

ISSN 1999-494X (Print)  
ISSN 2313-6057 (Online)

**Журнал Сибирского  
федерального университета  
Техника и технологии**

**Journal of Siberian  
Federal University  
Engineering & Technologies**

**2026 19 (3)**

ISSN 1999-494X (Print)  
ISSN 2313-6057 (Online)

2026 19(3)

# Журнал Сибирского федерального университета Техника и технологии

## Journal of Siberian Federal University Engineering & Technologies

Журнал включен в «Russian Science Citation Index» на платформе «Web of Science»

Индексируется Российским индексом научного цитирования (ИЗБ), представлен в международных и российских информационных базах: Ulrich's periodicals directory, EBSCO (США), Google Scholar, ProQuest, Erihplus, READera, КиберЛенинке.

Включен в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» Высшей аттестационной комиссии.

**Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии.  
Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies.**

Учредитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ)

Главный редактор: *В.А. Кулагин*. Редакторы *А.В. Прохоренко*, *А.В. Воробьев*.  
Корректор *Т.Е. Бастрыгина*. Компьютерная верстка *Е.В. Гревцовой*

№ 3 от 28.05.2026. Индекс: 42328. Тираж: 1000 экз.

Свободная цена

Адрес редакции и издателя:

660041 г. Красноярск, пр. Свободный, 82, стр. 24, ауд. 117.

Отпечатано в типографии Издательства БИК СФУ  
660041 г. Красноярск, пр. Свободный, 82а.

*Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 77-28722 от 29.06.2007 г.,  
выданное Федеральной службой по надзору в сфере массовых коммуникаций,  
связи и охраны культурного наследия.*

<http://journal.sfu-kras.ru>

Подписано в печать 18.05.2026. Формат 60x90/8. Усл. печ. л. 11,1.

Уч.-изд. л. 10,6. Бумага тип. Печать офсетная. Тираж 1000 экз. Заказ № 25979.

Возрастная маркировка в соответствии с Федеральным законом № 436-ФЗ: 16+

## CHIEF EDITOR

Vladimir Kulagin, Honorary Worker of Science and technicians of the Russian Federation, Head of the Department of Heat Technology and Fluid Dynamics of Polytechnic Institute of SibFU, Doctor of Engineering Sciences, Full Professor, member of the expert council of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation on energy, electrification and power mechanical engineering, Krasnoyarsk, Russia; ORCID 0000-0002-5433-7579

---

## EDITORIAL BOARD

- Sergey Alekseenko, Academician of RAS, Dr. Phys.-Math., Prof., Institute of Thermophysics RAS, Siberian Branch, Novosibirsk, Russia;
- Sereeter Batmönkh, Academician of the Mongolian Academy of Sciences, Dr. of Tech., Prof., Institute of Heat Engineering and Industrial Ecology Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar, Mongolia;
- Yuri Galerkin, Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Peter the Great St. Petersburg State Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia;
- Eugene Garin, Dr. of Tech., Prof., Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia;
- Alexander Zavorin, Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation, Honored Worker of the Ministry of Fuel and Energy of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia; ORCID 0000-0001-5724-0150;
- Vladimir Zuev, Corresponding member RAS, Dr. Phys.-Math., Prof., Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of RAS, Siberian Branch, Tomsk, Russia; ORCID 0000-0002-1271-1200;
- Sergey Ivanov, Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Transbaikalian State University, Chita, Russia;
- Yuriy Koziratzky, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Military Education and Research Centre of Military-Air Forces «Military-Air Academy name after N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin», Voronezh, Russia;
- Genius Kuznetsov, Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation, Dr. Phys.-Math., Prof., Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia;
- Tatiana Kulagina, Honorary Worker of Education of the Russian Federation, Expert of the Russian Academy of Sciences, Dr. of Tech., Prof., Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia; ORCID 0000-0003-2601-9570;
- Feng-Chen Li, Prof. Dr. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin, China; ORCID 0000-0003-2580-928X;
- Dmitriy Markovich, Academician of RAS, Dr. Phys.-Math., Prof., Institute of Thermophysics RAS, Siberian Branch, Novosibirsk, Russia; ORCID 0000-0002-1348-1806;
- Andrey Minakov, Dr. Phys.-Math., Prof., Siberian Federal University, Institute of Thermophysics of RAS, Siberian Branch, Krasnoyarsk, Russia; ORCID 0000-0003-1956-5506;
- Valery Mironov, Corresponding member RAS, Dr. Phys.-Math., Prof., Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC RAS, Siberian Branch, Krasnoyarsk, Russia; ORCID 0000-0001-7877-9817;
- Vladimir Moskvichev, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Krasnoyarsk Branch of the Federal Research Center for Information and Computing Technologies, Krasnoyarsk, Russia; ORCID 0000-0001-7072-2250;
- Bernard Nacke, Dr. of Tech., Prof., Institute of Electrotechnology Leibniz University, Hannover, Germany;
- Valeriy Nikulin, Honored Scientist of the Udmurt Republic, Honored Engineer of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Kamsk Institute of Humanitarian and Engineering Technologies, Izhevsk, Russia;
- Oleg Ostrovski, Dr. of Tech., Prof., University of New South Wales, Australia;
- Harald Oye, Dr. of Tech., Prof., Norwegian University of Science and Technology, Oslo, Norway;
- Vasili Pantelev, Honorary Worker of Science and technicians of the Russian Federation, Dr. of Tech., Prof., Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia; Scopus ID: 57205124847;
- Petr Polyakov, Honored Metallurgist of the RSFSR, Dr. of Tech., Prof., Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia;
- Miloš Stanković, Prof. Dr., Institute of Applied Sciences, Beograd, Srbija; ORCID 0000-0001-9767-5634;
- Valery Stennikov, Academician of RAS, Dr. of Tech., Prof., Melentiev Energy Systems Institute RAS, Siberian Branch, Irkutsk, Russia, ORCID 0000-0001-6219-0354;
- Viktor Tsubulsky, Dr. Tech., Ch. Scientific Co-worker, National Research Center «Kurchatov Institute», Institute of Economic Forecasting RAS, Moscow, Russia, ORCID 0000-0002-7739-9393;
- Ibragim Khisameev, Corresponding member of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Dr. of Tech., Prof., Kazan State Technological University, Kazan, Russia;
- Nikolai Zuglenok, Corresponding member RAS, Dr. of Tech., Prof., Federal Research Center KSC RAS, Siberian Branch, Krasnoyarsk, Russia;
- Vladimir Shaidurov, Academician of RAS, Dr. Phys.-Math., Prof., Institute of Computational Modelling Federal Research Center KSC RAS, Siberian Branch, Krasnoyarsk, Russia; ORCID 0000-0002-7883-5804
- Anatoly Shvidenko, Doctor of Agricultural Science, Prof., International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.

## CONTENTS

### Researching. Design. Operating Experience

<b>Tatyana A. Kulagina, Elena N. Zaitseva and Tatyana A. Solovyova</b> The Use of Alternative Energy Sources in the Far North .....	288
<b>Tatyana A. Kulagina, Elena N. Zaitseva and Anatoly I. Matyushenko</b> Cavitation Fuel Preparation Based on Waste Oils of Various Composition .....	309
<b>Sergey G. Bayakin and Nikolay V. Tsuglenok</b> Technology of Electricity Generation from Low-Temperature Thermal Energy from the Environment – Water, Air, Soil .....	322
<b>Sergey V. Rogozhkin and Vladimir V. Kalygin</b> On the Advantages of Using a Drum-Film Evaporator for Evaporation of Low- and Medium-Level Radioactive Waste .....	331
<b>Konstantin Yu. Ushakov, Aleksandr R. Bogomolov, Vladimir M. Sadovskiy and Vasiliy I. Murko</b> Determination of the Prospects for Use of Substandard Coals for Use in the Coal Chemical Industry.....	342
<b>Boris Y. Rozman, Andrey V. Elkin and Evgenii A. Sherstov</b> The Design of a New Remotely Operated Underwater Vehicle Gnom, Adapted for Mounting a Gamma-Ray Spectrometer .....	355
<b>Dmitry D. Dmitriev, Andrey B. Gladyshev, Vasily N. Ratushnyak, Andrey V. Lykho and Evgeny D. Mikhov</b> Method for Measuring Mutual Coordinates of UAVs in a Group Based on Radio Range Measurements with Relay.....	368
<b>Irina Yu. Botvich, Tamara I. Pisman, Galina S. Vysotskaya and Mark I. Rachinskiy</b> Satellite Monitoring of Atmospheric Carbon Dioxide in Krasnoyarsk Krai.....	377
<b>Math Modeling. Numerical Experiment</b>	
<b>Victor I. Filatov, Evgeny N. Garin and Gennady M. Aldonin</b> Model for Bit Error Rate Estimation in the UAV Control Radio Channel for Wildfire Monitoring Using a LoRa Module in Forested Environments .....	388
<b>Andrey V. Grebennikov, Nikita V. Kopylov, Valery M. Vladimirov and Valeria V. Poslavskaya</b> Mathematical Model of Microdoppler Signals of Small-Sized Aerial Objects for Radar Recognition Based on Phase Features .....	410

## СОДЕРЖАНИЕ

### Исследования. Проектирование. Опыт эксплуатации

<b>Т. А. Кулагина, Е. Н. Зайцева, Т. А. Соловьева</b> Использование альтернативных источников энергии в условиях Крайнего Севера.....	288
<b>Т. А. Кулагина, Е. Н. Зайцева, А. И. Матюшенко</b> Кавитационная топливоподготовка на базе отработанных масел различного состава .....	309
<b>С. Г. Баякин, Н. В. Цугленок</b> Технология процесса электрогенерации из низкотемпературной тепловой энергии окружающей среды – воды, воздуха, грунта .....	322
<b>С. В. Рогожкин, В. В. Калыгин</b> Использование барабанно-пленочного испарителя для выпаривания низко- и среднеактивных жидких радиоактивных отходов. Возможные компоновки оборудования .....	331
<b>К. Ю. Ушаков, А. Р. Богомолов, В. М. Садовский, В. И. Мурко</b> Определение перспективности использования некондиционных углей для применения в углехимической промышленности.....	342
<b>Б. Я. Розман, А. В. Елкин, Е. А. Шерстов</b> Разработка новой модели телеуправляемого необитаемого подводного аппарата «ГНОМ», адаптированного для установки гамма-спектрометра.....	355
<b>Д. Д. Дмитриев, А. Б. Гладышев, В. Н. Рагушняк, А. В. Лыхо, Е. Д. Михов</b> Метод определения взаимных координат БПЛА в группе на основе радиодальномерных измерений с ретрансляцией .....	368
<b>И. Ю. Ботвич, Т. И. Письман, Г. С. Высоцкая, М. И. Рачинский</b> Спутниковый мониторинг углекислого газа в атмосфере Красноярского края .....	377
<b>Математическое моделирование. Численный эксперимент</b>	
<b>В. И. Филатов, Е. Н. Гарин, Г. М. Алдонин</b> Модель оценки битовой ошибки в радиоканале управления БЛА мониторинга пожаров с использованием модуля LoRa в условиях лесного массива .....	388
<b>А. В. Гребенников, Н. В. Копылов, В. М. Владимиров, В. В. Пославская</b> Математическая модель микроплеровских сигналов малоразмерных воздушных объектов для радиолокационного распознавания на основе фазовых признаков .....	410

**Researching. Design.  
Operating Experience**

**Исследования.  
Проектирование.  
Опыт эксплуатации**



EDN: FAPQMA

УДК 504.064.4

## The Use of Alternative Energy Sources in the Far North

Tatyana A. Kulagina<sup>a\*</sup>,  
Elena N. Zaitseva<sup>a</sup> and Tatyana A. Solovyova<sup>b</sup>

*<sup>a</sup>Siberian Federal University*

*Krasnoyarsk, Russian Federation*

*<sup>b</sup>Far Eastern Federal University*

*Vladivostok, Russian Federation*

Received 25.01.2026, received in revised form 18.02.2026, accepted 11.03.2026

**Abstract.** The possibility of waste disposal of petroleum products is proved by the example of industrial oils in the places of their formation (territories of the far north) through the use of cavitation technologies even in the absence of specialized enterprises. The results obtained make it possible to assert that under the influence of natural low temperatures, the physico-chemical characteristics of water and water-oil emulsions are stabilized during phase transformations. Keywords: cavitation effects; waste oils; water-oil emulsion; physico-chemical characteristics; utilization.

**Keywords:** cavitation effects, waste oils, water-oil emulsion, physico-chemical characteristics, utilization.

Citation: Kulagina T. A., Zaitseva E. N., Solovyova T. A. The Use of Alternative Energy Sources in the Far North. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(3), 288–308. EDN: FAPQMA



## Использование альтернативных источников энергии в условиях Крайнего Севера

Т. А. Кулагина<sup>а</sup>, Е. Н. Зайцева<sup>а</sup>, Т. А. Соловьева<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, Красноярск

<sup>б</sup>Дальневосточный федеральный университет  
Российская Федерация, Владивосток

**Аннотация:** Доказана возможность утилизации отходов нефтепродуктов на примере промышленных масел в местах их образования (территории Крайнего Севера) за счет использования кавитационных технологий даже при отсутствии специализированных предприятий. Полученные результаты дают возможность утверждать, что при воздействии естественных низких температур наблюдается стабилизация физико-химических характеристик воды и водомасляных эмульсий во время фазовых превращений.

**Ключевые слова:** кавитационные воздействия, отработанные масла, водомасляная эмульсия, физико-химические характеристики, утилизация.

Цитирование: Кулагина Т. А. Использование альтернативных источников энергии в условиях Крайнего Севера / Т. А. Кулагина, Е. Н. Зайцева, Т. А. Соловьева // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(3). С. 288–308. EDN: FAPQMA

### Введение

В настоящее время особую актуальность и важность приобретает изучение арктической среды и проблемы ее охраны [1, 2], обусловленное высоким уровнем экологического ущерба, накопившегося в этой зоне. Интерес представляет возможность получения энергии путем сжигания энергетически насыщенных отходов, например, использованных промышленных масел, нефтешламов, образующихся при добыче нефти, а также нефтепродуктов, собранных из водных экосистем вследствие аварий и чрезвычайных происшествий. Проблему усугубляют удаленность регионов от промышленных центров, недостаточная развитость дорожной инфраструктуры, суровый климат и другие факторы. Важно отметить, что методы и подходы к утилизации углеродсодержащих отходов, применяемые в крупных городах, не подходят для северных территорий, главным образом по причине их неэкономичности. В свете этого возрастает важность исследований, направленных на создание новых типов эмульгированных (суспензионных) топливных смесей, которые бы использовали эффекты суперкавитации в различных производственных сферах.

Механизм эмульгирования системы из двух взаимно нерастворимых и несмешивающихся жидкостей, характеристики, свойства и типы получаемых эмульсий достаточно подробно рассмотрены в работах отечественных и зарубежных авторов [3–10]. Для получения водотопливных смесей (ВТС) на сегодняшний день применяется такое же оборудование, что и для создания эмульсий, гомогенных систем, суспензий и прочих дисперсных систем в различных отраслях промышленности: пищевой, строительной, фармацевтической и т.д. [11–14].

Дисперсность эмульсии определяется размерами частиц дисперсной фазы. Если эмульсия полидисперсная, то для её характеристики указывают распределение частиц по размерам,

чаще всего в виде гистограммы. Содержание дисперсной фазы выражается через объемную концентрацию:

$$V_{об} = \frac{V_{д.ф.}}{V_{д.с.}} \times 100 = \frac{V_{д.ф.}}{V_{д.ф.} + V_p} \times 100,$$

где  $V_{д.ф.}$  – объем дисперсной фазы;  $V_p$  – объем дисперсионной среды (растворителя);  $V_{д.с.}$  – объем дисперсной системы

Безусловно, ключевой характеристикой водно-топливной смеси (ВТС) является уровень влаги ( $W$ ). При проведении теплотехнических расчетов для топочных устройств используется понятие общей влаги, содержащейся в топливе в его рабочем состоянии ( $W_p$ ). Этот параметр выражается в процентах от так называемой рабочей массы топлива. Методы измерения и особенности содержания влаги в нефтепродуктах подробно описаны в работах [15–18].

Результаты применения объемного метода Дина-Старка для стандартного определения содержания влаги в жидком топливе продемонстрировали, что время отгонки составляет 2–3 часа, а ее эффективность зависит от дисперсности эмульсии. Для оценки влажности нефтепродуктов был разработан простой и экономически целесообразный метод, основанный на измерении зависимости диэлектрической проницаемости эмульсии от содержания воды в ней [15].

Более упрощенная оценка дисперсности эмульсий основывается на средних размерах капель воды, вычисленных с использованием методов математической статистики. Удельная поверхность раздела фаз является интегральной характеристикой дисперсности эмульсии [19, 20]. Дополнительное понимание дисперсности эмульсий может быть получено через графическое отображение распределений объема или количества капелек дисперсной фазы в зависимости от их размеров (см. рис. 1, 2). При аналитическом описании классических форм таких распределений используют математические закономерности теории вероятностей. Для некоторых других типов распределений – путем подбора подходящих формул для экспериментально полученных зависимостей.

В условиях сурового северного климата, где логистические цепочки и инфраструктура зачастую ограничены, проблема утилизации отходов и производства альтернативных источников энергии становится особенно острой. Отсутствие специализированных мусоросжигательных заводов или установок для термической обработки отходов приводит к накоплению

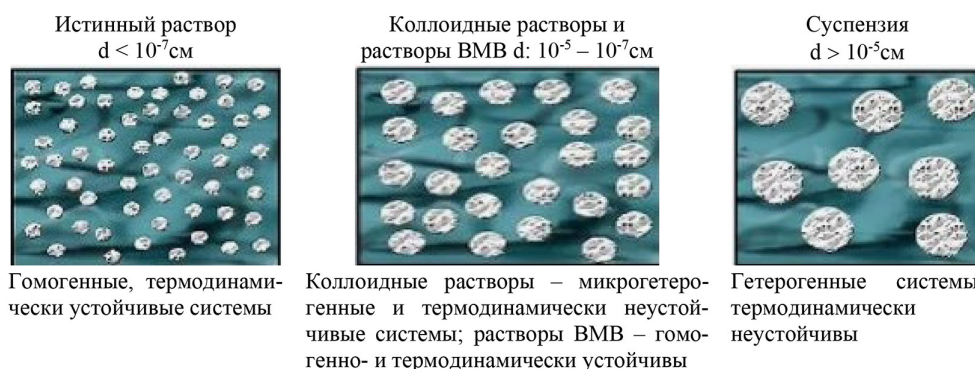


Рис. 1. Дисперсные системы

Fig. 1. Dispersed systems

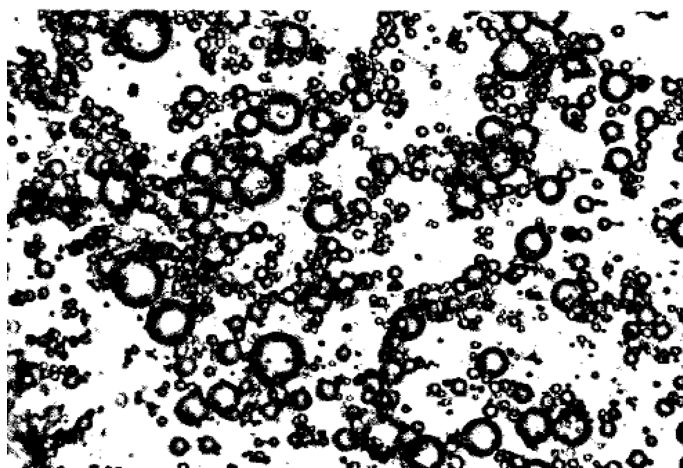


Рис. 2. Микрофотография капель воды в водомазутной эмульсии

Fig. 2. Micrography of water droplets in an oil-based emulsion

большого количества свалок, негативно влияющих на хрупкую экосистему региона. При этом если производство вторичных энергетических ресурсов (ВТЭ) все же налажено, их транспортировка на специализированные объекты, расположенные в более теплых регионах, сталкивается с рядом трудностей, напрямую связанных с экстремально низкими температурами.

#### **Экспериментальное определение физико-химических характеристик кавитационно-активной воды**

Проведено экспериментальное исследование, направленное на оценку влияния уровня кавитационного воздействия на свойства воды с целью выявления вероятности структурных изменений до и после заморозки. Определены первичные характеристики образцов воды: прозрачность, pH, электропроводность, жёсткость, окраска, температура, минерализация, вязкость, плотность, растворимость. Затем измеренная порция (100 мл) с установленными параметрами – скоростью и продолжительностью кавитационной обработки – подвергалась замораживанию, после чего проводились повторные замеры по таким показателям, как pH, удельная электрохимическая проводимость, солёность, щелочной уровень и жёсткость.

Для анализа действия пониженных температур была проведена серия испытаний: двенадцать образцов по 500 мл каждый подвергались кавитационной обработке последовательно по четырем временным интервалам – 1, 3, 5 и 10 мин. Частота вращения ротора кавитатора составила 5 000, 10 000 и 15 000 об/мин. Физико-химический анализ проводился после каждого цикла активации (табл. 1), а также после полного размораживания проб (табл. 2). Графическое отображение полученных данных по параметрам активированной воды до и после оттаивания представлено на рис. 3–5.

Результаты исследования указывают на то, что применение подготовленной кавитацией воды для создания водотопливной эмульсии не зависит от климатических факторов, таких как понижение температуры, характерное для северных регионов, поскольку физико-химические свойства жидкости остаются неизменными. Таким образом, данный ресурс может эффективно

Таблица 1. Характеристики проб воды, подвергшейся кавитации

Table 1. Characteristics of samples of water subjected to cavitation

Номер пробы кавитированной воды	Время воздействия, мин	Скорость вращения, тыс. об/мин	pH	УЭП (МАРК 603)	$t$ , °C	Солесодержание, мг/дм <sup>3</sup>	Жесткость, мг экв/дм <sup>3</sup>	Щелочность, мг экв/дм <sup>3</sup>
1a	1	5	7,55	145,4	3,3	25	1,4	1,4
2a		10	7,6	139	3,6	22,75	1,4	1,8
3a		15	7,4	128	2	23	1,2	1,5
4a	3	5	7,4	129	2,3	22,8	1,4	1,8
5a		10	7,6	131	2	22,75	1,4	1,8
6a		15	7,4	129	3	23	1,2	1,6
7a	5	5	7,6	140,6	4	27	1,3	1,5
8a		10	7,3	131,8	2	23	1,8	1,2
9a		15	7,5	140,5	4	27,2	1,3	1,4
10a	10	5	7,6	138,2	4	25	1,6	1,2
11a		10	7,4	139	2	23,1	1,3	1,4
12a		15	7,4	140,1	2	23,8	1,4	1,4

Таблица 2. Характеристики проб воды, подвергшейся кавитации, после фазового перехода «вода-лед-вода» при  $t = 16$  °C (время выдерживания в холодильной камере 24 часа)Table 2. Characteristics of samples of water subjected to cavitation after the «water-ice-water» phase transition at  $t = 16$  °C (refrigerating time 24 hours)

Номер пробы кавитированной, размороженной воды	Время воздействия, мин	Скорость вращения, тыс.об/мин	pH	УЭП (МАРК 603)	$t$ , °C	Солесодержание, мг/дм <sup>3</sup>	Жесткость, мг экв/дм <sup>3</sup>	Щелочность, мг экв/дм <sup>3</sup>
1a'	1	5	8,75	132	14	70,3	1,9	2,1
2a'		10	8,1	112,5	10	51,3	1,7	2,2
3a'		15	8	110,1	12	54,1	1,5	1,9
4a'	3	5	8	110,5	12	52,5	1,7	2,1
5a'		10	8,1	108,7	13	53,1	1,7	2
6a'		15	8	112,1	13	52,5	1,6	1,9
7a'	5	5	8,8	131	11	59,8	1,8	2,1
8a'		10	8,5	124,8	12	58,1	2,4	1,9
9a'		15	8,7	130,8	10	60,1	1,8	1,9
10a'	10	5	8,7	127	10	58,1	2,1	2
11a'		10	8,8	128	11	59,2	2,2	2,1
12a'		15	8,7	128,8	10	58,2	2,3	2

использоваться при производстве эмульсий с повышенными топливными качествами, пригодными для эффективного сжигания [21, 29, 30].

Размороженная кавитационно-обработанная вода сохраняет свои приобретенные физико-химические свойства. Перевод ее в твердое агрегатное состояние делает возможным ее достав-

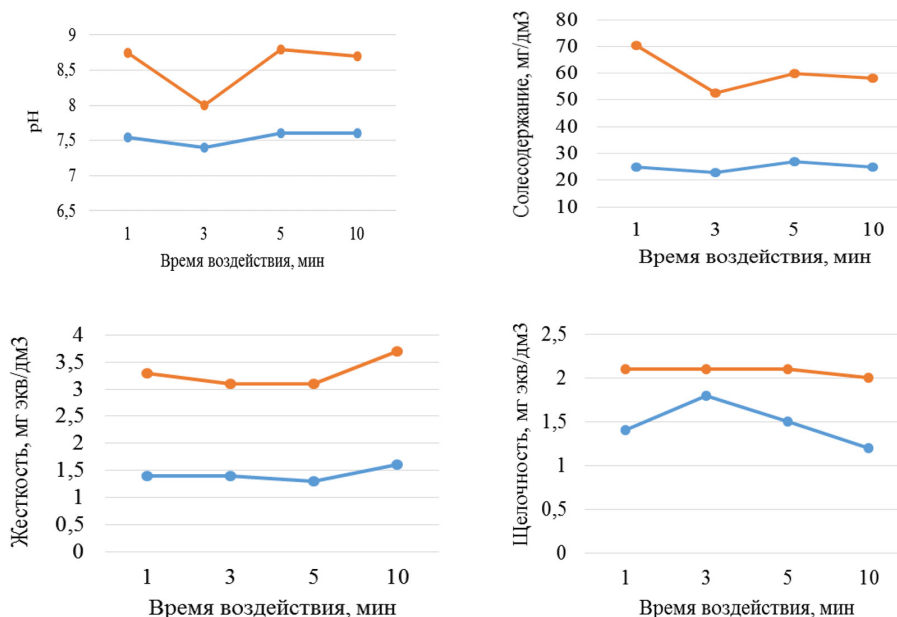


Рис. 3. Зависимости физико-химических параметров воды от времени кавитационной обработки при 5000 об/мин: — до заморозки — после разморозки

Fig. 3. Dependences of physico-chemical parameters of water on the time of cavitation treatment at 5000 rpm: — before freezing — after defrosting

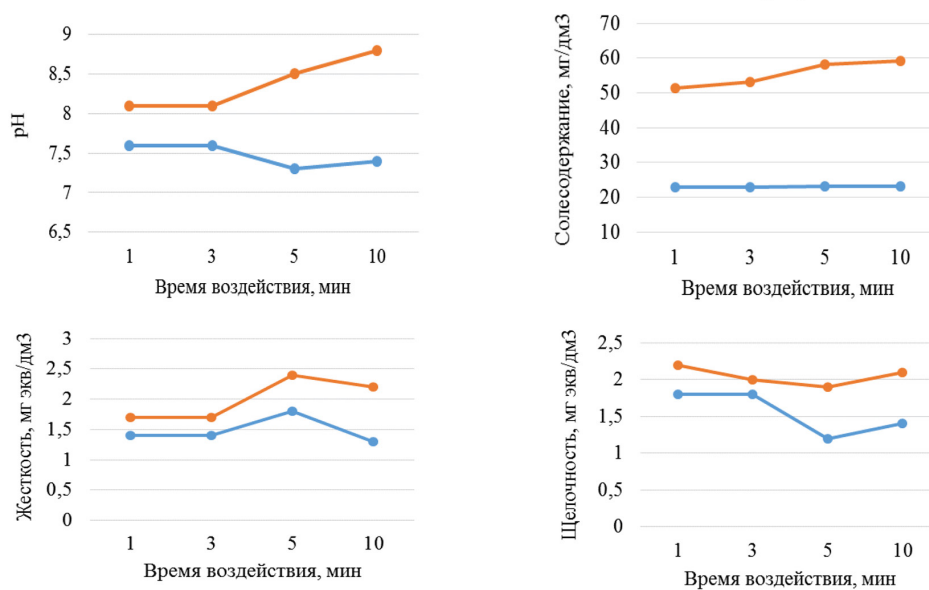


Рис. 4. Зависимости физико-химических параметров воды от времени кавитационной обработки при 10000 об/мин: — до заморозки — после разморозки

Fig. 4. Dependences of physico-chemical parameters of water on the time of cavitation treatment at 10000 rpm: — before freezing — after defrosting

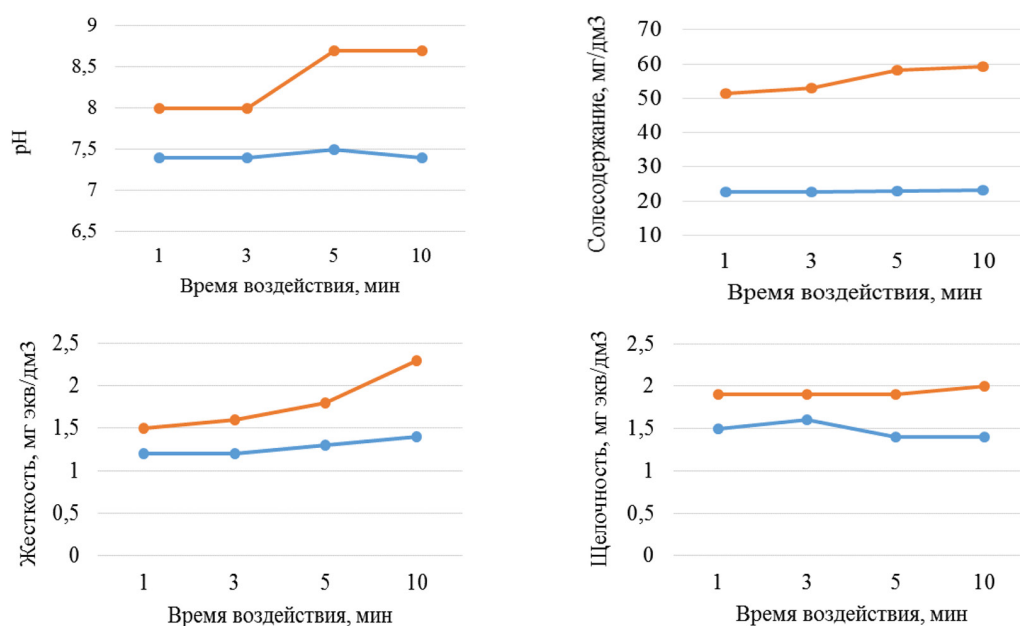


Рис. 5. Зависимости физико-химических параметров воды от времени кавитационной обработки при 15000 об/мин: — до заморозки — после разморозки

Fig. 5. Dependences of physico-chemical parameters of water on the time of cavitation treatment at 15000 rpm: — before freezing — after defrosting

ку на удаленные расстояния. Ее естественное замерзание в районах с низкими температурами не будет носить фатального характера.

Размороженная кавитационно-обработанная вода сохраняет свои приобретенные физико-химические свойства. Перевод ее в твердое агрегатное состояние делает возможным ее доставку на удаленные расстояния. Ее естественное замерзание в районах с низкими температурами не будет носить фатального характера.

### Экспериментальное определение физико-химических характеристик отработанных масел

Исследование масел (рис. 6) проводилось в несколько этапов: вначале для исходного (проба № 1) и отработанного (проба № 2) масла были определены параметры вязкости, значение pH и коэффициенты фильтрации. Далее отработанное масло подвергли кавитационному воздействию на установках двух типов: ультразвуковой и суперкавитационном миксере – получив пробы № 3а и № 3б, с последующим определением тех же физико-химических характеристик.

Для измерения водородного показателя (pH) масел использовался универсальный лабораторный автоматизированный прибор pH-метр/иономер ИТАН, для величин УЭП и солевого содержания воды кондуктометр-солемер МАРК 603 (рис. 7).

Определение жесткости воды по МУ 08–47/234 «Воды производственные тепловых электростанций. Методики выполнения измерений жесткости», щелочности – МУ 08–47/232 «Воды производственные тепловых электростанций. Метод определения щелочности». Для определения вязкости в работе использовался вискозиметр типа ВПЖТ-1, показан-

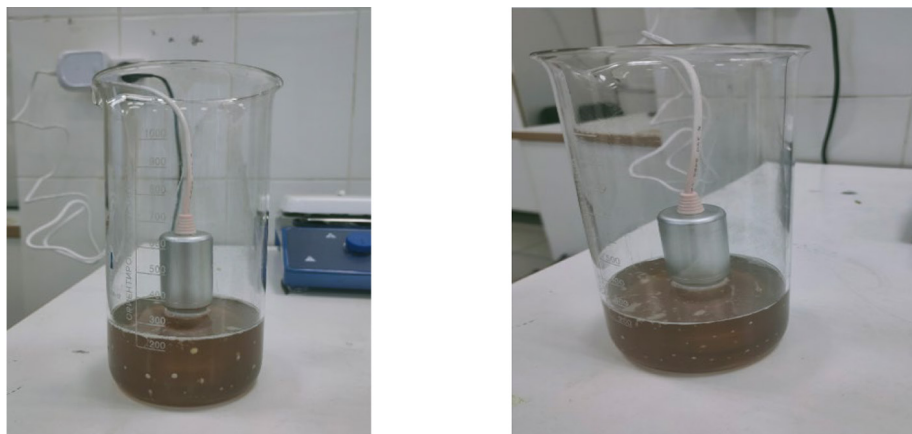


Рис. 6. Кавитационная обработка отработанного масла на ультразвуковой установке CE 9600 на первой и пятой минутах – проба № 3б

Fig. 6. Cavitation treatment of waste oil in an ultrasonic installation CE 9600 at the first and fifth minutes – sample No. 3b

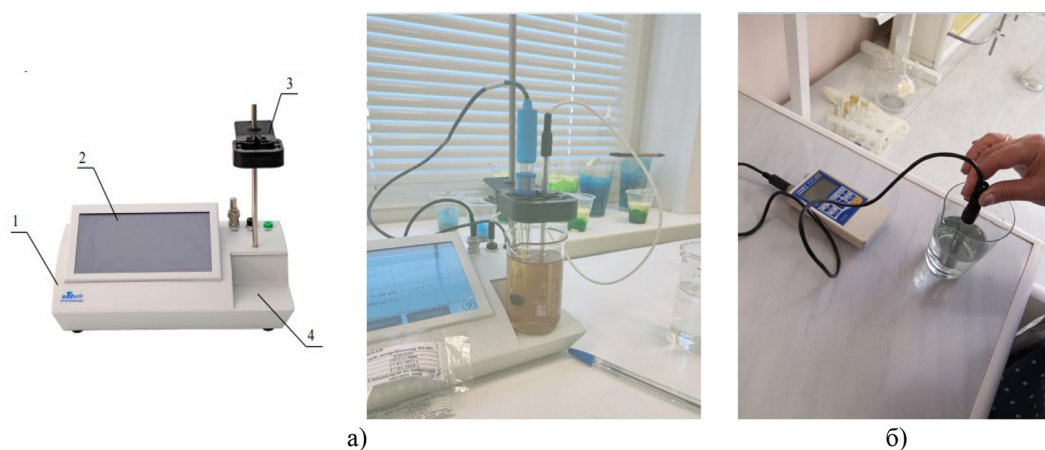


Рис. 7. а) рН-метр/иономер ИТАН, б) кондуктометр MARK 603

Fig. 7. a) pH meter/ionometer ITAN, b) conductometer MARK 603

ный на рис. 8. Суть метода определения вязкости заключается в измерении калиброванным стеклянным вискозиметром времени истечения в секундах определенного объема испытуемой жидкости под влиянием силы тяжести при известной и постоянно контролируемой температуре. Тестируемый образец масла (рис. 9) наливался в чистый вискозиметр через трубку 1, чтобы уровень его установился между метками  $M_3$  и  $M_4$ . Прибор устанавливается вертикально так, чтобы уровень термостатирующей жидкости находился на несколько сантиметров выше расширения 4.

В лаборатории для стабилизации температуры опыта вискозиметр выдерживается не менее 15 мин, после чего грушей всасывается масло выше метки  $M_1$  примерно до середины расширения 4. Далее измеряется время понижения уровня исследуемого масла в трубке 2 от метки  $M_1$ , до  $M_2$ .

Кинематическая вязкость рассчитывается по формуле (ГОСТ 33–2016):

$$\nu = C \times t_{cp},$$

где  $C$  – постоянная вискозиметра,  $\text{мм}^2/\text{с}^2$ ,  $t_{cp}$  – среднеарифметическое значение времени истечения, с.

Определение коэффициента фильтрации велось с использованием фильтрационного аппарата УОФТ (рис. 10). Метод определения коэффициента фильтрации основан на изменении пропускной способности фильтра при последовательном пропускании через него определенного количества топлива, в данном случае тестируемого образца [21].

Для выполнения эксперимента кран аппарата перекрывается и в стеклянную трубку 3 наливается тщательно перемешанная тестируемая проба масла на 0,3–0,5  $\text{см}^3$  выше метки. Далее в мерную колбу заливают 45  $\text{см}^3$  испытуемого образца. После выдержки и достижения уровнем масла верхней метки в аппарате открывается кран, одновременно включается секундомер и замеряется время истечения 2  $\text{см}^3$  масла ( $t_1$ ) от метки «В» стеклянной трубки до метки «А». Фильтрация продолжается путем доливания масла в стеклянную трубку аппарата, поддерживая уровень на 2–3  $\text{см}^3$  выше верхней метки. После того как все испытуемое масло перейдет в бюретку и его уровень опустится до верхней метки, замеряется время истечения последних 2  $\text{см}^3$  масла от метки «В» до «А» ( $t_2$ ).

