

НАУКА И ТЕХНОЛОГИИ

# ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА

НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ



Science & Technologies:  
Oil and Oil Products Pipeline Transportation

**Том/Vol.12  
№ 2, 2022**



# НАУКА И ТЕХНОЛОГИИ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ

Научно-технический журнал

Том 12, № 2/2022

## SCIENCE & TECHNOLOGIES: OIL AND OIL PRODUCTS PIPELINE TRANSPORTATION

Scientific and Technical Journal

Vol. 12, No. 2/2022



[pipeline-science.ru](http://pipeline-science.ru)

### ОРГАНИЗАТОР ИЗДАНИЯ ЖУРНАЛА

ПАО «Транснефть»

### УЧРЕДИТЕЛЬ

ООО «Научно-исследовательский институт  
трубопроводного транспорта» (ООО «НИИ Транснефть»)  
117186, г. Москва, Севастопольский проспект, 47а  
Тел.: +7(495) 950-8295, факс: +7(495) 950-8297  
[www.niitnn.transneft.ru](http://www.niitnn.transneft.ru)  
[niitnn@niitnn.transneft.ru](mailto:niitnn@niitnn.transneft.ru)

### ИЗДАТЕЛЬ

ООО «Транснефть – Медиа»  
123112, г. Москва, Пресненская набережная, 4, стр. 2  
Тел.: +7(495) 950-8074, факс: +7(495) 950-8726  
[www.media.transneft.ru](http://www.media.transneft.ru)  
[transpress@ttn.transneft.ru](mailto:transpress@ttn.transneft.ru)

### PUBLISHED ON BEHALF OF

Transneft

### FOUNDER

Pipeline Transport Institute, LLC (Transneft R&D, LLC)  
47a Sevastopolsky Prospect, Moscow, 117186,  
Russian Federation  
Tel.: +7(495) 950-8295, fax: +7(495) 950-8297  
[www.niitnn.transneft.ru](http://www.niitnn.transneft.ru)  
[niitnn@niitnn.transneft.ru](mailto:niitnn@niitnn.transneft.ru)

### PUBLISHER

Transneft Media, LLC  
4, bldg 2 Presnenskaya Embankment, Moscow, 123112,  
Russian Federation  
Tel.: +7(495) 950-8074, fax: +7(495) 950-8726  
[www.media.transneft.ru](http://www.media.transneft.ru)  
[transpress@ttn.transneft.ru](mailto:transpress@ttn.transneft.ru)

# Сведения о журнале

«Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов» – научный журнал в области магистрального трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов.

## ЦЕЛЬ ЖУРНАЛА

Публикация оригинальных научных статей, имеющих международное значение для ученых и специалистов в области трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов.

## ТЕМАТИКА ЖУРНАЛА

В журнале публикуются статьи по следующим направлениям исследований:

- Прочность, надежность, долговечность
- Проектирование, строительство и эксплуатация
- Ремонт трубопроводов
- Сварка
- Материалы и оборудование
- Автоматика, телемеханика и связь
- Защита от коррозии
- Товарно-транспортные операции и метрологическое обеспечение
- Энергетика и электрооборудование
- Пожарная и промышленная безопасность
- Экология
- Экономика и управление
- Правоприменение и безопасность
- Техническое регулирование
- Инновационное развитие
- Профессиональное образование
- Материально-техническое обеспечение

## НОРМЫ И ПРАВИЛА РЕДАКЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В своей работе редакция журнала следует следующим нормам и правилам:  
– обеспечивает рецензирование принятых к рассмотрению статей, привлекая для этого авторитетных российских и зарубежных специалистов и ученых;  
– придерживается процедуры коллегиального обсуждения статей редакционным советом, сформированным по принципу географического разнообразия и принадлежности участников к различным организациям;  
– руководствуется международными этическими нормами и издательскими стандартами в отношении научных публикаций.

## ИНДЕКСИРОВАНИЕ И СОХРАНЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ

Журнал включен в следующие базы данных: Российский индекс научного цитирования (учитывается в ядре РИНЦ), Scopus, Web of Science (ESCI, RSCI), Chemical Abstracts Service (CAS), Norwegian Centre for Research Data (NSD), Ulrich's Periodicals Directory.

Приоритетом редакционной политики является обеспечение сохранности научной информации путем архивации выпусков журнала и статей:

- статьи и метаданные размещаются в Научной электронной библиотеке России;
- обязательные бесплатные печатные и электронные экземпляры передаются в Российскую книжную палату (филиал ИТАР-ТАСС) с целью распределения между крупнейшими библиотечно-информационными организациями России;
- печатные и электронные выпуски журнала направляются в Chemical Abstracts Service;
- архив печатных и электронных выпусков хранится в научно-технической библиотеке ООО «НИИ Транснефть» и в редакции журнала.

## ПРИСУТВИЕ В ПЕРЕЧНЕ ВАК

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК). Публикуются статьи по следующим научным специальностям и соответствующим им отраслям науки (в редакции номенклатуры научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени, утвержденной Приказом Министерства образования и науки РФ от 23 октября 2017 г. № 1027):  
05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии (технические науки);  
05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (по отраслям) (технические науки);  
05.02.22 – Организация производства (по отраслям) (технические науки);  
08.00.05 – Экономика и управление народным хозяйством (по отраслям и сферам деятельности) (экономические науки);  
25.00.19 – Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ (технические науки).

## АВТОРСКИЕ ПРАВА И ПЕРСОНАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Редакционная политика основывается на юридических требованиях в отношении авторского права и смежных прав, недопущения плагиата, изложенных в законодательстве Российской Федерации. Редакция обеспечивает обработку и сохранение конфиденциальности персональных данных авторов в соответствии с Федеральным законом РФ № 152-ФЗ «О персональных данных».

Учредитель журнала является участником профессионального сообщества «Ассоциация научных редакторов и издателей» (АНРИ)

## РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

В. Н. Комарица, к. т. н.  
Н. Н. Сухорукова  
А. М. Цыбулов  
С. Е. Подгорнова  
В. Н. Малинина

## Верстка и дизайн:

Д. П. Васильев

## КОНТАКТЫ РЕДАКЦИИ

Тел.: +7(495) 950-8295,  
доб. 2230  
Факс: +7(495) 950-8297  
www.pipeline-science.ru  
mag@niitnn.transneft.ru

Свидетельство  
о регистрации СМИ:  
ПИ № ФС77-60207  
от 17.12.2014 г.  
ISSN 2221-2701  
eISSN 2541-9595  
Периодичность выхода:  
6 раз в год

Двухлетний импакт-фактор журнала, рассчитываемый Российским индексом научного цитирования (РИНЦ) с учетом цитирования из всех источников за 2020 год, – 0,891.

Перепечатка и иное коммерческое использование материалов допускается только с разрешения редакции.

Редакция не несет ответственности за достоверность информации, опубликованной в рекламных объявлениях.

В номере использованы фотографии из архива ООО «Транснефть – Медиа», а также фотографии, предоставленные авторами статей.

Перевод выполнен ООО «ЛМ Групп».  
Отпечатано в ООО «Компания Полиграфмастер».  
Тираж: 3970 экз.  
Отправлено в печать:  
20 апреля 2022 года

# Aims & Scope

Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation is a scientific journal in the field of main pipeline transport of oil and oil products.

## THE JOURNAL'S PURPOSE

Publication of original research papers of international importance for scientists and specialists in the field of oil and oil products pipeline transportation.

## THE JOURNAL'S THEMES

The journal covers the following thematic research trends in the field of oil and oil products pipeline transportation:

- Strength, reliability, durability
- Design, construction and operation
- Pipeline repair
- Welding
- Materials and equipment
- Automatics, telecom engineering and communication
- Corrosion protection
- Commodity-transport operations and metrological support
- Power industry and electrical equipment
- Fire and industrial safety
- Ecology
- Economics and management
- Safety and administration of law
- Technical regulation
- Innovative development
- Vocational education
- Inventory and logistics management

## THE RULES AND REGULATIONS OF EDITORIAL ACTIVITIES

The editorial staff of the journal in its work is guided by the following principles:

- provide peer review of all articles involving authoritative Russian and foreign experts and scientists;
- adhere to the procedure of collective discussion of articles by the Editorial Board, formed on the principle of geographic diversity and membership of various organizations;
- abide by the international ethical norms and publishing standards for scientific articles.

## INDEXING AND STORAGE OF INFORMATION

The journal is included in the databases: Russian Science Citation Index (RSCI), Scopus, Web of Science (ESCI, RSCI), Chemical Abstracts Service (CAS), Norwegian Centre for Research Data (NSD), Ulrich's Periodicals Directory.

The priority of the editorial policy is to ensure international scientific information communication and the storage of scientific information by archiving journal issues and articles:

- articles and metadata are placed in the Scientific Electronic Library of Russia;
- mandatory free printed and electronic copies are transferred to the Russian Book Chamber (ITAR-TASS branch) with the aim of distributing publications among the largest library and information organizations in Russia;
- printed issues of the journal are sent to Chemical Abstracts Service – acs.org;
- archive of print and electronic issues is stored in the scientific and technical library of Transneft R&D, LLC and in the journal's editorial office.

## PRESENCE ON THE LIST OF HIGHER ATTESTATION COMMISSION

The journal is included in the List of peer-reviewed scientific journals (the List of Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of Russian Federation), in which the main scientific results of dissertations for the degrees of Candidate of Sciences and Doctor of Science should be published. The journal publishes articles on the following scientific specialties and related fields of study (the edition of the nomenclature of scientific specialties for which scientific degrees are awarded is approved by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation dated October 23, 2017 No. 1027):

- 05.02.10 – Welding, related processes and technologies (technical sciences);
- 05.02.13 – Machines, units and processes (on branches) (technical sciences);
- 05.02.22 – Industrial engineering (on branches) (technical sciences);
- 08.00.05 – Economics national economy management (on branches and fields) (economic sciences);
- 25.00.19 – Construction and operation of oil and gas pipelines, oil depots and storage facilities (technical sciences).

