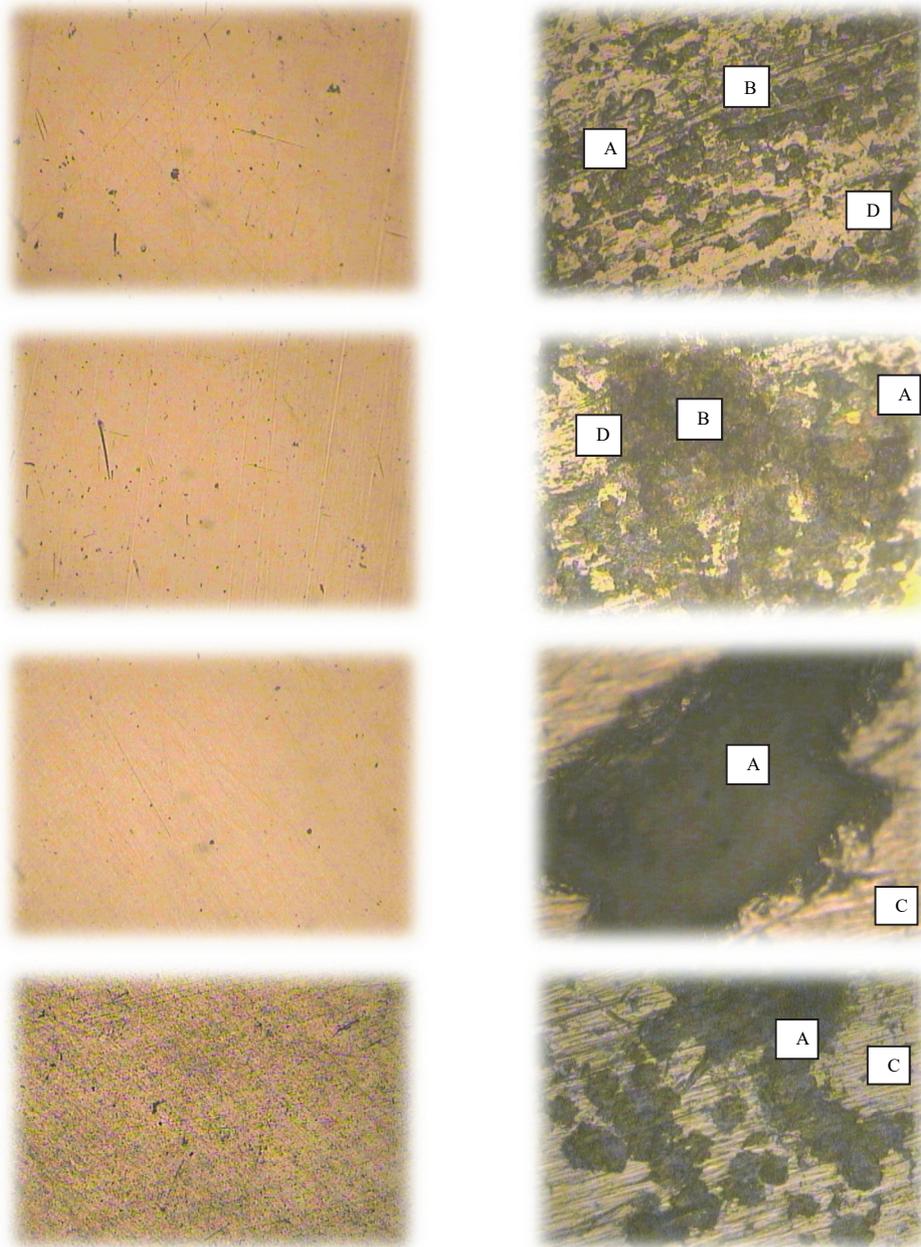


Figure 7. Corroded metal surfaces that observed under the microscope:
 A – ferrous sulphide (FeS); B – ferrous oxides (Fe₂O₃); C – corrosion cracks; D – pits and trace compounds

According to the microscopic analysis of the corroded metal surfaces simultaneously with the determinations of the corrosion rates of metals the specific observations have been shown in the Figure 7.

Among such results some of special observations have been discussed with the absolute features of the observed features in the Table 6 [1; 3– 6; 17].

Table 6

Visible appearances of the corrosion compounds

Compound	Appearances	Observations
FeS	Black, brownish black, property of powder, pitting, cracks	Observed most of features in each metal piece
Fe ₂ O ₃	Rusty color	Observed rarely.
CuS	Dark indigo/dark blue, property of powder	Unable to specify

Table 7

Decays of the metallic elements from metals into crude oils

Metal	Crude oil	Fe concentration/ppm	Cu concentration/ppm
Carbon Steel (High)	Murban	0.47	–
	Das Blend	1.10	–
Carbon Steel (Medium)	Murban	0.54	–
	Das Blend	0.02	–
Carbon Steel (Mild Steel)	Murban	–0.08	–
	Das Blend	–0.48	–
410-MN: 1.8 420-MN: 2.8 (Stainless Steel)	Murban	–0.65	–
	Das Blend	–0.78	–
410-MN: 1.7 420-MN: 1.7 (Stainless Steel)	Murban	–0.71	–
	Das Blend	–0.79	–
321-MN:1.4 304-MN:1.9 (Stainless Steel)	Murban	–0.44	–
	Das Blend	–0.17	–
Monel 400	Murban	–	10.47
	Das Blend	–	9.49

Regards the explanations and comparisons between the features of corrosion compounds basically it is possible to conclude the formations of some specific corrosion compounds during the current experiment such as the FeS, Fe₂O₃, corrosion cracks and pitting corrosion on the metal surfaces. In addition, that a black color compounds which is similar to FeS was indicated on the Monel metal surface although impossible to conclude as CuS only having visible features and better to recommend some advanced com-

positional analysis method for the analysis of corrosion compounds such as X-ray diffraction (XRD).