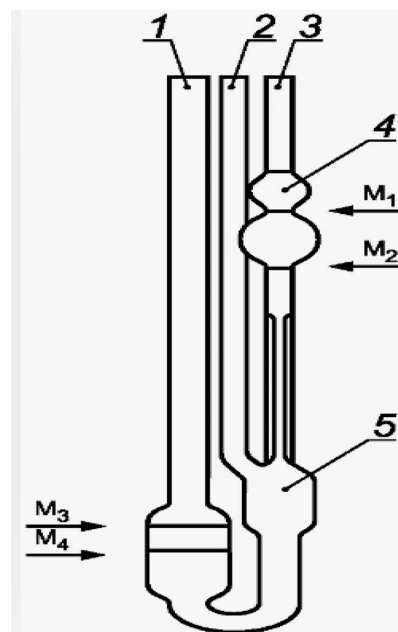


Рис. 8. Вискозиметр типа ВПЖТ-1: 1, 2, 3 – трубки вискозиметра, 4, 5 – расширители,  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$ ,  $M_4$  – метки уровней

Fig. 8. Viscometer type VPZHT-1: 1, 2, 3 – viscometer tubes, 4, 5 – expanders,  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$ ,  $M_4$  – level markers

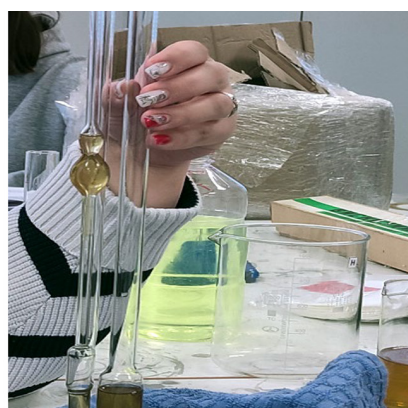
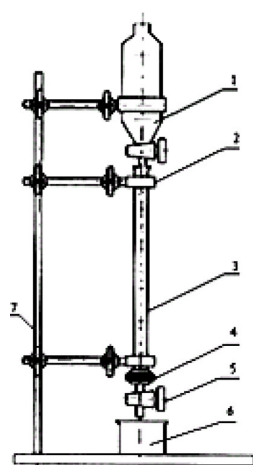
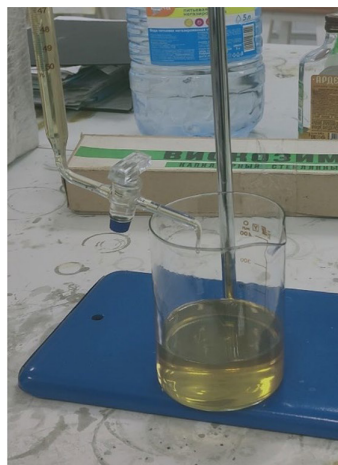


Рис. 9. Определение вязкости проб № 1 и № 2

Fig. 9. Determination of viscosity of samples No. 1 and No. 2



а)



б)

Рис. 10. Фильтрация: а) аппарат УОФТ, б) фильтрация образца № 2: 1 – колба, 2 – металлическая оправа, 3 – стеклянная трубка с метками, 4 – корпус, 5 – стеклянный кран, 6 – стеклянный стакан, 7 – штатив

Fig. 10. Filtration: a) UOFT apparatus, b) filtration of sample No. 2: 1 – flask, 2 – metal frame, 3 – glass tube with tags, 4 – housing, 5 – glass faucet, 6 – glass cup, 7 – tripod

Коэффициент фильтруемости топлива  $K$  находится по формуле:

$$K = \frac{t_2}{t_1},$$

где  $t_1$  – время фильтрации первых  $2 \text{ см}^3$  масла,  $t_2$  – время фильтрации последних  $2 \text{ см}^3$  масла.

#### Анализ углеродосодержащих отходов (нефтешлама)

Для анализа углеродосодержащих отходов были взяты пробы нефтешламов, образующихся при добыче нефти на Ванкорском месторождении. Испытания проводились на дериватографе Q-1500D (рис. 11), позволяющем одновременно выполнять термические и термогравиметрические анализы, в среде диоксида углерода

при скорости нагрева  $10 \text{ град/мин}$  в интервале температур  $25\text{--}800 \text{ }^\circ\text{C}$  [21].

Прибор позволяет получить максимальный нагрев в  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ , с интервалом скорости нагрева  $0,6\text{--}20 \text{ град/мин}$ . Основной частью дериватографа являются аналитические весы, на одном плече коромысла которых жестко укреплена фарфоровая трубка с термопарой. На спай термопары надевают тигель с исследуемым веществом, а на спай дифференциальной термопары надет тигель с инертным веществом. Тигли накрывают кварцевым колпачком, на него устанавливают печь, которую нагревают.



Рис. 11. Дериватограф Q-1500D, Венгрия

Fig. 11. Derivatograph Q-1500D, Hungary

На другом плече коромысла подвешена индукционная катушка с большим числом витков, которая перемещается в гомогенном поле двух подковообразных магнитов. При изменении массы образца коромысло поворачивается, и катушка изменяет свое положение. В качестве эталонного образца был взят активный оксид алюминия. Обработку полученных дериватограмм проводили по стандартным методикам.

### Оценка достоверности полученных результатов

В основе каждого измерения должна лежать оценка точности полученного результата, что является гарантией достоверности полученных данных и позволяет указать доверительные интервалы при практическом использовании результатов исследования. Во время проведения работ по замерам различных величин на испытательных стендах и в натурном эксперименте были по возможности устранены все причины для появления промахов, систематических и случайных ошибок с использованием рекомендаций, сделанных в работе. Качество результатов измерений характеризовалось абсолютной и относительной ошибкой. При определении погрешности использовались методы общей теории ошибок, теории вероятностей и математической статистики с установлением доверительного предела при вероятности 95 % [23–26].

Абсолютная ошибка функции нескольких переменных  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  определялась из соотношения:

$$\delta y = \pm \left( \left| \frac{\partial y}{\partial x} \delta x_1 \right| + \left| \frac{\partial y}{\partial x} \delta x_2 \right| + \dots + \left| \frac{\partial y}{\partial x} \delta x_n \right| \right),$$

где  $\delta y$  – абсолютная погрешность измеряемых величин.

Относительная ошибка, выраженная в процентах

$$\Delta y_{\text{отн}} = \frac{\delta y}{y} \times 100\%.$$

При использовании методов математической статистики определялось среднеарифметическое значение результатов испытаний по формулам:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_i^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}.$$

Здесь  $x_i$  – показатели измеряемых величин,  $n$  – число испытаний.

Среднеквадратичные отклонения (ошибки) находились по формуле:

$$\sigma \rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} S_n,$$

где

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n - 1}}.$$

Дисперсия измерения определялась как квадрат средней квадратичной ошибки. Коэффициент вариации, характеризующий рассеивание полученных данных, определялся как относительная величина средней квадратичной ошибки  $W$ :

$$W = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100\%.$$

Считают, что чем  $W$  больше, тем разнороднее результаты исследования. Доверительный интервал параметра определялся по выражению:

$$\Delta x = \pm \frac{t_{an} S_n}{\sqrt{n}},$$

где  $t_{an}$  – коэффициент Стьюдента; при доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$ ,  $t_{an} = 1,96$ .

Для обработки экспериментальных зависимостей применялся метод наименьших квадратов [27–29]. Анализ результатов подсчета относительных ошибок указывает на достаточную точность получаемых величин и корректность эксперимента.

### Определение физико-химических характеристик смазочных материалов

Лабораторные исследования проводились в два этапа:

1) для исходного и отработанного масла по существующим требованиям определялись значения вязкости, водородного показателя (рН) и коэффициент фильтрации. Результаты значений кинематической вязкости проб № 1 и № 2 представлены в табл. 3. По итогам определения водородного показателя получены следующие результаты:

- проба № 1 рН = 8,85;
- проба № 2 рН = 9,71.

Результаты определения коэффициента фильтрации исходного и отработанного масел представлены в табл. 4;

Таблица 3. Результаты вязкости тестируемых образцов

Table 3. Viscosity results of the tested samples

Номер пробы	Время истечения, с	Среднеарифметическая величина истечения, с	Постоянная вискозиметра*, мм <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>	Кинематическая вязкость, $\nu$ мм <sup>2</sup> /с (при $t = 23,8$ °С)	Класс вязкости по ISO 3448
№ 1	31,33	31,17	0,09705	3,0250	3 ( $\nu_{cp} = 2,88 - 3,52$ мм <sup>2</sup> /с)
	31,30				
	30,87				
№ 2	33,79	33,66	0,09705	3,2667	
	33,34				
	33,86				

\* – принимается из паспорта оборудования

Таблица 4. Расчет коэффициента фильтрации

Table 4. Calculation of the filtration coefficient

Номер пробы	Время фильтрации $t_1$ , с	Время фильтрации $t_2$ , с	Коэффициент фильтрации К
№ 1	15,19	62,56	4,12
№ 2	16,24	485,62	29,90

2) отработанное масло подверглось кавитационной обработке на двух разных устройствах: ультразвуковой установке и суперкавитационном смесителе. В результате были получены образцы № 3а и № 3б, для которых были определены те же физико-химические свойства. Время обработки варьировалось от 5 до 15 мин. Ультразвуковая установка работала с частотой 400 Гц, а суперкавитационный смеситель вращался со скоростью 7600 об/мин. Были сформированы серии образцов в зависимости от типа, примененного кавитационного эффекта (рис. 12.), наглядные результаты представлены на рис. 13.

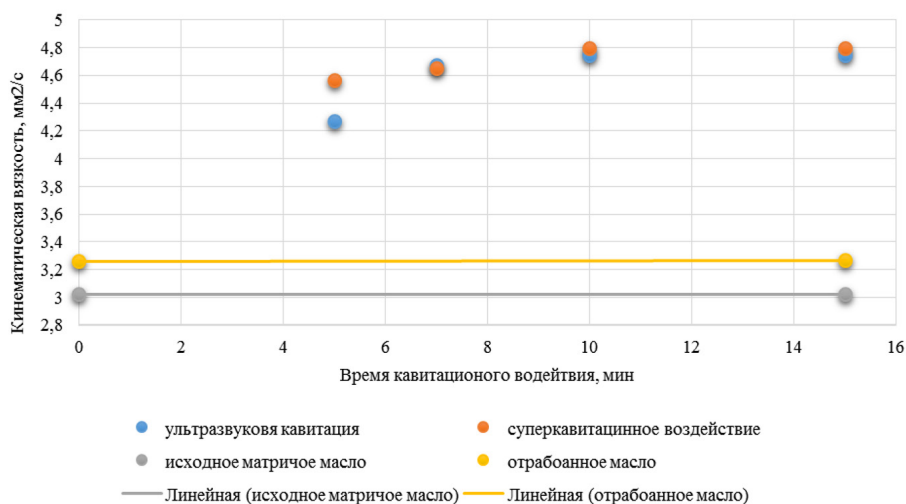


Рис. 12. Сравнение показателей вязкости масла – исходного, отработанного и после кавитационного воздействия

Fig. 12. Comparison of oil viscosity indicators – initial, spent and after cavitation

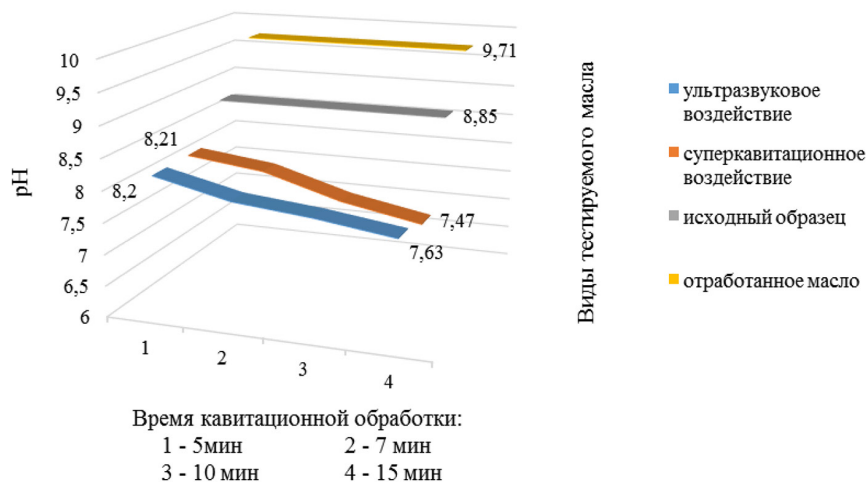


Рис. 13. Результаты определения величины водородного показателя pH

Fig. 13. Results of determining the value of the hydrogen pH index

Анализ проб № 1 и № 2 показал, что в отработанном масле присутствует осадок, включающий минеральные загрязнения, свинец, продукты износа оборудования и другие компоненты. При кавитационной обработке отработанного масла уже через 10 минут воздействия наблюдалось выпадение осадка и появление серного запаха.

Таким образом, путем увеличения класса вязкости регенерированного масла по стандарту ISO 3448, учитывая присутствие осадка, было установлено оптимальное соотношение выходных продуктов после кавитационной обработки. От 70 до 80 % масла пригодно для повторного использования в хозяйственной деятельности. Оставшаяся доля (20–30 %) углеводородного осадка может быть направлена на сжигание с обязательным условием создания кавитационно обработанной водотопливной смеси (ВТС) с содержанием воды 10–15 %. Данный процесс завершает жизненный цикл отработанного продукта и позволяет получить новую продукцию [32, 33].

Для определения процесса очистки от ионов  $S$  был разработан план многофакторного эксперимента, учитывающий остаточную концентрацию ионов  $S$ . Уровни факторов представляют собой границы исследуемой области по данному технологическому параметру. Основной (нулевой) уровень  $X_1^0$  и интервал варьирования  $l_1$  находятся по формулам:

$$X_1^0 = \frac{X_{max} + X_{min}}{2}; \quad l_1 = \frac{X_{max} - X_{min}}{2},$$

где  $X_{max}$  – верхний уровень фактора эксперимента;  $X_{min}$  – нижний уровень фактора эксперимента.

Уравнение регрессии по остаточной концентрации  $S$  приводят к натуральному виду и, изменяя сочетания и значения параметров, определяют графические зависимости:

$$X_i = \frac{Z_i - Z_{oi}}{\Delta Z_i};$$

$$X_i X_{(i+1)} = \frac{(Z_i - Z_{oi})(Z_{(i+1)} - Z_{o(i+1)})}{\Delta Z_i \times \Delta Z_{(i+1)}};$$

$$X_i^2 = \frac{(Z_i - Z_{oi})^2}{\Delta Z_i^2},$$

где  $Z_{oi}$ ,  $Z_{o(i+1)}$  – «нулевые» значения параметров  $X_i$  – исходная концентрация ионов  $S$  в маслах, мг/дм<sup>3</sup>;  $X_2$  – рН<sub>исх</sub>;  $X_3$  – скорость вращения крыльчатки кавитатора, об/мин.;  $\Delta Z_i$ ,  $\Delta Z_{(i+1)}$  – шаг изменения соответствующего параметра (интервал).

Регенерация промышленных масел основана на механизме деполимеризации, при котором длинные полимерные структуры распадаются до более коротких, что способствует высвобождению адсорбированных загрязнений и присадок из исходных и отработанных масел. Эффективность данного процесса восстановления существенно модулируется такими факторами, как рН среды, начальная концентрация присадок и скорость вращения кавитатора (см. рис. 13).

### Разработка технологической схемы установки сжигания ВТС

Поскольку образование отходов в промышленных процессах является неизбежным – вследствие термодинамических ограничений, связанных с потерями вещества и энергии, а также невозможностью полной переработки сырья в конечный продукт, строительство таких

предприятий предполагает внедрение интегрированных технологий, направленных на максимальное использование ресурсов. При этом побочные продукты одного производства служат исходными материалами или реагентами для последующих этапов.

Сжигание вторичных топливных средств (ВТС), особенно состава «отработанное масло–вода», способствует более полному выгоранию топлива, снижению эмиссии оксида углерода, бенз(а)пирена и оксидов азота, минимизации образования сажи, а также понижению температуры в радиантной зоне печей и аналогичных устройствах. Упрощённая схема установки сжигания указанного типа представлена на рис. 14.

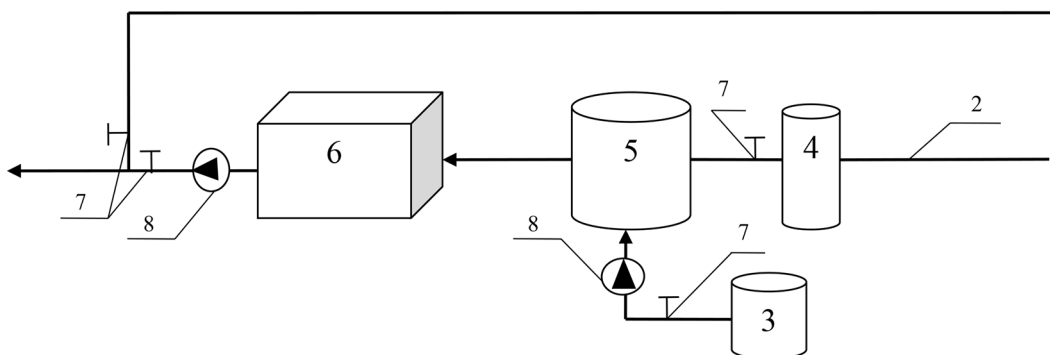


Рис. 14. Принципиальная схема установки сжигания ВТС «отработанное масло-вода»: 1 – действующий трубопровод; 2 – действующий водопровод; 3 – емкость с отработанными маслами; 4 – емкость с водой; 5 – кавитатор ПГК; 6 – промежуточная емкость хранения ВТС; 7 – запорная арматура; 8 – топливный насос

Fig. 14. Schematic diagram of a spent oil-water combustion plant: 1 – an operating pipeline; 2 – an operating water supply; 3 – a tank with used oils; 4 – a tank with water; 5 – a PGK cavitator; 6 – an intermediate storage tank; 7 – shut-off valves; 8 – a fuel pump

Жидкое топливо нагревается и подаётся по трубопроводу для последующего сжигания. При работе с ВТС «отработанное масло–вода» подготовка начинается с размещения смеси после прохождения через кавитационный аппарат в промежуточной ёмкости 6, откуда она направляется далее. Отработанные масла доставляются в ёмкость 3 автотранспортом. Компоненты ВТС – вода из водопровода и отработанные масла – смешиваются в ёмкости 5, где также реализуется кавитационное воздействие для получения стабильной однородной суспензии. После этого готовая смесь перемещается в промежуточную ёмкость с подогревом 6, где её температура доводится до 50–70 °С, поскольку сам процесс кавитации недостаточен для обеспечения необходимого теплового режима. Далее смесь подаётся топливным насосом в камеру сгорания. Контроль расхода мазута или ВТС регулируется за счёт изменения положения запорной арматуры. Основным преимуществом данной системы является обеспечение стабильной работы печи даже при колебаниях поступления отработанных масел.

Верификация результатов и расчет образования загрязняющих веществ производились по действующей методике определения выбросов ЗВ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 тонн пара в час [34]. Были рассмотрены следующие ва-

рианты: сжигание мазута, сжигание отработанного масла и сжигание водотопливной смеси (отработанное масло с водой в различных соотношениях).

Расход углеводородного топлива для котла ПКН-2М, заявленной мощностью 730 кВт, составляет 72 кг в час, годовую потребность в топливе определим величиной 5 тыс.т. Необходимые для расчета характеристики топлив взяты из табл. 6. Результаты полученных расчетов сведены в табл. 6 и представлены на диаграммах (рис. 15, 16).

По результатам выполненных расчетов установлено, что при сжигании водотопливной эмульсии с содержанием воды 10, 15 и 30 масс.% по сравнению с выбросами при сжигании мазута М100 наблюдается уменьшение выбросов оксида углерода и оксидов азота на 15–30 %, а также бенз(а)пирена – на 25–40 % [32, 33].

Впервые продемонстрирована возможность сохранения физико-химических свойств воды посредством ее фазового перехода в твердое состояние (замораживание). Замораживание

Таблица 5. Характеристики топлив

Table 5. Fuel characteristics

Вид топлива		Годовой расход топлива, тонн	Характеристики		
			$Q_P^H$ , МДж/кг	$A^P$ , %	$S^P$ , %
Мазут		5000	39,73	0,1	1,4
Отработанное трансмиссионное масло		5000	41,0	0,3*	0,5
ВТС «отработанное масло-вода»	воды 10 %	4500			
	воды 15 %	4250			
	воды 30 %	3500			

\* – наличие в маслах присадок, всегда содержащих тот или иной металл, приводит не только к повышению зольности масла, но также и к пропорциональному повышению коксового числа, что никак само по себе не может рассматриваться в качестве отрицательного фактора.

Таблица 6. Результаты расчетов образования загрязняющих веществ

Table 6. Results of calculations of pollutants formation

Вид топлива	Выбросы загрязняющих веществ, т/год (г/с)						Итого:
	NO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	CO	Сажа	Б(а)П	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	
Мазут	22,0876 (0,7004)	137,2 (4,3506)	25,7987 (0,8181)	0,500 (0,0159)	0,000059 (0,0000019)	1,0555 (0,0335)	186,641859 (5,918375)
Отработанное трансмиссионное масло	22,7937 (0,7227)	49,00 (1,5538)	26,6234 (0,8442)	1,500 (0,0476)	0,000063 (0,0000019)	0	50,917163 (1,614572)
ВТС (10 мас.% воды)	20,5143 (0,6505)	44,10 (1,3984)	23,9610 (0,7597)	1,350 (0,0428)	0,000057 (0,0000018)	0	45,825357 (1,453113)
ВТС (15 мас.% воды)	19,3746 (0,6143)	41,65 (1,3207)	22,6298 (0,7176)	1,2750 (0,0404)	0,000045 (0,0000014)	0	43,279445 (1,372382)
ВТС (30 мас.% воды)	15,9556 (0,5059)	34,30 (1,0876)	18,6363 (0,5909)	1,0500 (0,0333)	0,000024 (0,0000007)	0	35,641924 (1,130197)

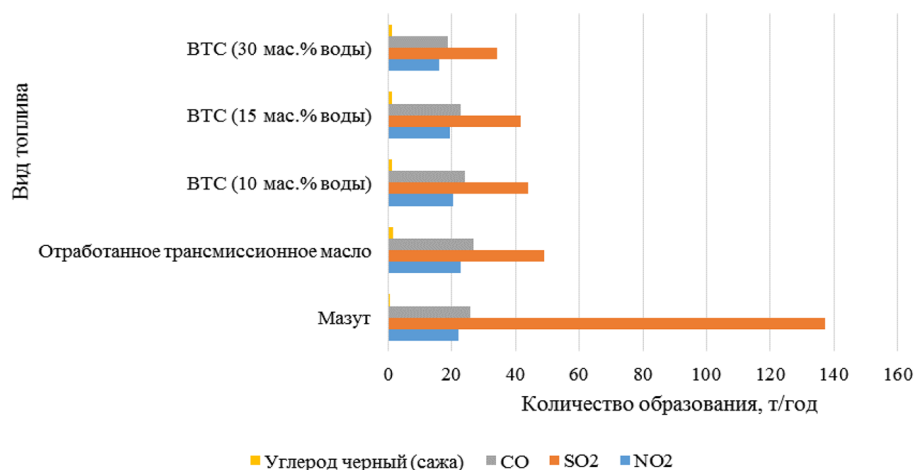


Рис. 15. Образование загрязняющих веществ в зависимости от вида сжигаемого топлива

Fig. 15. Formation of pollutants, depending on the type of fuel burned

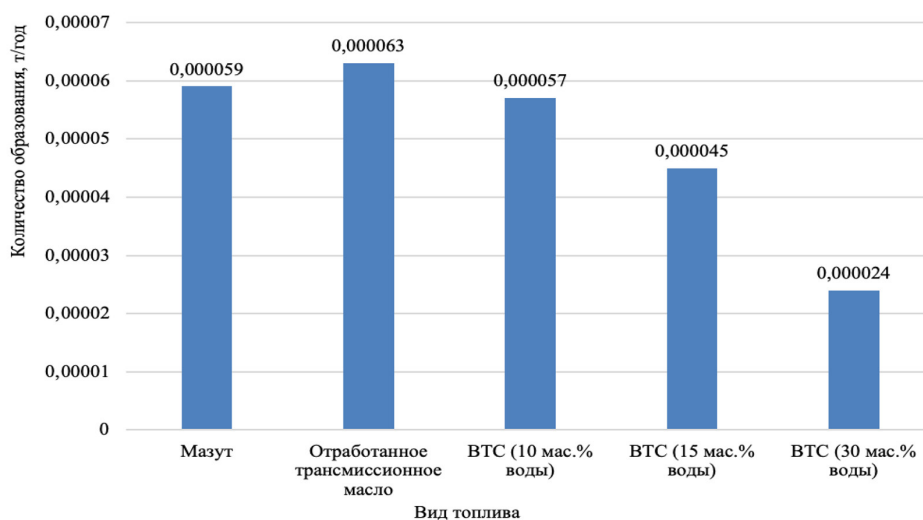


Рис. 16. Образование бенз(а)пирена в зависимости от вида сжигаемого топлива

Fig. 16. Benzapyrene formation, depending on the type of fuel burned

кавитационно-обработанной воды с последующим ее оттаиванием не приводит к модификации ее физико-химических характеристик. Это свойство делает ее пригодной для логистики на дальние расстояния или для замораживания в условиях низких температур. Таким образом, данная технология может быть использована для производства водотопливных эмульсий, предназначенных для предприятий, работающих на жидком топливе.

#### Список литературы / References

- [1] Лукин Ю. Ф. Горячие точки Российской Арктики. *Арктика и Север*. 2013. № 11. 4–38 [Lukin Yu. F. Hot spots” of the Russian Arctic. *Arctic and North*. 2013, No. 11, 4–38 (in Russian)].

[2] Смиреникова Е. В., Уханова А. В., Воронина Л. В. Оценка состояния окружающей среды и обеспечения экологической безопасности в Российской Арктике. *Управленческое консультирование*. 2018. № 9. 59–78 [Smirennikova E. V., Ukhanova A. V., Voronina L. V. Assessment of the State of the Environment and Ensuring Environmental Safety in the Russian Arctic. *Management Consulting*. 2018. No. 9. 59–78 (in Russian)].

[3] Дерябин В. А., Дерябин В. А., Фарафонтова Е. П. *Физическая химия дисперсных систем*. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. 88 с. [Deryabin V. A., Deryabin V. A., Farafontova, E. P. *Physical Chemistry of Dispersed Systems*. Yekaterinburg: Ural University Press, 2015. 88 p. (in Russian)].

[4] Пивоваров Ю. В. Расчет движения вязкой жидкости, частично заполняющей вращающуюся полость, при больших числах Рейнольдса. *Вычислительные технологии*. 2019. Т. 24, № 3. 88–105. DOI: 10.25743/ICT.2019.24.3.007 [Pivovarov Yu. V. Calculation of the Flow of a Viscous Fluid Partially Filling a Rotating Cavity at High Reynolds Numbers. *Computational Technologies*. 2019. Vol. 24, No. 3. 88–105. DOI: 10.25743/ICT.2019.24.3.007 (in Russian)].

[5] Нуштаева А. В., Вилкова Н. Г. Пены и эмульсии, стабилизированные твердыми частицами: механизмы стабилизации. *Известия вузов. Поволжский регион. Естественные науки*. 2017. № 4(20). 74–85. DOI: 10.21685/2307–9150–2017–4–6 [Nushtaeva A. V., Vilkova N. G. Foams and emulsions stabilized by solid particles: stabilization mechanisms. *News of Higher Education Institutions. Volga Region. Natural Sciences*. 2017. No. 4(20). 74–85. DOI: 10.21685/2307–9150–2017–4–6 (in Russian)].

[6] Drelich A., Gomez F., Clausse D., Pezron I. Evolution of water-in-oil emulsions stabilized with solid particles. Influence of added emulsifier. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2010. Vol. 365, No. 1–3. 171–177. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2010.01.042.

[7] Rajkumar R., Gaurav K., Kumar V. [et al.]. Numerical Investigation of the Effect of Liquid Temperature on Supercavitation. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2023. 19–27. DOI: 10.1007/978–981–19–1388–4\_2.

[8] Иванова Т. Е. *Дисперсные системы*. Тюмень: ТИУ, 2018. 146 с. ISBN 978–5–9961–1694–2 [Ivanova T. E. *Disperse Systems*. Tyumen: TIU, 2018. 146 p. ISBN 978–5–9961–1694–2 (in Russian)].

[9] Кулагин В. А. Гидродинамические воздействия на жидкости, золи, смеси твердые границы потоков. Красноярск: *Вестник КГТУ*. 1997. Вып. 8. 26–43 [Kulagin V. A. Hydrodynamic Effects on Liquids, Sols, Mixtures, and Solid Flow Boundaries. Krasnoyarsk: *Vestnik KSTU*. 1997. Iss. 8. 26–43 (in Russian)].

[10] Климов Д. М., Петров А. Г., Георгиевский Д. В. *Механика сплошной среды: вязкопластические течения*. М.: Изд-во Юрайт, 2018. 394 с. ISBN 978–5–534–08780–2 [Klimov D. M., Petrov A. G., Georgievskiy D. V. *Continuum Mechanics: Viscoplastic Flows*. Moscow: Yurait Publishing House, 2018. 394 p. ISBN 978–5–534–08780–2 (in Russian)].

[11] Gupta N. K. Biodiesel Production from Waste Cooking Oil Using Mechanical stirring and Ultrasonic Cavitation method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1116, No. 1. 012067. DOI: 10.1088/1757–899x/1116/1/012067.

[12] *СО 34.09.114–2001 Методические указания по контролю качества твердого, жидкого и газообразного топлива для расчета удельных расходов топлива на тепловых электростанциях: дата введения 2002–05–01*. М.: ОАО ВТИ, 2003. 36 с. [SO 34.09.114–2001 Guidelines for

*Quality Control of Solid, Liquid, and Gaseous Fuels for Calculating Specific Fuel Consumption at Thermal Power Plants: effective date 2002–05–01*. Moscow: OAO VTI, 2003. 36 p. (in Russian)].

[13] Abhijeet H. Thaker, Vivek V. Ranade. Towards harnessing hydrodynamic cavitation for producing emulsions: Breakage of an oil drop in a vortex based cavitation device. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*. Vol. 180, 2022, 108753. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108753>.

[14] Erfanian M.R., Anbarsooz M. Numerical investigation of body and hole effects on the cavitating flow behind a disk cavitator at extremely low cavitation numbers. *Applied Mathematical Modelling*. 2018. Vol. 62. 163–180. DOI: 10.1016/j.apm.2018.05.026.

[15] ГОСТ 14203–69. Нефть и нефтепродукты. Диэлькометрический метод определения влажности = *Oil and Petroleum Products. Capacitance method of determination of water content: межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР от 7 февраля 1969 г. № 171: введен впервые: дата введения 1970–01–01*. М.: Стандартинформ, 2006. 5 с. [*GOST 14203–69. Oil and Petroleum Products. Capacitance Method of Determining Water Content: Interstate Standard: Official Edition: Approved and Put into Effect by Resolution of the Committee for Standards, Measures, and Measuring Instruments under the Council of Ministers of the USSR dated February 7, 1969, No. 171: First Introduction: Effective Date 1970–01–01*. Moscow: Standartinform, 2006. 5 p. (in Russian)].

[16] Сладовский А. Г. *Совершенствование методов и средств воспроизведения и передачи единицы объемного влагосодержания нефти и нефтепродуктов*, дис. ... канд. техн. наук, 2017. 178 с. [Sladovsky A. G. *Improving the Methods and Means of Reproducing and Transmitting the Unit of Volumetric Moisture Content of Oil and Oil Products*, Cand. Sci. (Eng.), 2017. 178 p. (in Russian)].

[17] Готовский М. А., Суслов В. А. *Тепломассообмен в технологических установках*. Санкт-Петербург: СПбПУ, 2017. 420 с. ISBN 978–5–7422–5498–0 [Gotovsky M. A., Suslov, V. A. *Heat and Mass Transfer in Process Installations*. St. Petersburg: SPbPU, 2017. 420 p. ISBN 978–5–7422–5498–0 (in Russian)].

[18] Григорьев Б. А., Герасимов А. А., Александров И. С. *Теплофизические свойства углеводородов нефти, газовых конденсатов, природного и сопутствующих газов*: В 2 т. Т. 1. М.: Издательский дом МЭИ, 2019. 735 с. ISBN 978–5–383–01323–6 [Grigoriev B. A., Gerasimov A. A., Aleksandrov I. S. *Thermophysical Properties of Oil Hydrocarbons, Gas Condensates, Natural and Associated Gases: In 2 vols. Vol. 1*. Moscow: MPEI Publishing House, 2019. 735 p. ISBN 978–5–383–01323–6 (in Russian)].

[19] Дерябин В. А., Фарафонтова Е. П., Кулешов Е. А. *Физическая химия дисперсных систем*. М.: Изд-во Юрайт, 2020. 86 с. ISBN 978–5–534–05375–3 [Deryabin, V. A., Farafontova E. P., Kuleshov E. A. *Physical Chemistry of Dispersed Systems*. Moscow: Yurait Publishing House, 2020. 86 p. ISBN 978–5–534–05375–3 (in Russian)].

[20] Яковлева, А. А., Белозерова О. В. *Коллоидная химия нефтяных дисперсных систем*. Иркутск: ИРНИТУ, 2023. 22 с. ISBN 978–5–8038–1916–5 [Yakovleva A. A., Belozerova O. V. *Colloidal Chemistry of Oil Dispersed Systems*. Irkutsk: IRNITU, 2023. 22 p. ISBN 978–5–8038–1916–5 (in Russian)].

[21] ГОСТ 19006–73. Топливо дизельное. Метод определения коэффициента фильтруемости = *Motor fuel. Determination of the filterability factor*: межгосударственный стандарт:

издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 20 июля 1973 г. № 1787: введен впервые: дата введения 1980–01–01 / разработан ОАО «ВНИИ НП, Межгосударственным техническим комитетом по стандартизации МТК 31 «Нефтяные топлива и смазочные материалы». М.: Издательство стандартов, 1986 [*GOST 19006–73. Diesel Fuel. Method for Determining the Filterability Coefficient = Motor fuel. Determination of the filterability factor: interstate standard: official publication: approved and put into effect by Resolution of the State Standards Committee of the Council of Ministers of the USSR dated July 20, 1973, No. 1787: introduced for the first time: date of introduction 1980–01–01 / developed by JSC “VNII NP, Interstate Technical Committee for Standardization ITC 31 “Petroleum Fuels and Lubricants”. Moscow: Publishing House of Standards, 1986 (in Russian)].*

[22] Обращение с отходами нефтепродуктов: Монография / Т.А. Кулагина, Е.Н. Зайцева, В.А. Кулагин, Л.В. Кулагина, О.Г. Дубровская, Э.Э. Кобилев. М.: РУСАЙНС, 2024. 242 с. ISBN 978–5–466–07508–3 [*Handling of Waste Petroleum Products: Monograph / T. A. Kulagina, E. N. Zaitseva, V. A. Kulagin, L. V. Kulagina, O. G. Dubrovskaya, E. E. Kobilov. Moscow: RUSAINS, 2024. 242 p. ISBN 978–5–466–07508–3 (in Russian)].*

[23] Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. *Теория вероятностей и ее инженерные приложения*. 3-е изд., переработанное и дополненное. М.: Академия, 2003. 459 с. ISBN 5–7695–1052–8 [*Ventzel E. S., Ovcharov L. A. Probability Theory and Its Engineering Applications. 3rd ed., revised and supplemented. Moscow: Academy, 2003. 459 p. ISBN 5–7695–1052–8 (in Russian)].*

[24] Шуленин В.П. *Математическая статистика*. Ч. 1. Томск: Изд-во научно-технической литературы, 2012. 540 с. ISBN 978–5–89503–492–7 [*Shulenin V. P. Mathematical Statistics. Part 1. Tomsk: Publishing House of Scientific and Technical Literature, 2012. 540 p. ISBN 978–5–89503–492–7 (in Russian)].*

[25] Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф. *Теория вероятностей, математическая статистика и случайные процессы*. Самара: ПГУТИ, 2017. 283 с. ISBN 5–7410–0415–6 [*Tarasov, V.N., Bakhareva, N.F. Probability Theory, Mathematical Statistics, and Random Processes. Samara: PGUTI, 2017. 283 p. ISBN 5–7410–0415–6 (in Russian)].*

[26] Тараненко Е.В. *Оценка погрешностей результатов измерений*. Нижний Новгород: НГТУ им. Алексея, 2023. 100 с. ISBN 978–5–502–01663–6 [*Taranenko E. V. Estimation of Errors in Measurement Results. Nizhny Novgorod: Alekseev NSTU, 2023. 100 p. ISBN 978–5–502–01663–6 (in Russian)].*

[27] Жмако О.А., Голиков К.А., Чуприн Е.Н. Применение метода наименьших квадратов в физико-химических методах анализа. *Инновационные технологии в науке и образовании*. 2015. № 3(3). 20–22 [*Zhmako O. A., Golikov K. A., Chuprin E. N. Application of the Least Squares Method in Physicochemical Methods of Analysis. Innovative Technologies in Science and Education. 2015. No. 3(3). 20–22 (in Russian)].*

[28] Ковель А.А. *Инженерные аспекты математического планирования эксперимента: Монография*. Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017. 117 с. [*Kovel A. A. Engineering Aspects of Mathematical Experimental Planning: Monograph. Zheleznogorsk: Siberian Fire and Rescue Academy of the GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2017. 117 p.*].