## COPYRIGHT AND PERSONAL DATA

The editorial policy of the journal is based on the legal requirements in relation to copyright and allied rights, non-admission of plagiarism, set forth in the legislation of the Russian Federation. The editors ensure the processing and preservation of the author personal data privacy in accordance with the Federal Law of the Russian Federation No. 152-FZ "On Personal Data".

A member of Association of scientific editors and publishers (ASEP) – rasep.ru

## EDITORIAL OFFICE

V. N. Komaritsa, Cand. Sci. (Eng.)  
N. N. Sukhorukova  
A. M. Tsybulov  
S. E. Podgornova  
V. N. Malinina

## Layout and design:

D. P. Vasilyev

## CONTACT INFO:

Phone: +7(495) 950-8295, ext. 2230

Fax: +7(495) 950-8297

www.pipeline-science.ru

mag@niitnn.transneft.ru

Statement of mass media registration:

ПИ № ФС77-60207

dated 17.12.2014

ISSN 2221-2701

eISSN 2541-9595

Publication frequency:

6 issues per year

A two-year impact factor of the Journal calculated by the Russian Science Citation Index (RSCI) with taking into account citation from all sources for 2020 is 0.891.

Republication and other commercial use of materials are allowed only with the permission of the editorial board.

The editors are not responsible for the accuracy of the information published in advertisements.

There are photos from the archive of Transneft – Media, LLC used in the issue, as well as photos provided by the authors of the articles.

The translation is made by LM Group, LLC.

Printed at Poligraphmaster Company, LLC.

Circulation: 3970 copies

Sent to print: April 20, 2022

# РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА, ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛА

**Сощенко Анатолий Евгеньевич**

д. т. н., профессор, консультант управления инновационного и научно-технического развития ПАО «Транснефть», Москва

## РОССИЙСКИЙ СОСТАВ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА

**Бурков Петр Владимирович**, д. т. н., профессор, отделение нефтегазового дела, кафедра транспорта и хранения нефти и газа Национального исследовательского Томского политехнического университета, Томск. ORCID: 0000-0002-4334-508X

**Васильева Зоя Андреевна**, д. э. н., профессор, директор Института управления бизнес-процессами, заведующий кафедрой «Экономика и управление бизнес-процессами» ИУБП Сибирского Федерального Университета, Красноярск. ORCID: 0000-0002-8899-5262

**Жолобов Владимир Васильевич**, д. ф.-м. н., ведущий научный сотрудник лаборатории технологических расчетов ООО «НИИ Транснефть», Москва. ORCID: 0000-0001-8712-8215

**Конторович Алексей Эмильевич**, д. геол.-минерал. н., академик РАН, главный научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики имени А. А. Трофимука Сибирского отделения РАН, Новосибирск. ORCID: 0000-0001-8239-811X

**Королёнок Анатолий Михайлович**, д. т. н., профессор, декан факультета «Проектирование, сооружение и эксплуатация систем трубопроводного транспорта», заведующий кафедрой «Нефтепродуктообеспечение и газоснабжение» Российского государственного университета нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, Москва

**Манжай Владимир Николаевич**, д. х. н., старший научный сотрудник Института химии нефти Сибирского отделения РАН, профессор Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Томск

**Мастобаев Борис Николаевич**, д. т. н., профессор, факультет трубопроводного транспорта, кафедра «Транспорт и хранение нефти и газа» Уфимского государственного нефтяного технического университета, Уфа

**Матвиенко Юрий Григорьевич**, д. т. н., профессор, заведующий отделом прочности, живучести и безопасности машин, ФГБУН «Институт машиноведения имени А. А. Благонравова» РАН, Москва. ORCID: 0000-0003-2367-0966

**Махутов Николай Андреевич**, д. т. н., член-корреспондент РАН, профессор, главный научный сотрудник центра стали и сварки, прочностных расчетов ООО «НИИ Транснефть», Москва. ORCID: 0000-0001-5022-932X

**Неганов Дмитрий Александрович**, д. т. н., первый заместитель генерального директора ООО «НИИ Транснефть», Москва. ORCID: 0000-0002-3654-7978

**Несын Георгий Викторович**, д. х. н., ведущий научный сотрудник лаборатории химических реагентов ООО «НИИ Транснефть», Москва

**Новоселова Ирина Юрьевна**, д. э. н., профессор департамента отраслевых рынков факультета экономики и бизнеса Финансового университета при Правительстве РФ, профессор кафедры экономики нефтяной и газовой промышленности Российского государственного университета нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, Москва. ORCID: 0000-0002-5054-0676

**Сериков Павел Юрьевич**, д. э. н., заместитель вице-президента – директор департамента экономики ПАО «Транснефть», Москва

**Черепанов Анатолий Николаевич**, д. ф.-м. н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории термомеханики и прочности новых материалов Института теоретической и прикладной механики имени С. А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск. ORCID: 0000-0003-2562-7945

### ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ РОССИЙСКОГО СОСТАВА РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА:

обеспечение актуальности, высокого уровня и научно-технической ценности публикаций в журнале; проведение рецензирования статей; определение тематических направлений и обеспечение публикации в журнале статей наиболее цитируемых авторов; формирование годовых и текущих планов выпусков журнала; анализ результатов и выработка рекомендаций по организации, развитию и совершенствованию журнала

## МЕЖДУНАРОДНЫЙ СОСТАВ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА

**Адиб Самер**, Ph. D., профессор, заместитель декана, кафедра гражданского и экономического строительства, Университет Альберты, Эдмонтон, Канада. ORCID: 0000-0003-3750-2963

**Герберт Хофштеттер**, Ph.D., профессор, заведующий кафедрой «Извлечение углеводородной и геотермальной энергии», Университет Леобен, Австрия

**Караманос Спирос**, Ph. D., профессор факультета машиностроения, Университет Фессалии, Греция. ORCID: 0000-0003-0047-9173

**Каруппанан Сараванан**, Ph. D. (Eng.), доцент, заместитель декана факультета машиностроения Технологического университета ПЕТРОНАС, Перак, Малайзия

**Махмотов Ербол Сахитович**, д. х. н., академик Казахской национальной академии естественных наук, иностранный член Российской академии естественных наук, научный сотрудник ПОО «Ветераны нефтегазового комплекса», Нур-Султан, Казахстан. ORCID: 0000-0002-7514-5269

**Мохани Атеф**, Ph. D., доцент, заведующий кафедрой механики и машиностроения факультета инженерных и прикладных наук, Технологический Институт Университета Онтарио, Ошава, Канада. ORCID: 0000-0003-1630-0916

**Павлоу Димитриос**, Ph. D., академик Норвежской академии технологических наук, профессор кафедры механики деформируемого твердого тела, научный руководитель группы в области машиностроения и материаловедения кафедры механической и структурной инженерии и материаловедения, Университет Ставангера, Ставангер, Норвегия. ORCID: 0000-0002-9522-583X

**Паолаччи Фабрицио**, Ph. D., доцент кафедры машиностроения Третьего Университета Рима, директор и бизнес-разработчик академической спин-офф организации SAFEPLANT, Рим, Италия. ORCID: 0000-0003-2724-4809

**Плювинаж Ги**, Ph. D., почетный профессор, Университет Лотарингии, Нанси, Франция. ORCID: 0000-0001-6972-8559

**Раджив Патманатан**, Ph. D., профессор, доцент кафедры гражданского и инженерного проектирования, Технологический университет Сунберна, Мельбурн, Австралия. ORCID: 0000-0001-7731-8656

**Саяхов Берик Картанбаевич**, к. т. н., профессор Казахского национально-технического университета имени К. Сатпаева, директор департамента инновационно-технического развития АО «КазТрансОйл», Нур-Султан, Казахстан. ORCID: 0000-0001-9475-1478

**Хадж-Мелиани Мохаммед**, Ph. D., доцент лаборатории теоретической физики и физики материалов, Университет Хассиба Бен Боуали, Шлеф, Алжир. ORCID: 0000-0003-1375-762X

**Щербаков Сергей Сергеевич**, д. ф.-м. н., профессор, заместитель председателя Государственного комитета по науке и технологиям Республики Беларусь, Минск, Беларусь. ORCID: 0000-0001-6404-6129

### ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ МЕЖДУНАРОДНОГО РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА:

взаимодействие с зарубежными авторами по вопросам, связанным с публикацией статей в журнале; рецензирование статей зарубежных авторов; подготовка рекомендаций по тематической направленности и популяризации журнала за рубежом

# EDITORIAL BOARD

CHAIRMAN OF THE EDITORIAL BOARD, EDITOR-IN-CHIEF OF THE JOURNAL

## Soshchenko, Anatoly Eugenievich

Dr Sci. (Eng.), Professor, Adviser of the Department of Innovation and Scientific and Technical Development, Transneft, Moscow

## RUSSIAN EDITORIAL BOARD

**Burkov, Petr Vladimirovich**, Dr Sci. (Eng.), Professor, Division for Oil and Gas Engineering, Department of Oil and Gas Storage and Transportation, National Researcher of Polytechnic University, Tomsk. ORCID: 0000-0002-4334-508X

**Vasilyeva, Zoya Andreyevna**, Dr Sci. (Econ.), Professor, Director of Institute of Business Process Management, Head of Department of Economics and Business Process Management of Siberian Federal University, Krasnoyarsk. ORCID: 0000-0002-8899-5262

**Zholobov, Vladimir Vasilyevich**, Dr Sci. (Phys. and Math.), Lead Researcher of the Laboratory of technological calculations, Transneft R&D, LLC, Moscow. ORCID: 0000-0001-8712-8215

**Kontorovich, Alexey Emilyevich**, Dr Sci. (Geology and Mineralogy), Academician of Russian Academy of Sciences, Chief Researcher of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk. ORCID: 0000-0001-8239-811X

**Korolyonok, Anatoly Mikhailovich**, Dr Sci. (Eng.), Professor, Dean of the Faculty of Design, Construction and Exploitation of Pipeline Transport Systems, Head of Petroleum and Gas Supply Department, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow.