The obtained results for the experimental analysis of the decayed ferrous and copper from metals into crude oils by the atomic absorption spectroscopy (AAS) have been interpreted in the Table 7.

The obtained results for the analysis of decayed ferrous and copper amounts from metals into crude oils by the atomic absorption spectroscopy (AAS) have been shortlisted and interpreted in the following graphs that shown in the Figures 8 and 9.



Figure 8. Decayed ferrous concentrations from metals into crude oils



Figure 9. Decayed copper concentrations from metals into crude oils

The above graphs showed some significant decay of copper from Monel metal and relatively higher decay of ferrous from carbon steels into both crude oils during the immersion. As special observations there were not observed any decay concentration of metal from any stainless steel into crude oils also found least corrosion rates from stainless steels. After the formations of the corrosion compounds on the metal surfaces such corrosion compounds tend to be removed from the relevant metal surfaces either partially or completely because of the repulsive and attractive forces between the successive electrons and protons of relevant compounds [1; 3– 6]. Usually the corrosion compounds are the metal oxides, sulphides and other possible compounds. Therefore, the decay of metals into crude oils is feasible to happen due to the metallic corrosion.

According to the analysis of the variations of the initial hardness of metals by the Vicker's hardness tester the obtained results have been shortlisted in the Figures 10 and 11.

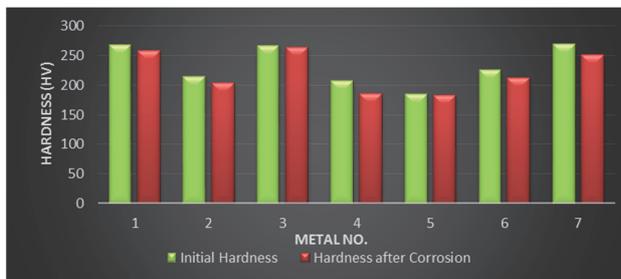


Figure 10. Variations of the initial hardness of metals in Murban

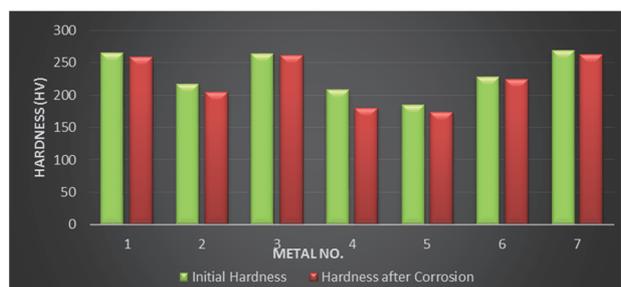


Figure 11. Variations of the initial hardness of metals in Das Blend

Those results showed slight reductions of the initial hardness of most of metals after the formation of the corrosion on the metal surfaces. The incident of the reductions of the initial hardness is possible to explain with the theory of electron repulsive because after the formations of corrosion compounds on the metal surfaces such corrosion compounds tend to be removed from the metal surfaces while creating unstable occasions on the metal surfaces because of the repulsive an attractive forces between the successive electrons and protons of existing compounds and also it is impossible to find a homogeneous metal surface after the formation of the corrosion compounds on the metal surfaces since they may be removed either partially or completely from the metal surfaces [1; 3; 5; 6]. Therefore, the initial conditions on the metal surfaces may be varied. As a result of the formation of the different corrosion compounds on the metallic surfaces, the most outer layer of the metal would be a heterogeneous one. The deduction of the initial hardness of might be caused due to the heterogeneity. However, the authentic reason for the reduction of the initial hardness must be investigated through some advanced material engineering theoretical explanations and experiments

Conclusion

As the important investigations of the existing experimental study that there were obtained and it is possible to conclude after analysis of the results it is emphasized the relatively lower corrosion tendency of stainless steels against the petroleum oils because of the self-corrosive protection film of the stainless steels when having at least 12% of chromium with sufficient amount of nickel, considerable progress of the process of corrosion regarding the salts when comparing with the impact of other corrosive compounds, irregular distributions of the corrosion, formations of the FeS, Fe₂O₃, corrosion cracks and pitting due as the corrosion compounds, destruction of the copper and ferrous from some of metals into petroleum oils and the deductions of the initial hardness of the metal coupons due to the formations of the corrosion compounds on such metal surfaces.

Recommendations for Future Improvements and Research Works: implementation of an appropriate experiment to measure or indicate the reduction of the hardness that associated with material engineering of friction science.

Acknowledgements

The author thanks scientific supervisor for his guidance and facilitations in carrying out works important for the research.

References

1. Khana OP. *Materials Science and Metallurgy*. New Delhi: Dhanpet Rai and Sons Publication; 2009.
2. Alsahhaf TA, Elkilani A, Fahim MA. *Fundamentals of Petroleum Refining*. Amsterdam: Radarweg Press; 2010.
3. Calister WD. *An Introduction of Materials Science and Engineering*. New York: John Wiley and Sons, Inc; 2003.
4. Davis ME, Davis RJ. *Fundamentals of Chemical Reaction Engineering*. New York: McGraw-Hill; 2003.
5. Singh R. *Introduction to Basic Manufacturing Process and Engineering Workshop*. New Delhi: New Age International Publication; 2006.
6. Bolton W. *Engineering Materials Technology*. London: BH Newnes Limited; 1994.
7. Ajimotokan HA, Badmos AY, Emmanuel EO. Corrosion in Petroleum Pipelines. *New York Science Journal*. 2009;2(5):36–40,
8. Speight JG. *The Chemistry and Technology of Petroleum*. New York: Marcel Dekker; 1999.
9. Afaf GA. *Corrosion Treatment of High TAN Crude* (PhD. Thesis, University of Khartoum, Khartoum, Sudan). 2007.
10. Okpokwasili GC, Oparaodu KO. Comparison of Percentage Weight Loss and Corrosion Rate Trends in Different Metal Coupons from two Soil Environments.