[29] Шейнин О.Б. *История теории ошибок*. Берлин: NG Verl., 2007. 176 с. ISBN 3–938417–49–8 [Sheinin O.B. *History of Error Theory*. Berlin: NG Verl., 2007. 176 p. ISBN 3–938417–49–8 (in Russian)].

[30] Кулагина Т.А., Дубровская О.Г., Зайцева Е.Н. Совершенствование технологий утилизации отработанных нефтепродуктов. *Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов*. 2024. Т. 335. № 6. 46–54; DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4607 [Kulagina T.A., Dubrovskaya O.G., Zaitseva E.N. Improving Waste Oil Product Utilization Technologies. *TPU Bulletin. Georesources Engineering*. 2024. Vol. 335. No. 6. 46–54; DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4607 (in Russian)].

[31] Кулагина Т.А., Зайцева Е.Н. Замкнутый цикл использования промышленных масел на циркумполярных территориях. *Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского*. 2025. № 1(95). 28–36. DOI: 10.17277/voprosy.2025.01.pp.028–036 [Kulagina T.A., Zaitseva E.N. Closed Cycle of Industrial Oil Use in Circumpolar Territories. *Current Science and Practice. Vernadsky University*. 2025. No. 1(95). 28–36. DOI: 10.17277/voprosy.2025.01.pp.028–036 (in Russian)].

[32] Зайцева Е.Н., Кулагина Т.А., Тюрикова О.А. Снижение накопленного экологического ущерба северных территорий России. *Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского*. 2025. № 2(96). 25–34. DOI: 10.17277/voprosy.2025.02.pp.025–034 [Zaitseva E.N., Kulagina T.A., Tyurikova O.A. Reducing Accumulated Environmental Damage in Russia's Northern Territories. *Current Science and Practice. Vernadsky University*. 2025. No. 2(96). 25–34. DOI: 10.17277/voprosy.2025.02.pp.025–034 (in Russian)].

[33] Кулагина Т.А., Зайцева Е.Н., Дубровская О.Г., Кулагина Л.В. Утилизация отработанных нефтепродуктов и кондиционирование промышленных стоков на базе кавитационной технологии в условиях циркумполярных территорий. *Журн. СВУ. Техника и технологии*. 2024, 17(4), 414–428 [Kulagina T.A., Zaitseva E.N., Dubrovskaya O.G., Kulagina L.V. Utilization of waste oil products and conditioning of industrial wastewater based on cavitation technology in circumpolar territories. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2024, 17(4), 414–428 (in Russian)].

[34] *Методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 20 ГКал в час*. М., 1999. 76 с. [Methodology for determining pollutant emissions into the atmosphere during fuel combustion in boilers with a capacity of less than 20 Gcal/hour. Moscow, 1999. 76 p. (in Russian)].

EDN: ACESFE

УДК 662.75

## Cavitation Fuel Preparation Based on Waste Oils of Various Composition

Tatyana A. Kulagina\*,  
Elena N. Zaitseva and Anatoly I. Matyushenko  
*Siberian Federal University  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 30.01.2026, received in revised form 28.02.2026, accepted 15.03.2026

**Abstract.** As part of our work, we studied the possibility of using the hydrodynamic cavitation effect for the recycling of waste oil products, particularly industrial oils. The main objective was to close the cycle of existence of the used materials by transforming them into new substances: 70 % of the regenerated oil, whose properties were close to the original ones, and 30 % of the water-fuel emulsion, which was suitable for burning in low-power burners. It was found that the use of cavitation methods for the recycling of waste oils in the Far North, while complying with environmental requirements, demonstrates high efficiency. This technology can be used to produce water-fuel emulsions for enterprises that use liquid fuel.

**Keywords:** petroleum products, waste oils, fuel preparation, cavitation effects, and water-oil emulsion.

Citation: Kulagina T. A., Zaitseva E. N. and Matyushenko A. I. Cavitation Fuel Preparation Based on Waste Oils of Various Composition. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(3), 309–321. EDN: ACESFE



## Кавитационная топливоподготовка на базе отработанных масел различного состава

Т. А. Кулагина, Е. Н. Зайцева, А. И. Матюшенко  
*Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, Красноярск*

**Аннотация.** В рамках проведенной работы мы изучали возможность использования гидродинамического кавитационного эффекта для переработки отработанных нефтепродуктов, в частности промышленных масел. Основная задача состояла в закрытии цикла существования использованных материалов путем их трансформации в новые субстанции: 70 % регенерированного масла, чьи свойства оказались близки к исходным, и 30 % водотопливной эмульсии, годной для сжигания в маломощных горелках. Было установлено, что при использовании кавитационных методов переработка отработанных масел в условиях Крайнего Севера, с соблюдением экологических требований, демонстрирует высокую эффективность. Данная технология может быть применена для производства водотопливных эмульсий для предприятий, использующих жидкое топливо.

**Ключевые слова:** нефтепродукты, отработанные масла, топливоподготовка, кавитационные воздействия, водомасляная эмульсия.

Цитирование: Кулагина Т. А. Кавитационная топливоподготовка на базе отработанных масел различного состава / Т. А. Кулагина, Е. Н. Зайцева, А. И. Матюшенко // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(3). С. 309–321. EDN: ACESFE

### Введение

В современном производстве, стремящемся к минимизации промышленных отходов за счет их повторного вовлечения в производственные циклы, рациональное потребление природных ресурсов становится не просто желательным, а необходимым подходом. Для сокращения расхода первичных нефтепродуктов и одновременного управления постоянным потоком отходов необходимо переводить последние в состояние восстановленных для последующего применения или направлять на утилизацию в теплоэнергетических установках.

Особую актуальность в наши дни приобретает бережное расходование всех типов масел, таких как моторные, промышленные, компрессорные, трансформаторные, турбинные и другие. Попадающие в природную среду отработанные масла лишь незначительно обезвреживаются или удаляются естественными процессами [1, 2]. Большая их часть становится источником загрязнения почв, водных объектов и атмосферного воздуха, негативно влияя на популяцию птиц, рыб, млекопитающих и представляя угрозу для здоровья человека.

Последние годы демонстрируют повышенный интерес к решению подобных проблем, однако собранной информации пока недостаточно для эффективной переработки отработанных масел и других нефтепродуктов в условиях Крайнего Севера. Требования к защите окружающей среды, учитывающие специфику климата и ограниченную доступность арктических регионов, обуславливают необходимость дифференцированного подхода. Оправданные решения в этом направлении могут быть найдены, например, посредством применения кавитационных технологий. В табл. 1 представлено ежегодное потребление масел в России.

После проведения процедур регенерации отработанные некоторые масла могут направляться на прямое использование – возврат в системы смазки техники, что может составлять

Таблица 1. Статистика оборота отработанных масел в РФ, млн т в год

Table 1. Statistics on the turnover of used oils in the Russian Federation, million tons per year

Потребление смазочных материалов в России	1,85
Средний показатель образования отходов масел	0,5
Ожидаемо должно образовываться	0,925
По данным 2ТП-отходы образовано	0,500
Легальные мощности по утилизации	0,100
Неучтенные количества	0,325
Средний показатель образования отходов масел	0,5

до 70 % масла определенной марки от общего объема образовавшихся отходов. В целом масла, не прошедшие восстановление, применяются как компонент водотопливной смеси (ВТС) на предприятиях с котлами для сжигания жидких топлив. В России вся масса использованного в производственных процессах масла обязана передаваться на пункты приема отходов для дальнейшей подготовки к переработке (утилизации), при этом пункт 3.8.3 указанного нормативного акта строго запрещает применение отработанных масел даже в качестве топлива. Уничтожение отработанных масел, включая их сжигание либо иные способы обработки, не приводящие к получению товарного сырья, не разрешается. Тем не менее внедрение принципов экономики замкнутого цикла при работе с этими отходами пока не достигло достаточного уровня развития, поэтому значительная доля таких отходов используется в качестве основного топлива – просто сжигается. Неучтенные в системе утилизации отработанные нефтепродукты и смазочные вещества оказываются в нелегальном обороте, где, будучи отходами 3 класса опасности, сжигаются с выбросами токсичных соединений, нарушая экологический баланс [2].

В странах Европы обращение с отработанными маслами регулируется специальной директивой, где впервые они рассматриваются не как отходы, подлежащие ликвидации, а как материалы, предназначенные для повторного использования. Ключевым условием исполнения требований этой директивы выступают обязательные ежегодные доклады государств – членов ЕЭС, направляемые в Комиссию ЕЭС об уровне развития производства, накопленном технологическом опыте и достигнутых показателях.

Развитие арктических районов Российской Федерации сопровождается серьезным негативным влиянием на природную среду, последствия которого часто оказываются необратимыми [3]. Большая площадь Арктики порождает иллюзию свободы в организации полигонов для хранения и размещения отходов. Это привело к накоплению огромных масс различного мусора (стекло, металлолом, пластик), включая цистерны с отработанными маслами, которые получили существенные механические дефекты и проявления коррозии, что делает невозможным их безопасную доставку на основную территорию страны. Следовательно, особое значение приобретает изучение накопленных объемов и разработка способов их переработки непосредственно там, где происходят выбросы.

Анализ ситуации с утилизацией отработанных масел в России позволяет заключить, что наиболее целесообразным решением будет сбор таких отходов по эксплуатационным группам

с последующей регенерацией на мобильных комплексах прямо на объектах их формирования, что возможно при применении кавитационных методов.

### Подходы, методы и техника эксперимента

Исследование известных решений и устройств для приготовления эмульсий продемонстрировало целесообразность применения механизма кавитационного воздействия, реализуемого в суперкавитирующих аппаратах (табл. 2), при получении ВТС. С учётом модели возникновения кавитации, разрыв сплошности наблюдается в зонах снижения давления внутри турбулентных вихрей, образующихся в области смешивания [4–8]. Разместив точку отсчёта координат на оси вихря и считая его структуру аналогичной ядерной форме, при которой все элементы перемещаются по концентрическим траекториям с величиной скорости, пропорциональной радиусу, проанализируем состояние равновесия капли жидкости, не смешивающейся с основной средой, вращающейся с тем же числом оборотов, что и окружающая её жидкость. В соответствии с законом Стокса справедливо следующее выражение:

$$6\pi \cdot \mu \cdot \frac{dx}{dt} \cdot r = \frac{4}{3}\pi r^3 \cdot (\rho_{\phi} - \rho_c) \cdot w^2 r,$$

где  $r$  – радиус частицы,  $\frac{dx}{dt}$  – скорость перемещения частицы;  $\mu$  – вязкость среды;  $(\rho_{\phi} - \rho_c)$  – разность плотностей дисперсной фазы и среды;  $\frac{4}{3}\pi r^3$  – объем шаровой частицы (капли).

Сравнительный анализ экспериментальных данных по получению эмульсий посредством гидродинамической и акустической кавитации выявил следующие ключевые аспекты:

- Эффективность процесса кавитационного эмульгирования в значительной степени определяется механизмом, зависящим от плотностных характеристик жидкостей в условиях вращательного движения (центрифугирования).
- Формирование эмульсий наивысшего качества наблюдается в случаях, когда плотность несущей фазы превышает плотность дисперсной.

Таблица 2. Сравнительные характеристики смесителей

Table 2. Comparative characteristics of mixers

Тип смесителя/ характеристики	Производительность, м <sup>3</sup> /ч	Удельные энергозатраты, кВт ч/м <sup>3</sup>	Средний диаметр микропузырьков>, мм
Быстроходные вертикальные	0,3–0,38	18–24	0,1–0,15
Аппараты вихревого слоя	2–6	0,6–1,8	0,025–0,03
Турбулентные статические	1,8–2,25	1,3–5,6	0,035–0,06
Гидродинамические ультразвуковые	0,8	3–12	0,06–0,07
Кавитационные динамические	0,6	6–19	0,01–0,025
Суперкавитирующие динамические	20	0,275	0,003–0,015
Суперкавитирующие статические	20–120	0,12	0,005–0,015

При характеристике процесса горения водотопливной смеси следует акцентировать внимание на дивергенции в поведении капель водотопливной эмульсии по сравнению с каплями безводного топлива. Данное различие обусловлено процессами, протекающими внутри дисперсной фазы, что приводит к моделированию поведения капли эмульсии на основе концепции ее микровзрыва (разрыва топливной оболочки). Феномен микровзрыва капли водотопливной эмульсии был впервые идентифицирован, исследован и интерпретирован В. М. Ивановым и П. И. Нефедовым, а впоследствии получил дальнейшее теоретическое и экспериментальное обоснование в работах других ученых [9–12].

Так как температура испарения большинства углеводородных топлив котельных превышает 200–300 °С, а температура кипения воды составляет 100 °С при нормальном давлении, то в процессе нагрева капли эмульсии до температуры испарения топлива частицы воды превращаются в пар. Хотя температура капли жидкости в процессе ее испарения несколько меньше температуры кипения, разница между температурой поверхности частицы топлива и температурой кипения воды, заключенной внутри капли топлива, остается весьма существенной и достигает 70–200 °С. Благодаря этому микрочастицы воды, находящиеся внутри капли эмульсии, в процессе ее прогрева быстрее превращаются в парообразное состояние и образуют паровые пузырьки, чем та пленка топлива, которая обволакивает эти пузырьки пара. При этом пленка топлива вследствие испарения с поверхности капли непрерывно уменьшается по толщине. Силы поверхностного натяжения капли стремятся сохранить прежнюю форму капель, хотя и превышают давление водяного пара, все же уже ослаблены. Продолжающийся нагрев капли эмульсии еще более повышает температуру, следовательно, и давление водяного пара внутри капли. В момент, когда давление стремящихся расшириться водяных паров внутри капли превысит уже ослабленные вследствие ее нагревания силы поверхностного натяжения топливной пленки, произойдет разрушение поверхности капли, т.е. микровзрыв, под действием которого эмульсионное распыленное топливо дополнительно дробится на еще более мелкие частицы.

### Результаты экспериментального исследования

Экспериментальное определение физико-химических свойств масел после гидродинамической обработки проводилось в лаборатории СФУ [13] на трех группах образцов промышленного масла W30:

- 1) исходное матричное масло – проба № 1,
- 2) отработанное масло – проба № 2,
- 3) отработанное кавитированное масло – пробы № 3а и № 3б, полученные разными способами кавитационного воздействия.

Исследования проводились с использованием следующего оборудования: термометр лабораторный ТЛ-4, рН-метр/ионометр ИТАН, кондуктометр МАРК 603, вискозиметр ВПЖТ-1, фильтрационный аппарат УОФТ, морозильная камера «Бирюса». Определение состава проб нефтешлама проводилось с использованием дериватографа Q-1500D (Венгрия). Эффективность выбранной кавитационной технологии экспериментально исследовали на лабораторной кавитационной установке Silverson L5. В качестве рабочего органа генератора кавитации использована 16-лопастная головка высокого сдвига. Рабочие числа оборотов регулировались до 12000 об/мин, что обеспечило получение чисел кавитации до  $\chi = 0,05$ . Схема управления

позволяет плавно изменять частоту вращения ротора, поддерживать число оборотов независимо от изменяющейся нагрузки и фиксировать время обработки. Мощность электродвигателя  $N_{эл} = 270$  Вт, ёмкость реактора 12000 мл. Параллельно опыты проводились с использованием суперкавитационного миксера [14] с целью исключения масштабного эффекта. В эксперименте измерялись следующие параметры: водородный показатель, вязкость и коэффициент фильтрации. Также в эксперименте был использован ультразвуковой генератор LZHZXY, CE 9600 [17] с заявленной мощностью 70 Вт и ультразвуковой частотой 400 Гц.

Работа с отработанным маслом проводилась в два этапа: для исходного и отработанного масла были определены параметры вязкости, значение pH и коэффициенты фильтрации; отработанное масло, представленное пробой № 2, подвергли кавитационной обработке двумя способами: ультразвуковой и в суперкавитационном миксере при числе оборотов ротора 7600 об/мин, с последующим определением заявленных ранее физико-химических характеристик. Время обработки составило соответственно: 5, 7, 10 и 15 мин. Доверительный интервал – 95 %.

Для исходного и отработанного масла по существующим требованиям определялись значения вязкости и коэффициент фильтрации, представленные в табл. 3. Определен водородный показатель: для пробы № 1 pH = 8,85; для пробы № 2 pH = 9,71.

Отработанное масло подвергли кавитационному воздействию на установках двух типов: ультразвуковой и суперкавитационном миксере – получив пробы № 3а и № 3б, с последующим определением тех же физико-химических характеристик. Время погружения оборудования составляло – 5, 7, 10 и 15 мин. Мощность ультразвукового кавитатора достигала 400 Гц, суперкавитационный миксер выполнял 7600 об/мин. В результате были получены серии проб по типу применимого кавитационного эффекта (табл. 4).

Таким образом, повышая класс вязкости восстановленного масла по ISO 3448 с учетом наличия осадка в тестируемом образце, было найдено оптимальное соотношение ингредиентов в получаемом полезном продукте – водомасляной эмульсии после кавитационной обработки с содержанием воды 10–30 %, тем самым завершая жизненный цикл отработанного продукта [15, 16].

По результатам замеров концентраций выбросов загрязняющих веществ от установки для сжигания жидкого топлива выполнен расчет и смоделировано рассеивание загрязнителей в открытой атмосфере при сжигании традиционного топлива (мазута) и ВМЭ с помощью программного комплекса Интеграл (УПРЗА Эколог 4.70). Зона с концентрациями 1 ПДК и более по диоксиду азота (250 метров от источника) заметно снижается при переходе с основного вида

Таблица 3. Значение вязкости и коэффициент фильтрации тестируемых образцов (при постоянной вискозиметра  $0,09705 \text{ мм}^2/\text{с}^2$ )

Table 3. Viscosity value and filtration coefficient of the test samples (with a viscometer constant of  $0,09705 \text{ мм}^2/\text{с}^2$ )

Номер пробы	Среднеарифметическая величина истечения, с	Кинематическая вязкость, $\nu$ мм <sup>2</sup> /с (при $t = 23,8$ °С)	Класс вязкости по ISO 3448	Время фильтрации $t_1$ , с	Время фильтрации $t_2$ , с	Коэффициент фильтрации $K$
№ 1	31,17	3,0250	3 ( $\nu_{ср} = 2,88\text{--}3,52 \text{ мм}^2/\text{с}$ )	15,19	62,56	4,12
№ 2	33,66	3,2667		16,24	485,62	29,90

Таблица 4. Полученные результаты тестируемых образцов

Table 4. Results of the tested samples

Тип кавитационного воздействия	Время, мин	Время истечения, с	Среднеарифметическая величина истечения, с	Постоянная вискозиметра*, мм <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>	Кинематическая вязкость, $\nu$ мм <sup>2</sup> /с (при $t = 23,8$ °С)	pH
ультразвуковой	5	43,73	43,98	0,09705	4,2683	8,2
		44,04				
		44,18				
	7	48,54	48,16			
		47,84				
		48,10				
	10	48,59	48,87			
		48,94				
		49,09				
	15	49,07	48,88			
		48,66				
		48,92				
суперкавитационный	5	46,09	47,02	0,09705	4,5633	8,21
		47,37				
		47,61				
	7	48,61	47,96			
		47,01				
		48,27				
	10	49,51	48,96			
		47,93				
		49,45				
	15	49,66	49,17			
		48,07				
		49,79				
5 класс вязкости по ISO 3448 ( $\nu_{ср} = 4,14-5,06$ мм <sup>2</sup> /с)						

\*берется из паспорта оборудования

топлива на водомасляные эмульсии и достигает значения 0,9 ПДК при сжигании ВМЭ 30 % (70–100 метров от источника), рис. 1–4. По диоксиду серы зона с концентрацией 3 ПДК при сжигании мазута (70–100 метров от источника) существенно меняется на 0,9 ПДК и менее при переходе на водомасляные эмульсии (70–100 метров). И достигает минимума 0,7 ПДК при сжигании ВМЭ 30 % (рис. 5–8).

### Вывод

В ходе научного исследования выявлено, что эффективность утилизации отработанных масел в условиях Крайнего Севера с учетом защиты окружающей среды достаточно высока с применением кавитационных технологий и может использоваться в создании водотопливных эмульсий для предприятий, работающих на жидком топливе.

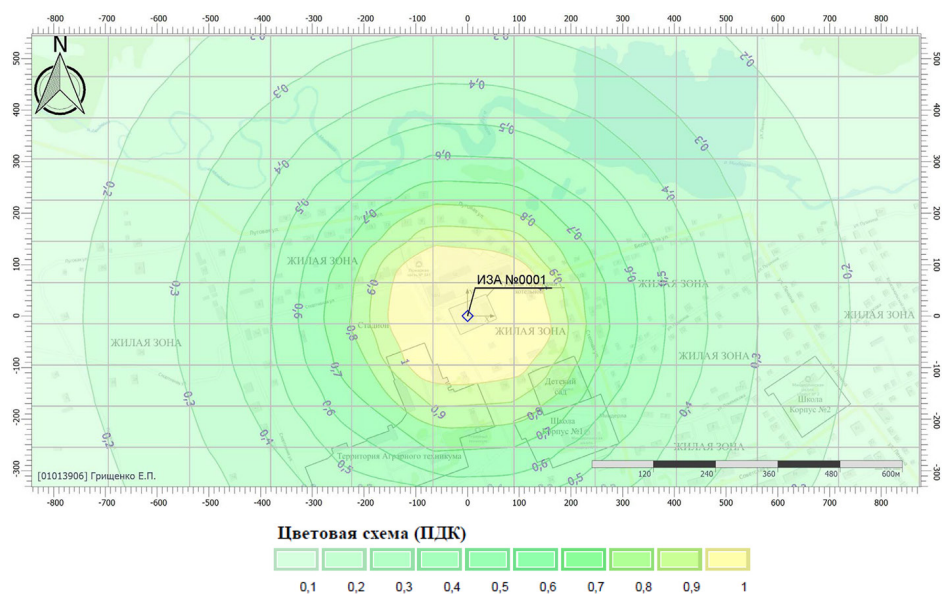


Рис. 1. Результаты расчета рассеивания по диоксиду азота при сжигании мазута (в долях ПДК)  
 Fig. 1. Results of nitrogen dioxide dispersion calculation during fuel oil combustion (in fractions of MPC)

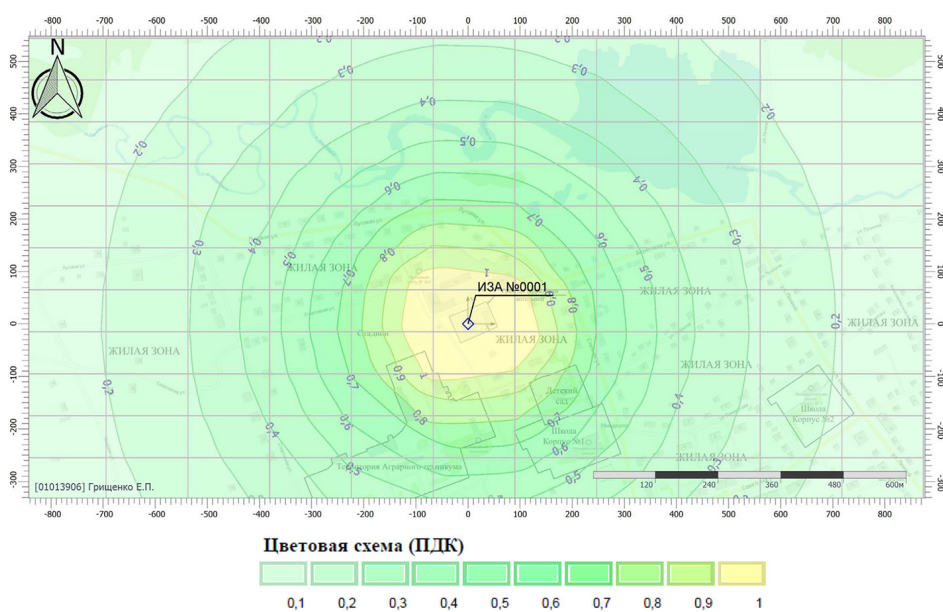


Рис. 2. Результаты расчета рассеивания по диоксиду азота при сжигании ВМЭ 10 % (в долях ПДК)  
 Fig. 2. Results of nitrogen dioxide dispersion calculation during burning of 10 % WOE (in fractions of MPC)

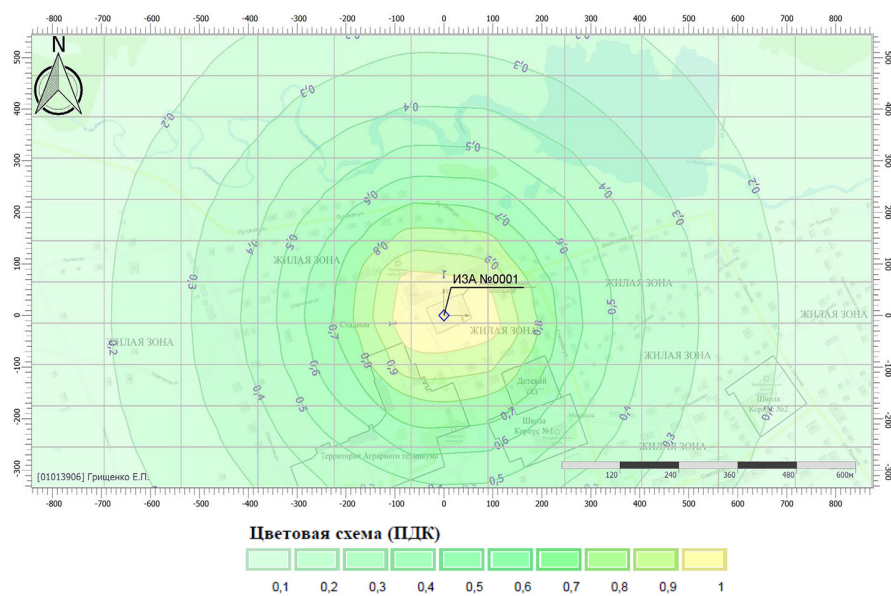


Рис. 3. Результаты расчета рассеивания по диоксиду азота при сжигании ВМЭ 15 % (в долях ПДК)  
 Fig. 3. Results of nitrogen dioxide dispersion calculation during burning of 15 % WOE (in fractions of MPC)

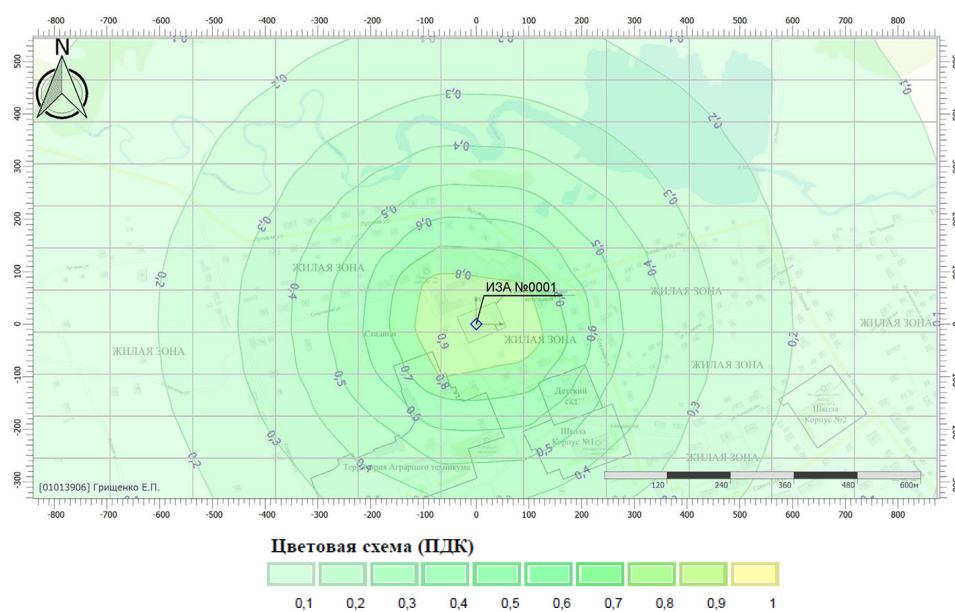


Рис. 4. Результаты расчета рассеивания по диоксиду азота при сжигании ВМЭ 30 % (в долях ПДК)  
 Fig. 4. Results of nitrogen dioxide dispersion calculation during burning of 30 % WOE (in fractions of MPC)

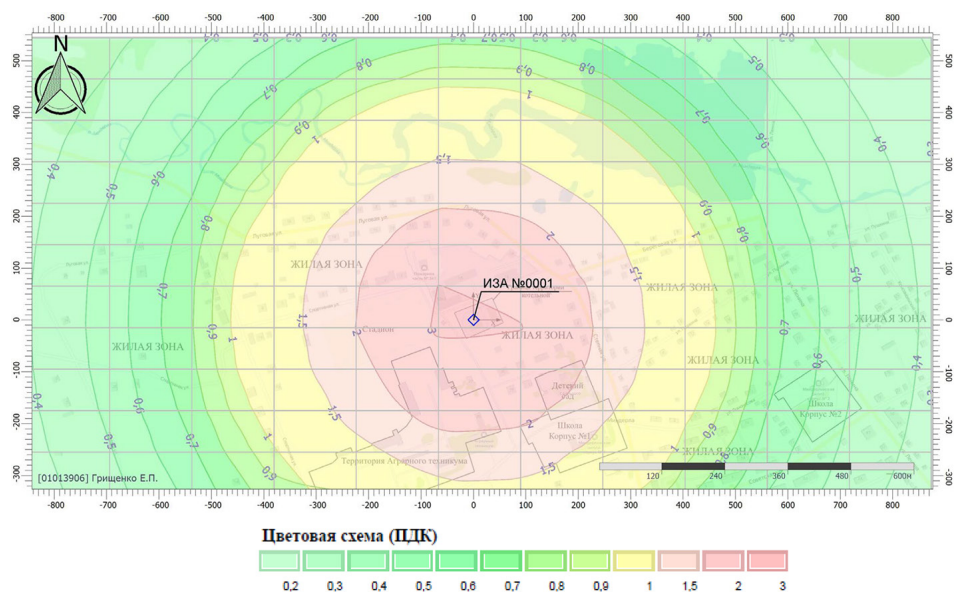


Рис. 5. Результаты расчета рассеивания по диоксиду серы при сжигании мазута (в долях ПДК)

Fig. 5. Results of sulfur dioxide dispersion calculation during fuel oil combustion (in fractions of MPC)

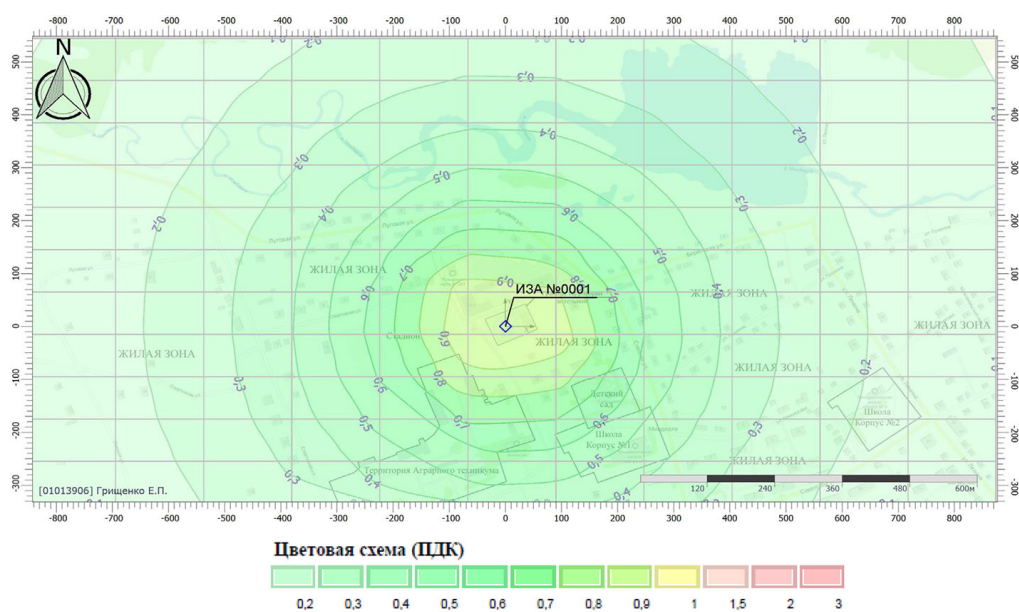


Рис. 6. Результаты расчета рассеивания по диоксиду серы при сжигании ВМЭ 10 % (в долях ПДК)

Fig. 6. Results of sulfur dioxide dispersion calculation during burning of WOE 10 % (in fractions of MAC)

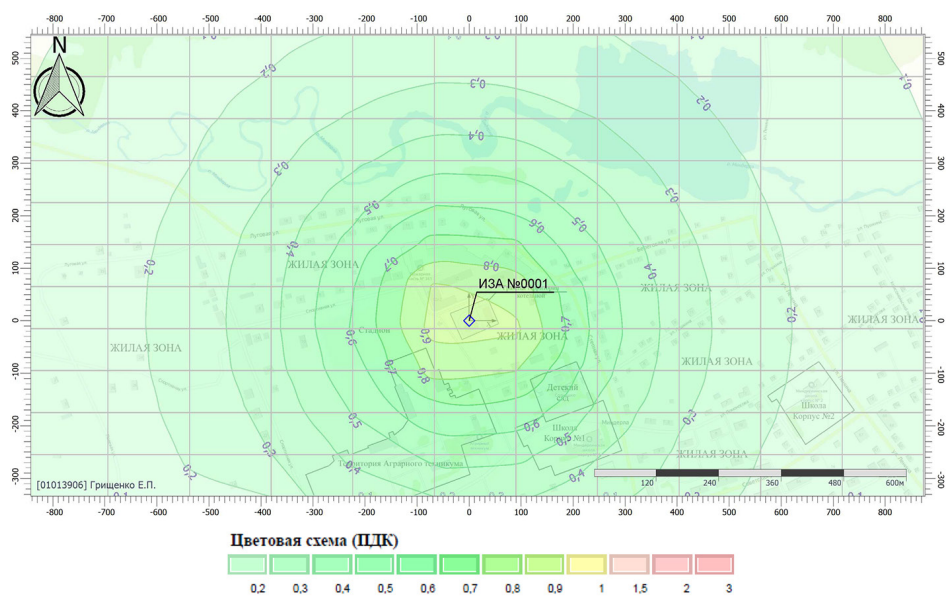


Рис. 7. Результаты расчета рассеивания по диоксиду серы при сжигании ВМЭ 15 % (в долях ПДК)  
 Fig. 7. Results of sulfur dioxide dispersion calculation during burning of 15 % WOE (in fractions of MAC)

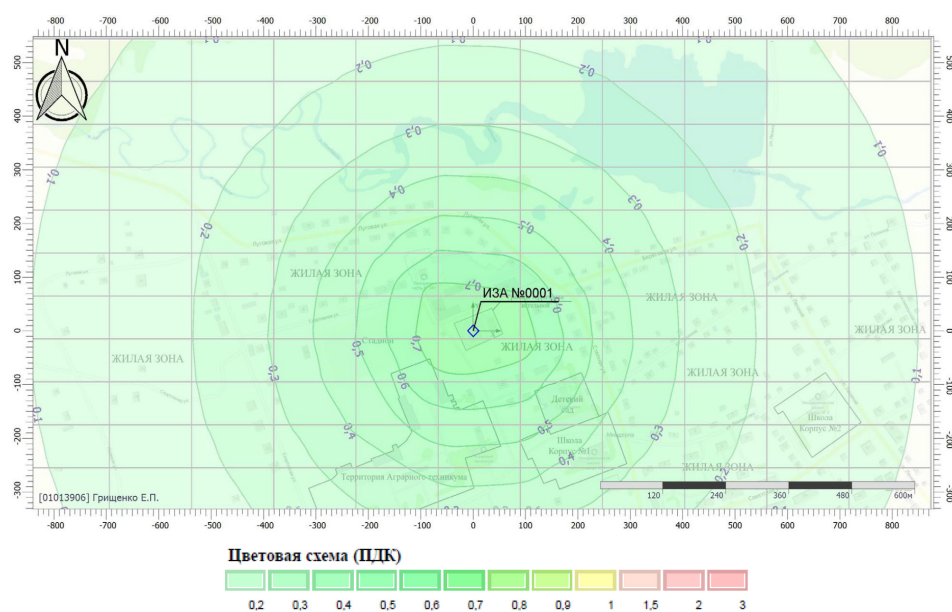


Рис. 8. Результаты расчета рассеивания по диоксиду серы при сжигании ВМЭ 30 % (в долях ПДК)  
 Fig. 8. Results of sulfur dioxide dispersion calculation during burning of 30 % WOE (in fractions of MPC)

## Список литературы / References

- [1] Кулагина Т.А., Хаглеев П.Е., Зайцева Е.Н. *Обращение с промышленными и особо опасными отходами*: монография. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2021. 512 с. [Kulagina T.A., Khagleev P.E., Zaitseva E.N. *Management of industrial and specially hazardous waste: monograph*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2021. 512 p. (in Russian)]
- [2] Кулагина Т.А., Зайцева Е.Н., Кулагин В.А. [и др.]. *Обращение с отходами нефтепродуктов*: монография / М.: РУСАЙНС, 2024. 242 с. [Kulagina T.A., Zaitseva E.N., Kulagin V.A. [et al.]. *Management of petroleum product waste: monograph* / М: RUSAINS, 2024. 242 p. (in Russian)]
- [3] Кулагина Т.А., Зайцева Е.Н. Замкнутый цикл использования индустриальных масел на циркумполярных территориях. *Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского*. 2025. № 1(95). С. 28–36. [Kulagina T.A., Zaitseva E.N. Closed cycle of industrial oils use in circumpolar territories. *Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University*. 2025. No. 1(95). P. 28–36 (in Russian)]
- [4] Романовский В.И., Петров О. Применение суперкавитирующих аппаратов для повышения эффективности технологических процессов. *Вода Magazine*. 2013. № 4(68). [Romanovsky V.I., Petrov O. Application of supercavitating devices to improve the efficiency of technological processes. *Water Magazine*. 2013. No. 4(68) (in Russian)]
- [5] Soliman A., Ismail A.R., Khater M. [et al.] Response surface optimization of a single-step castor oil-based biodiesel production process using a stator-rotor hydrodynamic cavitation reactor. *Environmental Science and Pollution Research*. 2024. Vol. 31, No. 50. P. 60601–60618.
- [6] Rizal M., Suriaini N., Syamsuddin Y., Supardan M.D. Use of hydrodynamic cavitation for esterification of free fatty acids in waste cooking oil. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 845, No. 1. 012036.
- [7] Lim J., Kim S., Lee J. [et al.] Numerical Analysis of the Rotational Non-Axisymmetric Cavitator in Supercavitating Flow. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, B*. 2022. Vol. 46, No. 3. P. 61–69.
- [8] Zheng Z. Y., Wei T. Z., Li F. C. [et al.] Experimental investigation of temperature effect on hydrodynamic characteristics of natural cavitation in rotational supercavitation evaporator for desalination. *Renewable Energy*. 2021. Vol. 174. P. 278–292.
- [9] Корягин В.А. *Сжигание водотопливных эмульсий и снижение вредных выбросов на промышленно-отопительных котельных*: дис. ... д-ра техн. наук. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 1998. 373 с. [Koryagin V.A. *Combustion of water-fuel emulsions and reduction of harmful emissions in industrial and heating boilers*: Dr. tech. sci. diss. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 1998. 373 p. (in Russian)]
- [10] Sousa A. M., Matos H. A., Pereira M. J. Properties of Crude Oil-in-Water and Water-in-Crude Oil Emulsions: A Critical Review. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2021.
- [11] Ong H. R., Iskandar W. M. E., Goh Ch. Ph. [et al.] Preparation and Characterization of Grease using Used Cooking Oil and Used Engine Oil. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1529, No. 5. 052024.
- [12] Кулагина Т.А. *Эффективность подготовительных процессов сжигания водотопливных смесей в топках малого объема*: дис. ... д-ра техн. наук. Омск: ОмГТУ, 2009.