**Manzhai, Vladimir Nikolaevich**, Dr Sci. (Chem.), Senior Researcher of Institute of Petroleum Chemistry of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Professor of School of Earth Sciences & Engineering of Tomsk Polytechnic University, Tomsk.

**Mastobaev, Boris Nikolaevich**, Dr Sci. (Eng.), Professor, Pipeline Transportation Faculty, Department of Oil and Gas Storage and Transportation, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa.

**Matvienko, Yury Grigorievich**, Dr Sci. (Eng.), Professor, Head of Department of Strength, Survivability and Safety of Machines, Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow. ORCID: 0000-0003-2367-0966

**Makhutov, Nikolay Andreevich**, Dr Sci. (Eng.), Associate Member of the Russian Academy of Sciences, Professor, Chief Researcher of the Centre of Steel and Welding, Strength Analysis, Transneft R&D, LLC, Moscow. ORCID: 0000-0001-5022-932X

**Neganov, Dmitry Aleksandrovich**, Dr Sci. (Eng.), First Deputy General Director, Transneft R&D, LLC, Moscow. ORCID: 0000-0002-3654-7978

**Nesyn, Georgy Viktorovich**, Dr Sci. (Chem.), Lead Researcher of the Laboratory of Chemical Reagents, Transneft R&D, LLC, Moscow

**Novoselova, Irina Yuryevna**, Dr Sci. (Econ.), Professor, Department of Industry Markets, Faculty of Economics and Business, Financial University under the Government of Russian Federation; Professor, Department of Economics of Oil and Gas Industry, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow. ORCID: 0000-0002-5054-0676

**Serikov, Pavel Yurievich**, Dr Sci. (Econ.), Deputy Vice President, Head of Department of Economics, Transneft, Moscow

**Cherepanov, Anatoly Nikolaevich**, Dr Sci. (Phys. and Math.), Professor, Chief Researcher of the Laboratory of Thermomechanics and Strength of New Materials, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences Khristianovich Institute of the Theoretical and Applied Mechanics, Novosibirsk. ORCID: 0000-0003-2562-7945

### FUNCTIONAL TASKS OF THE RUSSIAN EDITORIAL BOARD:

ensure publications in the Journal are up-to-date, have a high level and scientific and technical value; review articles submitted for publication; define thematic directions and to ensure the most quoted authors are published in the Journal; create annual and current plans of the Journal issues; analyze results and provide recommendations on the organization, development and improvement of the Journal activity

## INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

**Adeeb, Samer M.**, Ph. D. (Eng.), Associate Dean, Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, University of Alberta, Edmonton, Canada. ORCID: 0000-0003-3750-2963

**Herbert Hofstätter**, Ph. D. (Eng.), Professor, Chair of Petroleum and Geothermal Energy Recovery, University of Leoben, Austria

**Karamanos, Spyros A.**, Ph. D. (Eng.), Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Thessaly, Greece. ORCID: 0000-0003-0047-9173

**Karuppanan, Saravanan**, Ph. D. (Eng.), Deputy Head of Mechanical Engineering Department, Associate Professor, University of Technology PETRONAS, Bandar Seri Iskandar, Perak, Malaysia

**Makhmotov, Erbol Sahituly**, Dr Sci. (Chem.), Academician of the Kazakhstan National Academy of Natural Sciences, Foreign Member of Russian Academy of Natural Sciences, Research Engineer of the Republican Public Association of Oil and Gas Veterans, Nur-Sultan, Kazakhstan. ORCID: 0000-0002-7514-5269

**Mohany, Atef**, Ph. D. (Eng.), Department Chair, Professor, Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering and Applied Science, University of Ontario Institute of Technology, Oshawa, Canada. ORCID: 0000-0003-1630-0916

**Pavlou, Dimitrios**, Ph. D. (Eng.), Academician of the Norwegian Academy of Technological Sciences, Professor of Solid Mechanics, Research Group Leader for Mechanical Engineering & Material Sciences, Department of Mechanical & Structural Engineering and Materials Science, University of Stavanger, Stavanger, Norway. ORCID: 0000-0002-9522-583X

**Paolacci, Fabrizio**, Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Department of Engineering, University Rome Tre, Technical Director and Business Developer of University Spin-off SAFEPLANT srl, Rome, Italy. ORCID: 0000-0003-2724-4809

**Pluvinage, Guy**, Ph. D. (Eng.), Emeritus Professor, University of Lorraine, Nancy Cadex, France. ORCID: 0000-0001-6972-8559

**Rajeev, Pathmanathan**, Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Department of Civil & Construction Engineering, Swinburne University of Technology, Melbourne, Australia. ORCID: 0000-0001-7731-8656

**Sayakhov, Berik Kartanbaevich**, Cand. Sci. (Eng.), Professor of Satpaev Kazakh National Technical University, Director of Department of Innovative and Technical Development, KazTransOil, JSC, Nur-Sultan, Kazakhstan. ORCID: 0000-0001-9475-1478

**Hadj-Meliani, Mohammed**, Ph. D. (Eng., Materials Science), Associate Professor, Laboratory of Theoretical Physics and Materials Physics, University Hassiba Ben Bouali of Chlef, Algeria. ORCID: 0000-0003-1375-762X

**Sherbakov, Sergei Sergeevich**, Dr Sci. (Phys. and Math.), Professor, Vice Chairman of the State Committee on Science and Technology of Republic of Belarus, Minsk, Belarus. ORCID: 0000-0001-6404-6129

### FUNCTIONAL TASKS OF THE INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD:

communicate with foreign authors on issues related to articles publication in the Journal; review articles of foreign authors; prepare recommendations on the topical direction and the Journal promotion abroad

# СОДЕРЖАНИЕ

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ, СТРОИТЕЛЬСТВО И ЭКСПЛУАТАЦИЯ

- 128 Критерии эффективности физического воздействия на нефть со сложными реологическими характеристиками**  
М. А. Промтов, Р. З. Сунагатуллин, С. Е. Кутуков, А. Н. Колиух, О. А. Шейна, Ф. С. Зверев
- На основании анализа процессов в структуре нефти авторами предложены подходы и критерии, позволяющие оценить эффективность методов физического воздействия на вязкие и тяжелые нефти со сложными реологическими характеристиками. В качестве критериев эффективности обработки нефти предложены безразмерные коэффициенты, показывающие соотношения динамической вязкости, удельной мощности для поддержания течения в нефти до и после физического воздействия, а также отношение изменения энергии тиксотропии нефти к удельным затратам энергии для реализации физического воздействия на нефть.
- 138 Математическое моделирование русловых процессов с прогнозом развития на десять лет**  
М. С. Хамитов, В. А. Прокофьев, Н. С. Баканович
- Представлено практическое применение трехмерной модели открытого потока, пригодной для прогноза русловых деформаций в много рукавных руслах. Представлено описание используемой численной модели, учитывающей оползание подводных откосов, закрепленные (ремонтные) участки дна, взвешенные и влекомые наносы. Проведена верификация разработанной численной модели по результатам физических экспериментов, ее калибровка и валидация по натурным данным для конкретного объекта.

## ПРОЧНОСТЬ, НАДЕЖНОСТЬ, ДОЛГОВЕЧНОСТЬ

- 149 Малоцикловая усталость при «жестком» нагружении металла отводов холодного гнуща класса прочности K56**  
О. А. Задубровская, Д. А. Гаврилов, Г. В. Нестеров, П. В. Пошибаев
- Проведена оценка долговечности отводов холодного гнуща из стали класса прочности K56 по результатам испытаний на малоцикловую усталость по схеме «жесткого» нагружения при растяжении образцов из недеформированной, растянутой и сжатой зон отводов. Показано, что долговечность изогнутой части отводов в растянутой и сжатой зонах не меньше, чем металла недеформированной зоны. Определена зависимость относительного сужения испытанных образцов от количества циклов нагружения.
- 160 Расширенная модель коэффициента интенсивности напряжений для длинных трещин**  
Н. Нуи, Ф. З. Арзур, Т. Бухаруба, М. Хадж-Мелиани, Ч. Бурау, С. Рамтани
- В работе предлагается расширение модели коэффициента интенсивности напряжений на длинные трещины полуэллиптической формы с учетом обобщения Мураками, ограниченного короткими трещинами. Методика позволяет с приемлемой эффективностью рассчитывать коэффициент интенсивности напряжений путем использования новой поверхности, возникшей в результате распространения трещины, и может рассматриваться как упрощенный метод оценки опасности полуэллиптических трещин.

## ТОВАРНО-ТРАНСПОРТНЫЕ ОПЕРАЦИИ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

- 169 Выбор преобразователей расхода для систем обнаружения утечек в магистральных нефте- и нефтепродуктопроводах**  
О. В. Аралов, И. В. Буянов, А. Т. Яровой, С. В. Филиппов, Г. Н. Ключников
- Проведена комплексная оценка преобразователей расхода разных типов с точки зрения их пригодности для построения измерительных каналов расхода при проектировании и внедрении систем обнаружения утечек на участках магистральных нефте- и нефтепродуктопроводов. Предложены варианты требований к метрологическим характеристикам расходомеров, применяемых в составе измерительных каналов расхода систем обнаружения утечек, а также матрица выбора расходомеров в зависимости от диаметра трубопровода и типа среды.

## ЭКОЛОГИЯ

- 178 Нефтесорбирующие свойства коры древесных растений на примере сосны обыкновенной**  
Д. С. Дубовик, В. В. Тараканов, А. В. Николаева, А. С. Дунаева, К. Г. Хомутова
- Изучены нефтесорбирующие свойства (нефтеемкость) древесной коры на примере сосны обыкновенной с использованием двух видов товарной нефти и ее смесей с водой. Проведена оценка количества, глубины и скорости проникновения нефти и водонефтяных эмульсий в нативную кору сосны обыкновенной. Определена скорость испарения легких фракций нефти и водонефтяных эмульсий из загрязненной коры.