International Journal of Environmental Bioremediation & Biodegradation. 2014;2(5):243–249.

11. Usman AD, Okoro LN. Mild Steel Corrosion in Different Oil Types. *International Journal of Scientific Research and Innovative Technology*. 2015;2(2):9–13.

12. Ahmed IM, Elnour MM, Ibrahim MT. Study the Effects of Naphthenic Acid in Crude Oil Equipment Corrosion. *Journal of Applied and Industrial Sciences*. 2014; 2(6):255–260.

13. Luther GW, Rickard D. Chemistry of Iron Sulfides. *Chemical Reviews*. 2007;107(2):514–562.

14. Fang H, Nescic S, Young D. Corrosion of Mild Steel in the Presence of Elemental Sulfur. *International Corrosion Conference and Expo*. 2008.

15. Bota GM, Nescic S, Qu D, Wolf HA. Naphthenic Acid Corrosion of Mild Steel in the Presence of Sulfide

Scales Formed in Crude Oil Fractions at High Temperature. *International Corrosion Conference and Expo*. 2010.

16. Muller M. Theoretical Considerations on Corrosion Fatigue Crack Initiation. *Metallurgical Transactions*. 1982; 13:649–655

17. Smith WF, Hashemi J. Foundations of Material Science and Engineering. 4th Ed. New York: McGraw-Hill; 2006.

18. Hassan NS. The Effect of Different Operating Parameters on the Corrosion Rate of Carbon Steel in Petroleum Fractions. *Engineering and Technology Journal*. 2013;31A:1182–1193.

For citation

Aluvihara S, Premachandra JK. The influences of the crude oils on the decay of metals. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(3):244–253. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-3-244-253>

Научная статья

Влияние сырой нефти на разрушение металлов

С. Алувихара

Университет Перадени, Демократическая Социалистическая Республика Шри-Ланка, 20400, Перадения

Джагат К. Премачандра

Университет Моратувы, Демократическая Социалистическая Республика Шри-Ланка, 10400, Катубедда

История статьи:

Поступила в редакцию: 11 октября 2019

Доработана: 29 октября 2019

Принята к публикации: 31 октября 2019

Ключевые слова:

сырая нефть, коррозионные свойства, черные металлы, распад, потеря массы

Сырые нефти являются основным ресурсом для использования в промышленных целях в различных формах, а их переработка – ключевой процесс разделения смеси сырых нефтей. В проведенном исследовании предполагалось изучить влияние солей, органических кислот, меркаптанов и элементарной серы сырых нефтей на скорость коррозии семи различных типов черных металлов как в качественном, так и в количественном отношении. Химические составы отобранных черных металлов и вышеупомянутые коррозионные свойства двух различных типов сырой нефти измерялись с помощью стандартных приборов и методик. Набор металлических купонов одинакового размера был приготовлен из семи различных типов металлов, скорости коррозии металлов определялись методом относительной потери веса. Кроме того, под микроскопом анализировались корродированные металлические поверхности, измерялись концентрации распадающихся металлов и вычеты начальной твердости металлических купонов. Согласно полученным результатам, наблюдаются более низкие скорости коррозии купонов из нержавеющей стали с содержанием хрома и никеля не менее 12 %, более высокое коррозионное воздействие – со стороны солей, образования FeS, Fe₂O₃, коррозионных трещин и питтинговой коррозии.

Благодарности

Автор благодарит научного руководителя за содействие в выполнении важных для исследования работ.

Для цитирования

Aluvihara S., Premachandra J.K. The influences of the crude oils on the decay of metals (Влияние сырой нефти на разрушение металлов) // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. № 3. С. 244–253. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-3-244-253>

Суреш Алувихара, аспирант кафедры химического и технологического машиностроения Университета Перадени; sureshaluvihare@gmail.com; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3535-1201>.

Джагат Кумара Премачандра, профессор кафедры химико-технологических процессов машиностроения Университета Моратувы.



DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-3-254-260

УДК 622.276.012+622.276.53

Научная статья

Повышение эффективности работы жидкостно-газового эжектора

А.Н. Дроздов, Я.А. Горбылева, Е.И. Горелкина

Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

Н.А. Дроздов

ООО «Инновационные нефтегазовые решения», Российская Федерация, 115682, Москва, ул. Штиловская, д. 64, корп. 1

История статьи:

Поступила в редакцию: 05 сентября 2019

Доработана: 08 октября 2019

Принята к публикации: 21 октября 2019

Ключевые слова:

насосно-эжекторные системы, характеристика жидкостно-газового эжектора, коэффициент полезного действия эжектора, минерализация, рациональная концентрация солей

Предлагаемое в статье решение относится к струйной технике и может быть использовано, например, в добыче нефти и газа, сборе и подготовке нефти, газа и воды, извлечении метана из метаноугольных пластов, нефтепереработке. Техническим результатом является повышение эффективности жидкостно-газового эжектора путем обеспечения его работы в области рациональных концентраций и состава солей, в которой достигается интенсификация энергообмена между рабочей жидкостью и эжектируемым газом. Сущность предлагаемого решения: способ работы жидкостно-газового эжектора включает нагнетание рабочей жидкости силовым насосом в сопло эжектора, откачку газа эжектором, создание, диспергирование и повышение давления газожидкостной смеси эжектором с использованием в качестве рабочей жидкости водных растворов солей. Значения концентрации и состава солей в рабочей жидкости поддерживают в пределах области рациональных концентраций и состава солей, в которой достигаются повышенные величины коэффициента полезного действия эжектора. В слабоминерализованные водные растворы добавляют соли, а сильноминерализованные водные растворы разбавляют пресными водами. В качестве рабочей жидкости используют являющиеся водными растворами солей пластовые и/или попутно добываемые воды нефтяных, газовых, газоконденсатных и метаноугольных месторождений, если состав и концентрация солей в них находятся в пределах области рациональных концентраций и состава солей, в которой обеспечивается повышение коэффициента полезного действия эжектора. Границы области рациональных концентраций и состава солей предварительно определяют путем проведения лабораторных стендовых исследований.