340 с. [Kulagina T. A. *Efficiency of preparatory processes for combustion of water-fuel mixtures in small-volume furnaces*: Dr. tech. sci. diss. Omsk: OmSTU, 2009. 340 p. (in Russian)]

[13] Кулагина Т.А., Дубровская О.Г., Зайцева Е.Н. Совершенствование технологий утилизации отработанных нефтепродуктов. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2024. Т. 335, № 6. С. 46–54. [Kulagina T. A., Dubrovskaya O. G., Zaitseva E. N. Improving technologies for recycling waste petroleum products. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2024. Vol. 335, No. 6. P. 46–54 (in Russian)].

[14] А. с. 1755906 СССР, МКИ В01F 5/00. *Кавитационный смеситель* / В.А. Кулагин, Т.А. Кулагина, Е.П. Грищенко (СССР). № 4760709; заявл. 07.08.1989; опубл. 23.08.1992, Бюл. № 31. [Inventor's Certificate SU 1755906, Int. Cl. B01F 5/00. *Cavitation mixer* / V. A. Kulagin, T. A. Kulagina, E. P. Grishchenko (USSR). No. 4760709; appl. 07.08.1989; publ. 23.08.1992, Bull. No. 31 (in Russian)]

[15] Иванова Т.Е. *Дисперсные системы*. Тюмень: ТИУ, 2018. 146 с. [Ivanova T. E. *Disperse systems*. Tyumen: Industrial University of Tyumen, 2018. 146 p. (in Russian)]

[16] Кулагин В.А. Гидродинамические воздействия на жидкости, золи, смеси твердые границы потоков. Красноярск: *Вестник КГТУ*. 1997. Вып. 8. С. 26–43 [Kulagin V. A. Hydrodynamic effects on liquids, sols, mixtures and solid flow boundaries. Krasnoyarsk: Bulletin of KSTU. 1997. Issue 8. P. 26–43 (in Russian)]

[17] Кулагина Т.А., Зайцева Е.Н., Соловьева Т.А. Использование альтернативных источников энергии в условиях Крайнего Севера. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*. 2026. Т. 19, № 3. С. 414–428 [Kulagina T. A., Zaitseva E. N., Solovyova T. A. Use of alternative energy sources in the far north. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2026. 19(3). P. 288–308 (in Russian)]

EDN: AGOLDB

УДК 620.97

## Technology of Electricity Generation from Low-Temperature Thermal Energy from the Environment – Water, Air, Soil

Sergey G. Bayakin<sup>\*a</sup> and Nikolay V. Tsuglenok<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Space Technologies, FRC KSC, SB RAS*

<sup>b</sup>*Scientific, Educational and Production Center  
of Solar-Terrestrial Energy and Bioenergy SB RAS  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 16.12.2025, received in revised form 25.02.2026, accepted 15.03.2026

**Abstract.** An extremely important scientific and technical task at all times of humanity's development is the task of extracting energy in all its forms and using energy in all possible ways, both for the development of humanity, which is the task of the rational part of humanity, and for its destruction, which is the task of the insane part of humanity. Human scientific thought has always worked and continues to work towards understanding A promising technological paradigm, namely, the carbon-free generation of electric energy from low-temperature sources (solar radiation, air, soil, water, and excess heat from nuclear power plants and industrial complexes), can meet most of the global demand for electric energy. For the Arctic region, the Arctic Ocean is an ocean of energy.

**Keywords:** second law of thermodynamics, Maxwell's Demon principle, corpuscular energy mechanics, new technological paradigm, solar constant, low-temperature electricity generation, carbon-free energy.

Citation: Bayakin S. G., Tsuglenok N. V. Technology of Electricity Generation from Low-Temperature Thermal Energy from the Environment – Water, Air, Soil. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(3), 322–330. EDN: AGOLDB



© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: mitra53@mail.ru

## Технология процесса электрогенерации из низкотемпературной тепловой энергии окружающей среды – воды, воздуха, грунта

С. Г. Баякин<sup>а</sup>, Н. В. Цугленок<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Институт космических технологий ФИЦ КНЦ СО РАН

<sup>б</sup>Научно-образовательный и производственный центр

Солнечно-земной энергетики и биоэнергетики СО РАН

Российская Федерация, Красноярск

**Аннотация.** Крайне актуальной научной и технической задачей во все времена развития человечества является задача извлечения энергии во всех её видах и применения энергии всеми возможными способами как для развития человечества, чем занимается разумная его часть, так и для его уничтожения, что является уделом безумной части человечества. Научная мысль человечества всегда работала и работает в направлении понимания сущности энергии. Тенденция развития современного мира медленно, но неуклонно ориентируется в сторону безотходных, безуглеродных возобновляемых источников энергии, таких как солнечное излучение, грунтовые, воздушные и водные тепловые энергетические ресурсы. Перспективный технологический уклад, а именно безуглеродная генерация электрической энергии из низкотемпературных источников (солнечное излучение, воздух, грунт, вода, избыточное тепло АЭС и промышленных комплексов), позволяет обеспечить большую часть мировой потребности в электрической энергии. А для зоны Арктики Северный Ледовитый океан – это океан энергии.

**Ключевые слова:** второй закон термодинамики, принцип «Демон Максвелла», корпускулярная энергомеханика, новый технологический уклад, солнечная постоянная, низкотемпературная электрогенерация, безуглеродная энергетика.

Цитирование: Баякин С. Г. Технология процесса электрогенерации из низкотемпературной тепловой энергии окружающей среды – воды, воздуха, грунта / С. Г. Баякин, Н. В. Цугленок // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(3). С. 322–330. EDN: AGOLDB

### Введение

Глубокие теоретические, экспериментальные исследования и дополнения в изложение второго закона термодинамики показали, что классическая формулировка второго закона термодинамики Рудольфа Клаузиуса: «Энергия не может самопроизвольно переходить от тела менее нагретого к более нагретому» является частным случаем состояния изолированной термодинамической системы.

В результате обоснованных предположений и исследований Джеймса Максвелла, Уильяма Томсона, Людвиг Больцмана, технического решения Роберта Стирлинга, в результате современных теоретических исследований Лео Сцилларда, Рольфа Ландауэра, Кристофера Ярзинского, Чарльза Беннетта, Ивана Хаймовича, Эрика Луца, в результате фактов наличия природных явлений и итогов приведенных экспериментальных и технических решений становится очевидным, что энергия может передаваться от тела менее нагретого к более нагретому.

На основании приведенных современных исследований формулировку второго закона термодинамики Рудольфа Клаузиуса можно дополнить и изложить более справедливо в следующей редакции:

«В изолированной термодинамической системе, состоящей из двух частей, энергия низкотемпературной части системы может передаваться в высокотемпературную часть системы посредством природных явлений и технических конструкций внутри системы за счёт внутренней энергии низкотемпературной части системы».

Теоретические и экспериментальные исследования природных явлений и основанные на полученных знаниях технические решения привели к созданию и испытанию опытных и промышленных образцов устройств генерации электрической мощности из низкотемпературной мощности окружающей среды – воды, воздуха, грунта.

### **Технология процесса электрогенерации из низкотемпературной тепловой энергии окружающей среды – воды, воздуха, грунта**

Активно развивающиеся технологии солнечной и ветроэнергетики не лишены проблем. К существенным недостаткам, выявленным в процессе эксплуатации, следует отнести зависимость от погоды, времени суток, климата и локации. Указанные факторы обуславливают нестабильный режим генерации, что требует создания накопителей энергии и сложных систем управления. Кроме того, резкие длительные изменения погодных факторов в отдельных регионах вызывают энергетические коллапсы и гуманитарные проблемы. Следует отметить также весьма низкий КПД, потолок которого на сегодня для ветрогенерации – 0,4, для солнечной генерации – 0,25 при условии стабильности источника, на практике среднегодовой КПД снижается до 0,15.

Цель развития технологии возобновляемой безуглеродной низкотемпературной энергетики призывает разрешить перечисленные проблемы, нивелировать недостатки и добиться получения автономной стабильной и низкочастотной генерации электрической и тепловой энергии. Цель выражается предлагаемой парадигмой современной без углеродной энергетики, а именно – главным источником энергии для Земли является Солнце, которое передает на земную поверхность удельную усредненную мощность, равную 1367 ватт на один квадратный метр. Второй по значимости источник – раскаленное земное ядро – передает на земную поверхность не более 0,02 % от солнечной мощности.

Прямое применение низкотемпературной солнечной мощности в электрогенерации обладает следующими преимуществами:

- 1) низкотемпературный энергоноситель – воздух, грунт, вода – обладает неограниченным пополняемым солнечным, аэро-термальным, гидротермальным и геотермальным ресурсом;
- 2) минимально зависит от погодных и климатических условий;
- 3) не изменяет энергетический баланс и экологию планеты;
- 4) не расходует углеводородные ресурсы;
- 5) не снижает уровень кислорода;
- 6) не выделяет вредных выбросов;
- 7) не ограничен географией Земли вплоть до Антарктиды.

Впервые идея низкотемпературной электрогенерации взамен дизель-генераторов была гениально высказана К. Э. Циолковским с целью развития плана ГОЭЛРО. Однако технологическая среда того времени, как и в истории идеи полёта в космос, не позволяла технически реали-

зывать такую задачу. Современное развитие техники в части высокоскоростных (до 500000 об/мин) электрогенераторов, силовой электроники, газодинамических подшипников создает все необходимые условия для решения задачи низкотемпературной электрогенерации в неограниченном масштабе.

Для разработки технических решений и технологического применения процесса низкотемпературной электрогенерации при допустимых потерях 5 % необходим расчёт баланса мощности процесса, который представлен на рис. 1.

### Исходные данные

Тепловая мощность низкотемпературного источника  $W_{\text{ист}}$  (испарителя) = 50 кВт;

Коэффициент трансформации (компрессии) мощности  $\text{COP} = 4$ ;

КПД<sub>т</sub> турбоэлектрогенератора = 50 % (0,5).

### Расчет баланса

Мощность, потребляемая компрессором:

$$W_{\text{комп}} = W_{\text{ист}} / \text{COP} = 50 / 4 = 12,5 \text{ кВт}$$

Баланс мощности:

$$W_{\text{ист}} - W_{\text{ТЭГ}} - W_{\text{комп}} - W_{\text{вых}} = 0 \quad 50 - 25 - 12,5 - 12,5 = 0$$

Тепловая мощность, выделяемая на конденсаторе:

$$W_{\text{кон}} = W_{\text{ист}} - W_{\text{ТЭГ}} + W_{\text{комп}} \quad 37,5 \text{ кВт} = 50 - 25 + 12,5$$

Полный баланс мощности:  $W_{\text{ист}} = W_{\text{кон}} + W_{\text{вых}} \quad 50 \text{ кВт} = 37,5 + 12,5$

Мощность вырабатываемой электроэнергии:

$$W_{\text{ТЭГ}} = W_{\text{ист}} \times \text{КПД}_t \quad 50 \times 0,5 = 25 \text{ кВт}$$

Мощность выхода к внешнему потребителю:

$$W_{\text{вых}} = W_{\text{ТЭГ}} - W_{\text{комп}} \quad 12,5 \text{ кВт} = 25 - 12,5$$



Рис. 1. Баланс мощности низкотемпературного электрогенератора

Fig. 1. Power balance of a low-temperature electric generator

**Низкотемпературный электрогенератор** – это современный высокотехнологичный прибор широкого применения – от генерации электрической энергии до отопления, кондиционирования, горячего водоснабжения и автономной работы бытовых приборов.

Принцип работы: испаритель собирает рабочим телом (фреоном) низкотемпературное тепло, направляет его в компрессор, который повышает давление, преобразует его в высокотемпературное тепло. Рабочее тело посредством турбины с мотор-генератором **преобразует высокотемпературное тепло в электрическую энергию.**

На основании инженерных расчётов и данных, полученных при работе экспериментального образца **низкотемпературного электрогенератора** в медицинском центре г. Красноярска с климатической сплит-системой ND-ОН-080В-1, а также термодинамических расчетов составлена электронная интерактивная физико-математическая технологическая модель, которая представлена на рис. 2.

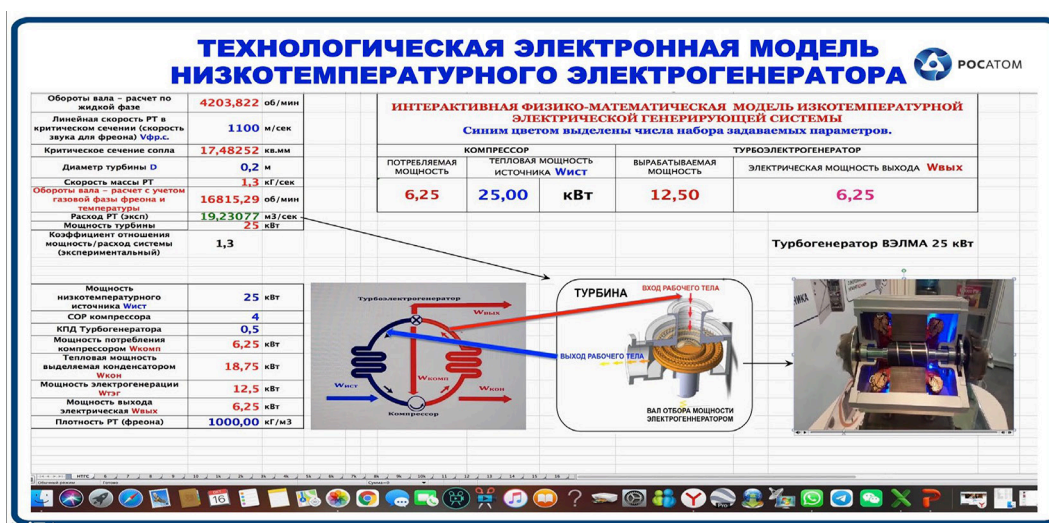


Рис. 2. Электронная технологическая модель параметров процесса

Fig. 2. Electronic process parameter model

Модель позволяет ввести необходимые входные технические параметры конструкции низкотемпературного электрогенератора (синий шрифт) и получить расчетные технологические параметры для разработки конструкции систем генерируемой мощности как для работы системы, так и для внешнего потребителя.

Пример практически апробированных технических и экономических параметров показывает опыт работы инновационной группы компаний «ЭРГА», которая, благодаря своим оригинальным техническим решениям, слаженной исследовательской и технической команде, мотивированному, грамотному руководству, на основании уникальных решений создает высокоскоростные мотор-генераторные энергоблоки, превосходящие все мировые аналоги. Опыт «ЭРГА» дает понимание разработчикам и производителям принципиально новых возможностей систем электрогенерации.

### Экономические преимущества, результаты развития, области применения

Ключевым преимуществом создания систем низкотемпературной электрогенерации является экономический фактор в виде удельной стоимости установленной мощности и себестоимости производства мощности. Таблица стоимостных показателей приведена на основании данных Международного энергетического агентства IEA (рис. 3).

#### ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЕКТА В СРАВНЕНИИ:

1. НИЗКАЯ УДЕЛЬНАЯ СЕБЕСТОИМОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОВ - ПРИ СЕРИЙНОМ ВЫПУСКЕ **НИЖЕ 500 \$/кВт**
2. СЕБЕСТОИМОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА ЭНЕРГИИ БЛИЗКА К **0,1 цент \$/кВт\*ч**

УДЕЛЬНАЯ СЕБЕСТОИМОСТЬ УСТАНОВЛЕННОЙ МОЩНОСТИ И ПРОИЗВОДСТВА ЭНЕРГИИ В МИРЕ ПО ДАННЫМ IEA НА 2024 Г.	Капитальные вложения, \$/кВт		Себестоимость производства, цент \$/кВт*ч	
	2005	2030	2005	2030
Биомасса	1000-2500	950-1900	3,1-10,3	3,0-9,6
Геотермальная энергетика	1700-5700	1500-5000	3,3-9,7	3,0-8,7
Традиционная гидроэнергетика	1500-5500	1500-5500	3,4-11,7	3,4-11,5
Малая гидроэнергетика	2500	2200	5,6	5,2
Солнечная фотоэнергетика	3750-3850	1400-1500	17,8-54,2	7,0-32,5
Солнечная теплоэнергетика	2000-2300	1700-1900	10,5-23,0	8,7-19,0
Приливная энергетика	2900	2200	12,2	9,4
Наземная ветроэнергетика	900-1100	800-900	4,2-22,1	3,6-20,8
Морская ветроэнергетика	1500-2500	1500-1900	6,6-21,7	6,2-18,4
АЭС	1500-1800	-	3,0-5,0	-
ТЭС на угле	1000-1200	1000-1250	2,2-5,9	3,5-4,0
ТЭС на газе	450-600	400-500	3,0-3,5	3,5-4,5
<b>Низкотемпературная электрогенерация</b>	<b>Менее 500 \$/кВт</b>		<b>0,1 цент \$/кВт*ч</b>	

Рис. 3. Удельные капитальные вложения по видам энергетики по данным Международного агентства IEA, 2024 г.

Fig. 3. Specific capital investments by type of energy according to the data of the international agency IEA 2024

Дополнительным крайне актуальным преимуществом является благотворное влияние на экологию территории. Пример применения проекта для города Красноярска принят решением Минэкологии Красноярского края 29.03.2024 (рис. 4).

Основные области применения проекта в реальном секторе экономики:

1. ГИДРОЭНЕРГЕТИКА – увеличение мощности существующих ГЭС до 100 %.
2. АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА – увеличение мощности существующих АЭС за счёт тепловых выбросов до 30 %.
3. МЕТАЛЛУРГИЯ – собственная электрогенерация, снижение себестоимости металла до 40 %.
4. АПК – автономная энергогенерация теплиц, сельхозтехники, животноводческих и перерабатывающих комплексов, снижение себестоимости до 40 %.
5. ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТ – автономное энергообеспечение наземного, подземного, рельсового, водного и автомобильного электротранспорта и сельхозтехники.
6. ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА АВИАЦИИ И КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ.



Рис. 4. Экологические и энергетические преимущества низкотемпературной электрогенерации

Fig. 4. Environmental and energy benefits of low-temperature electricity generation

Реализация результатов исследования в ведущих предприятиях и научных организациях:

1. Запрос ПАО АК «АЛРОСА» шифр 24042400035–8 «ЭЛЕКТРОГЕНЕРАЦИЯ ИЗ АРКТИЧЕСКОГО ХОЛОДА» заявлен как пилотный проект Минобрнауки.
2. Договор № 22–22–573/17152/723 Федеральное государственное унитарное предприятие ГК «Росатом» «Горно-химический комбинат» (ФГУП «ГХК») – СФУ на выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) «Техническое перевооружение. Оснащение электрогенерацией подгорной части предприятия с использованием низкопотенциального тепла вытяжного вентиляционного воздуха».
3. Решение Минэкологии Красноярского края 29.03.2024 протокол № 2, п. 11 «Низкотемпературная электрогенерация из воды реки Енисей».
4. Запрос ОАО «РЖД» – альтернативная электрогенерация объектов РЖД Проект Соглашения ФИЦ КНЦ СО РАН с ФГБУ «ВИТ «ЭРА» МО РФ 2024 г. (в стадии подписания).
5. Технические решения защищены патентами РФ 2692615, 2738494, патентом ЕАПО № 037428, в 4 странах Евразии патентом EP37791, в 17 странах Европы, заявкой КНР 343981619.
6. Постановление заседания научного совета Секции механизации, электрификации, автоматизации Отделения сельскохозяйственных наук РАН от 19.03.2025 г.г. Москва 1-й Институтский проезд, дом 5, 2 этаж музея. «Считать приоритетными междисциплинарные фундаментальные и прикладные научные исследования и разработки экологически чистых и экономически эффективных средств генерации тепловой и электрической энергии из низкотемпературных тепловых источников – воды, воздуха, грунта».

## Список литературы / References

- [1] Bayakin S. G. Low-temperature power generation for highly efficient hydrogen production in Arctic conditions. *International Forum «Safety and Economy of Hydrogen Transport-2025 – WCAEE-IFSSEHT-2025»*. www.isjaee.com
- [2] Баякин С. Г. Низкотемпературная электрогенерация. *Всероссийский Форум «Енисейская Теплофизика»*. Красноярск, СФУ. 2025 [Bayakin S. G. Low-temperature power generation. *All-Russian Forum “Yeniseyskaya Thermal Physics”*. Krasnoyarsk, SFU. 2025].
- [3] Баякин С. Г., Цугленок Н. В. Средства генерации тепловой и электрической энергии из низкотемпературных тепловых источников – грунт, вода, воздух. *Доклад на заседании ученого совета ОСХН РАН*. М., 2025 [Bayakin S. G., Tsuglenok N. V. Means of generating thermal and electrical energy from low-temperature thermal sources – soil, water, and air. *Report at the meeting of the Academic Council of the Russian Academy of Agricultural Sciences*. Moscow, 2025]. <https://rutube.ru/video/9fc1dcb5449d79d816dcd8eac1208574/>
- [4] Баякин С. Г. Низкотемпературная электрогенерация для АПК, ЖКХ, ВПК и транспорта в Арктике. *Международный форум по устойчивому развитию в новом социо-технологическом укладе HETS-2024*. – Красноярск, СФУ, 2024 [Bayakin S. G. Low-temperature power generation for the agro-industrial complex, housing and communal services, military-industrial complex, and transport in the Arctic. *HETS-2024 International Forum on Sustainable Development in the New Socio-Technological Order*. Krasnoyarsk, SFU, 2024]. <https://rutube.ru/video/e4d2dc1fbaa32be506048094267472d8/>
- [5] Bayakin Sergei Gennadevich. Thermal and electrical power transformer. European patent EP3779166. Application 11.10.2023.
- [6] Баякин С. Г., Гавриков А. В. *Термоэлектротрансформатор*. Евразийский Патент № 037428 от 26.03.2021. Заявка № 201900125 от 11.03.2019 [Bayakin S. G., Gavrikov A. V. Thermoelectric Transformer. Eurasian Patent No. 037428 dated 26.03.2021. Application No. 201900125 dated 11.03.2019].
- [7] Баякин С. Г. Создание систем электрогенерации из низкотемпературных источников (солнечное излучение, воздух, грунт, вода, сбросовое тепло АЭС и др. производств) для электротранспорта. *Красноярский экономический форум (КЭФ-2022)*. Красноярск, СФУ, 2022 [Bayakin S. G. Creation of power generation systems from low-temperature sources (solar radiation, air, soil, water, waste heat from nuclear power plants, etc. production facilities) for electric vehicles. *Krasnoyarsk Economic Forum (KEF-2022)*. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2022]. <https://www.youtube.com/watch?v=cqXjepz9zdo>.
- [8] Баякин С. Г. Финансово-энергетический баланс и энергосамостоятельная валютная система БРИКС. *Евразийское пространство: экономика, право, общество*. 2023, 5, 3–9 [Bayakin S. G. Financial and Energy Balance and the BRICS Energy-Self-Sufficient Currency System. *Eurasian Space: Economics, Law, and Society*. 2023, 5, 3–9].
- [9] Bayakin S. G., Simunin M. M., Chirkov D. Yu., Khartov S. V., Shimanskii A. F. Processing of aliphatic polymer wastes in brown coal synthesis gas. *AIP Conference Proceedings*. 2. Сер. «Proceedings of the II International Conference on Advances in Materials, Systems and Technologies, SAMSTech-II 2021». 2022. 080034.
- [10] Баякин С. Г. Низкотемпературная электрогенерация – парадигма и технология без углеродной энергетики. *В центре экономики*. 2022. Т. 3. № 1. 26–32 [Bayakin S. G. Low-

temperature electricity generation – a paradigm and technology of carbon-free energy. *In the center of the economy*. 2022. Vol. 3. No. 1. 26–32].

[11] Баякин С.Г. Способ генерации мощности для работы транспорта с электрическим приводом и устройство генерации мощности. Патент РФ на изобретение RU 2738494 С 1, 14.12.2020. Заявка № 2020114847 от 15.04.2020 [Bayakin S. G. Method of generating power for electric-powered vehicles and a power generation device. Russian Federation Patent for Invention RU 2738494 С 1, 14.12.2020. Application No. 2020114847, filed on 15.04.2020].

[12] Bayakin S.G. 低温发电 Low-temperature electric power generation. *Materials of the International Conference «Scientific research of the SCO countries: synergy and integration» – Reports in English (May 14, 2020. Beijing, PRC)*. ISBN 978–5–905695–56–8. Pp. 166–171.

[13] Баякин С.Г. Корпускулярная электрогенерация. *Наука и инновации – современные концепции: Сб. науч. статей по итогам работы Междунар. науч. форума*. М. 2020. 96–105 [Bayakin S. G. Corpuscular electric generation. *Science and Innovation – modern concepts: Collection of scientific articles based on the results of the work of the International Scientific Forum*. М. 2020. 96–105].

[14] Баякин С.Г. Низкотемпературная электрогенерация. *Сантехника, Отопление, Кондиционирование*. 2020. № 7(223). 55–59 [Bayakin S.G. Low-temperature electricity generation. *Sanitation, Heating, Air Conditioning*. 2020. No. 7(223). 55–59].

[15] Баякин С.Г., Гавриков А.В. Термоэлектротрансформатор. Патент РФ на изобретение RU 2692615 С 1, 25.06.2019. Заявка № 2018111581 от 30.03.2018 [ayakin S.G., Gavrikov A. V. Thermoelectric Transformer. Russian Federation Patent for Invention RU 2692615 С 1, 25.06.2019].

[16] Баякин С.Г. Газификатор твердого топлива с когенерацией тепловой и электрической энергии. Патент РФ на изобретение RU 2648932 С 2, 28.03.2018. Заявка № 2016106860 от 25.02.2016 [Bayakin S. G. *Solid Fuel Gasifier with Cogeneration of Thermal and Electrical Energy*. Russian Federation Patent for Invention RU2648932 С2, 28.03.2018. Application No. 2016106860, 25.02.2016].

Theoretical and Applied Heat Engineering  
Теоретическая и прикладная теплотехника

EDN: CSEVYK

УДК 621.039.733

**On the Advantages of Using a Drum-Film Evaporator  
for Evaporation of Low-  
and Medium-Level Radioactive Waste**

**Sergey V. Rogozhkin\* and Vladimir V. Kalygin**

*State Scientific Center – Research Institute of Atomic Reactors  
Dimitrovgrad, Russian Federation*

Received 01.10.2025, received in revised form 24.02.2026, accepted 15.03.2026

**Abstract.** The text discusses the problem of processing liquid radioactive waste (LRW) of medium and low activity levels at nuclear power plants equipment that employs thin-film evaporation technology. The text provides examples of such equipment for nuclear power plants, special laundry facilities, small modular reactors, and radioactive waste storage ponds.

**Keywords:** liquid radioactive waste, evaporators, continuous cleaning of the heating surface, recompression of secondary steam, film evaporators, drip and aerosol carryover, mobile complex, handling of LRW at the SMR.

Citation: Rogozhkin S. V., Kalygin V. V. On the Advantages of Using a Drum-Film Evaporator for Evaporation of Low- and Medium-Level Radioactive Waste. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(3), 331–341. EDN: CSEVYK



# Использование барабанно-пленочного испарителя для выпаривания низко- и среднеактивных жидких радиоактивных отходов.

## Возможные компоновки оборудования

С. В. Рогожкин, В. В. Калыгин

*Государственный научный центр –  
Научно-исследовательский институт атомных реакторов  
Дмитровград, Российская Федерация*

**Аннотация.** В тексте обсуждается проблема переработки жидких радиоактивных отходов (ЖРО) среднего и низкого уровня активности на объектах использования атомной энергии (ОИАЭ) аппаратами, в которых применена технология испарения в тонких пленках. Рассмотрены возможные примеры исполнения аппаратов для атомных станций и спецпрачечных, атомных станций малой мощности, водоемов-хранилищ радиоактивных отходов.

**Ключевые слова:** жидкие радиоактивные отходы, выпарные аппараты, непрерывная очистка греющей поверхности, рекомпрессия вторичного пара, пленочные испарители, капельный и аэрозольный унос, мобильный комплекс, обращение с ЖРО на АСММ.

Цитирование: Рогожкин С. В. Использование барабанно-пленочного испарителя для выпаривания низко- и среднеактивных жидких радиоактивных отходов. Возможные компоновки оборудования / С. В. Рогожкин, В. В. Калыгин // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(3). С. 331–341. EDN: CSEVYK

### Введение

Большинство действующих установок по переработке жидких радиоактивных отходов низкой и средней активности имеют те или иные недостатки [1]. Поэтому продолжают попытки разработать эффективные и экономичные установки, пригодные для обращения с широким спектром радиоактивных растворов. Анализ конструктивных и технологичных решений [2] существующих наиболее перспективных аппаратов позволил выделить те из них, применение которых позволяет качественно улучшить процесс и результаты переработки:

- использование рекомпрессии вторичного пара;
- непрерывная очистка греющей поверхности в процессе выпаривания;
- дополнительные средства очистки от загрязнения пара, возникающего вследствие молекулярного (летучесть, растворимость в паре), капельного (аэрозольного) и пенного уноса, не должны накладывать ограничения на производительность выпарных аппаратов;
- получение непосредственно в аппарате солевого раствора массовой концентрацией 700–800 г/л;
- применение технологии испарения без кипения;
- применение систем охлаждения концентрата и конденсата непосредственно в установке.

Наиболее полно перечисленные решения могут быть реализованы в установках, использующих барабанные пленочные испарители.

### Барабанный пленочный испаритель

Аппарат представляет собой горизонтальный вращающийся барабан, частично заполненный выпариваемым раствором. Принцип его действия [3] основан на испарении воды из подогреваемых тонких плёнок жидкости на вращающейся поверхности, образуемых её смачиванием раствором солей (кубовым остатком), находящихся в нижней части барабана (рис. 1).

Процесс пленочного испарения исключает фрагментацию раствора и унос мелких капель (аэрозолей) вместе с паром в устройство конденсации, что обеспечивает высокую степень очистки конденсата вторичного пара от включений радиоактивных солей. Малое гидравлическое сопротивление от поверхности испарения до поверхности конденсации обеспечивает высокую эффективность процесса отделения воды при сохранении температуры раствора меньшей, чем температура его кипения [4].

Это позволяет существенно замедлить коррозионную деградацию материалов конструкции, обусловленную высокой концентрацией солей в растворе, что обеспечивает значительное увеличение эксплуатационного ресурса технологического оборудования [5].

В процессе работы за счет оседания солей на внутренней поверхности барабана испарителя происходит ухудшение теплопередачи между ней и раствором.

Для удаления отложений применяется система пассивной очистки поверхности, представляющая собой шнек. Внутри него организованы ячейки, образуемые перегородками, закрепленными на оси, и дополнительно служащие ребрами жёсткости. Между перегородками размещены металлические шарики, которые имеют одинаковую комплектность внутри ячеек, но разную массу. При движении шарики производят вибрации за счет столкновений и передают их шнеку, тем самым мешают закреплению солей на режущей поверхности. При вращении барабана-испарителя шнек также вращается, срезая оседающие соли за счет режущей кромки спирали, их отводят к месту выгрузки. Перекатывающийся шнек из-за его погружённости

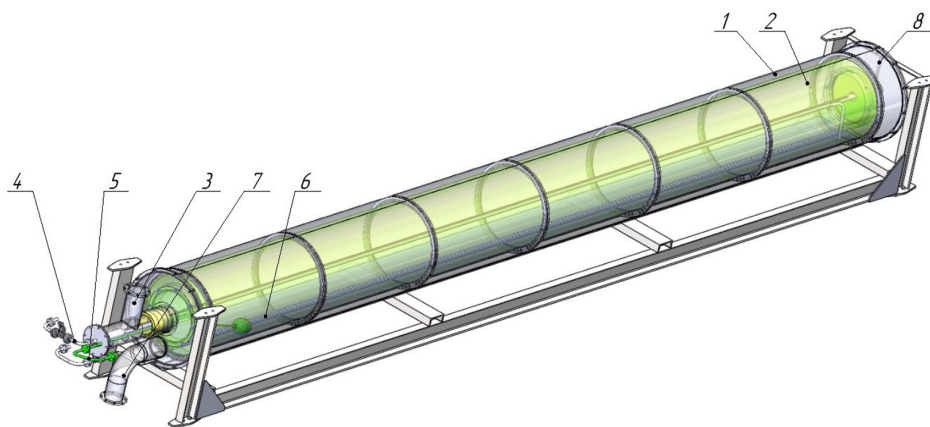


Рис 1. Барабанный пленочный испаритель: 1 – внешний барабан; 2 – внутренний барабан; 3 – патрубок отвода чистого пара; 4 – патрубок отвода упаренного раствора; 5 – патрубок подвода раствора на упаривание; 6 – шнек; 7 – патрубок подвода греющего пара; 8 – привод вращения

Fig. 1. Drum Film Evaporator (DFE): 1 – outer drum; 2 – inner drum; 3 – pure steam outlet pipe; 4 – evaporated solution outlet pipe; 5 – solution inlet pipe for evaporation; 6 – auger; 7 – heating steam inlet pipe; 8 – rotation drive

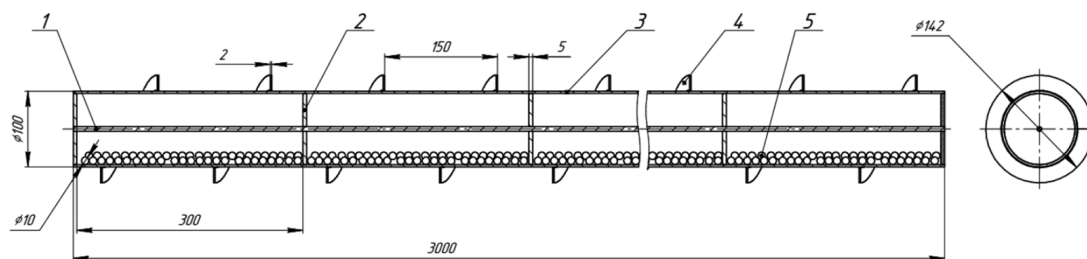


Рис. 2. Продольный разрез шнека: 1 – ось; 2 – перегородка; 3 – труба; 4 – спираль; 5 – шарик

Fig. 2. Longitudinal section of the auger: 1 – axis; 2 – partition; 3 – pipe; 4 – spiral; 5 – ball

в раствор не приводит к образованию пены, что снижает каплеунос. Продольный разрез шнека представлен на рис. 2.

Непрерывная очистка греющей поверхности в процессе упаривания обеспечивает получение непосредственно в аппарате солевого раствора массовой концентрацией 700–800 г/л.

В аппарате применяется технология рекомпрессии пара, при которой генерируемый во внутреннем барабане пар направляется в насос Рутса, в котором производится его механическое сжатие и повышение температуры. Сжатый в насосе Рутса пар используется в качестве греющего пара в паровой рубашке внешнего барабана, а образующийся там конденсат используется для подогрева в рекуператоре и направляется на упаривание раствора.