## ПРАВООБЛАДАНИЕ И БЕЗОПАСНОСТЬ

- 189 Оценка применимости матрицы MITRE ATT&CK для моделирования угроз информационной безопасности АСУТП объектов трубопроводного транспорта**  
В. В. Кузьмин, Д. А. Кобзев, А. В. Кныш, О. Н. Давиденко
- Проведена оценка возможности применения матрицы MITRE ATT&CK для моделирования угроз информационной безопасности АСУТП объектов трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. Результаты исследования применимы при проведении оценки соответствия реальным угрозам мер, принимаемых нефтепроводным предприятием по обеспечению информационной безопасности АСУТП.

## ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

- 198 Современные подходы к моделированию интеллектуальных систем управления. Часть 2. Автономный «Hard» и «Soft» – эволюция компетенций**  
И. В. Лямкин, А. А. Костяшина
- Рассмотрены вопросы математического моделирования систем управления, основанных на концепции автономного искусственного интеллекта, возможности их применения в системе магистрального трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. Исследованы целевое назначение, конструктивные особенности и принцип действия интеллектуальных управляющих систем, способных к адаптации и автономному функционированию в изменяющихся условиях внешней среды.



## DESIGN, CONSTRUCTION AND OPERATION

### 128 Effectiveness criteria for physical actions on oil with complicated rheological characteristics

Maxim A. Promptov, Rustam Z. Sunagatullin, Sergey E. Kutukov, Alexander N. Koliukh, Olga A. Sheina, Fedor S. Zverev

To improve rheological parameters of heavy and viscous oils, transportation of which through main pipelines requires additional operating expenses, physical actions methods could be applied. Presently there are no criteria and methodologies for assessing effectiveness of methods of physical actions on oil. The authors of this paper offer approaches and criteria that permit to assess effectiveness of methods of physical actions on heavy and viscous oils with complicated rheological characteristics. Dimensionless coefficients, which indicate ratios between oil dynamic viscosity, specific power for supporting oil flow before and after physical impact, as well as ratios of thixotropy energy variation to specific energy spent for realization of physical actions on oil, were offered as oil treatment effectiveness criteria.

### 138 Mathematical simulation of river bed evolution with projected growth for ten years

Maxim S. Khamitov, Vladimir A. Prokofyev, Natalya S. Bakanovichus

Practical application of the open flow three-dimensional model applicable for forecasting riverbed strains in braided riverbeds is presented. Description of the used numerical model is presented, taking into account the sliding of underwater slopes, fastened (repair) riverbed areas, suspended and bed load deposits. Verification of the developed numerical model by results of physical experiments, model calibration and validation by full scale data for a specific facility were performed.

## STRENGTH, RELIABILITY, DURABILITY

### 149 Low-cycle fatigue at loading of K56 strength class metal of cold bending elbows

Olga A. Zadubrovskaya, Dmitry A. Gavrilov, Grigory V. Nesterov, Pavel V. Poshibaev

Endurance of cold bending elbows from K56 strength class steel was evaluated according to results of low-cycle fatigue tests by a scheme of loading under tension of specimens made from unstrained, stretched and compressed elbow zones. It was demonstrated that endurance of the bent part of elbows in the stretched and compressed zones is not lesser than that of metal of the unstrained zone. The function of tested specimens' relative reduction versus quantity of loading cycles was defined.

### 160 Extended stress intensity factor model from short to long cracks

Nabil Noui, Fatima Zouhra Arzour, Taoufik Boukharouba, Mohammed Hadj-Meliani, Chokri Bouraoui, Salah Ramtani

In this work, an extension of the stress-intensity factor model to long semi-elliptic shaped cracks is proposed considering the generalizing of Murakami limited to short cracks. The method allows to calculate the stress intensity factor by using the new surfaces of the crack created by propagation with an acceptable efficiency. This methodology can provide engineers with a simplified method to evaluate the harmfulness of this type of cracks, especially in the case of pressure vessels. It can also open new perspectives on the use of a crack surface in fatigue studies.

## COMMODITY-TRANSPORT OPERATIONS AND METROLOGICAL SUPPORT

### 169 Selection of flow transducers for leak detection systems in main oil pipelines and oil product pipelines

Oleg V. Aralov, Ivan V. Buyanov, Artemy T. Yarovoy, Sergey V. Filippov, Gleb N. Klyuchnikov

Integrated evaluation of flow transducers of various types with regard to their suitability for generating measuring flow channels during design and implementation of leak detection systems in sections of main oil pipelines and oil product pipelines was performed. Versions of requirements to metrological characteristics of flow meters used as a part of measuring flow channels in leak detection systems, as well as a matrix of flow meter selection depending on pipeline diameter and medium type are proposed.

## ECOLOGY

### 178 Oil-absorbing properties of bark of woody plants on the example of Scotch pine

Dmitry S. Dubovik, Vyacheslav V. Tarakanov, Arina V. Nikolaeva, Anastasia S. Dunaeva, Ksenia G. Khomutova

The oil-absorbing properties (oil capacity) of tree bark on the example of Scotch pine using two product oil types and its mixtures with water were studied. Quality, depth and speed of oil and oil-water emulsions penetration into native Scotch pine bark were evaluated. Evaporation rate for light ends of oil and oil-water emulsions from contaminated bark was defined. A nonlinear dependence between the initial concentration of oil and its sorption was revealed. Hypotheses based on the assumption of physical and chemical interactions of oil, water and bark are proposed for explanation.

## SAFETY AND ADMINISTRATION OF LAW

### 189 Evaluation of matrix MITRE ATT&CK applicability for simulation of threats to information security of ICS of pipeline transportation facilities

Vyacheslav V. Kuzmin, Dmitry A. Kobzev, Alexander V. Knysh, Oksana N. Davidenko

A possibility of using MITRE ATT&CK matrix for simulating threats to information security of ICS of pipeline transportation facilities for oil and oil products was evaluated. Based on the results of the analysis it was concluded on applicability of MITRE ATT&CK matrix for the specified purpose with account of its supplement depending on specific features of particular facility and ICS. The study results are applicable when estimating correspondence of measures taken by an oil pipeline enterprise for providing ICS information security against actual threats.

## ECONOMICS AND MANAGEMENT

### 198 Modern approaches to simulation of intelligent control systems. Part 2. Autonomous "Hard" and "Soft" – evolution of competencies

Igor V. Lyamkin, Anna A. Kostyashina

Issues of mathematic simulation of control systems based on the autonomous artificial intelligence concept, possibilities of their application in the system of main pipeline transportation for oil and oil products were considered. Designated use, structural features and operating principle of intelligent control systems capable for adaptation and autonomous functioning in changing environmental conditions were studied.

UDC 532.133:622.69:534-8

DOI: 10.28999/2541-9595-2022-12-2-128-137

# Критерии эффективности физического воздействия на нефть со сложными реологическими характеристиками

М. А. Промтов<sup>а</sup>, Р. З. Сунагатуллин<sup>б</sup>, С. Е. Кутуков<sup>с</sup>, А. Н. Колиух<sup>а</sup>, О. А. Шеина<sup>а</sup>, Ф. С. Зверев<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Тамбовский государственный технический университет, 106, ул. Советская, 392000, Тамбов, Россия

<sup>б</sup> ООО «Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта» (ООО «НИИ Транснефть»), Севастопольский проспект, 47а, 117186, Москва, Россия

<sup>с</sup> Научно-технический центр трубопроводного транспорта ООО «НИИ Транснефть» (НТЦ ООО «НИИ Транснефть»), проспект Октября, 144/3, 450055, Уфа, Россия

## Аннотация

Для улучшения реологических параметров тяжелых и вязких нефтей, транспортировка которых по магистральным трубопроводам требует дополнительных эксплуатационных затрат, могут применяться физические методы воздействия. В настоящее время отсутствуют критерии и методики оценки эффективности методов физического воздействия на нефть. Авторами настоящей статьи предложены подходы и критерии, позволяющие оценить эффективность методов физического воздействия на вязкие и тяжелые нефти со сложными реологическими характеристиками. На основе анализа факторов, влияющих на реологию нефти, в качестве критериев эффективности обработки нефти предложены безразмерные коэффициенты, показывающие соотношения динамической вязкости, удельной мощности для поддержания течения в нефти до и после физического воздействия, а также отношение изменения энергии тиксотропии нефти к удельным затратам энергии для реализации физического воздействия на нефть. Методика расчета коэффициентов апробирована на примере роторно-импульсного воздействия на образцы нефти со сложными реологическими характеристиками. Обработку нефти проводили в роторном импульсном аппарате, в котором в потоке нефти генерируются пульсации давления, кавитация, развитая турбулентность, вихреобразование, большие сдвиговые нагрузки. По результатам экспериментов установлено, что реологические параметры высокосмолистой, малопарафинистой нефти остались практически неизменными. Для высокопарафинистых нефтей отмечено снижение динамической вязкости в среднем на 35 %, энергии тиксотропии – на 68 %. Величина изменения энергии тиксотропии за счет разрушенных внутренних связей нефти может многократно (до 70 раз) превышать величину энергии, затраченной на обработку нефти. Коэффициенты, характеризующие эффективность метода воздействия, значительно больше единицы, что показывает хорошую технологическую эффективность метода роторно-импульсного воздействия для высокопарафинистой нефти.