Введение

Струйная техника (в том числе жидкостно-газовые эжекторы) используется в добыче нефти

Дроздов Александр Николаевич, профессор департамента недропользования и нефтегазового дела Инженерной академии РУДН, доктор технических наук, профессор; drozdov_an@mail.ru; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9509-203X>, eLIBRARY SPIN-код: 9355-4829.

Дроздов Николай Александрович, генеральный директор ООО «Инновационные нефтегазовые решения», кандидат технических наук; eLIBRARY SPIN-код: 7660-9196.

Горбылева Яна Алексеевна, аспирант, учебный мастер лаборатории горных машин департамента недропользования и нефтегазового дела Инженерной академии РУДН; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4021-3046>, eLIBRARY SPIN-код: 5132-3021.

Горелкина Евгения Ильинична, аспирант, учебный мастер лаборатории горных машин департамента недропользования и нефтегазового дела Инженерной академии РУДН.

© Дроздов А.Н., Дроздов Н.А., Горбылева Я.А., Горелкина Е.И., 2019

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

потоком жидкости подают дополнительный поток жидкости под давлением, равным давлению подсасываемого газа, при этом расход дополнительного потока жидкости составляет 0,01–1,15 от расхода подсасываемого газа [1]. Этот способ имеет, как показали последующие экспериментальные исследования, ограниченную область применения и низкие функциональные возможности.

Другой способ работы жидкостно-газового эжектора заключается в откачке газа нагнетаемой в сопло эжектора рабочей жидкостью, в качестве которой используется углеводородосодержащая жидкость – капролактамы, при этом содержание капролактама в рабочей жидкости составляет не менее 75 % по массе, а содержание примесей – остальное [2]. Данный способ имеет низкую эффективность, а также ограниченную область применения из-за высокой цены и токсичности капролактама.

Еще один способ работы жидкостно-газового эжектора состоит в откачке газа нагнетаемой в сопло эжектора рабочей жидкостью, в качестве которой используется углеводородосодержащая жидкость, содержащая смесь бензола, толуола, ксилолов и жидких углеводородов от C_6 до C_{10} при следующем соотношении компонентов (масс. %): бензол 20–40; толуол 10–25; ксилолы 2–10; примеси 1–9; смесь жидких углеводородов от C_6 до C_{10} – остальное [3]. Как и предыдущие, способ имеет низкую эффективность, область применения и ограничена из-за высокой цены используемой углеводородосодержащей жидкости, являющейся к тому же ядовитым и канцерогенным веществом.

Низко эффективен и ограничен в области применения по причине высокой цены, токсичности и канцерогенности используемой углеводородосодержащей жидкости способ работы жидкостно-газового эжектора, включающий откачку газа нагнетаемой в сопло эжектора рабочей жидкостью, в качестве которой используется углеводородосодержащая жидкость с алкилбензолом, содержание которого в рабочей жидкости составляет не менее 75 % по массе, а содержание примесей – остальное [4]. Известный способ имеет

Наконец, малоэффективным является способ работы жидкостно-газового эжектора, включающий откачку газа нагнетаемой в сопло эжектора рабочей жидкостью, в качестве которой используется вода, вследствие недостаточно интенсивного перемешивания воды и откачиваемого газа.

Наиболее перспективным для дальнейшего улучшения является способ работы жидкостно-газового эжектора, включающий нагнетание рабочей жидкости силовым насосом в сопло эжектора, откачку газа эжектором, создание, диспергирование и повышение давления газожидкостной смеси эжектором с использованием в качестве рабочей жидкости водных растворов солей [6], хотя и он имеет низкую эффективность по причине недостаточно интенсивного энергообмена между рабочей жидкостью и эжектируемым газом.

1. Цель и методы работы

Цель работы – разработка методов интенсификации энергообмена между потоками рабочей жидкости и откачиваемого газа и, соответственно, повышение эффективности работы жидкостно-газового эжектора

Указанная проблема решается тем, что в способе работы жидкостно-газового эжектора, включающем нагнетание рабочей жидкости силовым насосом в сопло эжектора, откачку газа эжектором, создание, диспергирование и повышение давления газожидкостной смеси эжектором с использованием в качестве рабочей жидкости водных растворов солей, значения концентрации и состава солей в рабочей жидкости поддерживают в пределах области рациональных концентраций и состава солей, в которой достигаются повышенные величины коэффициента полезного действия (КПД) эжектора.

Кроме того, в слабоминерализованные водные растворы добавляют соли, а сильноминерализованные водные растворы разбавляют пресными водами.

Также в качестве рабочей жидкости можно использовать являющиеся водными растворами солей пластовые и/или попутно добываемые воды нефтяных, газовых, газоконденсатных и метаноугольных месторождений, если состав и концентрация солей в них находятся в пределах области рациональных концентраций и состава солей, в которой обеспечивается повышение КПД эжектора.

В одном из вариантов способа в поток рабочей жидкости и/или газа добавляют пенообразующие поверхностно-активные вещества (ПАВ). В другом варианте – границы области рациональных концентраций и состава солей предварительно определяют путем проведения лабораторных

стендовых исследований характеристик жидкостно-газовых эжекторов.

Допустимо границы области рациональных концентраций и состава солей определять, исходя из условия, что допустимое снижение КПД эжектора в оптимальном режиме на границах области по сравнению с его максимальным значением составляет не более 5 %.

В качестве еще одного варианта откачку газа проводят при давлении газа, превышающем атмосферное давление.