### Описание различных исполнений

*Барабанная установка перерабатывающего комплекса для атомных станций.* Существующее оборудование выпарной установки системы переработки ЖРО среднего и низкого уровня активности трапных вод или вод спецрабочных, образующихся на АЭС, предназначено для концентрирования ЖРО до уровня солесодержания 350 г/л. Для проектов, использующих цементирование, применяют дополнительное оборудование (например, УГУ-500), которое позволяет доводить концентрацию солесодержания до 700–800 г/л.

Применение БПИ в составе имеющейся технологии глубокого упаривания вместо используемых аппаратов УГУ-500 за счет особенности механизма тонкопленочного испарения позволит производить солевой плав с практически полным удалением растворителя (воды) из ЖРО.

Генерируемый в барабане пар с помощью насоса Рутса сжимается с 0,07 до 0,5 МПа, его температура повышается с 90 до 152 °С [6]. Для определения термодинамических циклов установки БПИ для АЭС, а также выбора компрессора построили диаграмму взаимосвязи давления и энтальпии (P-H-диаграмма). Для примера на рис. 3 показано, что при КПД компрессора 55 % сжатый пар перегреется до температуры 391 °С.

Снижение возможного числа отказов оборудования достигается резервированием (дублированием, троированием) установок. Увеличение количества барабанов повышает максимальную производительность и приводит к возможности маневрирования [7].

Концентрированный до солесодержания 700 или 800 г/л раствор из нижней части вращающегося барабана периодически отводится в вакуумированную емкость.

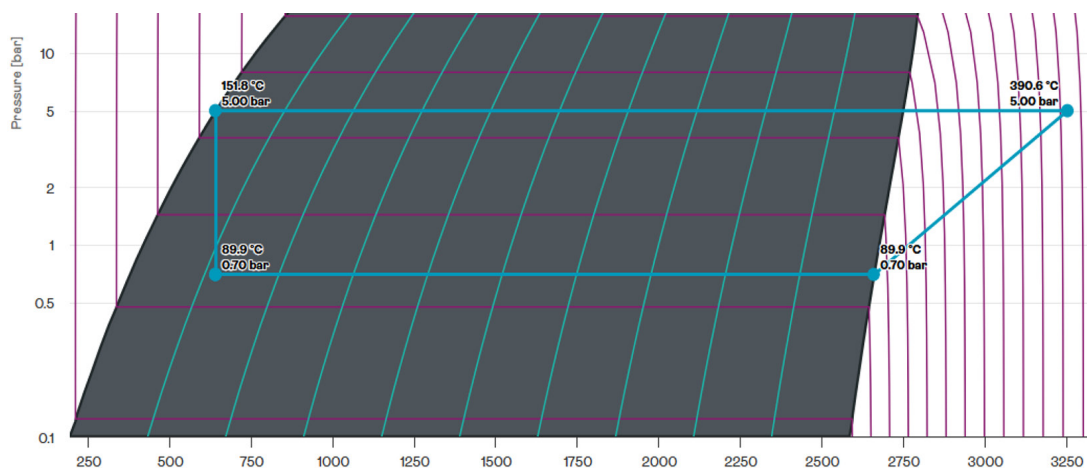


Рис. 3. P-H-диаграмма цикла установки для АЭС

Fig. 3. P-H diagram of a nuclear power plant cycle

В связи с задачей применения аппарата для упаривания ЖРО с высоким содержанием поверхностно-активных веществ, собираемых со спецпрачечных, в конструкцию аппарата внесен дополнительный модуль. Вторичный пар проходит через горизонтальный насадочный тепло- и массообменный аппарат [8] и доочищается от аэрозолей, возникающих в результате упаривания пенящихся жидкостей. Массообменный аппарат имеет набор секций кольцевых насадочных конструкций, частично погруженных в жидкость и расположенных смежно вдоль оси вала, разделенных перегородками, которые формируют зигзагообразный радиально-осевой и последовательно-параллельный канал прохода пара через кольцевые насадочные конструкции (рис. 4).

Регулирование степени очистки производится изменением расхода флегмы и частоты вращения насадочных конструкций. При их увеличении происходит интенсификация абсорбции радиоактивных аэрозолей на пленках насадок в секторах со стороны входа пара, что позволяет повышать степень очистки пара на выходе из аппарата.

Конденсат накапливается в ёмкость для сбора конденсата, и если дистиллят соответствует требованиям радиационного контроля, он может быть направлен для повторного использования в технологических системах либо отведен в открытую водную сеть. Пример реализации барабанной установки концентрирования для атомной станции представлен на рис. 5.

*Мобильный автоматический перерабатывающий комплекс.* Технология предназначена для переработки ЖРО низкой и средней активности и перевода их в безопасную форму хранения автономно в местах, где отсутствуют подразделения по кондиционированию ЖРО.

Мобильность установки позволяет передислоцировать ее на любой объект или участок в короткие сроки и начать переработку ЖРО. На рис. 6 приведен пример реализации мобильного автоматического перерабатывающего комплекса.

Доставка ЖРО осуществляется посредством транспорта или напрямую из источника через трубопроводы.

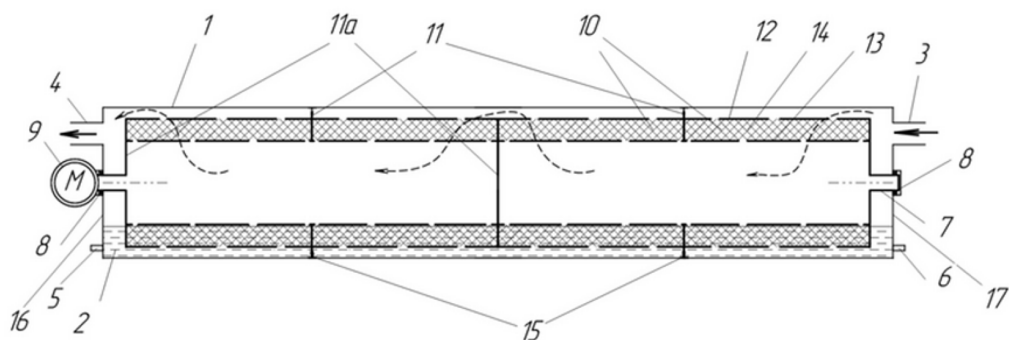


Рис. 4. Горизонтальный насадочный тепло- и массообменный аппарат: 1 – цилиндрический корпус; 2 – жидкость; 3 – патрубок подвода газовой среды; 4 – патрубок отвода газовой среды; 5 – патрубок подвода жидкости; 6 – патрубок отвода жидкости; 7 – вал; 8 – подшипниковая опора; 9 – привод вращения; 10 – кольцевая насадочная конструкция; 11 – разделительная кольцевая перегородка; 11а – разделительная дисковая перегородка; 12 – внешняя коаксиальная перфорированная обечайка разного диаметра; 13 – внутренняя коаксиальная перфорированная обечайка разного диаметра; 14 – насадка; 15 – узел герметизации; 16 – днище; 17 – днище

Fig. 4. Horizontal packed heat and mass transfer apparatus: 1 – cylindrical body; 2 – liquid; 3 – gas supply pipe; 4 – gas outlet pipe; 5 – liquid supply pipe; 6 – liquid outlet pipe; 7 – shaft; 8 – bearing support; 9 – rotary actuator; 10 – annular attachment structure; 11 – separating annular partition; 11a – dividing disk partition; 12 – external coaxial perforated shell of different diameters; 13 – internal coaxial perforated shell of different diameters; 14 – nozzle; 15 – sealing unit; 16 – bottom; 17 – bottom

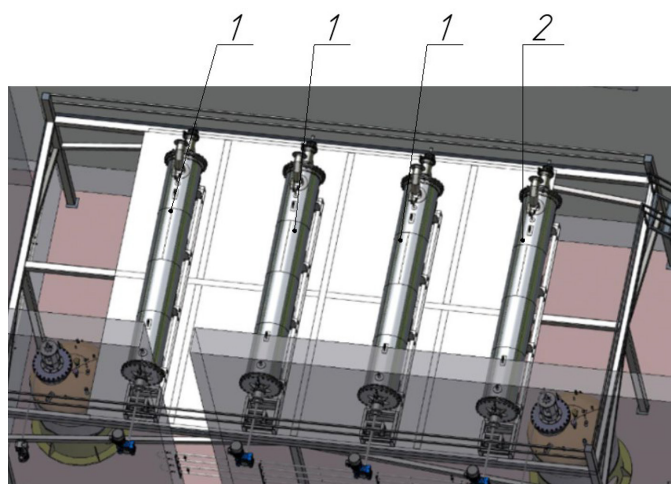


Рис. 5. Пример реализации барабанной установки концентрирования для атомной станции: 1 – БПИ; 2 – горизонтальный насадочный тепло- и массообменный аппарат

Fig. 5. Example of a drum-type concentration plant for nuclear power plants: 1 – DFE; 2 – horizontal packed heat and mass transfer apparatus

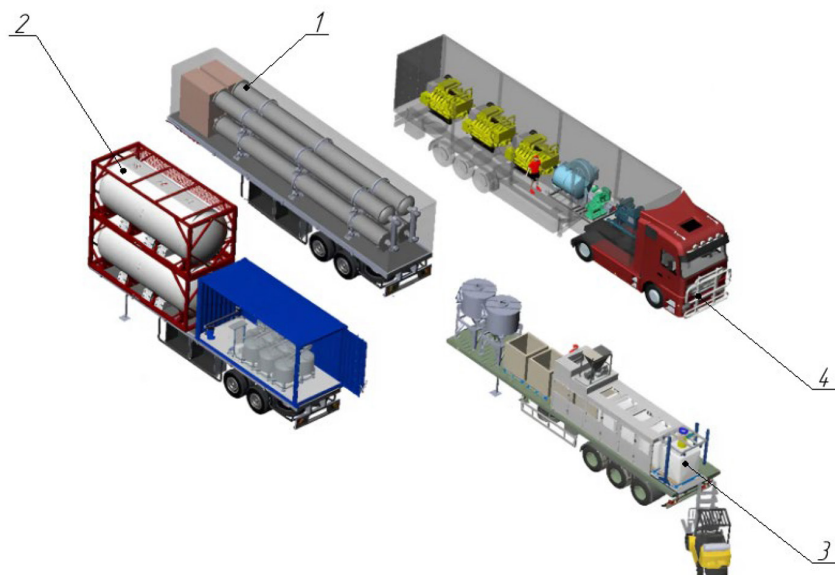


Рис. 6. Пример реализации мобильного комплекса по переработке ЖРО: 1 – БПИ; 2 – блок приема раствора после упаривания; 3 – блок цементирования; 4 – энергетический модуль

Fig. 6. Example of implementing a mobile LRW management system: 1 – DFE; 2 – solution reception unit after evaporation; 3 – cementation unit; 4 – energy module

В отдельном трейлере расположен энергетический модуль, оснащённый дизель-генераторами, вакуумным насосом и компрессором сжатого воздуха, для обеспечения бесперебойной работы комплекса без применения насосного оборудования.

Отличительной особенностью БПИ мобильного комплекса от технологии, предлагаемой для АЭС, является применение спаренных барабанных пленочных испарителей, схема работы которых представлена на рис. 7.

На вход компрессора из БПИ второй ступени поступает 130 г/с насыщенного пара при давлении 0,07 МПа и температуре 90 °С. В компрессоре пар сжимается до 0,27 МПа. При КПД компрессора 55 % сжатый пар перегреется до температуры 334 °С. При попадании в греющую рубашку БПИ первой ступени дополнительно произведется 58 г/с пара, а температура понизится до температуры насыщения 130 °С. Итого в греющей рубашке БПИ первого уровня будет конденсироваться 188 г/с греющего пара. Пар, передав тепло через теплопередающую стенку и сконденсировавшись, произведет в полости этого БПИ 144 г/с вторичного пара с температурой 110 °С. Вторичный пар, конденсируясь в паровой рубашке БПИ второй ступени, произведет 130 г/с вторичного пара при давлении 0,07 МПа и температуре 90 °С, который поступит на вход компрессора. Р-Н-диаграмма цикла установки для мобильного комплекса представлена на рис. 8. В связи с изменением вязкости, коэффициента теплопроводности раствора при солесодержании выше 300 г/л [9] и малым перепадом температур между стенкой и паром при производительности 2 м<sup>3</sup>/ч солесодержание раствора должно составлять 350 г/л.

Такая компоновка позволяет получить наибольшую производительность для БПИ, размещенного в прицепе длиной 13,6 м фуры грузоподъемностью 20 тонн.

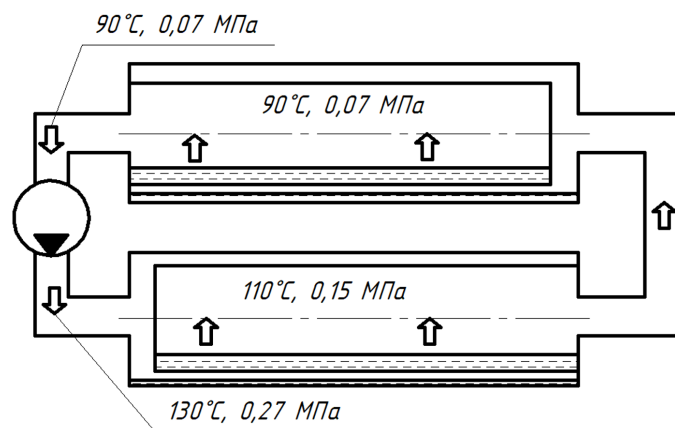


Рис. 7. Схема работы спаренных барабанов мобильного комплекса по переработке ЖРО

Fig. 7. Diagram of the paired drums of the mobile LRW treatment plant

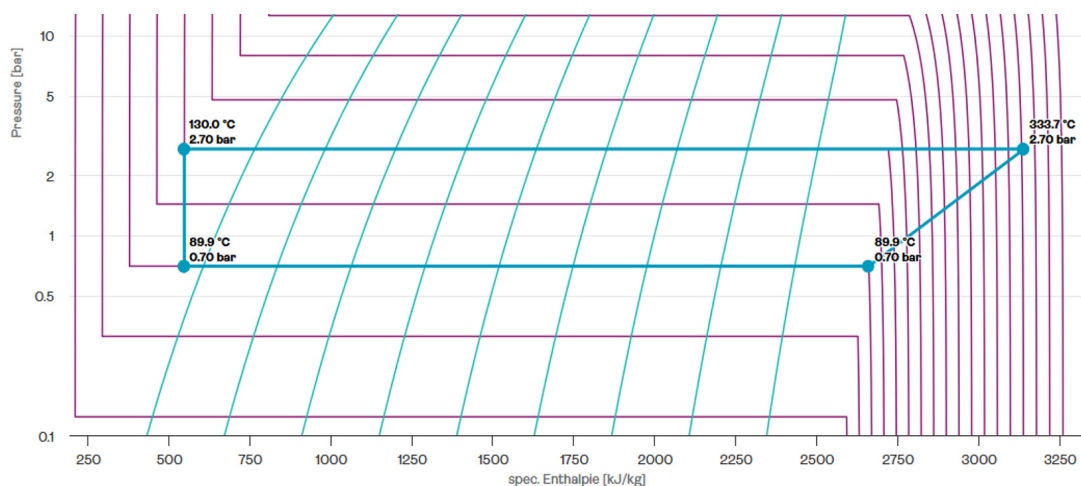


Рис. 8. P-H-диаграмма цикла мобильной установки

Fig. 8. P-H diagram of the mobile installation cycle

*Барабанная установка перерабатывающего комплекса для атомных станций малой мощности.* Для обеспечения региональной энергетической безопасности и работы в локальных энергосистемах удаленных и труднодоступных регионов ведутся исследования и опытно-конструкторские работы по изучению возможностей применения атомных станций малой мощности (АСММ), а следовательно, и установок по упариванию ЖРО в их составе. Примером возможной реализации может быть следующая установка.

Аппарат имеет единственный горизонтальный вращающийся барабан, частично заполненный выпариваемым раствором. Его конструкция отличается упрощенной системой очистки греющей поверхности [10] по сравнению с установками, использующими шнеки с пассивной системой сбрасывания солей. Это связано с малыми габаритами оборудования и, как следствие, малым диаметром внутренней полости шнека.

Одним из требований к разрабатываемому оборудованию для АСММ является автоматизация процессов для снижения численности персонала. В связи с этим процесс работы аппарата является непрерывным. Это обеспечивается благодаря применению тонкой настройки подачи ЖРО на упаривание с помощью специальных дросселирующих устройств [11].

Для повышения степени очистки конденсата вторичный пар проходит через барабанный скруббер, где обеспечивается доочистка от аэрозолей в случае упаривания пенящихся жидкостей (рис. 9).

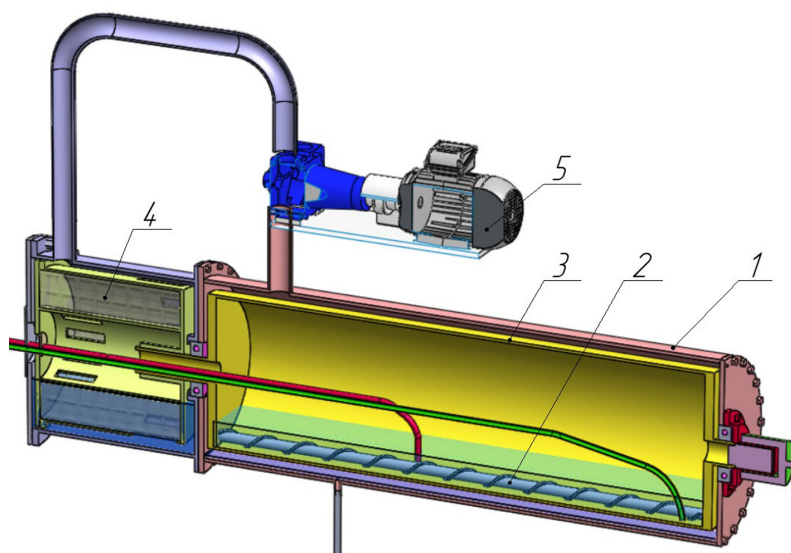


Рис. 9. Аппарат для АСММ в разрезе: 1 – внешний барабан; 2 – шнек; 3 – внутренний барабан; 4 – скруббер; 5 – компрессор

Fig. 9. The device for SMR in the section: 1 – outer drum; 2 – auger; 3 – inner drum; 4 – scrubber; 5 – compressor

### Сравнительная характеристика представленных аппаратов

Характеристики аппаратов БПИ различных исполнений представлены в табл. 1. Различие параметров по солесодержанию концентрата обусловлено изотопным составом ЖРО, требова-

Таблица 1. Характеристики аппаратов БПИ различных исполнений

Table 1. Characteristics of DFE devices of various designs

Параметры	БПИ для АЭС	Мобильный комплекс БПИ	БПИ для АСММ
Производительность по исходному раствору, м <sup>3</sup> /ч	0,5	2	0,07
Энергопотребление, кВт	65	90	11
Солесодержание исходного продукта, г/л	1–350	1–350	1–350
Солесодержание концентрата, г/л	350–800	350	350–700
Занимаемая площадь, м <sup>2</sup>	72	144	25

нием рецептуры для получения цементного компаунда, выбором системы очистки греющей поверхности.

### Выводы

Технологии с применением барабанных пленочных испарителей демонстрируют высокую степень адаптивности и могут быть успешно интегрированы на ОИАЭ, таких как:

- атомные электростанции, где требуется переработка значительных объемов ЖРО, и спецпрачечные, где необходима очистка загрязненных вод, содержащих поверхностно-активные вещества;
- атомные станции малой мощности, для которых важна компактность и эффективность оборудования;
- для обслуживания водоемов-хранилищ радиоактивных отходов, для которых требуются мобильные автоматизированные комплексы.

Универсальность технологии позволяет:

- подбирать оборудование под конкретные условия эксплуатации;
- оптимизировать процессы переработки с учетом характеристик исходного ЖРО, за счет возможности работы с высоким исходным солесодержанием;
- интегрировать систему в существующие производственные цепочки.

Такой подход позволяет провести модернизацию существующих технологий переработки ЖРО, а также создать новые комплексы для ОИАЭ с учетом их специфических требований и условий эксплуатации.

### Список литературы / References

[1] Рогожкин С.В., Калыгин В.В. О преимуществах использования барабанно-пленочного испарителя для выпаривания низко- и среднеактивных жидких радиоактивных отходов. *Журнал СВУ. Техника и технологии*, 2025, 18(5). 586–593. [Rogozhkin S. V., Kalygin V. V. On the Advantages of Using a Drum-Film Evaporator for Evaporation of Low- and Medium-Level Radioactive Waste, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2025, 18(5), 586–593 (in Russian)]

[2] Рогожкин С.В. Калыгин В.В. Современные конструкционные и технологические решения, применяемые в выпарных аппаратах для переработки жидких радиоактивных отходов низкой и средней активности. *Сборник трудов АО «ГНЦ НИИАР»*, 2024, 3, 51–57. [Rogozhkin S. V., Kalygin V. V. Modern design and technological solutions used in evaporators for processing low- and medium-level liquid radioactive waste. *Collected papers by JSC «SSC RIAR»*, 2024, 3, 51–57 (in Russian)]

[3] Рогожкин С.В., Калыгин В.В., Узиков В.А. Рогожкина Д.Р. Использование барабанно-пленочного испарителя для совершенствования технологии выпаривания низко- и среднеактивных жидких радиоактивных отходов. *Современные проблемы физики и технологий: сборник тезисов докладов*. Москва, 2022, С. 61–63 [Rogozhkin S. V., Kalygin V. V., Uzikov V. A., Rogozhkina D. R. Use of a Drum-Film Evaporator for Improving the Technology of Evaporation of Low- and Medium-Active LRW. *Modern Problems of Physics an Technology: Collection of Abstract*. Moscow, 2022, pp. 61–63 (in Russian)]

[4] Никифоров А.С. *Обезвреживание жидких радиоактивных отходов*, М.: Энергоатомиздат, 1985. 184 с. [Nikiforov, A.S. *Neutralization of liquid radioactive waste*, Moscow, Energoatomizdat, 1985, 184 p. (in Russian)]

[5] Закирова Е.В. *Коррозия и защита оборудования от коррозии*, учебное пособие, Издательство Пензенского государственного университета, 2013, 55 с. [Zakirova E. V. *Corrosion and Protection of Equipment from Corrosion*, Textbook, Penza State University Publishing House, 2013, 55 p. (in Russian)]

[6] Ривкин С.Л. *Термодинамические свойства воды и водяного пара*. М.: Энергоатомиздат, 1975, 79 с. [Rivkin C.L. *Thermodynamic properties of water and water vapor*, Moscow, Energoatomizdat, 1975, 79 p. (in Russian)]

[7] Р 50–54–82–88. *Надежность в технике. Выбор способов и методов резервирования: рекомендации*, М.: ВНИИНМАШ, 1988. Утвержд. ВНИИНМАШ № 260 от 22.09.1988. [Р 50–54–82–88. *Reliability in technology. The choice of ways and methods of reservation: recommendations*, М.: VNIINMASH, 1988, Approved. VNIINMASH No. 260, September, 22, 1988.]

[8] Узиков В.А., Узикова И.В., Рогожкин С.В. Патент 2750492 Российская Федерация, МПК В 01D 3/30. *Горизонтальный насадочный тепло- и массообменный аппарат*. № 2021102790; заявл. 07.02.2021; опубл. 28.06.2021 [Uzikov V. A., Uzikova I. V., Rogozhkin S. V. Patent 2750492 Russian Federation, IPC B 01D 3/30. *Horizontal packed heat and mass transfer apparatus*. No 2021102790, filed on February, 07, 2021; published on June, 28, 2021]

[9] Зелинская Е.В. Теоретические аспекты использования гидроминерального сырья / Е.В. Зелинская, Е.Ю. Воронина; Зелинская Е.В., Воронина Е.Ю.; М-во образования и науки РФ, Иркутский гос. технический ун-т, Российская акад. естествознания. Москва: Акад. естествознания, 2009. 118 с. [Zelinskaya E. V. *Theoretical aspects of the use of hydromineral raw materials* / E. V. Zelinskaya, E. Yu. Zelinskaya E. V., Voronina E. Yu.; Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Irkutsk State Technical University, Russian Academy of Natural Sciences. Moscow: Academy of Natural Sciences, 2009. 118 p. (in Russian)]

[10] Рогожкин С.В., Калыгин В.В., Рогожкина Д.Р. Система очистки греющей поверхности барабанно-пленочного испарителя от солевых отложений. *Радиоактивные отходы*. Ред. Б.Ф. Мясоедов. Москва, 2022, 1, 57–61 [Rogozhkin S. V., Rflygin V. V., Rogozhkina D. R. System for Cleaning the Heating Surface of a Drum-Film Evaporator from Salt Deposits. *Radioactive Waste*. Ed. by B. F. Myasoeodov. Moscow, 2022, 1, 57–61]

[11] Рогожкин С.В., Паршин С.М., Алексеев А.В. Патент 229248 Российская Федерация, МПК F16K 47/12. *Дросселирующее устройство*. № 2024111687; заявл. 27.04.2024; опубл. 30.09.2024 [Rogozhkin S. V., Parshin S. M., Alekseev A. V. Patent 229248 Russian Federation, IPC F16K 47/12. *Throttling device*. No. 2024111687, filed on April 27, 2024; published on September, 30, 2024]

Theoretical and Applied Heat Engineering  
Теоретическая и прикладная теплотехника

EDN: HZRCXQ

УДК 662.74

**Determination of the Prospects for Use  
of Substandard Coals for Use  
in the Coal Chemical Industry**

**Konstantin Yu. Ushakov<sup>a</sup>, Aleksandr R. Bogomolov<sup>a\*</sup>,  
Vladimir M. Sadovskiy<sup>a</sup> and Vasilij I. Murko<sup>b</sup>**

*<sup>a</sup>T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University  
Kemerovo, Russian Federation*

*<sup>b</sup>Siberian State Industrial University,  
Novokuznetsk, Russian Federation*

Received 09.08.2025, received in revised form 21.02.2026, accepted 15.03.2026

**Abstract.** In light of the refusal of a number of countries to use nuclear and coal power generation and the growing dependence on natural gas, leading to higher prices for raw materials, coal is seen as a promising raw material for the chemical industry. In this paper, a comprehensive analysis of substandard brown coals from the Itatskoye, Karakanskoye, Sarykolskoye, Munayskoye and Chernogorskoye deposits is carried out in order to assess their suitability for coal chemical processing. The research included technical and elemental analyses, thermogravimetric analysis (TG/DSC) in inert (argon) environment, IR spectroscopy. The technical characteristics of coals, as well as such parameters as the atomic ratio H/C, the ratio of aliphatic and aromatic structures, the relative maximum rate of pyrolysis and the activation energy of the thermal decomposition process were determined, on the basis of which an assumption was made about the applicability of the coals under consideration for coal chemical use. It was established that brown coals from the Itatskoye and Munayskoye deposits have the lowest thermal stability (the lowest temperatures of maximum decomposition rate and peak oxidation temperatures), the highest mass losses during pyrolysis in an inert environment (47.3 % and 38.7 %), high values of H/C (0.93 and 1.01) and the ratio of aliphatic and aromatic structures 0.68 and 0.42, which indicates that they are the most promising of the coals under consideration for obtaining liquid products. Coal of the Sarykolskoye deposit is recognized as the least suitable for hydrogenation processing and is recommended for consideration in the technology of obtaining gaseous fuel.

**Keywords:** substandard brown coals, thermogravimetric analysis (TGA), differential scanning calorimetry (DSC), IR spectroscopy, hydrogenation, gasification, liquid coal chemical products.

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: kuzstu@kuzstu.ru; rector@sibsiu.ru

Citation: Ushakov K. Yu., Bogomolov A. R., Sadovskiy V. M., Murko V. I. Determination of the Prospects for Use of Substandard Coals for Use in the Coal Chemical Industry. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(3), 342–354. EDN: HZRCXQ



## Определение перспективности использования некондиционных углей для применения в углехимической промышленности

К. Ю. Ушаков<sup>а</sup>, А. Р. Богомолов<sup>а</sup>,  
В. М. Садовский<sup>а</sup>, В. И. Мурко<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Кузбасский государственный технический университет  
им. Т. Ф. Горбачева

Российская Федерация, Кемерово

<sup>б</sup>Сибирский государственный индустриальный университет  
Российская Федерация, Новокузнецк

**Аннотация.** В свете отказа ряда стран от атомной и угольной генерации и роста зависимости от природного газа, приводящего к удорожанию сырья, уголь рассматривается как перспективное сырье для химической промышленности. В данной работе проведен комплексный анализ некондиционных бурых углей месторождений Итатское, Караканское, Сарыкольское, Мунайское и Черногорское с целью оценки их пригодности для углехимической переработки. Исследование включало технический и элементный анализы, термогравиметрический анализ (ТГ/ДСК) в инертной (аргон) среде, ИК-спектроскопию. Определены технические характеристики углей, а также такие параметры, как атомное отношение Н/С, соотношение алифатических и ароматических структур, относительная максимальная скорость пиролиза и энергия активации процесса терморазложения, на основании которых высказано предположение о применимости рассматриваемых углей к углехимическому использованию. Установлено, что бурые угли Итатского и Мунайского месторождений обладают наименьшей термической стабильностью (наиболее низкие температуры максимума скорости разложения), наибольшими потерями массы при пиролизе в инертной среде (47,3 и 38,7 %), высокими значениями Н/С (0,93 и 1,01) и соотношением алифатических и ароматических структур 0,68 и 0,42, что указывает на их наибольшую перспективность из рассматриваемых углей для получения жидких продуктов. Уголь Сарыкольского месторождения признан наименее пригодным для гидрогенизационной переработки и рекомендован к рассмотрению в технологии получения газообразного топлива.

**Ключевые слова:** некондиционные бурые угли, термогравиметрический анализ (ТГА), дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК), ИК-спектроскопия, гидрогенизация, газификация, жидкие углехимические продукты.

Цитирование: Ушаков К. Ю. Определение перспективности использования некондиционных углей для применения в углехимической промышленности / К. Ю. Ушаков, А. Р. Богомолов, В. М. Садовский, В. И. Мурко // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(3). С. 342–354. EDN: HZRCXQ

## Введение

В последние года ряд государств ведут политику отказа от атомной и угольной генераций, а основным энергоносителем становится газ, несмотря на планы развития возобновляемой энергетики [1], что определяет увеличение стоимости газового сырья для промышленности во многих странах. В этой связи в обозримом будущем уголь может рассматриваться как сырьевой продукт для химической промышленности. В общем виде уголь представляет собой твердое ископаемое топливо с неравномерной структурой, включающей органические и минеральные вещества [2, 3]. Органические вещества, входящие в состав угля, являются горючими, определяют его калорийность и возможные направления использования. Использование некондиционных для энергетических целей углей с целью получения полезных продуктов в результате углехимической переработки – вполне перспективное научное направление, которое пока недостаточно экспериментально и экономически обосновано. Процесс получения полезных веществ из угля при термической обработке должен основываться на его физико-химических свойствах и механизме термического разрушения [4–6]. Уголь как высокомолекулярный материал на углеродной основе при термообработке может быть расщеплен на жидкие и/или газообразные продукты с меньшей молекулярной массой. Однако то, насколько хорошо твердое вещество будет подвергаться термораспаду, зависит как от природы и количества внутри- и межмолекулярных связей, так и от особенностей термического процесса, используемого для разрушения структуры высокомолекулярного материала.

В настоящей работе авторами проведен анализ углей различных месторождений с целью определения их применимости в технологических процессах для получения полезных продуктов.

## Методика эксперимента

Основные характеристики выбранных углей (данные технического и элементного анализов) приведены в табл. 1. Технический анализ углей проводили с использованием общепринятых методик (стандартных методов по ГОСТ), а их элементный анализ выполнялся с помощью элементного анализатора Flash 2000 (Thermo Fisher Scientific, США). Теплота сгорания углей определялась с использованием автоматического изопериболического калориметра АС-500 (LECO, США). В работе по тексту использованы следующие аббревиатуры углей: ИБ – бурый уголь Итатского месторождения (Кемеровская область-Кузбасс); КК – караканский каменный

Таблица 1. Характеристики исследуемых образцов кузбасских углей

Table 1. Characteristics of the studied samples of Kuzbass coals

Образец угля	Технический анализ (масс.%)			Элементный анализ (масс.%, в пересчете на <i>daf</i> )			$Q_{\text{п}}$ МДж/кг	Н/С
	$W^a$	$A^d$	$V^{daf}$	С	Н	N+S+O		
МБ	25	3,6	52	82,9	6,96	10,14	21,32	1,01
ХБ	25,1	11,5	48,4	65,78	5,43	28,79	17,2	0,99
СБ	16,5	26	46,5	76,4	5	16,6	17,2	0,79
ИБ	12,1	15,8	52,4	80,48	6,26	13,26	19,4	0,93
КК	7,7	13,6	41,3	81,39	5,84	12,77	18,7	0,86

длиннопламенный (Кемеровская область-Кузбасс); МБ – мунайский бурый (месторождение Алтайского края); СБ – сарыкольский бурый (Костанайская область, Казахстан); ХБ – бурый уголь Черногорского месторождения (Республика Хакасия).

Согласно диаграмме Ван Кревелена [8] рассматриваемые угли относятся к углям низкой степени метаморфизма и по таким показателям, как теплота сгорания и зольность, могут относиться к низкокондиционным топливам, поэтому могут рассматриваться в качестве сырья для углехимических технологий.

Для предварительной оценки возможности использования углей в процессах переработки в газообразные и жидкие продукты активно применяются методы термического анализа, которые позволяют определить температурные интервалы и последовательность стадий термического разложения углей, а также оценить прочность в них химических связей [9–11]. Термогравиметрический анализ является одним из аналитических методов, позволяющих определить характеристики сгорания и терморазложения угля [7, 12]. Дериватограммы исследуемых углей в инертной среде были записаны на приборе синхронного термического анализа NETZSCH STA 449 F3 Jupiter. Навеска образца составляла ~ 200 мг; скорость нагрева ~ 10 °С/мин; в качестве образца сравнения использовался прокаленный при 1200 °С  $\alpha$ -оксид алюминия.

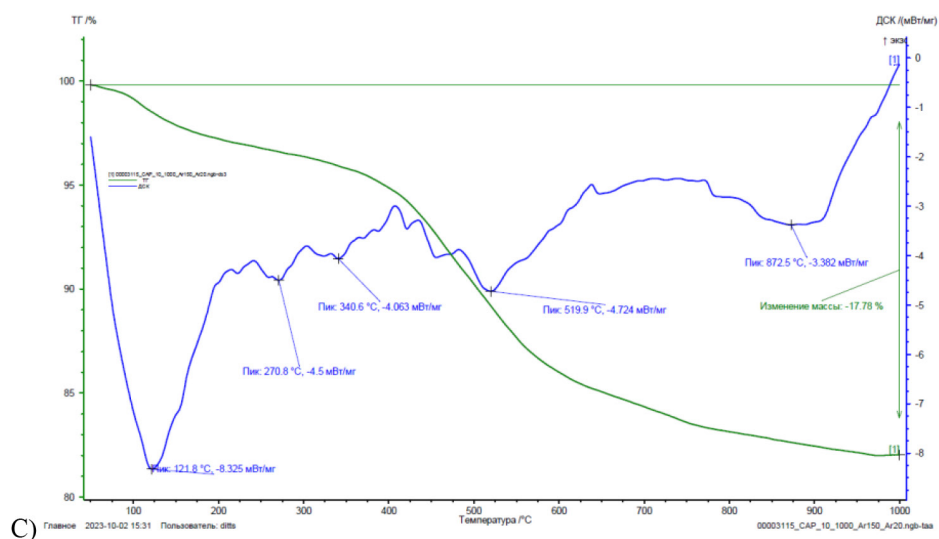
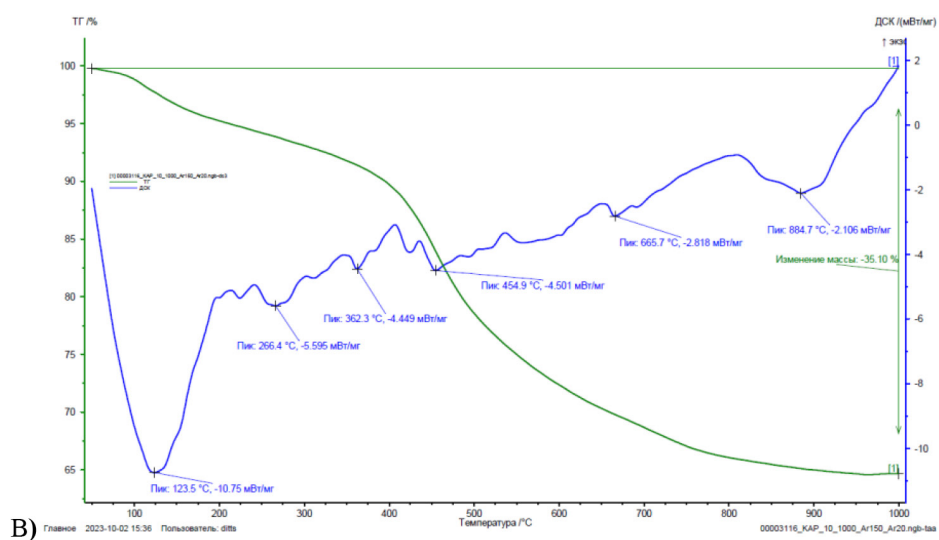
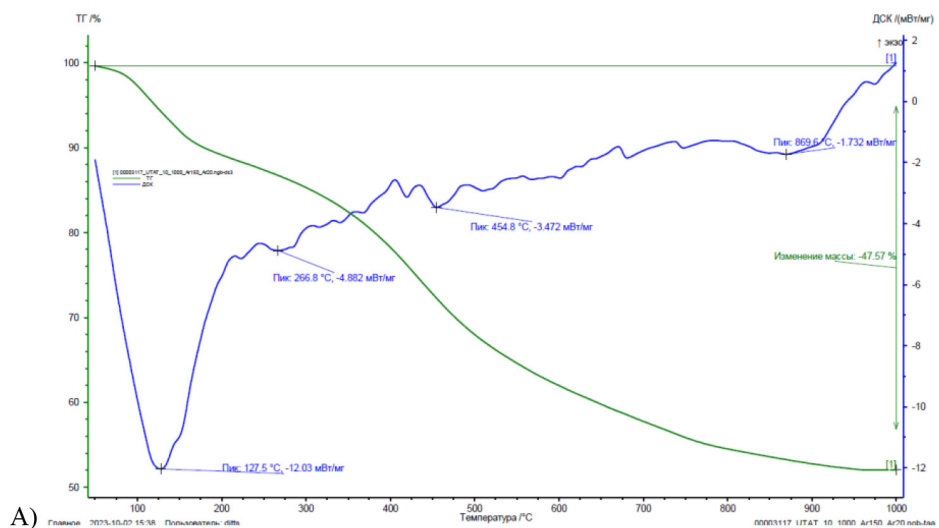
На дериватограммах фиксируются изменение массы (линия ТГ) и разность температур (ДСК) между исследуемым и инертным образцом при непрерывном нагреве с одинаковой скоростью. Для определения энергии активации были проанализированы дериватограммы с использованием линий ТГ и ДСК. Согласно [12], процесс пиролиза углей достаточно удовлетворительно описывается кинетикой реакции первого порядка. Расчет энергий активации процессов разложения исследуемых углей в интервале температур 300–550 °С ( $E_a^{300-550}$ , табл. 2) по данным термического анализа проводился методом Ингрэма-Мариера [13] с использованием логарифмической формы кинетического уравнения зависимости скорости потери массы образца от температуры.