**Ключевые слова:** реологические параметры, реология нефти, вязкость нефти, динамическая вязкость, энергия тиксотропии, тяжелая нефть, вязкая нефть, критерий эффективности

## Для цитирования

Критерии эффективности физического воздействия на нефть со сложными реологическими характеристиками / М. А. Промтов [и др.] // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2022. Т. 12. № 2. С. 128–137. <https://doi.org/10.28999/2541-9595-2022-12-2-128-137>



# Effectiveness criteria for physical actions on oil with complicated rheological characteristics

Maxim A. Promtov<sup>a</sup>, Rustam Z. Sunagatullin<sup>b</sup>, Sergey E. Kutukov<sup>c</sup>, Alexander N. Koliukh<sup>a</sup>,  
Olga A. Sheina<sup>a</sup>, Fedor S. Zverev<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Tambov State Technical University, 106, Sovetskaya Str., Tambov, 392000, Russian Federation

<sup>b</sup> The Pipeline Transport Institute, LLC (Transneft R&D, LLC), 47a Sevastopolsky Prospect, Moscow, 117186, Russian Federation

<sup>c</sup> Science & Technology Centre of Pipeline Transportation of Transneft R&D, LLC (STC Transneft R&D, LLC), 144/3 Oktyabrya Prospect, Ufa, 450055, Russian Federation

## Abstract

To improve rheological parameters of heavy and viscous oils, transportation of which through main pipelines requires additional operating expenses, physical actions methods could be applied. Presently there are no criteria and methodologies for assessing effectiveness of methods of physical actions on oil. The authors of this paper offer approaches and criteria that permit to assess effectiveness of methods of physical actions on heavy and viscous oils with complicated rheological characteristics. Based on the analysis of factors that affect the oil rheology, dimensionless coefficients, which indicate ratios between oil dynamic viscosity, specific power for supporting oil flow before and after physical actions, as well as ratios of thixotropy energy variation to specific energy spent for realization of physical actions on the oil, were offered as oil treatment effectiveness criteria. The methodology for coefficients calculation was tested for an example of rotor-pulse action on oil specimens with complicated rheological characteristics. The oil was treated in a rotor pulse device, in which pressure pulsation, cavitation, developed turbulence, vortex formation, high shear loads are generated in the oil flow. It was established by the experimental results that rheological parameters of highly resinous, low in paraffin oil practically did not change. For high-paraffin crudes decrease of dynamic viscosity, in average, by 35 %, thixotropy energy by 68 % was found. The value of thixotropy energy variation due to rupture of oil inner connections could repeatedly (up to 70 times) exceed the energy spent for oil treatment. Coefficients, which characterize action method effectiveness are considerably greater than one, that demonstrates good process effectiveness of the method of rotor-pulse action for high-paraffin crudes.

**Keywords:** rheological parameters, oil rheology, oil viscosity, dynamic viscosity, thixotropy energy, heavy oil, viscous oil, effectiveness criterion

## For citation

Promtov M. A., Sunagatullin R. Z., Kutukov S. E., Koliukh A. N., Sheina O. A., Zverev F. S. Effectiveness criteria for physical actions on oil with complicated rheological characteristics. *Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2022;12(2):128–137. <https://doi.org/10.28999/2541-9595-2022-12-2-128-137>

## Введение

Технология и энергозатраты транспортировки нефти по магистральным трубопроводам существенно зависят от ее реологических свойств [1]. Повышенное содержание асфальтеносмолистых и парафиновых веществ (АСПВ) в нефти затрудняет ее транспортирование из-за необходимости дополнительных затрат энергии на перекачку жидкости более высокой вязкости и плотности, необходимости борьбы с отложениями, которые уменьшают проходное сечение и увеличивают шероховатость стенок труб, сокращают срок эксплуатации трубопроводов [2].

Для улучшения реологических свойств вязкой нефти эффективно используются методы, основанные на внесении в поток дополнительной тепловой энергии («горячие» трубопроводы с системами попутного подогрева), применяются технологии разбавления вязкой нефти маловязкой нефтью, газовым конденсатом и другими разбавителями, газонасыщения нефти,

перекачка в виде водной эмульсии, перекачка с присадками и поверхностно-активными веществами [3–5].

Физические методы воздействия могут быть эффективными для улучшения реологических параметров тяжелых и вязких нефтей [6]. Существенная часть исследований по снижению вязкости за счет физических эффектов проводится с применением волновых методов обработки образцов нефти [7]. Многочисленные исследования показали, что волновое воздействие на нефть в виде пульсаций давления и кавитации позволяет улучшить ее реологические характеристики, снизить содержание серы и увеличить долю низкокипящих фракций [8]. Сложность перехода от лабораторных исследований к промышленным технологиям заключается в отсутствии методов масштабирования физических эффектов для трубопроводного транспорта. Рассматриваемые методы успешно реализуются в технологиях гидроимпульсного воздействия при транспортировке сырой нефти из пласта. При этом разработ-

ка промышленных технологий с применением физических методов воздействия на нефть для транспорта нефти по магистральным трубопроводам и методики оценки их эффективности остаются актуальными задачами [9].

Цель работы – предложить критерии оценки эффективности метода физического воздействия на негьютоновские нефти, имеющие нелинейные реологические характеристики.

## Методы

Нефть представляет собой дисперсную систему, в которой углеводородные и неуглеводородные компоненты образуют ассоциаты за счет сил межмолекулярного взаимодействия – так называемые сложные структурные единицы (ССЕ), состоящие в основном из асфальтеновых ядер, окруженных множеством сольватных слоев из смол, ароматических и насыщенных углеводородов [10]. Молекулы с высоким потенциалом парного взаимодействия соединяются в ядро ССЕ с низким потенциалом – обволакивают ядро в межфазном слое. Структурообразование нефти с позиций свойств химических связей обуслов-

лено ассоциацией ее высокомолекулярных компонентов и связано с действием двух факторов: взаимодействием полярных компонентов АСПВ из-за формирования водородной связи между ними и формированием единой молекулярной орбитали между высокомолекулярными компонентами [11]. Увеличение доли АСПВ и размеров кластеров на их основе приводит к значительному возрастанию вязкости и в основном определяет реологические параметры нефти. Кластеры АСПВ могут иметь вид отдельных неполярных агрегатов с замкнутыми на себя полярными группами [11].

Физической основой изменения реологических параметров нефти являются механизмы разрушения и структурирования свободно- и связнодисперсных структур – сети кластеров АСПВ [12]. Наличие развитой внутренней структуры АСПВ и неуглеводородных веществ определяет нелинейный характер кривой течения, аномалию вязкости при малых скоростях сдвига, а также тиксотропные свойства нефти, которые характеризуются гистерезисом реологических кривых течения «напряжение – скорость сдвига», получаемых при повышении и снижении



скорости сдвига, а также снижением эффективной вязкости при увеличении скорости сдвига. Зависимость вязкости от скорости сдвига связывают с процессом разрушения/восстановления нативной структуры нефти при, соответственно, повышении и снижении скорости сдвига [13–16]. Гистерезис течения зависит от природы нефти, структурирования кластеров АСПВ, а также от температуры [17]. Площадь «петли гистерезиса», ограниченная реологическими кривыми течения на графике зависимости скорости сдвига от напряжения сдвига, характеризует величину энергии, необходимую для разрушения тиксотропных связей, отнесенную к единице объема нефти. Чем больше площадь «петли гистерезиса», тем сильнее проявляется структурообразование при определенных температурных условиях [18]. Энергию тиксотропии жидкости при различной степени разрушения структуры можно оценить сравнением величин площади фигур под кривыми течения [19].

При уменьшении энергии тиксотропии величина площади фигуры под кривой течения обратного хода будет стремиться к величине площади фигуры под кривой течения прямого хода  $S_1 \rightarrow S_2$  (Па/с), вид линий прямого и обратного ходов будет приближаться к прямой линии, а разница между площадями фигур прямого и обратного ходов будет пропорциональна удельной энергии тиксотропии системы  $\Delta S \sim N$  [9, 19]. Чем меньше удельная энергия тиксотропии (площадь «петли гистерезиса»), тем ближе образец нефти по реологическим характеристикам к ньютоновской жидкости. Площадь фигуры под кривой течения может быть определена стандартными численными методами.

Для нефти с выраженными тиксотропными свойствами напряжение сдвига существенно изменяется в зависимости от скорости сдвига, и удельные затраты энергии пластической деформации пропорциональны площади  $S$  под кривой течения [12, 18]:

$$N \sim \Delta S = \int \Delta\tau(\dot{\gamma}) d\dot{\gamma},$$

где  $N$  – удельные затраты энергии пластической деформации образца нефти, Вт/м<sup>3</sup>;

$\Delta\tau(\dot{\gamma}) = \tau_{(1)} - \tau_{(2)}$  – разница напряжений сдвига прямого и обратного ходов вискозиметрии, Па;

$\tau$  – напряжение сдвига, Па;

$\dot{\gamma}$  – скорость сдвига, с<sup>-1</sup>.

При физическом воздействии на нефть для изменения ее нативной структуры затрачивается энергия. При обработке нефти физико-механическими методами происходит диспергирование кристаллов парафина, изменение диэлектрических свойств, а также разрушение надмолекулярных связей между ССЕ, разрушение ССЕ с увеличением удельной поверхности и, следовательно, поверхностной энергии. Так как энергия, затраченная на изменение нативной структуры



нефти, пропорциональна площади под кривыми течениями, то изменение энергии тиксотропии обработанного определенным физическим методом образца нефти также будет пропорционально изменению площади фигур под кривыми течения до и после физического воздействия. Другим реологическим параметром нефти, характеризующим эффективность физического воздействия на нефть, может служить величина динамической вязкости при определенных значениях температуры и скорости сдвига.

Так как при физическом воздействии на нефть происходит изменение ее структуры, то (если не приняты меры для стабилизации нового состояния) для снижения внутреннего энергетического потенциала нефть стремится вернуться к исходной структуре. В этом случае необходимо определить, как меняются зависимости реологических параметров нефти во времени после оказанного физического воздействия:  $\tau = \tau(\gamma, t)$ . Приращение внутренней энергии за счет увеличения свободной поверхности между фрагментами разрушенной структуры ССЕ определяется интегрированием кривых течения по двум переменным [9]:

$$V_a = \int_0^{t_p} \int_0^{\gamma_p} \Delta\tau(\gamma) d\gamma dt, \quad (1)$$

где  $V_a$  – приращение внутренней энергии за счет увеличения свободной поверхности между фрагментами разрушенной структуры нефти, Вт·с/м<sup>3</sup>;

$t_p$  – продолжительность положительного эффекта от обработки нефти (время релаксации структуры нефти), с.