2. Результаты

Достижимые технические результаты заключаются в повышении эффективности жидкостно-газового эжектора путем обеспечения его работы в области рациональных концентраций и состава солей, в которой достигается интенсификация энергообмена между рабочей жидкостью и эжектируемым газом.

Сущность метода поясняется рисунками: на рис. 1 представлена схема устройства для реализации метода, на рис. 2 – вариант устройства для реализации метода, на рис. 3 – стендовые характеристики жидкостно-газового эжектора при откачке газа, на рис. 4 – пример определения области рациональных концентраций по графику зависимости значений КПД жидкостно-газового эжектора в оптимальных режимах от концентрации соли.

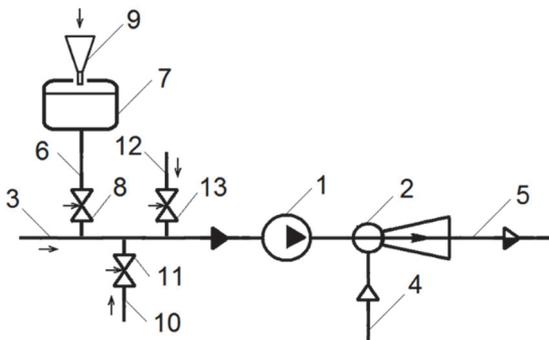


Рис. 1. Схема устройства для реализации метода
[Figure 1. Scheme of the device for implementing the method]

Устройство для реализации способа (рис. 1) содержит силовой насос (1), жидкостно-газовый эжектор (2), а также линию подачи рабочей жидкости – водных растворов солей (3), линию подачи газа (4) и линию закачки газожидкостной

смеси (5). К линии подачи рабочей жидкости (3) присоединена линия подачи соли (6) с баком (7), задвижкой (8) и воронкой для засыпки соли (9), а также линия подачи пресной воды (10) с задвижкой (11) и линия подачи ПАВ (12) с задвижкой (13).

В другом варианте выполнения устройства к линии подачи газа (4) подключен компрессор (14) (рис. 2).

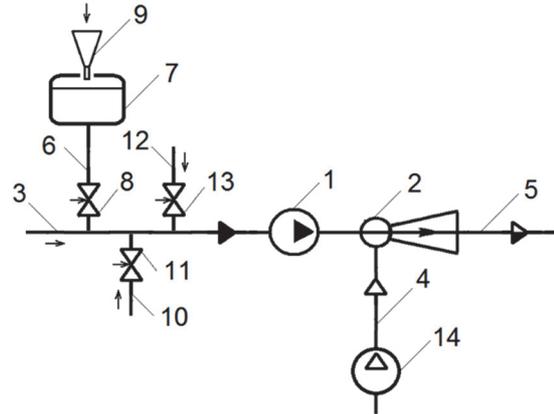


Рис. 2. Вариант устройства для реализации метода
[Figure 2. A variant of the device for implementing the method]

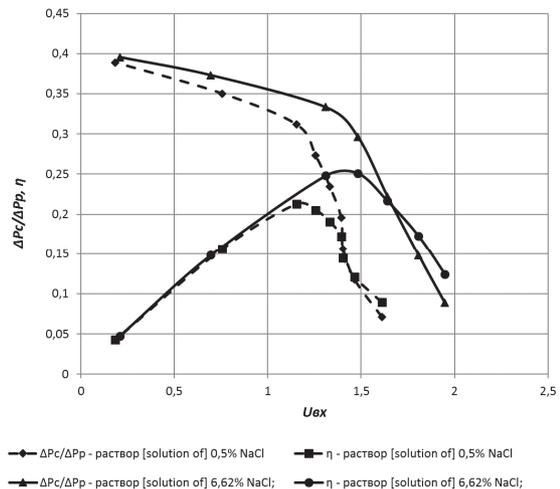


Рис. 3. Характеристики жидкостно-газового эжектора
[Figure 3. Characteristics of a liquid-gas ejector]

Способ работы жидкостно-газового эжектора осуществляют следующим образом.

Нагнетают рабочую жидкость силовым насосом (1) из линии подачи (3) в сопло жидкостно-газового эжектора (2), которым откачивают газ из газовой линии (4). Эжектором (2) создают, дис-

пергируют и повышают давление газожидкостной смеси, направляя ее в линию закачки (5).

Значения концентраций и состава солей в воде в пределах области рациональных концентраций и состава солей обеспечивают так.

Для слабоминерализованных вод это осуществляют путем добавления солей в воду. При этом через воронку (9) насыпают необходимое количество соли требуемого состава в бак (7). Там соль растворяется в воде и затем по линии (6) с открытой задвижкой (8) поступает в линию подачи воды (3) и далее на вход силового насоса (1). Задвижки (11) и (13) при этом закрыты.

Для сильноминерализованных вод это производят путем их разбавления пресными водами. Пресную воду подают по линии (10) с открытой задвижкой (11). Задвижки (10) и (12) при этом закрыты.

Используют также направляемые по линии (3) пластовые и/или попутно добываемые воды нефтяных, газовых, газоконденсатных и метанугольных месторождений, если состав и концентрация солей в пластовых и/или попутно добываемых водах находятся в пределах области рациональных концентраций и состава солей, в которой обеспечивается повышение КПД эжектора. Задвижки (8), (11) и (13) при этом закрыты.

В ряде случаев эксплуатации в поток воды и/или газа дополнительно добавляют пенообразующие ПАВ, например в поток рабочей жидкости по линии (1) с открытой задвижкой (13). Задвижки (8) и (11) при этом закрыты.