ИКФП-спектры образцов углей регистрировались на ИКФП-спектрометре «Инфралюм» (Симекс, Россия) в спектральном диапазоне 500–4000 см<sup>-1</sup>; спектры записывались в виде пленки на окошке из KBr либо с использованием методики прессования образцов с бромистым калием.

### Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены дериватограммы углей в инертной среде, а термогравиметрические данные этих измерений суммированы в табл. 2.

На дериватограммах, записанных для исследуемых углей в инертной среде (рис. 1), можно выделить три характерные [14–16] для процессов неизотермического пиролиза твердых топлив основные области термического разложения в диапазоне температур  $T$ : 1)  $\leq 150$  °С (удаление адсорбированной воды); 2) 150–500 °С (стадия первичного пиролиза) и 3)  $>500$  °С (стадия вторичного или медленного пиролиза). На стадии первичного пиролиза газообразные продукты образуются в результате распада алифатических структур и отщепления боковых заместителей от углеродного каркаса органической массы углей и в основном состоят из CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>O, метана и его гомологов. На стадии вторичного пиролиза происходит разрыв связей и перестройка углеродной матрицы самих углей; при этом основными выделяющимися газообразными продуктами здесь являются водород и CO, а также (в небольших количествах) CS<sub>2</sub> и HCN [17].



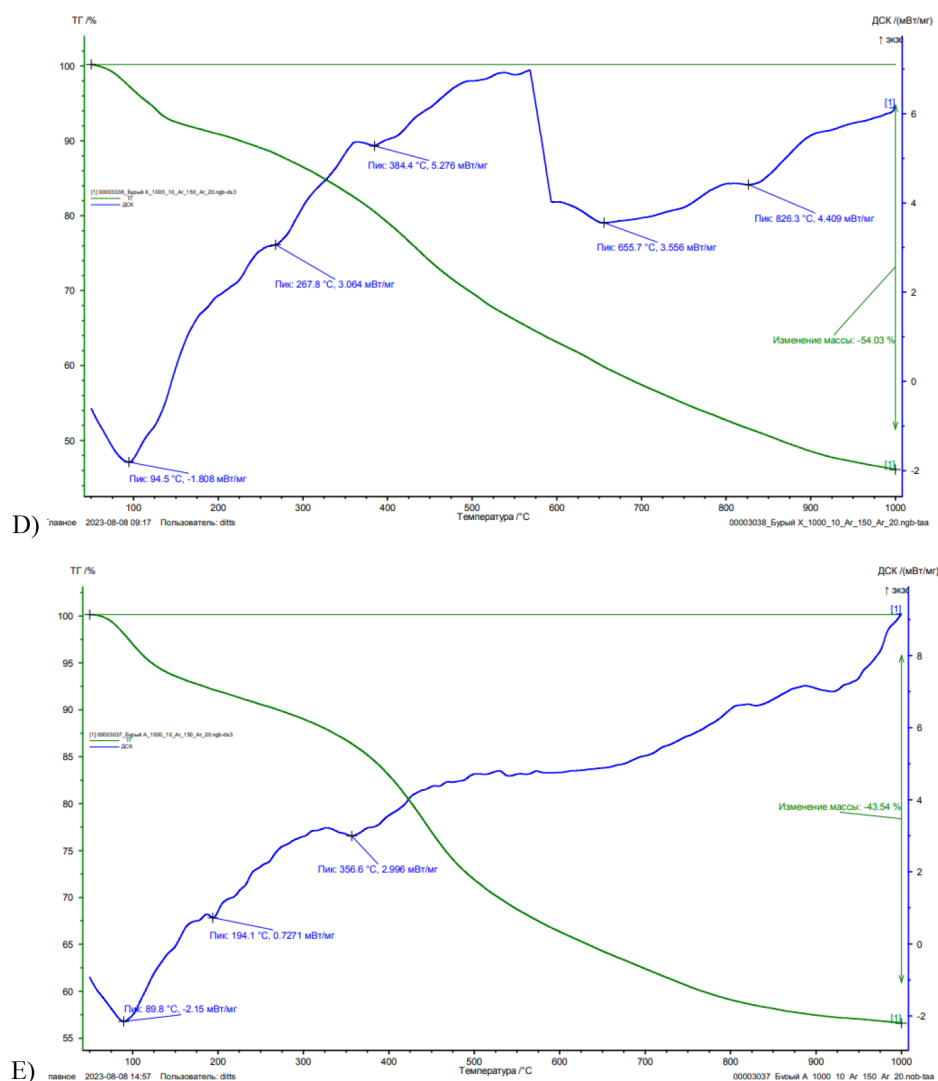


Рис. 1. Дериватограммы угля в инертной среде: А) ИБ; В) КК; С) СБ; D) ХБ; Е) МБ

Fig. 1. Derivatograms of coal in an inert environment: A) ИБ; В) КК; С) СБ; D) ХБ; Е) МБ

Термогравиметрические кривые для изученных образцов качественно согласуются для углей ИБ, КК и СБ, (рис. 1А, В и С), кривые ХБ (рис. 1D) и МБ (рис. 1Е) носят индивидуальный характер. Потеря свободной влаги и частично из поверхностной части пористой структуры для ХБ и МБ произошла при температурах 94,5 и 89,8 °С. Для углей СБ, КК и ИБ потеря свободной влаги и частично из внутриповерхностной части пористой структуры происходит при более высоких температурах, 121,8; 123,5 и 127,5 °С соответственно. Вероятно, это связано с размером пор исследуемых углей. В случае меньшего диаметра пор и известной в практике гидрофобности угля выход влаги из пор происходит с подведением большей энергии из-за выпуклости мениска влаги в поре. Авторами произведено определение текстурных характеристик исследуемых углей на анализаторе удельной поверхности и пористости 3P sync 200 после выхода летучих веществ по следующим показателям: удельная поверхность, диаметр и объем пор. На-

Таблица 2. Результаты термогравиметрического анализа разложения образцов углей в различных средах  
 Table 2. Results of thermogravimetric analysis of coal samples decomposition in different media

Исследуемый уголь	Среда разложения	D	Потеря массы (%)	$T_{\max}$ (°C)	$E_a^{350-550}$ (кДж/моль)
ИБ	Гелий	< 150	7,31	455	66,38
		150–500	24,62		
		> 500	15,38		
КК	Гелий	< 150	3,43	455	152,04
		150–500	18,04		
		> 500	14,29		
СБ	Гелий	< 150	2,18	520	99,20
		150–500	8,40		
		> 500	8,73		
ХБ	Аргон	< 150	7,39	384	62,60
		150–500	22,61		
		> 500	23,48		
МБ	Аргон	< 150	6,29	356	130,39
		150–500	18,97		
		> 500	13,45		

пример, установлено, что для ХБ диаметр пор равен 2,865 нм и конечная температура удаления свободной влаги в инертной среде равна 94,5 °С. Для ИБ диаметр пор равен 2,557 нм и конечная температура удаления свободной влаги в инертной среде имеет температуру 127,5 °С. Данные подтверждают гипотезу о влиянии размера пор на конечную температуру удаления свободной влаги и частично адсорбированной в порах на внешней и приповерхностной части угля. Если следовать последним обоснованиям о повышенных температурах удаления поверхностной и частично капиллярной влаги, то процессы интенсивного роста экзотермических процессов для углей СБ, КК и ИБ, включая уголь ХБ, связаны с более интенсивным взаимодействием материнского кислорода угля с поверхностью углеродной массы по сравнению с атмосферным окислителем. Содержание кислорода в углях представлено в табл. 1. Из нее видно, что наименьшее содержание материнского кислорода относится к углю МБ, который показывает самую низшую интенсивность экзотермического процесса. Взаимодействие материнского кислорода с поверхностью углеродной матрицы вызывает интенсивные процессы хемосорбции, являющиеся экзотермическими. Эти процессы продолжаются до температуры 200–210 °С.

После высвобождения влаги в инертной среде начинается стадия первичного пиролиза, на которой происходит наибольшая потеря массы при термопревращении органической части угольного сырья. По рассчитанной на этой стадии энергии активации можно предположить энергетические затраты на проведение термопревращения угольного сырья с получением углехимической продукции. Из исследуемых углей бурые угли ИБ и ХБ имеют наименьшие значения энергии активации в диапазоне температур 350–500 °С (66,38 и 62,6 кДж/моль соответственно). Стоит отметить, что температура максимума скорости разложения  $T_{\max}$  для ИБ (455 °С), КК (455 °С) и угля СБ (520 °С) оказалась больше аналогичных величин, полученных для МБ (356 °С) и ХБ (384 °С). Температура максимума скорости разложения может быть использована при составлении методики экспериментальных исследований термообработки

данных углей и указывает на область температур, которые необходимы для проведения термолитиза. Более низкие температуры процесса наряду со значениями энергии активации могут положительно повлиять на энергетические затраты, необходимые в процессе термообработки. При этом суммарная потеря массы после термообработки в потоке инертного газа для итатского угля (47,3 %) и ХБ (53,5 %) была выше по сравнению с углями Караканского (35,8 %), Сарыкольского (19,3 %) и Мунайского месторождений (38,7 %), что также может указывать на больший выход жидких и газообразных продуктов в процессе их термообработки.

Следующей стадией термопревращений является стадия вторичного (медленного) пиролиза. Здесь затраты энергии на процесс значительно меньше, чем на стадии первичного пиролиза, что характеризуется более пологим характером возрастающей линии ДСК на дериватограммах и резким снижением интенсивности падения массы (линии ТГ). При этом на линии ДСК можно наблюдать наличие эндотермических реакций, в большей степени характеризующих химические процессы с участием минеральной части.

Так, пики эндотермических реакций в диапазоне 650–800 °С, вероятно, связаны с процессом сульфатизации оксида кальция (например, по реакции  $\text{CaO} + \text{SO}_3 \rightarrow \text{CaSO}_4$ ) для углей ХБ, МБ и ИБ, в связи с преобладающими в золе углей оксидами кальция (35,5 %, 34 % и 35,82 % соответственно) и наличием серы как в органической части (табл. 1), так и в оксидном составе золы. Отличительными по характеру поведения кривой ДСК в области температур 700–900 °С являются дериватограммы, записанные в инертной среде для углей КК и СБ, что может быть обусловлено преобладанием в составе золы этих углей оксида кремния и алюминия (44–45 % и 20–24 % соответственно).

Значения суммарных потерь массы образцов в целом коррелируют со значениями в них атомных отношений Н/С (табл. 1) и общего содержания алифатических структур, характеризуемого описанным в работе [18] параметром  $(D_{2920} + D_{2860})/D_{1600}$  (табл. 2). Также известно, что значение величины относительной максимальной скорости пиролиза углей соотносится с выходом жидких продуктов в процессе гидрирования углей (показатель скорости максимальной потери их массы на 1 г угля в инертной среде в интервале 300–500 °С  $[(1/m_0) \cdot dm/dT]$ ). В работе по дериватограммам было рассчитано значение  $[(1/m_0) \cdot dm/dT]$  в интервале 300–500 °С для исследуемых углей, которые представлены в табл. 3.

Рассчитанные из полученных дериватограмм углей в инертной среде значения относительных скоростей пиролиза  $[(1/m_0) \cdot dm/dT]$  в интервале 300–500 °С характеризуют бурые угли

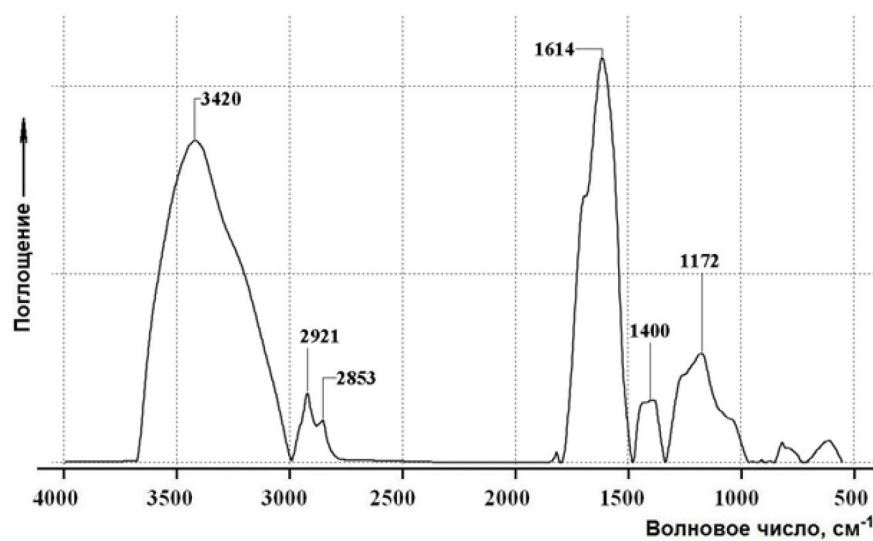
Таблица 3. Значения различных параметров для исследуемых углей

Table 3. Values of various parameters for the studied coals

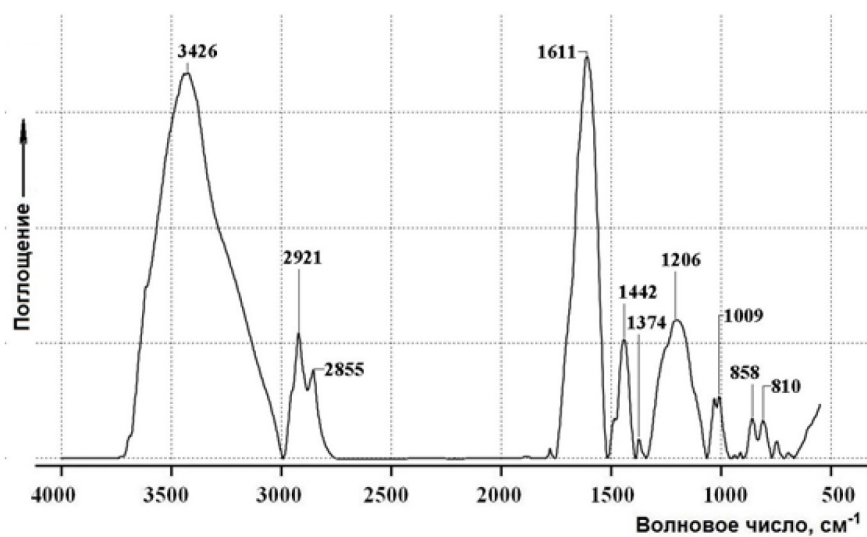
Исследуемый уголь	$[(1/m_0) \cdot dm/dT], [(1/\Gamma_{обр.}) \cdot мг/°С]$	$(D_{2920} + c_{2860})/D_{1600}$	$Q_p^{\#}$ МДж/кг	Н/С
МБ	0,85	0,42	21,32	1,01
ХБ	0,83	0,36	17,2	0,99
СБ	0,47	0,31	17,2	0,79
ИБ	0,92	0,68	19,4	0,93
КК	0,87	0,32	18,7	0,86

ИБ, ХБ и МБ как наиболее пригодные к гидрогенизационной переработке из рассматриваемых углей. Стоит отметить, что по перечисленным параметрам угли месторождений Сарыколь (СБ) и Караканское (КК) являются наименее приемлемыми для использования в качестве сырья для получения жидких продуктов.

При термической обработке твердых топлив, как было отмечено выше, происходит термораспад различных связей межмолекулярного взаимодействия функциональных групп, которые могут быть определены и описаны с использованием метода ИК-спектроскопии. Поэтому были записаны ИКФП-спектры исследуемых углей (рис. 2). Удобным параметром, позволяющим оценить характер поведения угля при его термической обработке с целью получения жидких продуктов, может быть отношение суммы оптических плотностей ИК-полос поглощения валентных С-Н-колебаний алкильных групп ( $D_{2920}+D_{2860}$ ) к оптической плотности ИК-полосы поглощения при  $\sim 1600\text{--}1630\text{ см}^{-1}$ , относящейся к валентным колебаниям С=С-связей аромати-



A)



B)

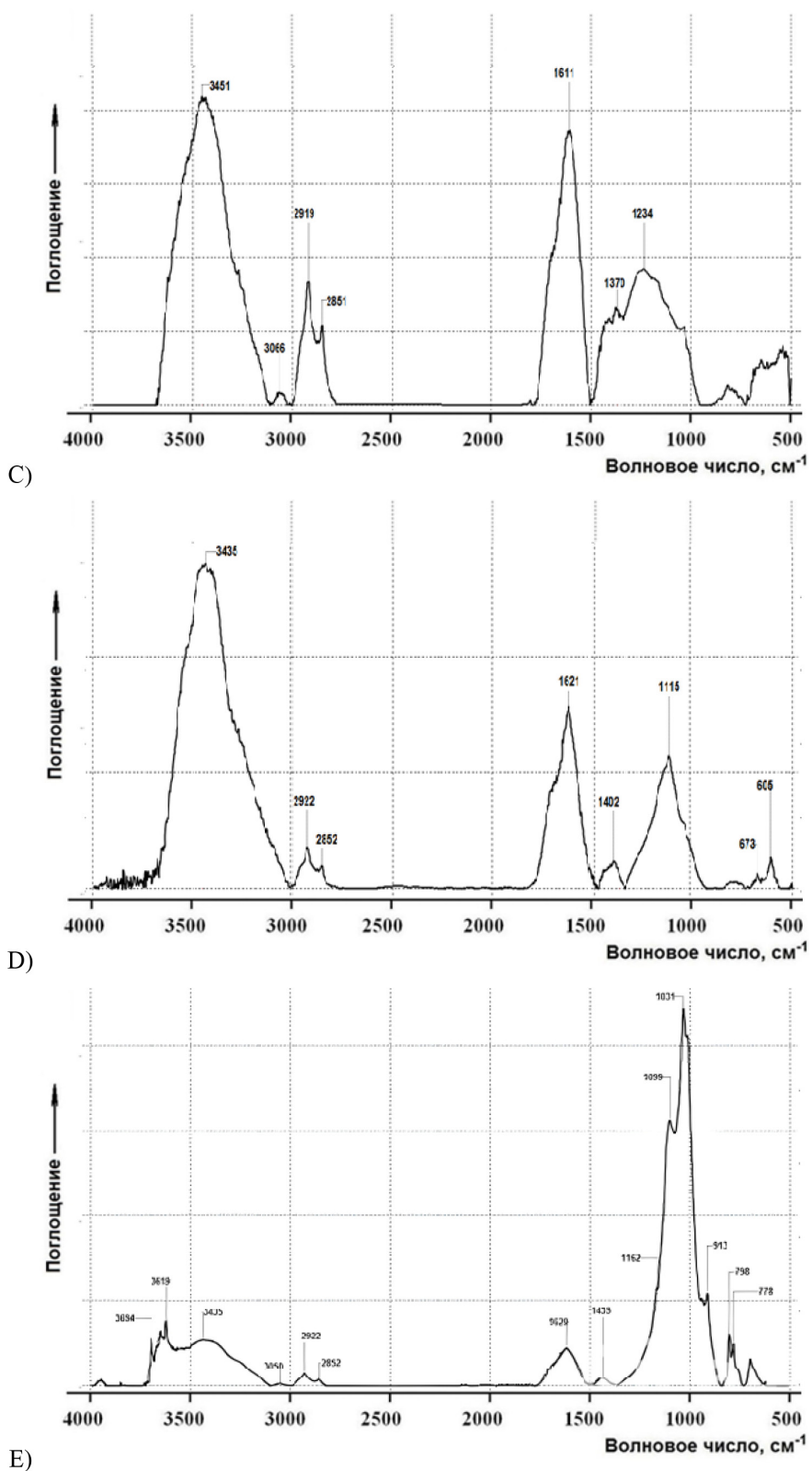


Рис. 2. Типичные ИКФП-спектры исходных углей: А) ИБ; В) КК; С) СБ; D) ХБ; Е) МБ

Fig. 2. Typical IR spectra of the coals: А) ИБ; В) КК; С) СБ; D) ХБ; Е) МБ

ческих колец ( $D_{1600}$ ), т.е. отношение  $(D_{2920}+D_{2860})/D_{1600}$ , которое по своему физическому смыслу отражает соотношение алифатических и ароматических структур в исследуемых углях.

Согласно литературным данным по ИК-спектрам различных углей [20, 22], методом ИК-спектрального анализа бурых углей (рис. 2) ХБ, ИБ, МБ и длиннопламенного КК показано, что для этих образцов определены свойственные полосы слабых кислородсодержащих групп (волновое число 3451–3426 и 1254–1115  $\text{см}^{-1}$ ) и алифатических  $\text{C}-\text{H}_x$ -связей метиленовых групп (волновое число 2921–2851, 1442–1402  $\text{см}^{-1}$ ). Для указанных углей свойственны слабые кислородсодержащие функциональные группы с волновыми числами в диапазоне 3451–3420 и 1234–1115  $\text{см}^{-1}$ . Только в буром угле МБ отражены ароматические  $\text{C}-\text{H}$ -связи (3066  $\text{см}^{-1}$ ). Сарыкольский уголь (СБ) значительно отличается по ИК-спектрам от бурых исследуемых углей ХБ, ИБ, МБ и от каменного КК. ИК-спектры показывают, что кислородсодержащие группы составляют основную долю в спектрах 1162–1031  $\text{см}^{-1}$ . Незначительно проявлены ароматические  $\text{C}-\text{H}$ -связи (3050  $\text{см}^{-1}$ ) и  $\text{C}=\text{C}$ -группы (1620  $\text{см}^{-1}$ ), а также алифатические  $\text{C}-\text{H}_x$ -связи метиленовых групп (волновое число 2922–2852, 1435  $\text{см}^{-1}$ ). Довольно сильно проявлена связь  $\text{C}-\text{O}-\text{H}$  (1000 и 913  $\text{см}^{-1}$ ), характерная для карбоксильных групп органических кислот, а также слабых кислородсодержащих групп  $\text{C}-\text{O}-\text{C}$  (1162, 1099 и 1031  $\text{см}^{-1}$ ). Волновое число деформационных колебаний 798  $\text{см}^{-1}$  отражает  $\text{C}-\text{H}$ -связь, свойственную простейшим алканам, которая участвует в образовании летучих веществ в форме метана, этана и пропана.

По спектрам, записанным для исследуемых углей, было рассчитано отношение  $(D_{2920}+D_{2860})/D_{1600}$ , значения которого представлены в табл. 3. Стоит отметить, что наименьшее относительное содержание алифатических структур определено для угля СБ, спектр которого значительно отличается наличием пика, характерного для валентных колебаний мостиковых групп  $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ , что было отмечено выше. Подобный функциональный состав угля СБ подтверждает обозначенный ранее факт, что он является наименее пригодным из рассматриваемых для использования в процессе получения жидких продуктов, при этом он может быть применен в технологии получения газообразного топлива, рассматриваемой автором [23, 24]. В свою очередь, наибольшее значение отношения  $(D_{2920}+D_{2860})/D_{1600}$  из рассматриваемых углей имеет бурый уголь Итатского месторождения (ИБ). В целом по совокупности рассматриваемых факторов бурый уголь Итатского месторождения вызывает наибольший интерес к исследованиям в направлении получения из него жидких продуктов.

### Выводы

Произведен термографический и ИК-спектроскопический анализ некондиционных углей месторождений Итатское (ИБ), Караканское (КК), Мунайское (МБ), Сарыкольское (СБ) и месторождения Республики Хакасия (ХБ), в результате которых определены угли, которые наиболее перспективны для исследования в углехимическом направлении.

Бурые угли ИБ, ХБ и МБ имеют наибольшую потерю массы и наименьшую энергию активации в инертной среде для диапазона температур, характерного для стадии первичного пиролиза.

Температура максимума  $T_{\text{max}}$  скорости разложения в инертной среде для углей Караканского (КК) и Сарыкольского (СБ) месторождений показала большие значения по сравнению с другими углями.

Наиболее целесообразными для исследований в направлении получения жидких продуктов являются бурые угли Итатского и Мунайского месторождений по показателям: а) значение суммарных потерь массы углей при термообработке в инертной среде, б) величина атомных отношений Н/С, в) общее содержание алифатических структур и г) значение величины относительной максимальной скорости пиролиза  $[(1/m_0) \cdot dm/dT]$ .

### Список литературы / References

[1] Chan Y.H., Syed Abdul Rahman S. N.F., Lahuri H. M., Khalid A. Recent progress on CO-rich syngas production via CO<sub>2</sub> gasification of various wastes: A critical review on efficiency, challenges and outlook, *Environmental Pollution*, 2021, 278.

[2] Заостровский А.Н. Петрографический состав как параметр, характеризующий свойства коксующихся углей. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*, 2023, № 3(157), 60–69 [Zaostrovsky, A.N. Petrographic composition as a parameter characterizing the properties of coking coals. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2023, № 3(157), 60–69 (in Russian)]

[3] Федорова Н.И., Грабовая Н.А., Исмагилов З.Р. Петрографическая характеристика сапропелитовых углей. *Химия в интересах устойчивого развития*, 2020, Т. 28, № 6, 604–609 [Fedorova N.I., Grabovaya N.A., Ismagilov Z.R. Petrographic characteristics of sapropelite coals. *Chemistry for Sustainable Development* 2020, Vol. 28, № 6, 604–609 (in Russian)]

[4] Xie W., Stanger R., Wall T. F., Lucas J. A., and Mahone M. R. Associations of physical, chemical with thermal changes during cooking as coal heats – Experiments on coal maceral concentrates. *Fuel*, 2015, 147, 1–8.

[5] Vasireddy S., Morreale B., Cugini A., Song C., and Spivey J.J. Clean liquid fuels from direct coal liquefaction: chemistry, catalysis, technological status and challenges. *Energy and Env. Sci.*, 2011, Vol. 4, No. 2, 311–345.

[6] Stach E., Mackowsky M. T., Teichmuller M., Taylor G. H., Chandra D., Teichmuller R. *Stach's textbook of coal petrology*. Berlin: Gebruder-Borntraege, 1981. 535 p.

[7] Соловьев Т.М., Цзе Х., Дуров Н.М., Состав и свойства бурых углей Кангаласского месторождения Республики Саха (Якутия). *Химическая промышленность сегодня*, 2022, № 2, 30–37 [Soloviev T.M., Jie H., Durov N.M., Composition and properties of brown coals from the Kangalas deposit in the Republic of Sakha (Yakutia). *Chemical Industry Today*, 2022, № 2, 30–37 (in Russian)]

[8] Van Krevelen D. W. Organic Geochemistry – Old and New, *Org. Geochem*, 1984, 6,1–10.

[9] Kaljuvee T., Keelman M., Trikkel A., Petkova V.J. *Therm. Anal. Calorim.* 2013. Vol. 113. N 3. P. 1063–1071.

[10] Shi L., Liu Q., Guo X., Wu W., Liu Zh., *Fuel Process. Technol.* 2013. Vol. 108. P. 125–132.

[11] Kim S.V., Baikenov M.I., Ibishev K.S. Effect of Nickel Nanopowder on the Thermal Degradation of Coal Tar Distillate, *Bulletin of the Karaganda University. Chemistry Series*, 2022, No. 2(106), P. 134–144.

[12] Бойко Е.А. *Комплексный термический анализ твёрдых органических топлив: Монография*. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2005. 383 с [Boyko E. A. Complex thermal analysis of solid organic fuels: Monograph. Krasnoyarsk: IPC KSTU, 2005, 383 p. (in Russian)]

- [13] Ingraham T.R., Marier P. Activation Energy Calculation from a Linearly-Increasing-Temperature Experiment, *Can. J. Chem. Eng.*, 1964. V. 42. N 4. P. 161–163.
- [14] Shi L., Liu Q., Guo X., Wu W., Liu Zh, *Fuel Process. Technol.* 2013. V. 108. P. 125–132.
- [15] Ibrahim M.M., Seehra M. S., Kech R. A., *Fuel Process. Technol.* 1990. V. 25. N 3. P. 215–226.
- [16] Janikowski S.K., Stenberg V.I. *Fuel*. 1989. Vol. 68. N 1. P. 95–99.
- [17] Петров И.Я., Ушаков К.Ю., Богомолов А.Р., Зябрев А.С., Трясунов Б.Г. Термическое разложение барзасских углей. *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*, 2021, Т. 64, № 3, 92–99 [Petrov I. Ya., Ushakov K. Yu., Bogomolov A. R., Zybrev A. S., Tryasunov B. G. Thermal decomposition of Barzas coals. *News of higher educational institutions. Series: Chemistry and chemical technology*, 2021, Vol.64, № 3, 92–99 (in Russian)]
- [18] Ушаков К.Ю., Петров И. Я., Богомолов А.Р. Исследование термических превращений низкометаморфизованных кузбасских углей в различных средах и прогнозирование их гидрируемости в процессах прямого ожижения. *Химия твердого топлива*, 2021, № 4, 3–12 [Ushakov K. Yu., Petrov I. Ya., Bogomolov A. R. Study of thermal transformations of low-metamorphosed Kuzbass coals in various environments and prediction of their hydrogenation in direct liquefaction processes. *Chemistry of Solid Fuels*, 2021, № 4, 3–12 (in Russian)]
- [19] Feng B., Bhatia S.K. On the validity of thermo gravimetric determination of carbon gasification kinetics, *Chemical Eng. Sci.*, 2002, Vol. 57, No. 15. P. 2907–2920.
- [20] Duzyol S. and Sensogut C. The relation between hydrophobic flocculation and combustion characteristics of coal, *Fuel Process. Technol.*, 2015, Vol. 137. P. 333–338
- [21] Плюснина И.И. *Инфракрасные спектры минералов*. М.: МГУ, 1977. 175 с [Plyusnina I.I. *Infrared spectra of minerals*. Moscow: Moscow State University, 1977. 175 p (in Russian)]
- [22] Наканиси К. *Инфракрасные спектры и строение органических соединений*. М.: Мир, 1965, 216 с [Nakanishi K. *Infrared spectra and structure of organic compounds*. Moscow: Mir, 1965, 216 p. (in Russian)]
- [23] Богомолов А.Р., Петров И. Я., Жалмагамбетова У.К. Термический анализ углей казахстанских месторождений, *Теплоэнергетика*, 2020, № 3, 24–32 [Bogomolov A. R., Petrov I. Ya., Zhalmagambetova U. K. Thermal analysis of coals from Kazakhstan deposits, *Thermal Power Engineering*, 2020, № 3, 24–32 (in Russian)]
- [24] Жалмагамбетова У.К. *Технология обеспечения изолированного поселка различными видами энергии (по приемлемой стоимости)*, дис. ... д-ра философии, Алматы, 2021, 98 с [Zhalmagambetova U. K. Technology of providing an isolated village with various types of energy (at an affordable cost), dis. ... Doctor of Philosophy, Almaty, 2021, 98 p. (in Russian)]

EDN: HRSAZP

УДК 551.465.062.5

## The Design of a New Remotely Operated Underwater Vehicle Gnom, Adapted for Mounting a Gamma-Ray Spectrometer

**Boris Y. Rozman\***,  
**Andrey V. Elkin and Evgenii A. Sherstov**  
*Shirshov Institute of Oceanology of the RAS*  
*Moscow, Russian Federation*

Received 23.10.2025, received in revised form 31.03.2026, accepted 29.04.2026

**Abstract.** Advances in modern robotics have permeated almost all spheres of human activity. Today, it is impossible to imagine conducting underwater research without the use of underwater robots – remotely operated underwater vehicles. Assessing the radiation situation of scuttled/sunken objects is an important part of underwater research. The article describes the process of adapting a new model of the GNOM ROV, which utilizes modern components available on the Russian market, for operation with specialized equipment – an underwater gamma-ray spectrometer.

**Keywords:** Remotely operated underwater vehicle, unmanned underwater vehicle, ROV, underwater research, underwater devices, control system, mathematical model, gamma-ray spectrometer, radiation.

**Acknowledgements.** The work was carried out as part of the state assignment of the Russian Ministry of Education and Science for the Institute of Oriental Studies of the Russian Academy of Sciences (theme No. FMWE-2024–0026).

Citation: Rozman B. Y., Elkin A. V., Sherstov E. A. The Design of a New Remotely Operated Underwater Vehicle Gnom, Adapted for Mounting a Gamma-Ray Spectrometer. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(3), 355–367. EDN: HRSAZP



## Разработка новой модели телеуправляемого необитаемого подводного аппарата «ГНОМ», адаптированного для установки гамма-спектрометра

**Б. Я. Розман, А. В. Елкин, Е. А. Шерстов**  
*Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН*  
*Российская Федерация, Москва*

**Аннотация.** Достижения современной робототехники проникли практически во все сферы деятельности человека. Проведение подводных исследований сейчас нельзя представить без использования подводных роботов – телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов. Оценка радиационной обстановки затопленных/затонувших объектов является важной частью подводных исследований. В статье рассмотрен процесс адаптации новой модели ТНПА ГНОМ, состоящей из современных комплектующих, доступных на российском рынке, для использования со специализированным оборудованием – подводным гамма-спектрометром.

**Ключевые слова:** телеуправляемый необитаемый подводный аппарат, подводный робот, ТНПА, подводные исследования, подводные устройства, система управления, математическая модель.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024–0026).

Цитирование: Розман Б. Я. Разработка новой модели телеуправляемого необитаемого подводного аппарата «ГНОМ» адаптированного для установки гамма-спектрометра / Б. Я. Розман, А. В. Елкин, Е. А. Шерстов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(3). С. 355–367. EDN: HRSAZP

### Введение

Лаборатория подводной видеотехники Института океанологии им П. П. Ширшова РАН более 20 лет занимается разработкой телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА) «ГНОМ». Линейка продукции представлена следующими моделями: «ГНОМ Микро», «ГНОМ Стандарт», «СуперГНОМ», «ГНОМ ПРО». Модели различаются рабочей глубиной, мощностью, комплектацией, что определяет их функциональность и сферу применения. В 2005–2006 годах возникла необходимость использования ТНПА для радиационного мониторинга – потребовалось оснастить подводный модуль «ГНОМ» гамма-спектрометром.

НИЦ «Курчатовский институт», который занимается разработкой спектрометров серии РЭМ (радиоэкологический модуль) с 1990 г., предоставил прототип спектрометра РЭМ-26, размещенного в капслоновой капсуле (рис. 1), а позднее и серийное изделие РЭМ-26 в титановом корпусе (рис. 2).

Установка гамма-спектрометра на данных этапах заключалась в балансировке подводного модуля ТНПА – компенсации веса устанавливаемого датчика. Для этого на «ГНОМ» определенным образом крепились дополнительные блоки плавучести – «поплавки». Датчик работал в автономном режиме – источник питания, запоминающее устройство спектрометра, детектор и блок электроники находились в общем прочном корпусе.

С начала 2020 г. НИЦ «Курчатовский институт» является ответственным исполнителем Госпрограммы «Научно-технологическое развитие Российской Федерации». В рамках этой работы был создан Комплекс технических средств радиационного мониторинга для оценки и кон-



Рис. 1. ТНПА «ГНОМ» с установленным прототипом спектрометра РЭМ-26

Fig. 1. GNOM ROV with a prototype spectrometer installed



Рис. 2. ТНПА «ГНОМ» со спектрометром РЭМ-26

Fig. 2. GNOM ROV with a prototype spectrometer installed

троля ядерной, радиационной и экологической безопасности объектов, затопленных/затонувших в Арктике. В состав Комплекса вошли в том числе подводные гамма-спектрометры серии РЭМ-4х, которые были использованы при проведении комплексных инженерно-радиационных обследований затопленной АПЛ К-27 и затонувшей АПЛ Б-159. Уже в 2024 г. спектрометры серии РЭМ-4х были включены в Реестр средств измерений РФ (сертификат № 93750–24).