Изменение внутренней энергии нефти будет определяться разностью интегралов (1) по кривым течения прямого хода измерений для необработанной и обработанной нефти. При определении эффекта от физического воздействия на нефть проводят измерения реологических параметров исходной нефти до и после обработки. Измерение реологических параметров на ротационном вискозиметре осуществляют в выбранном диапазоне скоростей сдвига  $\{\gamma_{\min}, \gamma_{\max}\}$ . Изменение внутренней энергии в выбранном диапазоне скоростей сдвига с учетом времени релаксации структуры обработанной нефти можно оценить, как:

$$\Delta V_a = \int_{\gamma_{\min}}^{\gamma_{\max}} \int_{\gamma_{\min}}^{\gamma_{\max}} \tau_{(1)}(\gamma) d\gamma dt - \int_{\gamma_{\min}}^{\gamma_{\max}} \int_{\gamma_{\min}}^{\gamma_{\max}} \tau_{(2)}(\gamma) d\gamma dt. \quad (2)$$

Для определения эффективности какого-либо процесса удобно использовать безразмерные параметры. В частности, для критериев эффективности метода физического воздействия с целью изменения реологических характеристик образца нефти можно предложить следующие параметры:

$$K_{\mu} = \frac{\mu_1}{\mu_2}, \quad (3)$$

$$K_s = \frac{\Delta S_1}{\Delta S_2}, \quad (4)$$

$$K_w = \frac{\Delta V_a}{W}, \quad (5)$$

где  $\mu_1$  – динамическая вязкость образца нефти при заданных температуре и скорости сдвига на линии прямого хода до физического воздействия, Па·с;

$\mu_2$  – динамическая вязкость образца нефти при заданных температуре и скорости сдвига на линии обратного хода после физического воздействия, Па·с;

$\Delta S_1$  – удельная мощность поддержания течения в образце нефти до физического воздействия, Вт/м<sup>3</sup>;

$\Delta S_2$  – удельная мощность поддержания течения в образце нефти после физического воздействия, Вт/м<sup>3</sup>;

$\Delta V_a$  – изменение энергии тиксотропии образца нефти, Дж/м<sup>3</sup>;

$W$  – удельные затраты энергии на обработку образца нефти при физическом воздействии, Дж/м<sup>3</sup>.

Коэффициент  $K_{\mu}$  показывает, во сколько раз снизилась вязкость при заданных температуре и скорости сдвига на линии прямого хода за счет физического воздействия.

Коэффициент  $K_s$  показывает, во сколько раз снизилась величина энергии тиксотропии образца нефти за счет изменения ее нативной структуры при физическом воздействии.

Коэффициент  $K_w$  показывает отношение изменения энергии тиксотропии за счет разрушенных внутренних связей нативной структуры нефти к энергии, затраченной на процесс ее обработки.

Эффективность физических методов обработки нефти существенно зависит от ее тиксотропных свойств. Чем большую значимость имеет структурная вязкость, тем эффективнее применение механических методов деструкции, то есть эффективность метода воздействия значительно зависит от состава и структуры обрабатываемой нефти.

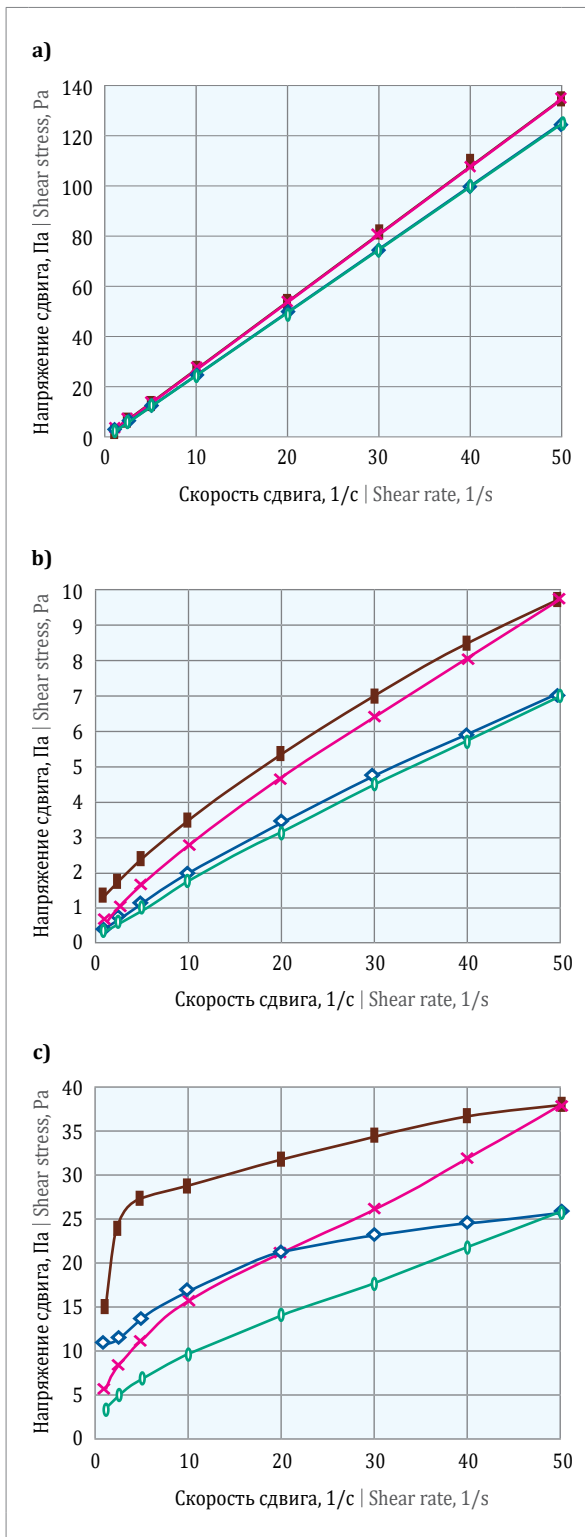
Методику расчета критериев эффективности метода воздействия в данной работе проверяли на примере роторно-импульсного метода воздействия на нефть. Определение эффективности данного метода проведено для трех образцов нефти. Физико-химические параметры образцов нефти приведены в таблице.

По массовому содержанию парафинов образец № 1 относится к типу малопарафинистой нефти (менее 1,5 %), образцы № 2 и 3 – к типу высокопарафинистой нефти (более 6 %). По содержанию смолисто-асфальтеновых компонен-

Таблица. Физико-химические параметры образцов нефти  
Table. Physical and chemical parameters of oil specimens

Показатель   Indicator	Образец   Specimen		
	№ 1   No. 1	№ 2   No. 2	№ 3   No. 3
Динамическая вязкость при температуре 20 °С и скорости сдвига 50 с <sup>-1</sup> , мПа·с Dynamic viscosity under temperature 20 °C and shear speed 50 s <sup>-1</sup> , mPa·s	2704	196	757
Плотность, кг/м <sup>3</sup>   Density, kg/m <sup>3</sup>	942,3	873,4	820,6
Температура застывания, °С   Setting point, °C	6	20	29
Содержание механических примесей, %   Contents of mechanical impurities, %	0,03	0,079	0,038
Содержание воды, %   Contents of water, %	0,03	0,09	Отсутствует Not available
Содержание серы, %   Contents of sulfur, %	1,23	0,95	0,25
Содержание асфальтенов, %   Contents of asphaltenes, %	4,05	1,24	1,08
Содержание смол, %   Contents of tars, %	21,89	12,48	8,14
Содержание парафинов, %   Contents of paraffines, %	1,35	6,99	20,57
Коэффициент $K_S$   Coefficient $K_S$	~0	3,17	1,7
Коэффициент $K_W$   Coefficient $K_W$	~0	13,2	69,6
Коэффициент $K_{\mu}$ при температуре 20 °С и скорости сдвига 10 с <sup>-1</sup> на линии прямого хода Coefficient $K_{\mu}$ under temperature 20 °C and shear speed 10 s <sup>-1</sup> in forward stroke line	1,08	1,78	1,70
Коэффициент $K_{\mu}$ при температуре 20 °С и скорости сдвига 30 с <sup>-1</sup> на линии прямого хода Coefficient $K_{\mu}$ under temperature 20 °C and shear speed 30 s <sup>-1</sup> in forward stroke line	1,08	1,48	1,48
Коэффициент $K_{\mu}$ при температуре 20 °С и скорости сдвига 50 с <sup>-1</sup> на линии прямого хода Coefficient $K_{\mu}$ under temperature 20 °C and shear speed 50 s <sup>-1</sup> in forward stroke line	1,08	1,40	1,47





**Рисунок.** Кривые течения образцов нефти № 1 (а), 2 (б), 3 (в) при 20 °С: —■— прямой ход, до обработки в РИА; —×— обратный ход, до обработки в РИА; —◇— прямой ход, после обработки в РИА; —○— обратный ход, после обработки в РИА

**Figure.** Flow curves for oil specimens No. 1 (a), 2 (b), 3 (c) at 20 °C: —■— forward stroke, before treatment in rotor pulse device; —×— return stroke, before treatment in rotor pulse device; —◇— forward stroke, after treatment in rotor pulse device; —○— return stroke, after treatment in rotor pulse device

тов образец № 1 относится к типу смолистой нефти (от 18 до 35 %), образцы № 2 и 3 – к типу малосмолистой нефти (менее 18 %).

Роторно-импульсное воздействие на образцы нефти осуществляли в роторном импульсном аппарате (РИА), реализующем многофакторное импульсное воздействие на обрабатываемую жидкость: пульсации давления, интенсивная кавитация, развитая турбулентность, вихреобразование, большие сдвиговые нагрузки [20]. Обработка образцов нефти проводилась в пилотной установке, состоящей из РИА, насоса, двух емкостей, приборов регистрации параметров давления, температуры и расхода [21].