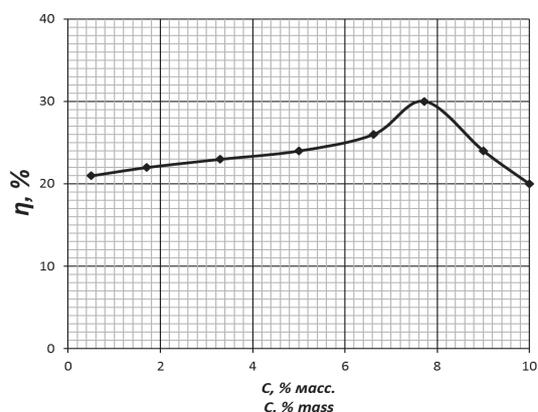


Рис. 4. Пример определения области рациональных концентраций по графику зависимости значений КПД жидкостно-газового эжектора в оптимальных режимах от концентрации соли
[Figure 4. An example of determining the region of rational concentrations according to a graph of the dependence of the efficiency values of a liquid-gas ejector in optimal conditions on the salt concentration]

Для дополнительного повышения КПД эжектора откачку газа проводят также при давлении газа, превышающем атмосферное давление. Давление газа на приеме жидкостно-газового эжектора (2) при этом увеличивают с помощью компрессора (14).

В варианте способа границы области рациональных концентраций и состава солей предварительно определяют путем проведения лабораторных стендовых исследований характеристик жидкостно-газовых эжекторов. Лабораторные исследования проводят на специальных стендах, позволяющих получать напорно-энергетические характеристики струйных аппаратов [7; 8].

3. Обсуждение

Итак, в качестве рабочей жидкости используют водные растворы солей, меняя их концентрацию и состав в процессе экспериментов. По данным этих исследований строят напорно-энергетические характеристики жидкостно-газовых эжекторов и зависимости КПД жидкостно-газовых эжекторов от концентрации и состава солей в рабочей жидкости.

На рис. 3 представлены в качестве примера полученные при лабораторных стендовых исследованиях зависимости относительного напора $\Delta P/\Delta P_p$ и КПД η от коэффициента инжекции газа $U_{вх}$ для эжектора с диаметром сопла $d_c = 3,6$ мм, диаметром камеры смешения $d_{кк} = 5,4$ мм при откачке воздуха из атмосферы струей воды с массовой концентрацией NaCl, составляющей 0,5 %, и струей воды с массовой концентрацией NaCl, составляющей 6,62%. Значения давления рабочей жидкости P_p перед соплом составляли 1,3–1,35 МПа, расхода рабочей жидкости Q_p через сопло – 1,07–1,08 м³/ч.

Наблюдается заметное улучшение характеристик жидкостно-газового эжектора при откачке газа струей более соленой воды по сравнению с эжектированием газа струей малосоленой воды. Это связано с улучшением энергообмена между струей рабочей жидкости и откачиваемым газом в области рациональных концентраций поваренной соли.

На рис. 4 показано, как по данным лабораторных стендовых исследований определяют границы области рациональных концентраций соли. На график нанесены значения КПД эжектора в оптимальных режимах в зависимости от концентрации поваренной соли. Левую и правую грани-

цы рациональной области находят из условия, что допустимое снижение КПД эжектора на границах области по сравнению с его максимальным значением составляет не более 5 %.

Для данных графика на рис. 4 левая граница области рациональных массовых концентраций соли составляет 6 %, правой – 8,8 %.

Аналогичным методом определяют и границы областей рациональных составов солей.

Практическое применение результатов исследований в первую очередь актуально для решения одной из важнейших проблем нефтяной промышленности, которой является нерациональное сжигание попутного нефтяного газа (ПНГ) на факелах. В мире сгорает около 150 млрд м³ ПНГ ежегодно. В 2017 г. в России сгорело в факелах 12,9 млрд м³, или 13,1 % от общей добычи ПНГ [9]. Вместе с тем утилизировать низконапорный газ можно с применением простых по конструкции и надежных систем, содержащих насосы и жидкостно-газовые эжекторы [10]. Помимо утилизации ПНГ в газопровод или нефтесборный коллектор [10; 11], перспективным вариантом использования попутного газа с помощью жидкостно-газовых эжекторов является водогазовое воздействие на пласт [12–14]. Данная задача имеет большое практическое значение и для рациональной эксплуатации нефтяных скважин, оборудованных установками погружных электроцентробежных насосов с эжекторами [15], при откачке газа из затрубного пространства в колонну насосно-компрессорных труб.

Заключение

Предложенная методология позволяет повысить эффективность работы жидкостно-газового эжектора по сравнению с известными техническими решениями. Это достигается за счет интенсификации энергообмена между рабочей жидкостью и эжектируемым газом с использованием в качестве рабочей жидкости водных растворов солей. Значения концентрации и состава солей в рабочей жидкости поддерживают в пределах области рациональных концентраций и состава солей, в которой достигаются повышенные величины КПД эжектора. В слабоминерализованные водные растворы добавляют соли, а сильноминерализованные водные растворы разбавляют пресными водами. В качестве рабочей жидкости используют являющиеся водными растворами солей пластовые и/или попутно добываемые воды

нефтяных, газовых, газоконденсатных и метаноугольных месторождений, если состав и концентрация солей в пластовых и/или попутно добываемых водах находятся в пределах области рациональных концентраций и состава солей, в которой обеспечивается повышение КПД эжектора. В поток рабочей жидкости и/или газа добавляют пенообразующие ПАВ. Границы области рациональных концентраций и состава солей предварительно определяют путем проведения лабораторных стендовых исследований характеристик жидкостно-газовых эжекторов.