Универсальный спектрометр РЭМ-4–50 с кристаллом ВГО Ø 50×100 мм предназначен для размещения на ТНПА малого и сверхмалого классов с возможностью проведения измерений либо в автономном режиме, либо с передачей спектрометрических данных в режиме реального времени.

Новая разработка лаборатории Подводной видеотехники – ТНПА «ГНОМ» с рабочим названием «Х» – «Икс», создана с учетом опыта, полученного при установке первых моделей спектрометров РЭМ: предусмотрены отдельный канал передачи данных и возможность внешнего питания устанавливаемого датчика.

Кроме того, ТНПА разработан с учетом использования комплектующих, которые доступны на российском рынке. На аппарате установлены одна (или две) видеокамеры с высоким разрешением FullHD. Подводный модуль оснащен восьмью двигателями, расположенными по векторной схеме.

При этом сохранены преимущества существующей линейки продукции: малые габариты, низкое энергопотребление, относительно тонкий кабель.

Для реализации данного проекта сотрудниками лаборатории в 2024–2025 годах выполнены следующие работы:

- Выполнено компьютерное моделирование и расчет гидродинамики ТНПА.
- Доработана система управления ТНПА.
- Доработано пользовательское программное обеспечение ТНПА.

### **1. Компьютерное моделирование и расчет гидродинамики ТНПА**

В целях оптимизации массогабаритных характеристик подводного модуля прочные корпуса спроектированы с учетом достижения плавучести, максимально приближенной к нейтральной. Таким образом, нейтральная плавучесть подводного модуля достигается без использования дополнительных элементов плавучести – «поплавков».

Спроектирован основной блок электроники – главный прочный корпус подводного модуля. Детали прочного корпуса были доработаны под использования более дешевого материала. Так как основной блок электроники также выполняет функцию плавучего объема, был увеличен внутренний объем прочного корпуса.

Конструкция корпуса светильника доработана по сравнению с существующим для использования электроники, дающей возможность работать от входного высокого напряжения, что позволило снизить выходную мощность вторичного источника питания, тем самым уменьшив стоимость и размеры этого преобразователя напряжения. Также была увеличена интенсивность светового излучения фонаря.

Проведена унификация лазерных указателей для снижения стоимости узла. Также для упрощения изготовления и обслуживания сборочной единицы прочный корпус был разделен на две части: непосредственно сам корпус и крышку.

Разработан новый одностепенной манипулятор. Для удешевления и уменьшения веса в воде, во всех деталях, где это возможно, алюминиевый сплав в качестве материала был заменен на полиоксиметилен (ПОМ–С).

Все узлы были доработаны с учетом требований по прочности для того, чтобы ТНПА мог эксплуатироваться на глубинах до 200 м включительно.

Для установки на подводный модуль гамма-спектрометра спроектирована «док-станция». Также предусмотрено наличие герморазъемов для подключения дополнительного оборудования.

В результате работ, выполненных на данном этапе, получена 3D-модель нового продукта (рис. 3, 4).

Выполнен расчет на прочность всех дорабатываемых узлов при воздействии гидростатического давления, равного 2,5 МПа. Ниже приведен скриншот математического моделирования расчета на прочность с использованием метода конечных элементов основного блока электроники. В наиболее уязвимых местах запас прочности превышает значение 2 (рис. 5).

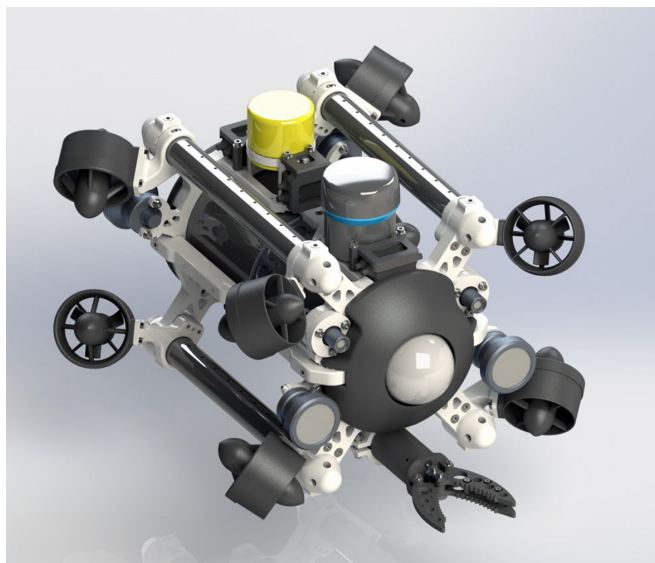


Рис. 3. 3D-модель ТНПА «ГНОМ X»

Fig. 3. 3D model of “GNOM X”

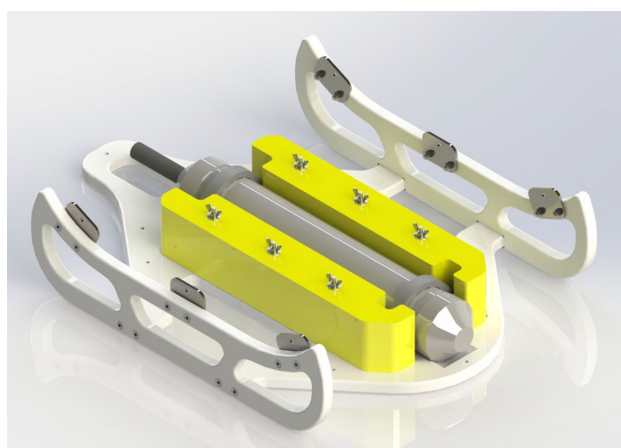


Рис. 4. 3D-модель «док-станции»

Fig. 4. 3D model of «dock station»

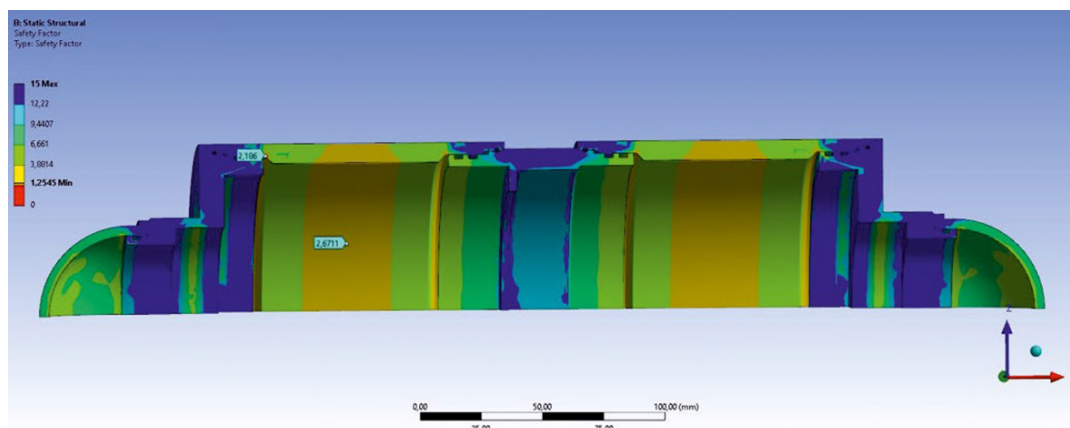


Рис. 5. Эпюра запаса прочности корпуса

Fig. 5. Plot of the hull safety margin

По результатам компьютерного моделирования гидродинамики ТНПА получены уравнения сил и моментов сопротивления, которые в дальнейшем будут использованы для создания математической модели ТНПА и синтезирования системы управления. Уравнение силы/момента сопротивления в общем случае имеет вид:

$$f(x) = c_1 x^2 + c_2 x. \quad (1)$$

Ниже приведены скриншоты моделирования движения ТНПА в жидкости в продольном направлении со скоростью 1 м/с. На рис. 6 проиллюстрирована расчетная траектория потока жидкости при движении ТНПА.

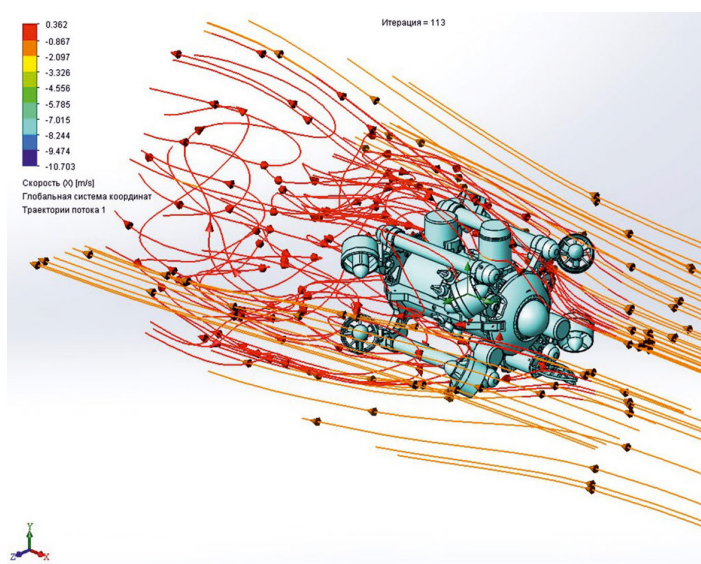


Рис. 6. Траектория потока жидкости

Fig. 6. The trajectory of the liquid flow

На рис. 7 приведены результаты моделирования гидродинамики ТНПА.

Полученные уравнения использованы для создания математической модели ТНПА и синтеза системы управления.

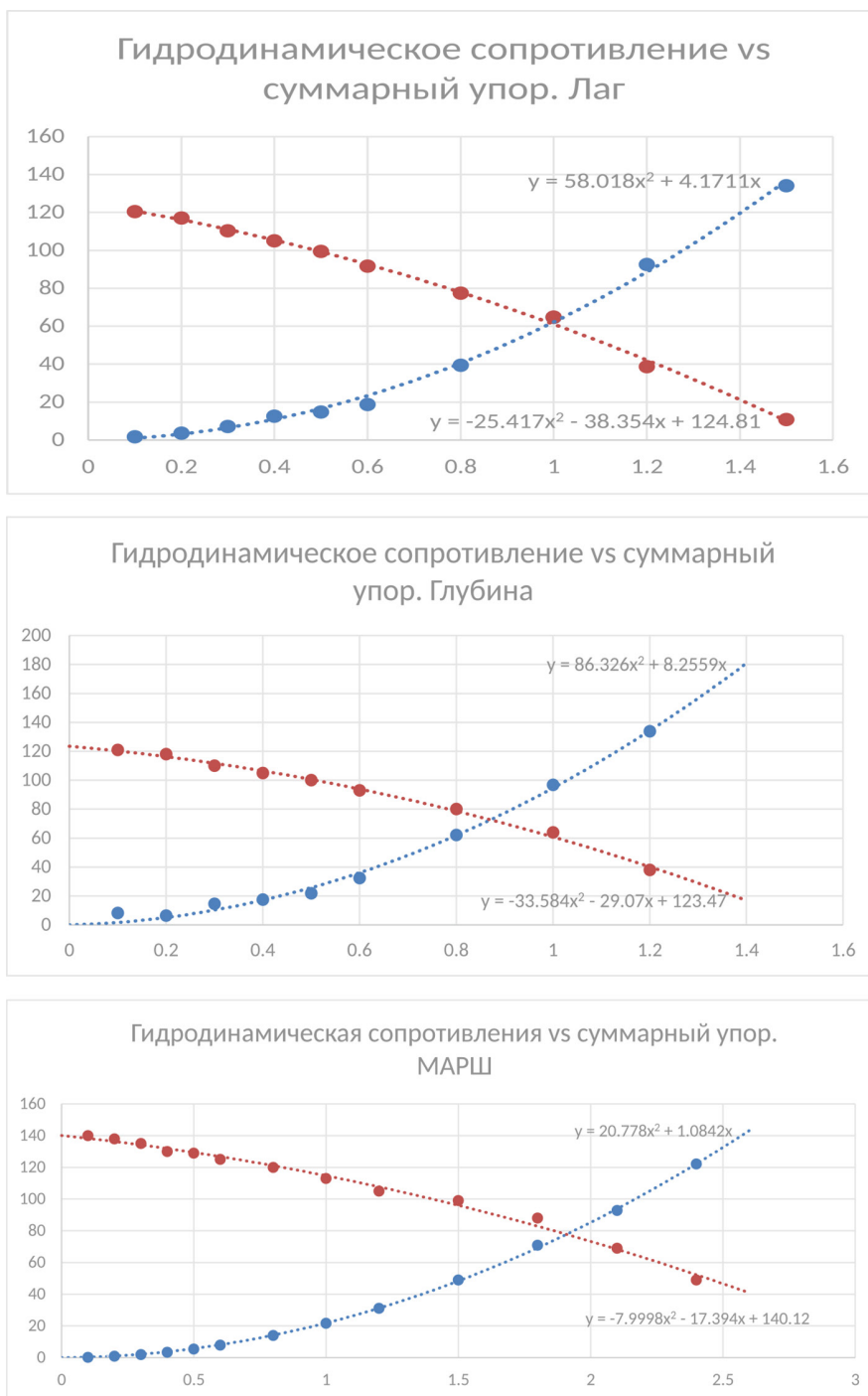


Рис. 7. Уравнения гидродинамических сил

Fig. 7. Equations of hydrodynamic forces

## 2. Доработка системы управления ТНПА «ГНОМ Х»

Основным отличием системы управления новым аппаратом от уже существующих моделей является возможность контроля и управления углами крена и дифферента, что обусловлено выбранной схемой расположения движителей.

Далее приведены результаты разработки системы управления углом дифферента.

При движении подводного аппарата по маршруту, без снаряженной нагрузки, возникает возмущающий момент по дифференту. Этот момент обусловлен компоновкой движительно-рулевого комплекса, где маршевые движители лежат не в горизонтальной плоскости, проходящей через центр масс подводного аппарата. Это приводит к возникновению возмущающего момента. Чтобы компенсировать этот момент, задействуются вертикальные движители, которые способны создавать компенсирующий момент при движении подводного аппарата. Таким образом, необходимо синтезировать систему управления углом дифферента.

На рис. 8 показана структурная схема математической модели аппарата с системой управления.

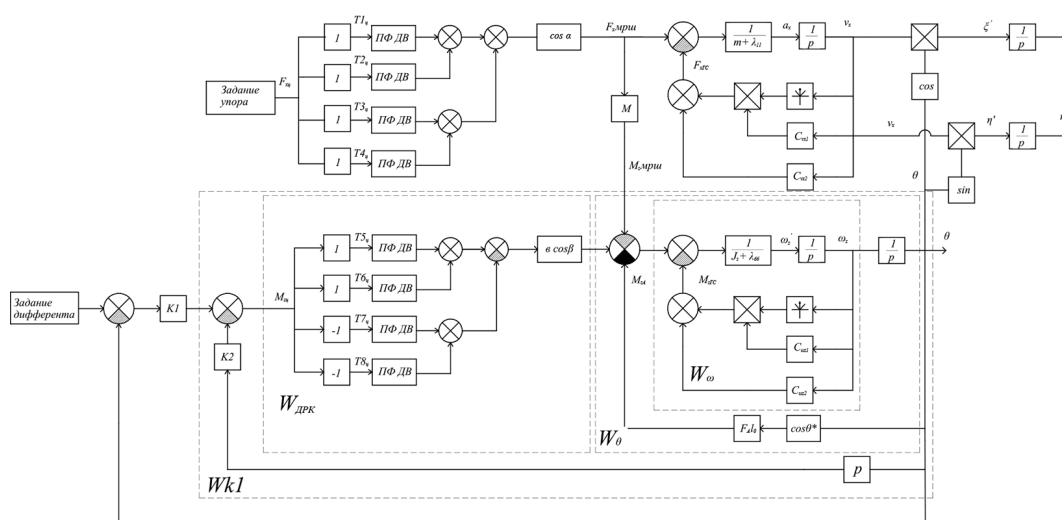


Рис. 8. Структурная схема математической модели аппарата

Fig. 8. Block diagram of the mathematical model of the device

Для составления структурной схемы часть параметров определяется из характеристик реальной системы, другая часть получается в результате вычислений. Также необходимо убедиться в устойчивости разработанной системы, что требует ее приведения к линеаризованному виду и последующей проверки критериев ее устойчивости.

На рис. 9 показана логарифмическая амплитудно-фазовая частотная характеристика системы, устойчивая при работе контура угла дифферента аппарата в худшем, с точки зрения устойчивости, случае.

По ней определяется возможный вид передаточной функции, а также ее постоянные времени, необходимые для синтеза коэффициентов K1 и K2 для заданных критериев качества.

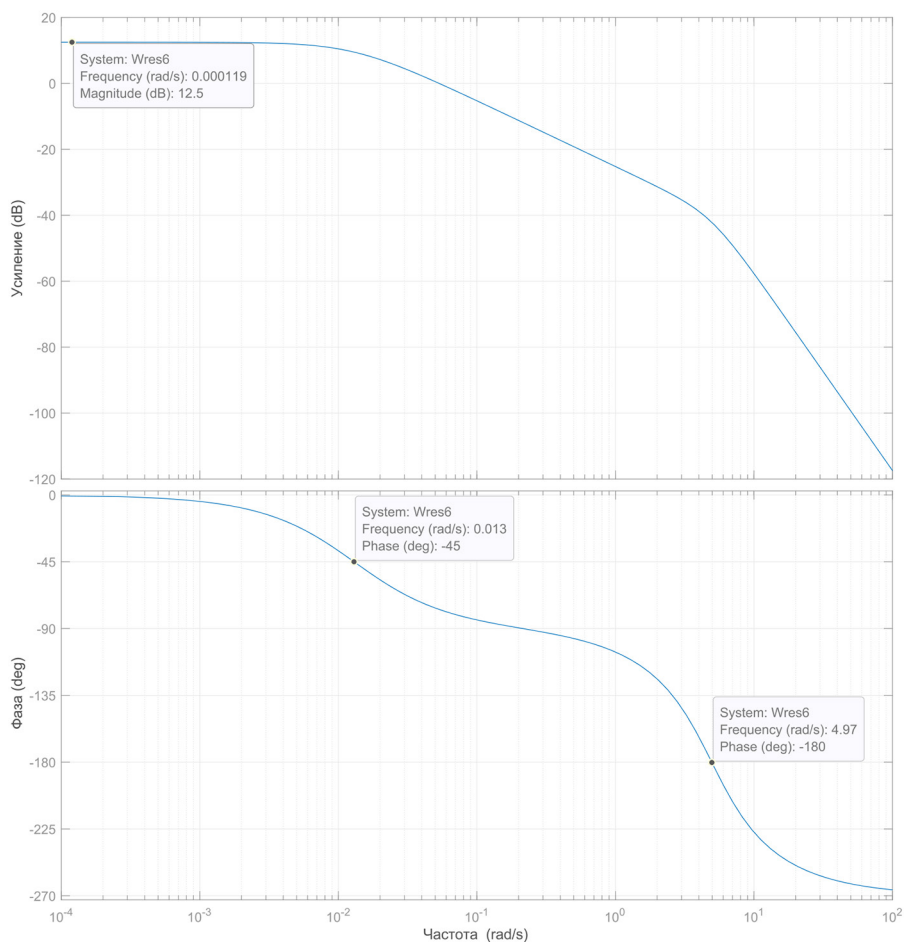


Рис. 9. Логарифмическая амплитудно-фазовая частотная характеристика системы

Fig. 9. Logarithmic amplitude-phase frequency response of the system

Анализируя полученную характеристику, можно сделать вывод, что передаточная функция  $Wk_1$  (2) раскладывается на аperiodическое и колебательное звено:

$$Wk_1 = \frac{K_{Wk_1}}{(T_{1Wk_1}p + 1)(T_{2Wk_1}^2 p^2 + 2\zeta_{2Wk_1} T_{2Wk_1} p + 1)}. \quad (2)$$

Получившаяся передаточная функция контура дифферента не имеет астатизма, значит, при возникновении постоянного возмущающего момента будет возникать статическая ошибка. Внесение ПИ-регулятора обеспечит системе астатизм и полную компенсацию ошибки управления.

На рис. 10 представлена полученная модель системы управления, разработанная в среде MatLab Simulink. Данная среда упрощает исследование системы.

Результатом работы является модель системы управления, удовлетворяющая критериям устойчивости и качества, параметры и процессы которой имеют незначительные погрешности относительно реальных характеристик системы.

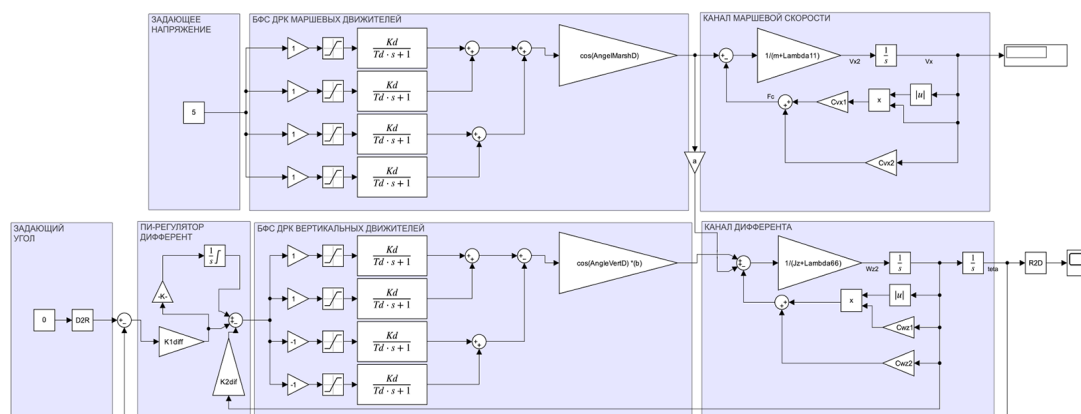


Рис. 10. Процесс компенсации дифферента при движении подводного аппарата со скоростью 1,41 м/с на нелинейной модели

Fig. 10. The trim compensation process

### 3. Доработка пользовательского программного обеспечения ТНПА

Проведена доработка программного обеспечения нового телеуправляемого необитаемого подводного аппарата. В частности, реализованы следующие функции, отсутствующие у предыдущих моделей:

- Реализованы режимы фотосъемки и видеозаписи (задание размера кадра, выбор кодека).
- Реализована возможность добавления текстовой информации на фото/видеозапись – при сохранении фото и перед началом записи видео пользователь может набрать комментарий, который будет добавлен на фото/видео.
- Реализованы функции записи с видеокамер, телеметрии (компас, датчик глубины), данных с дополнительного оборудования (гидролокатор кругового обзора) и функция синхронного воспроизведения видео, записи сонара и данных навигационной системы.
- Пользовательский интерфейс доработан в соответствии с новыми функциональными возможностями и адаптирован для использования с сенсорным экраном.

Ниже приведен скриншот доработанного пользовательского интерфейса (рис. 11).

Пользовательский интерфейс состоит из двух основных панелей:

- Панель видеовизуализации (до 6 панелей, включая панель гидролокатора кругового обзора и гидроакустической навигационной системы, в зависимости от конфигурации ТНПА)
- Панель управления (рис. 12).

Доработка пользовательского программного обеспечения позволила наиболее полно реализовать возможности новой модели ТНПА «ГНОМ X».

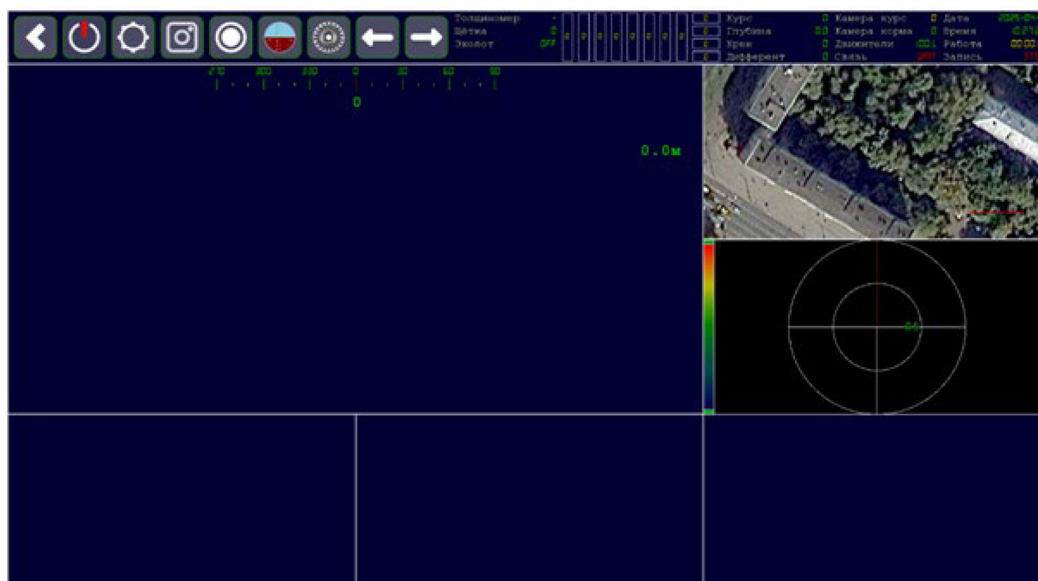


Рис 11. Скриншот пользовательского интерфейса

Fig. 11. Screenshot of the user interface



Рис. 12. Скриншот панели управления

Fig. 12. Screenshot of the control panel

### Заключение

Выполненная работа позволила изготовить опытный образец новой модели ТНПА «ГНОМ X» как в базовой конфигурации (рис. 13), так и в варианте с установленным гамма-спектрометром РЭМ-4–50 (рис. 14, 15).

В настоящее время НИЦ «Курчатовский институт» разрабатывает следующее поколение спектрометров РЭМ-5х. Создание нового комплекса ведется на базе его предшественников, с учетом многолетнего опыта их эксплуатации в природных условиях. Важным отличием спектрометров серии РЭМ-5х от предшественников станет широкое использование новых типов сцинтилляционных кристаллов, в том числе вольфрамата кадмия, бромида церия и йодида стронция. Однако отличия нового поколения спектрометров не повлияют на возможность их интеграции в ТНПА «ГНОМ».

В дальнейшем запланировано проведение природных испытаний опытных образцов ТНПА в различных конфигурациях, по результатам которых возможно потребуется доработка дизайна и конструкции новой модели, доработка программного обеспечения.

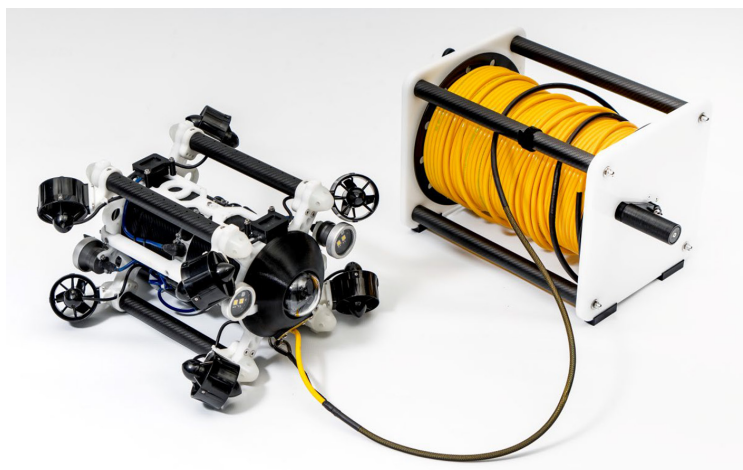


Рис. 13. Опытная модель ТНПА «ГНОМ X» в базовой конфигурации

Fig. 13. Prototype in the basic configuration

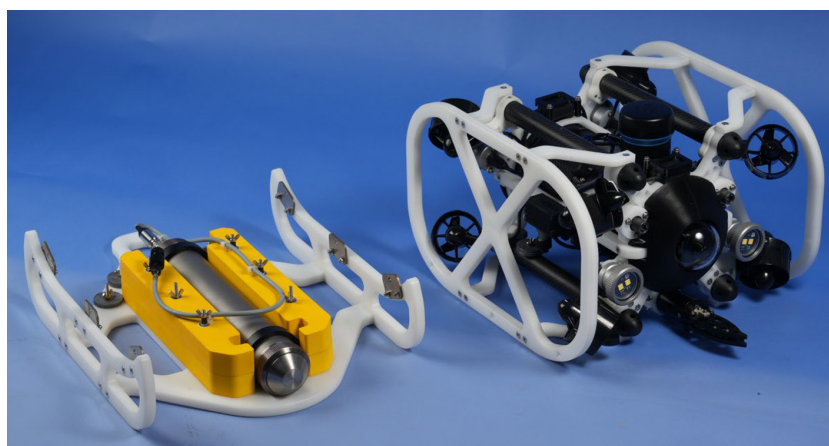


Рис. 14. Док-станция со спектрометром и ТНПА «ГНОМ»

Fig. 14. «Dock station» and “GNOM”

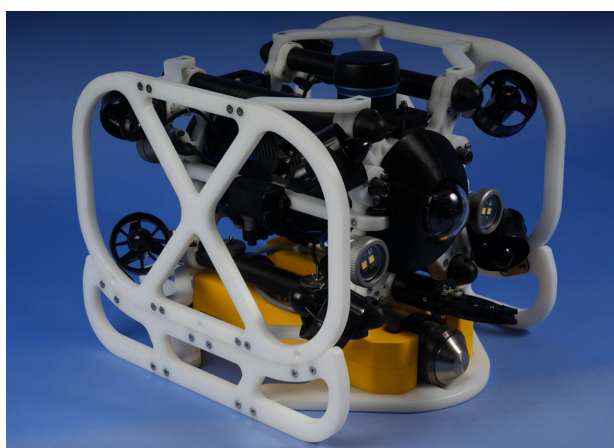


Рис 15. ТНПА «ГНОМ» с установленным спектрометром

Fig. 15. “GNOM” with a spectrometer installed

На заключительном этапе проекта запланирована разработка эксплуатационной и конструкторской документации.

Полученный опыт будет использован при интеграции гамма-спектрометра в остальные модели ТНПА «ГНОМ» – «ГНОМ ПРО» и «ГНОМ ПРО Вектор».

#### Список литературы / References

[1] Бесекерский В. А., Попов Е. П. *Теория систем автоматического управления* / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – СПб, Изд-во «Профессия», 2004.– 752 с. [Besekersky, V. A., and Popov, E. P. *Theory of Automatic Control Systems*. 4th Edition, Revised and Expanded. St. Petersburg: Professiya, 2004. 752 p. (in Russian)]

[2] Шматков А.А., Шматков А.Г., Сергейчиков О.А Современное состояние производства и перспективы развития серийных российских телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов // *Газовая промышленность*. 2020. № 2. С. 156–160 [Shmatkov A. A., Shmatkov A. G., Sergeychikov O. A. The current state of production and prospects for the development of serial Russian unmanned underwater vehicles // *Gas Industry*. 2020. No. 2. Pp. 156–160 (in Russian)]

[3] Виноградов Н. И., Гутман М. Л., Лев И. Г., Нисневич М. З. *Привязные подводные системы. Прикладные задачи статики и динамики*. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2000. 319 с. [Vinogradov N. I., Gutman M. L., Lev I. G., Nisnevich M. Z. *Tethered underwater systems. Applied Problems of Statics and Dynamics*. St. Petersburg: St. Petersburg State University Press, 2000. 319 p. (in Russian)]

[4] Филатов А. Л. Обзор существующих подходов к построению бионических подводных роботов // *Техн. проблемы освоения Мирового океана*. 2019. № 8. С. 167–172 [Filatov A. L. Review of Existing Approaches to Building Bionic Underwater Robots // *Tech. Problems of the World Ocean Development*. 2019. No. 8. Pp. 167-172 (in Russian)]

EDN: KUTQZC

УДК 629.7.054.07

## Method for Measuring Mutual Coordinates of UAVs in a Group Based on Radio Range Measurements with Relay

Dmitry D. Dmitriev\*,  
Andrey B. Gladyshev, Vasily N. Ratushnyak,  
Andrey V. Lykho and Evgeny D. Mikhov  
*Siberian Federal University  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 13.02.2026, received in revised form 21.02.2026, accepted 15.03.2026

**Abstract.** This article addresses the pressing issue of organizing high-precision mutual navigation in a swarm of unmanned aerial vehicles (UAVs). It provides a brief analysis of centralized, decentralized (swarm), and hybrid approaches to solving this problem. Particular attention is given to hybrid methods combining GNSS and ultra-wideband (UWB) radio systems. The disadvantages of these methods, including high communication channel load, difficulty synchronizing and merging local coordinate systems, and limited range, are highlighted. As an alternative, a radio ranging method with relay is proposed, allowing for measuring the distances between the leader UAV and the other UAVs in the group. An improved method for mutual navigation, combining radio ranging and relay approaches, is described in detail. A step-by-step algorithm is presented that allows, based on cyclic measurements, to determine not only the distances from the leader to each UAV, but also all mutual distances between group members. Based on this data, formulas are derived for calculating the coordinates of all UAVs in a local Cartesian system associated with the leader UAV.

**Keywords:** satellite radio navigation, GLONASS, unmanned aerial vehicles, group of unmanned aerial vehicles, relative navigation measurements, mutual navigation, ranging method of measuring range, local coordinate system.

**Acknowledgements.** The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 25–19–20070, <https://rscf.ru/project/25–19–20070/>, and a grant from the Krasnoyarsk Regional Science Foundation.

Citation: Dmitriev D. D., Gladyshev A. B., Ratushnyak V. N., Lykho A. V., Mikhov E. D. Method for Measuring Mutual Coordinates of UAVs in a Group Based on Radio Range Measurements with Relay. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(3), 368–376. EDN: KUTQZC



© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: [ddmitriev@sfu-kras.ru](mailto:ddmitriev@sfu-kras.ru)

## Метод определения взаимных координат БПЛА в группе на основе радиодальномерных измерений с ретрансляцией

Д. Д. Дмитриев, А. Б. Гладышев,  
В. Н. Ратушняк, А. В. Лыхо, Е. Д. Михов  
*Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, Красноярск*

**Аннотация.** Статья посвящена актуальной проблеме организации высокоточной взаимной навигации в группе (рое) беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). В работе дан краткий анализ ключевых подходов к решению этой задачи: централизованного, децентрализованного (роевого) и гибридного. Особое внимание уделено гибридным методам, сочетающим использование ГНСС и ультраширокополосных (UWB) радиотехнических систем. Показаны недостатки этих методов: высокая загрузка каналов связи, сложность синхронизации и объединения локальных систем координат, а также ограниченная дальность действия. В качестве альтернативы предложен радиодальномерный метод с ретрансляцией, позволяющий измерять расстояния между БПЛА-лидером и остальными БПЛА группы. Подробно описан усовершенствованный метод взаимной навигации, комбинирующий радиодальномерный и ретрансляционный подходы. Представлен пошаговый алгоритм, позволяющий по результатам циклических измерений определить не только расстояния от лидера до каждого БПЛА, но и все взаимные расстояния между членами группы. На основе этих данных выведены формулы для расчета координат всех БПЛА в локальной декартовой системе, связанной с БПЛА-лидером.

**Ключевые слова:** спутниковая радионавигация, ГЛОНАСС, беспилотные летательные аппараты, группа беспилотных летательных аппаратов, относительные навигационные измерения, взаимная навигация, дальномерный метод измерения дальности, локальная система координат.

**Благодарности.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25–19–20070, <https://rscf.ru/project/25–19–20070/>, гранта Красноярского краевого фонда науки.

Цитирование: Дмитриев Д. Д. Метод определения взаимных координат БПЛА в группе на основе радиодальномерных измерений с ретрансляцией / Д. Д. Дмитриев, А. Б. Гладышев, В. Н. Ратушняк, А. В. Лыхо, Е. Д. Михов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(3). С. 368–376. EDN: KUTQZC

### Введение

Применение групп, или роев, беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является одной из наиболее динамично развивающихся и актуальных технологических тенденций последнего десятилетия. Актуальность обусловлена комплексом качественных преимуществ, которые обеспечивает роевой подход по сравнению с использованием одиночных БПЛА, а также широким спектром решаемых задач. К примеру, группа БПЛА может одновременно обследовать обширные территории, выполняя задачу существенно быстрее одиночного БПЛА (например, при картографировании местности или проведении поисково-спасательных операциях), создавать распределенные сети связи и ретрансляции, осуществлять совместный перенос грузов [1]. Возможен синергетический эффект от применения роя за счет того, что разные БПЛА в нем могут выполнять различные функции (разведка, целеуказание, поражение, оценка ущерба) [2]. Кроме того, достаточно большая группа БПЛА не имеет единой точки отказа. Потеря не-

скольких членов группы из-за технических неисправностей или противодействия не приводит к провалу выполнения задачи в целом. Функции перераспределяются между оставшимися БПЛА. В качестве преимущества также можно указать и возможность применения алгоритмов роевого интеллекта для управления группой БПЛА, которые позволяют группе динамически адаптироваться к изменяющейся обстановке, самостоятельно перестраиваясь и меняя цели без прямого вмешательства оператора (например, обход неожиданных препятствий, преследование движущейся цели) [3]. Применение группы БПЛА имеет и существенный экономический эффект. Использование множества сравнительно простых и дешевых БПЛА часто экономически выгоднее, чем создание одного сложного и дорогого аппарата, способного решать аналогичные задачи [4].