Обрабатываемый образец нефти заливали в первую емкость, из которой она под давлением прокачивалась через РИА во вторую емкость. Вся нефть проходила однократно через активные зоны РИА и затем выгружалась из второй емкости. Частотные преобразователи позволяли регулировать частоту вращения вала насоса и частоту вращения ротора РИА. Скорость сдвига в РИА достигала  $33 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$  при зазоре между ротором и статором  $\sim 0,1 \text{ мм}$ . Обработка нефти проходила при подаче 0,6–0,7 л/с, давлении на входе в аппарат до  $9 \cdot 10^5 \text{ Па}$ . Обработка образцов осуществлялась в температурном диапазоне 25–30 °С для обеспечения текучести нефти по трубопроводам установки. Хотя основная масса парафинов с температурой плавления выше 30 °С в образцах нефти находилась в твердом кристаллическом состоянии, визуально (без оптического увеличения) дисперсные частицы не определялись. Удельная потребляемая мощность на обработку единицы объема образца нефти в пилотной установке на базе РИА составляла: для образца № 1 – 2,676 кВт·ч/м<sup>3</sup>, для образца № 2 – 1,004 кВт·ч/м<sup>3</sup>, для образца № 3 – 1,411 кВт·ч/м<sup>3</sup>. Время релаксации реологических параметров для образцов № 2 и 3 – 5 суток.

## Результаты

Образцы нефти до и после ее обработки в РИА исследовали на вискозиметрах ротационного типа DV2T RV Брукфильд и DV2T LV Брукфильд с использованием SSA адаптера для малых образцов с камерой SC4-13RPY и датчиком температуры RTD [21]. Термостатирование проводилось жидкостным криотермостатом LOIP FT 311-80. Ротационный вискозиметр позволял получать значения динамической вязкости и напряжения сдвига при заданной частоте вращения шпинделя и скорости сдвига. Измерения реологических параметров нефти проводили в диапазоне скоростей сдвига от  $\gamma_{\text{min}} = 2 \text{ с}^{-1}$  до  $\gamma_{\text{max}} = 50 \text{ с}^{-1}$ . Закономерности изменения напряжения сдвига нефти до и после обработки в РИА определяли по кривым течения, построенным по данным измерений ротационным вискозиметром при температуре 20 °С (см. рисунок).



По форме графика прямого хода на рисунке при температуре 20 °С образец № 1 соответствует ньютоновской модели с уравнениями зависимостей для образца нефти до обработки  $\tau = 2,7\gamma$ , после обработки  $\tau = 2,5\gamma$ . Нефть относится к ньютоновской модели за счет малого содержания парафинов, а большие значения вязкости обусловлены высокой концентрацией смол.

Графики прямого хода кривых течений экспериментальных образцов № 2 и 3 при температуре 20 °С показывают, что нефти относятся к неньютоновским жидкостям. Для образца № 2 реологические кривые до обработки соответствуют модели Балкли – Гершеля (нелинейно-вязкопластичная жидкость с предельным напряжением сдвига),  $\tau = 24,24 + 20,46\gamma^{0,51}$ ; после обработки – модели Шведова – Бингама (линейно-вязкопластичная жидкость Бингама),  $\tau = 0,44 + 0,136\gamma$ . Для образца № 3 реологические кривые соответствуют модели Балкли – Гершеля (нелинейно-вязкопластичная жидкость с предельным напряжением сдвига): до обработки  $\tau = 8,8 + 10,27\gamma^{0,27}$ , после обработки  $\tau = 4,84 + 5,28\gamma^{0,36}$ . Большое содержание парафина в образцах № 2 и 3 определяет неньютоновский характер течения нефти. Чем выше данная величина, тем больше площадь «петель гистерезиса» на кривых течения образцов нефти.

На основе полученных по результатам исследования экспериментальных данных определяли площадь под кривыми течения численным методом интегрирования Гаусса, а затем проводили расчет коэффициентов эффективности обработки нефти в РИА по соотношениям (3)–(5), значения которых для исследуемых образцов представлены в таблице.

## Обсуждение

После обработки в РИА образца нефти № 2 с относительно невысоким (7 %) содержанием парафинов произошло изменение модели течения нефти. Установлено, что до обработки нефть соответствовала модели нелинейно-вязкопластичной жидкости с предельным напряжением сдвига, после обработки – модели линейно-вязкопластичной жидкости Бингама, которая очень близка к модели ньютоновской жидкости. Это подтверждает уравнение, описывающее график прямого хода образца нефти № 2 после обработки, которое соответствует линейному виду.

Сравнивая показатели снижения вязкости образцов нефти между собой и анализируя содержание АСПВ, можно сделать предположение, что величина снижения вязкости нефти при ее обработке в РИА зависит от концентрации смол и парафинов, а также от их соотношения. Вероятнее всего, при обработке нефти в РИА происходит диспергирование твердых кристаллов парафинов, разрушение надмолекулярных связей между ССЕ и самих ССЕ.

Предполагается, что смолы образуют смешанные кристаллы с парафинами и изменяют их структуру: распределяются между двумя фазами, «разрыхляют» кристаллическую структуру и изменяют строение ассоциатов кристаллов парафина. Адсорбция смол на разрушенных кристаллах парафина предотвращает их агрегацию. В высокопарафинистых нефтях ядро ССЕ формируют парафины, кристаллы которых разрушаются при обработке нефти в РИА с увеличением удельной поверхности и, следовательно, повышением поверхностной энергии. Коллоидная углеводородная система после многофакторного воздействия в РИА стремится к понижению избыточной энергии за счет снижения удельной поверхности.

Вероятнее всего, в высокопарафинистой нефти образца № 3, в которой отношение содержания смол к парафинам меньше, чем в образце № 2, остаются открытые вновь образованные поверхности парафинов. Открытые активные поверхности зерен парафина стремятся к образованию ССЕ и ассоциатов ССЕ, формированию структурной сетки. Можно предположить, что если бы в образце № 3 содержание смол было бы выше, то они в большей мере закрывали бы поверхности парафинов, тем самым обеспечивая снижение способности частиц парафинов к образованию объемной сетчатой структуры. В этом случае, возможно, имело место большее снижение вязкости образца после обработки в РИА.

При физической обработке любой жидкости в РИА происходит ее нагрев. Проведенные исследования показали, что за один проход через РИА образца нефти № 1 нагрев составляет не менее 10 °С. Для образцов нефти № 2 и 3 указанный показатель составил 1,5–2 °С. Чем более вязкой является нефть, тем больше она нагревается. При этом повышение температуры нефти даже на 1 °С существенно снижает вязкость вблизи значений температуры застывания. В таком случае изменение энергии тиксотропии может не произойти, а значение вязкости снизится.

Для образца нефти № 1 установлена значительная зависимость вязкости от температуры. В ходе обработки этого образца в РИА вязкость существенно снизилась из-за увеличения температуры нефти на 10 °С. Так, при увеличении температуры образца нефти № 1 от 10 до 20 °С вязкость временно снизилась с 9000 до 2500 мПа·с, то есть примерно в 3,6 раза. Если температура окружающей среды ниже 20 °С, то при остывании нефти вязкость снова увеличивалась. Таким образом, хотя реологические испытания показали снижение вязкости образца нефти № 1 за счет обработки всего лишь на 8 %, вследствие нагрева при однократном прохождении нефти через РИА вязкость временно снижалась в несколько раз. Для поддержания эффекта снижения вязкости нефти после обработки в РИА нефть необходимо термостатировать.

Средняя величина снижения динамической вязкости при 20 °С для прямого хода кривой течения образца № 1 составила 8 %, образцов № 2 и 3 – 35 %. Отношение удельной мощности поддержания течения в образце нефти до и после обработки: для образца № 2 –  $K_S = 3,17$ , для образца № 3 –  $K_S = 1,7$ . Отношение изменения энергии тиксотропии за счет разрушенных внутренних связей нефти к энергии, затраченной на ее обработку: для образца № 2 –  $K_W = 13,2$ , для образца № 3 –  $K_W = 69,6$ .

Анализируя полученные экспериментальные данные, можно сделать вывод, что многофакторное гидромеханическое воздействие на нефть в импульсной форме эффективно для образцов с высоким содержанием парафинов.

## Выводы

На основании анализа процессов в структуре нефти при физическом воздействии предложены критерии эффективности метода физического воздействия на нефть. Реологические свойства тиксотропных нефтей могут быть улучшены за счет роторно-импульсного воздействия на нефть в РИА (сдвиговые нагрузки, гидродинамические импульсы давления, кавитация, трибонагрев). Динамическая вязкость при 20 °С образца нефти № 1 в среднем снизилась на 8 %, образцов нефти № 2 и 3 – на 35 %. Энергия тиксотропии образца нефти № 2 снизилась на 68,5 %, образца № 3 – на 41 %. Время релаксации реологических параметров образцов нефти № 2 и 3 составило пять суток. Величины коэффициентов, характеризующих эффективность роторно-импульсного метода воздействия, существенно превышают единицу для высокопарафинистой нефти, что показывает его высокую технологическую эффективность.

## Список литературы

- [1] Оценка гидравлической эффективности нефтепроводов по данным мониторинга технологических режимов эксплуатации / П. А. Ревель-Муроз [и др.] // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2019. Т. 9. № 1. С. 8–19.
- [2] Подготовка и транспорт проблемных нефтей (научно-практические аспекты) / Г. И. Волкова [и др.]. Томск : Издательский Дом ТГУ, 2015. 136 с.
- [3] Сравнительная оценка эффективности «горячей» перекачки / А. И. Гольянов [и др.] // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2018. № 6. С. 642–649.
- [4] Оценка эффективности технологии перекачки нефти с применением противотурбулентных присадок / П. А. Ревель-Муроз [и др.] // Нефтяное хозяйство. 2020. № 1. С. 90–95.
- [5] Обзор современных методов воздействия на реологические свойства тяжелых высоковязких нефтей / И. И. Хасанов [и др.] // Нефтегазохимия. 2018. № 3. С. 49–54.
- [6] Верховых А. А., Вахитова А. К., Еллидинский А. А. Обзор работ по воздействию ультразвука на нефтяные системы // Вестник технологического университета. 2016. Т. 19. № 8. С. 37–42.