Список литературы

1. Патент РФ № 1735611. Способ работы жидкостно-газового эжектора / авт. изобрет. А.Н. Дроздов, В.И. Игrevский, П.Б. Кузнецов и др. М. кл F 04 F 5/04, заявл. 21.03.1990, опубл. 23.05.1992, Б.И. № 19.
2. Патент РФ № 2179266. Рабочая жидкость для жидкостно-газового струйного аппарата / авт. изобрет. В.Г. Цегельский. М. кл F 04 F 5/54, заявл. 31.08.2000, опубл. 10.02.2002, Б.И. № 4.
3. Патент РФ № 2239101. Рабочая жидкость для жидкостно-газового струйного аппарата установки вакуумной перегонки продуктов пиролиза нефтепродуктов / авт. изобрет. А.Н. Реутов, М.У. Хамитов. М. кл F 04 F 5/54, заявл. 13.08.2003, опубл. 27.10.2004, Б.И. № 30.
4. Патент РФ № 2180411. Рабочая жидкость для жидкостно-газового струйного аппарата / авт. изобрет. В.Г. Цегельский. М. кл F 04 F 5/54, заявл. 08.09.2000, опубл. 10.03.2002, Б.И. № 7.
5. Патент РФ № 2297520. Система утилизации низконапорного природного газа / авт. изобрет. К.С. Басниев, И.В. Грязнова. М. кл E21B 43/34, заявл. 12.07.2011, опубл. 10.11.2011, Б.И. № 31.
6. Патент РФ № 2287490. Система обессоливания воды / авт. изобрет. В.Н. Зенцов, М.Д. Акульшин, Д.Л. Рахманкулов и др. М. кл C02F 1/44, заявл. 03.05.2005, опубл. 20.11.2006, Б.И. № 32.
7. Патент РФ № 2075654. Способ испытаний гидравлических машин и электродвигателей к ним и стенд для его осуществления / авт. изобрет. А.Н. Дроздов, Л.А. Демьянова. М. кл F04D 13/10, F04F 5/54, F04B 51/00, заявл. 14.03.1995.
8. Дроздов А.Н. Технология и техника добычи нефти погружными насосами в осложненных условиях. М.: МАКС Пресс, 2008. С. 187–188.
9. Эдер Л.В., Проворная И.В., Филимонова И.В. По пути к попутному. На ухабах ПНГ // Бурение и нефть. 2018. № 12. С. 4–14.
10. Тарасов М.Ю., Зобнин А.А., Зырянов А.Б., Панов В.Е., Магомедшерифов Н.И. Разработка и промысловые испытания технологии утилизации низко-

напорного нефтяного газа с помощью струйных компрессоров // Нефтяное хозяйство. 2009. № 2. С. 43–45.

11. *Осичева Л.В.* Разработка технологии утилизации попутного газа в нефтепромысловом сборе с использованием струйного аппарата: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина. М., 2004. 21 с.

12. *Абуталипов У.М., Кутабов А.Н., Есинов П.К., Иванов А.В.* Исследование конструктивных и технологических параметров водогазового эжектора для утилизации попутного нефтяного газа // Экспозиция Нефть Газ. 2017. № 4 (57). С. 54–58.

13. *Апасов Т.К., Апасов Г.Т., Саранча А.В.* Использование устьевого эжектора для утилизации попутного газа на Южно-Охтеурском месторождении // Фундаментальные исследования. 2016. № 1 (1). С. 13–17.

14. *Drozdov A.N., Drozdov N.A.* Laboratory Researches of the Heavy Oil Displacement from the Russkoye Field's

Core Models at the SWAG Injection and Development of Technological Schemes of Pump-Ejecting Systems for the Water-Gas Mixtures Delivering // SPE 157819. Society of Petroleum Engineers – SPE Heavy Oil Conference Canada 2012. Canada: Calgary, Alberta, 2012. Pp. 872–878.

15. *Carvalho P.M., Podio A.L., Sepehrnoori K.* An Electrical Submersible Jet Pump for Gassy Oil Well // Journal of Petroleum Technology. 1999. Vol. 51. No. 5. Pp. 34–36.

Для цитирования

Дроздов А.Н., Дроздов Н.А., Горбылева Я.А., Горелкина Е.И. Повышение эффективности работы жидкостно-газового эжектора // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. № 3. С. 254–260. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-3-254-260>

Research paper

Increasing efficiency of work of a liquid-gas ejector

Alexander N. Drozdov, Yana A. Gorbyleva, Evgenia I. Gorelkina

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklay St., Moscow, 117198, Russian Federation

Nikolay A. Drozdov

LLC "Innovative Oil and Gas Solutions", 64 Shipilovskaya St., bldg. 1, Moscow, 115682, Russian Federation

Article history:

Received: September 05, 2019

Revised: October 08, 2019

Accepted: October 21, 2019

Keywords:

pump-ejector systems; characteristic of liquid – gas ejector, ejector efficiency, mineralization, rational concentration of salts

The proposed solution relates to fluidics and can be used, for example, in the extraction of oil and gas, the collection and preparation of oil, gas and water, the extraction of methane from methane beds, oil refining. The technical result is to increase the efficiency of a liquid-gas ejector by ensuring its work in the field of rational concentrations and salt composition, in which the intensification of energy exchange between the working fluid and the ejected gas is achieved. The essence of the proposed solution: the method of operation of a liquid-gas ejector involves injecting a working fluid with a power pump into the ejector nozzle, pumping gas with an ejector, creating, dispersing and increasing the pressure of a gas-liquid mixture with an ejector using aqueous solutions of salts as a working fluid. The values of the concentration and composition of salts in the working fluid are maintained within the range of rational concentrations and composition of salts, in which increased values of the efficiency of the ejector are achieved. Salts are added to the weakly mineralized aqueous solutions, and the highly mineralized aqueous solutions are diluted with fresh water. As the working fluid, the formation and/or incidentally produced waters of oil, gas, gas condensate and methane-coal deposits, which are aqueous solutions of salts, are used if the composition and concentration of salts in the produced and/or incidentally produced waters are within the range of rational concentrations and composition of salts in which provides an increase in the efficiency of the ejector. The boundaries of the field of rational concentrations and salt composition are preliminarily determined by laboratory bench studies.