[7] Sawarkar A. N. Cavitation induced upgrading of heavy oil and bottom-of-the-barrel: a review // Ultrasonics Sonochemistry. 2019. Vol. 58. P. 104690.

[8] Current knowledge and potential applications of cavitation technologies for the petroleum industry / B. Avvaru [et al.] // Ultrasonics Sonochemistry. 2018. Vol. 42. P. 493–507.

[9] Управление реологическими характеристиками нефтей физическими методами воздействия / Р. З. Сунагатуллин [и др.] // Нефтяное хозяйство. 2021. № 1. С. 92–97.

[10] Сюняев З. И., Сафиева Р. З., Сюняев Р. З. Нефтяные дисперсные системы. М. : Химия, 1990. 226 с.

[11] Шарафутдинов З. З. Обзор положений теории растворов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2017. № 1. С. 70–81.

[12] Кутуков С. Е., Четверткова О. В., Гольянов А. И. Гидравлическая характеристика трубопровода на высоковязкой нефти // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2021. Т. 11. № 1. С. 32–39.

[13] Ганеева Ю. М. Асфальтеновые наноагрегаты: структура, фазовые превращения, влияние на свойства нефтяных систем // Успехи химии. 2011. Т. 80. № 10. С. 1034–1050.

[14] Unraveling the molecular structures of asphaltenes by atomic force microscopy / B. Sculer [et al.] // Journal of American Chemical Society. 2015. Vol. 137. P. 9870–9876.

[15] Состав, свойства, структура и фракции асфальтенов нефтяных дисперсных систем / Г. А. Галимова [и др.] // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18. № 20. С. 60–64.

[16] Ратов А. Н. Механизмы структурообразования и аномалии реологических свойств высоковязких нефтей и битумов // Российский химический журнал. 1995. Т. 39. № 5. С. 106–113.

[17] Иктисанов В. А., Сахабутдинов К. Г. Реологические исследования парафинистой нефти при различных температурах // Коллоидный журнал. 1999. Т. 61. № 6. С. 776–779.

[18] Бойцова А. А., Кондрашева Н. К. Исследование реологических свойств углеводородных систем с высоким содержанием смол и асфальтенов // Инженерно-физический журнал. 2018. Т. 91. № 4. С. 1098–1105.

[19] Кондрашева Н. К., Батайлов Ф. Д., Бойцова А. А. Сравнительная оценка структурно-механических свойств тяжелых нефтей Тимано-Печорской провинции // Записки Горного института. 2017. Т. 225. С. 320–329.

[20] Промтов М. А., Степанов А. Ю., Алешин А. В. Методы расчета характеристик роторного импульсного аппарата. Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2015. 148 с.

[21] Изменение реологических параметров высокопарафинистой нефти при многофакторном воздействии в роторном импульсном аппарате / М. А. Промтов [и др.] // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2020. № 5. С. 76–88.

## References

- [1] Revel-Muroz P. A., Fridlyand Y. M., Kutukov S. E., Golyanov A. I. Assessing the hydraulic efficiency of oil pipelines according to the monitoring of process operation conditions. Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation. 2019;9(1):8–19. (In Russ.)
- [2] Volkova G. I., Loskutova Yu. V., Prozorova I. V., Berezina E. M. Preparation and transportation of problem oils (scientific and practical aspects). Tomsk: Publishing House of TSU; 2015. 136 p. (In Russ.)
- [3] Golyanov A. I., Grisha B. G., Kutukov S. E., Chetvertkova O. V. Comparative evaluation of the “hot” batching efficiency. Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation. 2018(6):642–649. (In Russ.)
- [4] Revel-Muroz P. A., Fridlyand Ya. M., Kutukov S. E., Golyanov A. I., Chetvertkova O. V. Evaluation of the efficiency of oil pumping

technology with the use of anti-turbulent additives. *Neftyanoe khozyaystvo = Oil Industry*. 2020(1):90–95. (In Russ.)

[5] Khasanov I. I., Shakirov R. A., Leontyev A. Yu., Poletayeva O. Yu., Babayev E. R., Mamedova P. Sh. Review of modern methods of influence on the rheological properties of heavy highly viscous oils. *Petrochemical industry*. 2018(3):49–54. (In Russ.)

[6] Verkhoviykh A. A., Vakhitova A. K., Elpidinsky A. A. Review of works on ultrasound effects on oil systems. *Herald of Technological University*. 2016;19(8):37–42. (In Russ.)

[7] Sawarkar A. N. Cavitation induced upgrading of heavy oil and bottom-of-the-barrel: a review. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2019;58:104690.

[8] Avvaru B., Venkateswaran N., Uppara P., Iyengar S. B., Katti S. S. Current knowledge and potential applications of cavitation technologies for the petroleum industry. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018;42:493–507.

[9] Sunagatullin R. Z., Kutukov S. E., Golianov A. I., Chetvertkova O. V., Zverev F. V. Control of oil rheological properties by exposure to physical methods. *Neftyanoe khozyaystvo = Oil Industry Journal*. 2021(1):92–97. (In Russ.)

[10] Syunyaev Z. I., Safieva R. Z., Syunyaev R. Z. Oil disperse systems. Moscow: Khimiya Publ.; 1990. 226 p. (In Russ.)

[11] Sharafutdinov Z. Z. The survey of the theory of solutions. *Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2017(1):70–81. (In Russ.)

[12] Kutukov S. E., Chetvertkova O. V., Golyanov A. I. Q – H characteristics for heavy crude oil pipeline. *Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2021;11(1):32–39. (In Russ.)

[13] Ganeeva Y. M., Yusupova T. N., Romanov G. V. Asphaltene nano-aggregates: structure, phase transitions and effect on petroleum systems. *Russian Chemical Reviews*. 2011;80(10):993–1008. (In Russ.)

[14] Sculer B., Meyer G., Pena D., Mullins O. C. Unraveling the molecular structures of asphaltenes by atomic force microscopy. *Journal of American Chemical Society*. 2015;137:9870–9876.

[15] Galimova G. A., Yusupova T. N., Ibragimova D. A., Yakupov I. R. Composition, properties, structure and fractions of asphaltenes of oil dispersion systems. *Herald of Technological University*. 2015;18(20):60–64. (In Russ.)

[16] Ratov A. N. Mechanisms of structurization and anomalies of rheological properties of high-viscosity oils and dead oils. *Russian Chemical Magazine*. 1995;39(5):106–113. (In Russ.)

[17] Iktisanov V. A., Sakhabutdinov K. G. Rheological paraffin oil under various temperatures. *Kolloidny Zhurnal*. 1999;61(6):776–779. (In Russ.)

[18] Boitsova A. A., Kondrasheva N. K. Study of rheological properties of hydrocarbon systems with high contents of tars and asphaltenes. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal = Journal of Engineering Physics*. 2018;91(4):1098–1105. (In Russ.)

[19] Kondrasheva N. K., Bataylov F. D., Boytsova A. A. Comparative assessment of structural-mechanical properties of heavy oils of Timano-Pechorskaya province. *Journal of Mining Institute*. 2017;225:320–329. (In Russ.)

[20] Promtov M. A., Stepanov A. Yu., Aleshin A. V. Methods for calculation of rotor pulse device characteristics. *Tambov: TSTU Publ.*; 2015. 148 p. (In Russ.)

[21] Promtov M. A., Sunagatullin R. Z., Kutukov S. E., Koliukh A. N., Sheina O. A., Zverev F. S., Sukhovey M. V. Change of rheological parameters of high-paraffin oil under multi-factor impact in a rotor-stator device. *Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*. 2020(5):76–88. (In Russ.)

Статья получена редакцией 24.04.2021,  
принята к опубликованию 20.11.2021

Received on April 24, 2021; in final form, November 20, 2021

## Сведения об авторах | Authors credentials



**М. А. Промтов**, д. т. н., профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность» Тамбовского государственного технического университета, Тамбов, Россия

Maxim A. Promtov, Dr Sci. (Eng.), Professor of Department of Technological Processes, Devices and Technosphere Safety, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation

[Promtov.MA@mail.tstu.ru](mailto:Promtov.MA@mail.tstu.ru)



**Р. З. Сунагатуллин**, к. т. н., директор центра исследований гидравлики трубопроводного транспорта ООО «НИИ Транснефть», Москва, Россия

Rustam Z. Sunagatullin, Cand. Sci. (Eng.), Director of Pipeline Transport Hydraulics Research Centre, Transneft R&D, LLC, Moscow, Russian Federation

[SunagatullinRZ@niitnn.transneft.ru](mailto:SunagatullinRZ@niitnn.transneft.ru)



**С. Е. Кутуков**, д. т. н., главный научный сотрудник управления математического моделирования и технологий трубопроводного транспорта НТЦ ООО «НИИ Транснефть», Уфа, Россия

Sergey E. Kutukov, Dr Sci. (Eng.), Chief Researcher of Department of Mathematical Modeling and Pipeline Transport Technologies, STC Transneft R&D, LLC, Ufa, Russian Federation

[KutukovSE@niitnn.transneft.ru](mailto:KutukovSE@niitnn.transneft.ru)



**А. Н. Колиух**, к. т. н., доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность» Тамбовского государственного технического университета, Тамбов, Россия

Alexander N. Koliukh, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Department of Technological Processes, Devices and Technosphere Safety, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation

[kvidep@cen.tstu.ru](mailto:kvidep@cen.tstu.ru)



**О. А. Шеина**, к. х. н., доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность» Тамбовского государственного технического университета, Тамбов, Россия

Olga A. Sheina, Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor of Department of Technological Processes, Devices and Technosphere Safety, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation

[anysha01lol@gmail.com](mailto:anysha01lol@gmail.com)



**Ф. С. Зверев**, к. т. н., заведующий лабораторией химических реагентов ООО «НИИ Транснефть», Москва, Россия

Fedor S. Zverev, Cand. Sci. (Eng.), Head of Chemical Reagents Laboratory, Transneft R&D, LLC, Moscow, Russian Federation

[ZverevFS@niitnn.transneft.ru](mailto:ZverevFS@niitnn.transneft.ru)