Alexander N. Drozdov, Professor at Department of Mineral Development and Oil & Gas Engineering at Academy of Engineering in RUDN University, Doctor of Technical Sciences, Professor; drozdov_an@mail.ru; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9509-203X>, eLIBRARY SPIN-code: 9355-4829.

Nikolay A. Drozdov, General Director of "Innovative Oil and Gas Solutions" LLC, Ph.D.; eLIBRARY SPIN-code: 7660-9196

Yana A. Gorbyleva, graduate student, training master of the Laboratory of Mining Machines at Department of Mineral Development and Oil & Gas Engineering at Academy of Engineering in RUDN University; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4021-3046>. SPIN: 5132-3021.

Evgenia I. Gorelkina, graduate student, training master of the Laboratory of Mining Machines at Department of Mineral Development and Oil & Gas Engineering at Academy of Engineering in RUDN University.

References

1. Drozdov AN, Igrevsky VI, Kuznetsov PB (inventors). *Rabochaya zhidkost' dlya zhidkostno-gazovogo struinogo apparata ustanovki vakuumnoi peregonki produktov piroliza nefteproduktov* [The method of operation of a liquid-gas ejector]. RU patent No. 1735611. B.I. No. 19. 23 May 1992.
2. Tsegelsky VG (inventor). *Rabochaya zhidkost' dlya zhidkostno-gazovogo struinogo apparata* [The working fluid for a liquid-gas jet apparatus]. RU patent No. 2179266. B.I. No. 4. 10 February 2002.
3. Reutov AN, Khamitov MU (inventors). *Rabochaya zhidkost' dlya zhidkostno-gazovogo struinogo apparata ustanovki vakuumnoi peregonki produktov piroliza nefteproduktov* [Working fluid for a liquid-gas jet apparatus for the installation of vacuum distillation of pyrolysis products of petroleum products]. RU patent No. 2239101. B.I. No. 30. 27 October 2004.
4. Tsegelsky VG (inventor). *Rabochaya zhidkost' dlya zhidkostno-gazovogo struinogo apparata* [Working fluid for a liquid-gas jet apparatus]. RU patent No. 2180411. B.I. No. 7. 10 March 2002.
5. Basniev KS, Gryaznova IV (inventors). *Sistema utilizatsii nizkonapornogo prirodno gaza* [System for utilization of low-pressure natural gas]. RU patent No. 2297520. B.I. No. 31. 10 November 2011.
6. Zentsov VN, Akulshin MD, Rakhmankulov DL, et al. (inventors). *Sistema obessolivaniya vody* [Water desalination system]. RU patent No. 2287490. B.I. No. 32. 20 November 2006.
7. Drozdov AN, Demyanova LA (inventors). *Sposob ispytaniy gidravlicheskikh mashin i elektrodvigatelei k nim i stend dlya ego osushchestvleniya* [Method for testing hydraulic machines and electric motors for them and a stand for its implementation]. RU patent No. 2075654. 14 March 1995.
8. Drozdov AN. *Tekhnologiya i tekhnika dobychi nefi pogrzhnymi nasosami v oslozhnennykh usloviyakh* [Technology and technique for oil production by submersible pumps in complicated conditions]. Moscow: MAKS Press, 2008. p. 187–188.
9. Eder LV, Provornaya I, Filimonova I. Po puti k poputnomu. Na ukhabakh PNG [On the way to the prosperous. APG bumps]. *Drilling and oil*. 2018;(12):4–14.
10. Tarasov MYu, Zobnin AA, Zyryanov AB, Pannov VYe, Magomedsherifov NI. *Razrabotka i promyslovyye ispytaniya tekhnologii utilizatsii nizkonapornogo neftyanogo gaza s pomoshch'yu struynykh kompressorov* [Development and field testing of low-pressure oil gas utilization technology using jet compressors]. *Oil Industry*. 2009;(2):43–45.
11. Osicheva LV. *Razrabotka tekhnologii utilizatsii poputnogo gaza v neftepromyslovom sbore s ispol'zovaniem struinogo apparata* [Development of technology for the utilization of associated gas in the oil field using an jet apparatus] (abstract of dis. ... cand. tech. sciences). Moscow; 2004.
12. Abutalipov UM, Kitabov AN, Esipov PK, Ivanov AV. *Issledovanie konstruktivnykh i tekhnologicheskikh parametrov vodogazovogo ezhektora dlya utilizatsii poputnogo neftyanogo gaza* [Study of the design and technological parameters of a gas-water ejector for the utilization of associated petroleum gas]. *Ekspozitsiya Neft' Gaz*. 2017;4(57):54–58.
13. Apasov TK, Apasov GT, Sarancha AV. *Ispol'zovanie ust'evogo ezhektora dlya utilizatsii poputnogo gaza na Yuzhno-Okhteurskom mestorozhdenii* [Use of a wellhead ejector for utilization of associated gas at the Yuzhno-Okhteurskoye field]. *Fundamental research*. 2016;1(1):13–17.
14. Drozdov AN, Drozdov NA. *Laboratory Researches of the Heavy Oil Displacement from the Russkoye Field's Core Models at the SWAG Injection and Development of Technological Schemes of Pump-Ejecting Systems for the Water-Gas Mixtures Delivering*. *SPE 157819. Society of Petroleum Engineers – SPE Heavy Oil Conference Canada 2012*. Calgary, Alberta, Canada; 2012. p. 872–878.
15. Carvalho PM, Podio AL, Sepehnoori K. *An Electrical Submersible Jet Pump for Gassy Oil Well*. *Journal of Petroleum Technology*. 1999;51(5):34–36.

For citation

Drozdov AN, Drozdov NA, Gorbyleva YA, Gorelkina EI. Increasing efficiency of work of a liquid-gas ejector. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(3):254–260. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-3-254-260>. (In Russ.)