### 1. Методы навигации БПЛА в составе группы

Навигация БПЛА внутри группы – это краеугольный камень всей технологии группового применения, требующий решения задач взаимного позиционирования, избегания столкновений и совместного движения к цели на всех этапах функционирования группы [5, 6]. Точная информация о взаимном местоположении БПЛА внутри группы является необходимым условием для поддержания положения в строю и исключения летных происшествий [7]. Существует несколько основных подходов и их комбинаций к организации навигации БПЛА внутри группы [8]:

- централизованный – все БПЛА получают команды напрямую от центральной станции управления, которая формирует траектории движения для исключения столкновений, передавая при этом по линиям связи сигналы управления для каждого из участников группы. В качестве основных недостатков следует отметить, что этот подход предполагает значительную вычислительную нагрузку на центральную станцию управления и, кроме того, передачу больших объемов информации;

- децентрализованный на основе взаимного обмена данными (роевой подход) – каждый БПЛА является независимым агентом, который автономно определяет свои навигационные параметры – абсолютные координаты и положение внутри группы на основании данных, полученных от других членов группы по каналам связи. На основе собственных алгоритмов роевого интеллекта каждый из членов группы самостоятельно принимает решение о своем движении в составе группы, поддерживая минимальные (или заданные полетным заданием) расстояния от соседних БПЛА;

- гибридный (смешанный) – решения об общем планировании маршрутов, выполняемых группой, принимаются БПЛА-лидером на основе навигационной информации от подчиненных БПЛА. В данном случае БПЛА-лидер использует бортовую навигационную систему на основе ГНСС-приемников, инерциальных и оптико-электронных навигационных систем для определения абсолютных координат, а члены группы ориентируются относительно него, используя бортовые сенсоры (оптические, лидары, радиотехнические).

Учитывая достаточно жесткие требования к бортовым навигационным средствам БПЛА по массе, габаритам и энергопотреблению, для навигации БПЛА внутри группы наибольшее применение нашли гибридные подходы, основанные на децентрализованной навигации с использованием ГНСС-приемников и ультраширокополосных радиотехнических навигационных систем (UWB – Ultra-WideBand) на основе UWB-модулей [9]. UWB-технология стала фактическим стандартом для высокоточного относительного позиционирования в роях БПЛА благодаря

своей устойчивости к помехам, высокой точности (до 10 см) и низкому энергопотреблению. В подобной системе каждый БПЛА оснащен автономным UWB-модулем, способным напрямую измерять расстояние до любого другого модуля в пределах прямой видимости. Все модули равноправны и обмениваются двусторонними сообщениями по протоколу Two-Way Ranging (TWR) или его улучшенных версий Double-Sided TWR (DS-TWR) и Symmetrical Double-Sided TWR (SDS-TWR) [10, 11]. Каждый БПЛА, получив набор расстояний до соседних БПЛА группы, самостоятельно вычисляет свое относительное положение в собственной локальной системе координат. Основным недостатком данного подхода являются сложные распределенные алгоритмы для совмещения локальных систем координат каждого БПЛА с общей системой координат группы.

Более простая реализация приведенного выше алгоритма возможна при иерархическом построении группы. В данном случае назначается БПЛА-лидер с опорным UWB-модулем, до которого производится измерение расстояний другими членами группы. При этом необходимо осуществлять измерение расстояний до нескольких лидеров (4 и более) с помощью методов TWR или Time Difference of Arrival (TDoA) для реализации алгоритмов трилатерации [12]. В качестве недостатка следует отметить необходимость высокоточной навигации БПЛА-лидеров, организации обмена данными между ними, а также синхронизацию бортовых шкал времени отдельных БПЛА при использовании протокола TDoA.

Приведенные выше методы обладают некоторыми существенными недостатками – большая загрузка каналов связи при большом количестве БПЛА в группе, высокие требования к вычислительным ресурсам для совмещения локальных систем координат отдельных БПЛА в единую систему координат группы. Кроме того, UWB-модули обладают сравнительно невысоким энергетическим потенциалом, что резко ограничивает их дальность действия.

## 2. Метод определения взаимных координат БПЛА в группе

Если имеется возможность ограничиться измерением расстояний между отдельными БПЛА и БПЛА-лидером, то можно предложить другой метод, для реализации которого достаточно оснастить БПЛА группы ретрансляторами, а БПЛА-лидер будет выступать в роли опорного [13]. Суть метода заключается в организации локальной радионавигационной системы, при этом в качестве опорного БПЛА будет использоваться БПЛА-лидер, измерения дальностей до всех БПЛА будут производиться относительно него. Рассмотрим более подробно организацию такой системы. БПЛА-лидер формирует и излучает навигационный широкополосный сигнал, модулированный дальномерным кодом на основе M-последовательности или ее разновидностей (коды Голда, Касами и т.п.). Ретрансляторы, размещенные на БПЛА, принимают данный сигнал, переносят в полосу частот, выделенную для каждого ретранслятора, и излучают в направлении БПЛА-лидера (рис. 1).

В отличие от протокола TDoA, в данном методе отдельные БПЛА группы не фиксируют время приема радионавигационного сигнала, а измерение расстояний  $d_i$  до каждого БПЛА производится на БПЛА-лидере по формуле (1).

$$d_i = c \cdot \left( \frac{t_i}{2} - t_{\text{delay}} \right), \quad (1)$$

где  $t_i$  – время задержки от момента излучения дальномерного сигнала до момента приема ретранслированного;  $c$  – скорость света;  $t_{\text{delay}}$  – время задержки дальномерного сигнала в ретрансляторе.

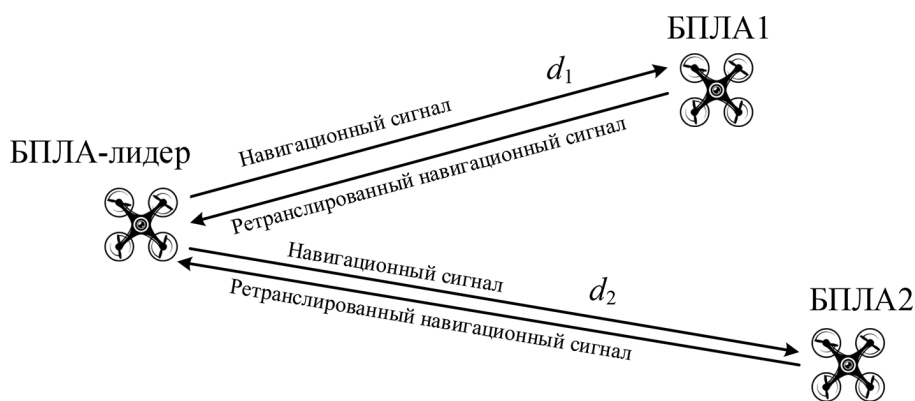


Рис. 1. Метод измерения расстояний между БПЛА-лидером и БПЛА группы с использованием ретрансляции

Fig. 1. Method of measuring the distance between the leader UAV and the group UAV using relay

Значения частот дальномерного сигнала, излучаемого БПЛА-лидером, можно выбирать как в рабочем диапазоне частот ГНСС, так и в каком-либо другом рабочем диапазоне. Для исключения взаимного влияния сигналов ГНСС и дальномерного сигнала частота дальномерного сигнала формируется в полосе частот, свободных от стандартных спутниковых радионавигационных сигналов стандартной точности [14]. Приняв ширину полосы частот дальномерного сигнала БПЛА-лидера, равную 5 МГц – 1593...1598 или 1605...1610 МГц, получим достижимую погрешность измерения дальности, сопоставимую с погрешностью измерения координат ГНСС-приемниками по сигналам высокой точности. Кроме того, в предлагаемой структуре в качестве дальномерного сигнала можно использовать сигналы и с кодовым разделением, то есть CDMA-сигналы (Code Division Multiple Access – множественный доступ с кодовым разделением). При этом если модулирующая функция дальномерного кода сигналов БПЛА-лидера отличается от применяемой при модуляции сигналов спутниковых навигационных систем, то можно выбирать любую частоту излучения сигналов в пределах разрешенного диапазона частот.

Достоинством предложенного метода является его простота реализации – БПЛА группы оснащаются только ретрансляторами, вся обработка сигналов производится только на БПЛА-лидере, не требуется синхронизация бортовых шкал времени и пересчет локальных систем координат отдельных БПЛА в единую. Его основным недостатком является возможность измерения расстояния только между БПЛА-лидером и отдельными БПЛА группы, что практически полностью обесценивает достоинства группового применения за исключением редких ситуаций.

В качестве альтернативы можно предложить метод взаимной навигации БПЛА в группе, совмещающий использование запросных методов (TWR) и ретрансляции (рис. 2).

Подробно рассмотрим предложенный алгоритм определения координат отдельных БПЛА в группе. Измерение расстояний от БПЛА-лидера до всех членов группы производится в несколько этапов, при этом один из БПЛА группы выступает в роли ответчика, остальные – ретрансляторов. При расчетах примем, что задержки, возникающие в ответчиках и ретрансляторах БПЛА, могут быть откалиброваны с высокой точностью и учтены при измерении времени задержки на БПЛА-лидере.

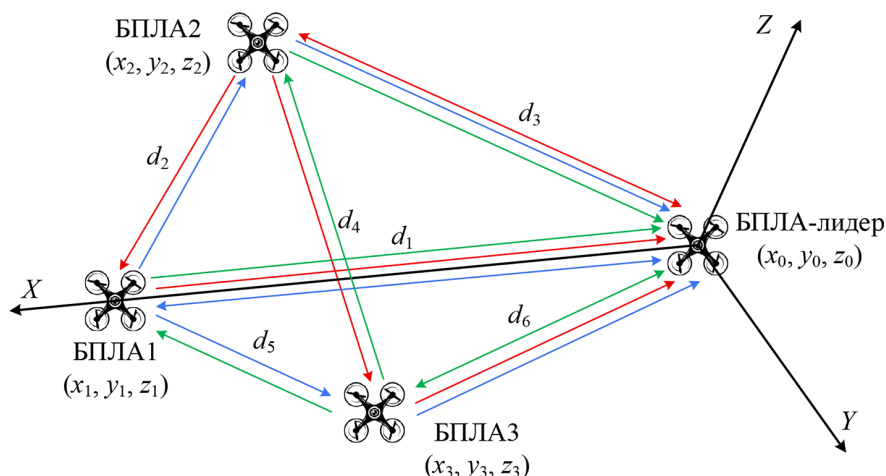


Рис. 2. Метод определения взаимных координат БПЛА в группе на основе радиодальномерных измерений с ретрансляцией

Fig. 2. Method for determining the mutual coordinates of UAVs in a group based on radio range measurements with relay

На первом этапе БПЛА-лидер формирует и излучает запросный навигационный сигнал для БПЛА1, выступающий ответчиком (синие стрелки на рис. 2). Он принимает этот сигнал, формирует ответный сигнал и излучает его. БПЛА2 и БПЛА 3, выступая в роли ретрансляторов, принимают этот ответный сигнал и ретранслируют его в направлении БПЛА-лидера. Для однозначного определения пути прохождения навигационных сигналов БПЛА-ретрансляторы добавляют в ответный сигнал идентификационную информацию. Таким образом, БПЛА-лидер принимает три ответных сигнала, по времени задержки которых по (1) относительно времени излучения запросного сигнала определяется три расстояния:

$d_1$  – расстояние между БПЛА-лидером и БПЛА1;

$r_{1,2} = d_2 + d_3$  – расстояние между БПЛА-лидером и БПЛА1 через БПЛА2;

$r_{1,3} = d_5 + d_6$  – расстояние между БПЛА-лидером и БПЛА1 через БПЛА3.

На втором этапе БПЛА-лидер формирует и излучает запросный навигационный сигнал для БПЛА2, выступающего ответчиком (красные стрелки на рис. 2), а БПЛА1 и БПЛА3 в этом случае будут выступать ретрансляторами. По завершении этапа БПЛА-лидер также определяет три расстояния:

$d_3$  – расстояние между БПЛА-лидером и БПЛА2;

$r_{2,1} = d_2 + d_1$  – расстояние между БПЛА-лидером и БПЛА2 через БПЛА1;

$r_{2,3} = d_4 + d_6$  – расстояние между БПЛА-лидером и БПЛА2 через БПЛА3.

Используя результаты измерения первого и второго этапов, определяется расстояние между БПЛА1 и БПЛА2  $d_2$  как разность между  $r_{2,1}$  и ранее измеренным  $d_1$ .

В ходе третьего этапа производится измерение расстояния между БПЛА-лидером и БПЛА3  $d_6$  (зеленые стрелки на рис. 2) и вычисление расстояний между БПЛА1 и БПЛА3  $d_5$  и между БПЛА2 и БПЛА3  $d_4$  с использованием результатов предыдущих этапов.

Расчет координат всех БПЛА в группе производится на борту БПЛА-лидера в локальной системе координат, центр которой находится в центре масс БПЛА-лидера, ось абсцисс про-

ходит через центр масс одного из БПЛА группы (на рис. 2 – через центр масс БПЛА1), а центр масс БПЛА3 находится в положительном квадранте плоскости  $XOY$ . Определим координаты всех БПЛА группы в выбранной системе координат. Исходя из условий, координаты БПЛА-лидера равны  $(0, 0, 0)$ , БПЛА1 –  $(d_1, 0, 0)$ .

Учитывая, что центр масс БПЛА3 находится в плоскости  $XOY$ , его координата  $z = 0$ . Рассчитаем координаты  $x_3, y_3$ , используя известные соотношения для длин векторов  $d^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2$ , где  $x, y, z$  – координаты начальной точки,  $x_i, y_i, z_i$  – координаты конечной точки. Из известных расстояний  $d_5$  и  $d_6$  имеем:

$$\begin{cases} x_3^2 + y_3^2 = d_6^2, \\ (x_3 - d_1)^2 + y_3^2 = d_5^2. \end{cases} \quad (2)$$

Вычитая первое уравнение из второго, получим  $x_3^2 - 2x_3d_1 + d_1^2 + y_3^2 - (x_3^2 + y_3^2) = d_5^2 - d_6^2$ . Упростив и выразив  $x_3$ , получим:

$$x_3 = \frac{d_1^2 + d_6^2 - d_5^2}{2d_1}. \quad (3)$$

Откуда

$$y_3 = \sqrt{d_6^2 - x_3^2}. \quad (4)$$

Произведем расчет координат БПЛА2. Из известных расстояний  $d_2$  и  $d_3$  имеем:

$$\begin{cases} x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 = d_3^2, \\ (x_2 - d_1)^2 + y_2^2 + z_2^2 = d_2^2. \end{cases} \quad (5)$$

Решая (5) относительно  $x_2$ , получим:

$$x_2 = \frac{d_1^2 + d_3^2 - d_2^2}{2d_1}. \quad (6)$$

Используя известное расстояние между БПЛА2 и БПЛА3  $d_4$ , получим систему уравнений:

$$\begin{cases} x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 = d_3^2, \\ (x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2 + z_2^2 = d_4^2. \end{cases} \quad (7)$$

Раскрыв второе уравнение системы (7)  $(x_2 - x_3)^2 + y_2^2 - 2y_2y_3 + y_3^2 + z_2^2 = d_4^2$  и подставив в него  $y_2^2 + z_2^2 = d_3^2 - x_2^2$ , получим:

$$y_2 = \frac{(x_2 - x_3)^2 + d_3^2 - x_2^2 + y_3^2 - d_4^2}{2y_3}. \quad (8)$$

$$z_2 = \sqrt{d_3^2 - x_2^2 - y_2^2}. \quad (9)$$

Таким образом, получены аналитические выражения для вычисления координат всех БПЛА в группе. Достоинством данного метода является возможность строгого решения – в отличие от общепринятых способов решения навигационных задач, нет необходимости применять итерационные методы наименьших квадратов для решения систем уравнений.

### Заключение

Таким образом, актуальность применения групп (роев) БПЛА определяется их способностью совершать качественный скачок в продуктивности, живучести и функциональности. Они трансформируют подходы к решению задач в военной и гражданской сферах, предлагая экономически эффективные, масштабируемые и устойчивые решения. Роевые технологии для БПЛА перешли из разряда экспериментальных в разряд стратегически важных, определяющих облик современных и будущих операций, что делает инвестиции в развитие этой области критически важными для государств и корпораций.

Одной из наиболее сложных задач, сдерживающих активное применение БПЛА в составе групп, является их взаимная навигация. Наиболее перспективным следует признать децентрализованный (роевой, на основе взаимобмена данными) и гибридный (с использованием БПЛА-лидера) подходы для организации навигации внутри группы. Децентрализованный подход потенциально обеспечивает наилучшую точность позиционирования и гибкость формирования роя, однако он предъявляет наиболее жесткие требования к вычислительным возможностям бортовых систем управления и каналам обмена данными, обусловленные требованиями совмещения локальных систем координат каждого БПЛА в единую систему координат группы и достаточно плотным трафиком обмена данными между БПЛА по принципу «каждый с каждым».

В качестве компромисса можно рассмотреть гибридные методы, сочетающие использование ГНСС и локальные радиотехнические системы навигации. Если имеется возможность ограничиться измерением расстояний между отдельными БПЛА и БПЛА-лидером, то можно применить метод, основанный на радиодальномерном принципе с ретрансляцией. Применение усовершенствованного метода, совмещающего использование запросных методов и метода ретрансляции навигационных сигналов, позволяет за несколько измерений при помощи навигационного сигнала, излучаемого с БПЛА-лидера, определить расстояния между всеми БПЛА группы. Определение координат в данном случае производится в единой локальной системе координат с использованием строгих аналитических выражений, что резко снижает требования к вычислительным возможностям. Достоинствами предложенного подхода являются простота реализации (ретрансляторы на БПЛА можно реализовать на основе программно-определяемого радио, что проще и дешевле полноценных UWB-модулей), отсутствие необходимости в сложной синхронизации и в объединении локальных систем координат, а также снижение общей нагрузки на каналы связи. Основным недостатком можно признать централизованный характер системы, где отказ БПЛА-лидера может привести к потере навигации всей группой, что противоречит одному из базовых принципов роя – отсутствию единой точки отказа.

### Список литературы / References

- [1] Al-zahrani B., Oubbati Omar Sami, Barnawi A., Atiquzzaman Mohammed, Alghazzawi D. UAV assistance paradigm: State-of-the-art in applications and challenges. *Journal of Network and Computer Applications*, 2020, 166 (1).
- [2] Kurochkin S. Yu., Tachkov A. A. Methods of Formation Control for a Group of Mobile Robots (a Review). *Mechatronics, Automation, Control*, 2021, 22(6), 304–312.
- [3] Сахопотин Г. А. Исследование местности с помощью группы роботов, управляемых алгоритмом роевого интеллекта. *Вестник Кузбасского государственного технического универ-*

*сумма*, 2015, 4(110), 67–71. [Sakhopotinov G. A. Land Exploring with the Help of Group of Robots Controlled by a Swarm Intelligence Algorithm. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2015, 4(110), 67–71 (in Russian)]

[4] Селин А.И., Туркин И.К. Обзор целевых объектов применения беспилотных летательных аппаратов, работающих в составе группы. *Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации*, 2023, 26(2), 91–105. [Selin A. I., Turkin I. K. Review of Target Objects for the Group-Operated Unmanned Aerial Vehicles Application. *Civil Aviation High Technologies*, 2023, 26 (2), 91–105 (in Russian)]

[5] Титков И.П., Карпунин А.А. Координированное управление формацией группы БПЛА с обеспечением траекторной безопасности в виде желаемых положений на пространственных траекториях (часть 1). *Информационно-измерительные и управляющие системы*, 2022, 20(4), 25–35. [Titkov I. P., Karpunin A. A. Coordinated Control of the Formation of a Group of UAVs with Ensuring Trajectory Safety in the Form of Desired Positions on Spatial Trajectories (part 1). *Information-measuring and Control Systems*, 2022, 20(4), 25–35 (in Russian)]

[6] Селин А.И., Туркин И.К. Проектирование беспилотных летательных аппаратов, применяемых в составе групп аппаратов. *Авиация и космонавтика: тезисы 22-ой Международной конференции*. Москва: Издательство «Перо», 2023. 47–48. [Selin A. I., Turkin I. K. Design of unmanned aerial vehicles used as part of groups of devices. *Aviation and Cosmonautics, proceedings of the 22nd International Conference*. Moscow: Pero Publishing House, 2023. 47–48 (in Russian)]

[7] Tong P., et al. Multi-UAV Collaborative Absolute Vision Positioning and Navigation: A Survey and Discussion. *Drones*, 2023, 7(261).

[8] Муслимов Т.З. Методы и алгоритмы группового управления беспилотными летательными аппаратами самолетного типа. *Системная инженерия и информационные технологии*. 2024. 6(16). 3–15. [Muslimov T. Z. Methods and Algorithms for Formation Control of Fixed Wing Unmanned Aerial Vehicles. *Systems Engineering and Information Technologies*. 2024. 6(16). 3–15 (in Russian)]

[9] Krasnov T. V. Investigation of localization accuracy in UWB relative ranging system. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 2094.

[10] Zafari F., Gkelias A., Leung K. A survey of indoor localization systems and technologies. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, 21(3), 2568–2599.

[11] Gladyshev A. B., Dmitriev D. D., Ratushnyak V. N., Zhgun A. V., Golubyatnikov M. A. Determining the Relative Position of Unmanned Aerial Vehicles in a Group. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2025, 18(5), 649–659.

[12] Tiemann J., Eckermann F., Wietfeld C. ATLAS – an open-source TDOA-based Ultra-wideband localization system. *2016 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*. Alcalá de Henares, Spain, 2016, 1–6.

[13] Dmitriev D. D., Gladyshev A. B., Ratushnyak V. N., Mikhov E. D. Use of a Group of Unmanned Aerial Vehicles to Detect Radio-Emitting Devices. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2025, 18(7), 931–939.

[14] Gladyshev A. B., Dmitriev D. D., Veysov E. A., Tyapkin V. N. A hardware-software complex for modelling and research of near navigation based on pseudolites. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, 803.

EDN: OJDXZQ

УДК 528.8.04

## Satellite Monitoring of Atmospheric Carbon Dioxide in Krasnoyarsk Krai

Irina Yu. Botvich\*, Tamara I. Pisman,  
Galina S. Vysotskaya and Mark I. Rachinskiy  
*Institute of Biophysics SB RAS  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 06.10.2025, received in revised form 21.02.2026, accepted 15.03.2026

**Abstract.** The present study analyzes the year-to-year (2003–2021) and seasonal variations in concentration of atmospheric CO<sub>2</sub>, Land Surface Temperature (LST), and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in Krasnoyarsk Krai, based on satellite data. Over the study period, the annual average concentration of atmospheric CO<sub>2</sub> had increased by 41 ppm. Analysis of seasonal variations in CO<sub>2</sub> concentration demonstrated a carbon dioxide decrease in summer and an increase in winter. Positive trends were revealed in the annual average LST and the average NDVI values for a period between March and October in Krasnoyarsk Krai over 2001–2023. Analysis of the spatial distribution of CO<sub>2</sub> in the atmosphere of Krasnoyarsk Krai in 2021 revealed higher CO<sub>2</sub> concentrations (about 415 ppm) in the west of Krasnoyarsk Krai, as far as the Yenisei River. Lower CO<sub>2</sub> concentrations (about 414 ppm) were found in the northern, island areas (ice-covered area and Arctic deserts) and in the regions of the Central Siberian Plateau and Sayan Mountains. Analysis of correlation of the LST and NDVI spatial distributions for 2021 revealed a positive relationship of NDVI to LST. In the northernmost, island part of Krasnoyarsk Krai, the negative LST value is correlated with the negative NDVI value. Farther south, a classical increase in LST and NDVI occurs. The coefficient of correlation between LST and NDVI over the entire area of Krasnoyarsk Krai is rather high: 0.83.

**Keywords:** Krasnoyarsk Krai, satellite data, carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), Land Surface Temperature (LST), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), maps of spatial distribution.

**Acknowledgements.** The study was funded within the framework of the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FWES-2026-0007).

Citation: Botvich I. Yu., Pisman T. I., Vysotskaya G. S., Rachinskiy M. I. Satellite Monitoring of Atmospheric Carbon Dioxide in Krasnoyarsk Krai. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(3), 377–386. EDN: OJDXZQ



## Спутниковый мониторинг углекислого газа в атмосфере Красноярского края

**И. Ю. Ботвич, Т. И. Письман,  
Г. С. Высоцкая, М. И. Рачинский**  
*Институт биофизики СО РАН  
Российская Федерация, Красноярск*

**Аннотация.** Приведены результаты анализа межгодовой (2003–2021 гг.) и сезонной динамики концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере Красноярского края, радиационной температуры поверхности Земли – LST и нормированного вегетационного индекса – NDVI растительности по спутниковым данным. За исследуемый период показано увеличение среднегодовой концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере на 41 ppm. Анализ сезонной динамики концентрации CO<sub>2</sub> показал уменьшение диоксида углерода летом и увеличение – зимой. Выявлен положительный тренд среднегодовых LST и средних значений NDVI за период с марта по октябрь на территории Красноярского края за 2001–2023 гг. При анализе пространственного распределения CO<sub>2</sub> за 2021 г. повышенные значения CO<sub>2</sub> выявлены в атмосфере западной части Красноярского края (около 415 ppm), вплоть до реки Енисей. Пониженные значения концентрации CO<sub>2</sub> (около 414 ppm) выявлены в атмосфере северной, островной части края (зона льдов и арктических пустынь), районах Средне-Сибирского нагорья и Саян. При анализе корреляции пространственного распределения LST и NDVI за 2021 г. определена положительная зависимость значений NDVI от LST. На территории северной островной части края отрицательное значение LST коррелирует с отрицательным значением NDVI. Далее с севера на юг происходит классическое повышение температуры LST и индекса NDVI. Коэффициент корреляции между LST и NDVI по всей территории Красноярского края достаточно высокий и составляет 0,83.

**Ключевые слова:** Красноярский край, спутниковые данные, диоксид углерода (CO<sub>2</sub>), радиационная температура поверхности Земли (LST), нормированный вегетационный индекс (NDVI), карты пространственного распределения.

**Благодарности.** Исследование финансировалось в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FWES-2026-0007).

Цитирование: Ботвич И. Ю. Спутниковый мониторинг углекислого газа в атмосфере Красноярского края / И. Ю. Ботвич, Т. И. Письман, Г. С. Высоцкая, М. И. Рачинский // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(3). С. 377–386. EDN: OJDXZQ

### Introduction

Global warming of the Earth has recently become a matter of serious concern. Over the last 150 years, the average land surface temperature has indeed risen by about 1 °C. This change is attributed to the greenhouse effect, caused by the increase in the concentration of atmospheric carbon dioxide [1].

Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) is a major greenhouse gas in the Earth's atmosphere. The difference between carbon dioxide and other gases is that it has a long-term greenhouse effect on climate. Although the concentration of atmospheric carbon dioxide is relatively low, it is an important component of the Earth's atmosphere.

For many years, scientists have been regularly monitoring CO<sub>2</sub> concentration to track changes and study the impact of this gas on climate. The first instrumental measurements of atmospheric CO<sub>2</sub> were conducted in the 1950s using infrared analyzers in Mauna Loa Observatory (Hawaii) [2].

The first experiments in remote sensing of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration were performed in the late 1990s using spectrometers onboard satellites to study to atmosphere. For instance, during 1996–97, the Japanese satellite ADEOS conducted global measurements of CO<sub>2</sub> in the near infrared band using the IMG Fourier transform infrared spectrometer [3].

In 2014, NASA launched Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2), designed to collect more exact data on the spatial distribution and temporal variations in carbon dioxide concentration in the Earth's atmosphere. The state-of-the-art high-resolution infrared spectrometer onboard OCO-2 is capable of recording even small CO<sub>2</sub> variations over the entire planet [4].

Satellite observations are used to monitor regional sources and sinks of carbon dioxide and track year-to-year and seasonal CO<sub>2</sub> concentration dynamics, in order to gain insight into the global carbon cycle and climatic processes.

The purpose of the present study was to analyze year-to-year (2003–2021) and seasonal concentrations of atmospheric carbon dioxide in Krasnoyarsk Krai based on satellite data and to examine correlations of the spatial distributions of the annual average concentration of carbon dioxide, CO<sub>2</sub>, Land Surface Temperature, LST, and the Normalized Difference Vegetation Index, NDVI, averaged for a period from March to October, in Krasnoyarsk Krai in 2021.

### Material, Data and Methods

The current study was performed for Krasnoyarsk Krai – the second largest administrative region of the Russian Federation. It is situated in Eastern Siberia, in the Yenisei River basin, between 51°46' and 77°43' N (the mainland), extending to 81°16' (with the Severnaya Zemlya islands), and between 78° and 113° E.

In the north, Krasnoyarsk Krai is bounded by two seas of the Arctic Ocean – the Kara Sea and the Laptev Sea. In the east, Krasnoyarsk Krai borders the Republic of Sakha (Yakutia) and Irkutsk Oblast, in the south – Tuva Republic and the Republic of Khakassia, and in the west – Kemerovo Oblast and Tomsk Oblast as well as Khanty-Mansi Autonomous Okrug and Yamalo-Nenets Autonomous Okrug.

Krasnoyarsk Krai has three climate zones: Arctic, subarctic, and temperate ones. Within each climate zone, climatic features vary not only from north to south but also from west to east.

Krasnoyarsk Krai measures about 3000 km from north to south and 1250 km from west to east. The landscape-geographical zones represented in it include Arctic deserts, tundra, forest-tundra, taiga, forest-steppe, and steppe. The northernmost islands contain the ice zone and Arctic deserts.

#### *Satellite data and methods*

Three datasets were downloaded from data repository [5]:

1. 2002–2009. The AIRS/Aqua L3 product is monthly data on mid-tropospheric carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), Level 3, obtained by the AIRS and AMSU instruments onboard the Aqua satellite. The data spatial resolution is 2.5° × 2°.

2. 2010–2014. The AIRS/Aqua L3 product is monthly data on mid-tropospheric carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), Level 3, obtained by the AIRS instrument onboard the Aqua satellite. The data spatial resolution is 2.5° × 2°.

3. 2015–2022. The OCO-2 GEOS Level 3 monthly product is Level 3 monthly data retrieved from the NASA satellites – the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2). The data spatial resolution is 0.5° × 0.625°.

The present study considered the annual average and seasonal concentrations of CO<sub>2</sub> for 2003–2021.

Land Surface Temperature (LST) was obtained from satellite monthly data (the MOD 21C 3V61 product) for 2001–2023.

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was obtained from satellite monthly data (the MOD 13A3V61 product) for 2001–2023 (the averaging period was between March and October each year). The NDVI data from November to February are not included, as they are not available for some of the northern areas (above 66.5°) because of the short or non-existent daylight and bad weather conditions.

The maps of CO<sub>2</sub>, LST, and NDVI spatial distributions were made for 2021.

Coefficients of correlations between NDVI and LST were determined using Pearson's formula in each pixel of the study area. The time series for the calculations were from March to October from 2001 to 2023. The spatial resolution was 1 km.

### Results and Discussion

Analysis of variations in the annual average concentration of carbon dioxide from 2003 to 2021 demonstrated an increase in CO<sub>2</sub> concentration for Krasnoyarsk Krai (Fig. 1). Over the study period, the concentration of atmospheric CO<sub>2</sub> had increased by 41 ppm (from 374 to 415 ppm).

The year-to-year CO<sub>2</sub> rise is mainly associated with the increase in anthropogenic emissions [6]. In the last 100 years, the increase in the concentration of atmospheric CO<sub>2</sub> has chiefly resulted from emissions caused by fossil fuel (oil, coal, gas) combustion and eradication of forests.

The annual increase in the concentration of atmospheric CO<sub>2</sub> is determined not only by the rates of anthropogenic emissions but also by rates with which it is naturally absorbed or released by terrestrial ecosystems and the Global Ocean [7]. These two processes, especially the natural carbon absorption, demonstrate year-to-year variability.

Fig. 2 shows seasonal variations in the concentration of atmospheric CO<sub>2</sub> in Krasnoyarsk Krai for a period between 2003 and 2021. Variations in CO<sub>2</sub> concentration during 2003–2014 are represented as broken-line graphs, with hardly any pattern, while during 2015–2021, there are evident seasonal

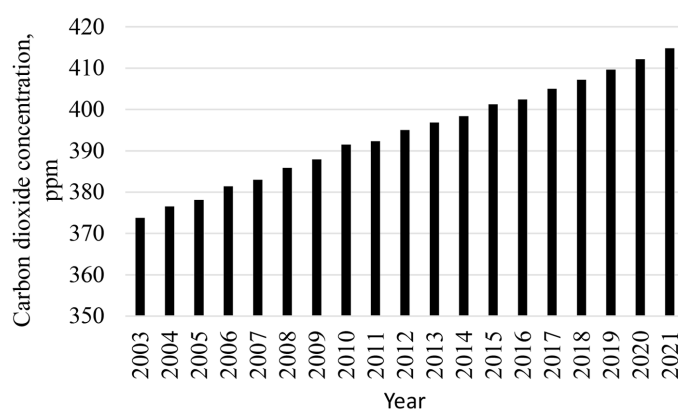


Fig. 1. Multiyear variations in the annual average concentration of atmospheric CO<sub>2</sub> in Krasnoyarsk Krai based on satellite data

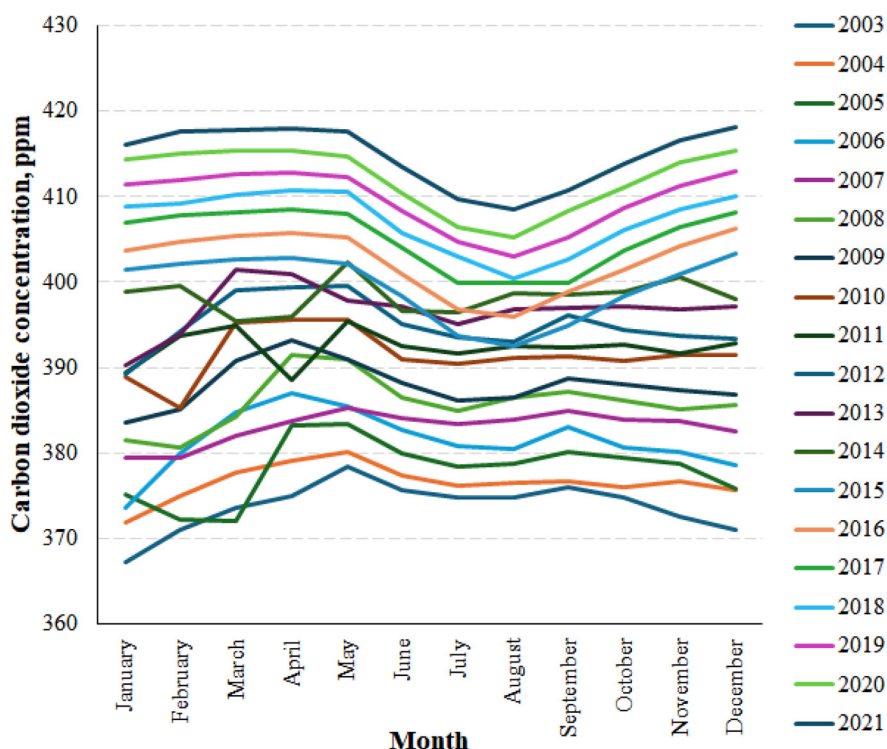


Fig. 2. Seasonal variations in the concentration of atmospheric CO<sub>2</sub> in Krasnoyarsk Krai based on satellite data

variations in CO<sub>2</sub> concentration, with a decrease in summer and an increase in winter. The accuracy and the repeatability of the shapes of the graphs for 2015–2021 are attributed to the launching of OCO-2 (U.S.) in 2014 – a satellite designed to collect more accurate data on the spatial distribution of carbon dioxide concentration in the Earth’s atmosphere.

A study of carbon budget at the ZOTTO international observatory (Central Siberia, 700 km away from Krasnoyarsk) from 2009 to 2015 also showed the clear seasonality of CO<sub>2</sub> concentration in the ground level atmosphere, with a short-term minimum in late July – early August and an extended maximum between late December and early March [8]. These seasonal variations in the atmospheric CO<sub>2</sub> concentration are caused not only by the specific atmospheric-ecosystem gas exchange of CO<sub>2</sub> in the prevailing plant communities located close to the ZOTTO observatory but also by the specific air mixing and atmospheric circulation in the intracontinental regions of the world such as Krasnoyarsk Krai [9].

As is known, vegetation cover is a crucial factor in seasonal variations of carbon dioxide. In the seasonal cycle, in summer, the prevailing process is CO<sub>2</sub> absorption, which co-occurs with C emission, while in winter (after leaf fall), only C emission occurs. Vital functions of numerous organisms are an important source of carbon dioxide. The greatest contribution is made by respiration of fungi and bacteria, which degrade the dead matter of plant tissues, and plant (primarily, root) respiration. Hence, CO<sub>2</sub> absorption by vegetation leads to the seasonal minimum of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration in summer and maximum in winter [10].

One of the key factors determining the amount of carbon dioxide emitted to the atmosphere is soil temperature. A study found that in taiga, the farther north, the more closely CO<sub>2</sub> emission is correlated

with soil temperature while moisture content is not a significant factor for most soils in the region, which are sufficiently moist [11].

Summing up, CO<sub>2</sub> emission parameters are determined by such factors as natural climatic conditions in the area and scenarios of anthropogenic impact, which influence soil temperature and moisture content, microbial composition of the soil layer, and development of the plant cover [12].

To estimate the effect of soil temperature and development of vegetation on variations in CO<sub>2</sub> concentration, we examined multiyear variations in Land Surface Temperature (LST) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), which was averaged for March–October, in Krasnoyarsk Krai over a period of 2001–2023 (Fig. 3). A positive trend was found for both LST and NDVI, similar to CO<sub>2</sub>.

Analysis of the correlation between CO<sub>2</sub>, LST, and NDVI for a period between 2003 and 2021 is presented in Table 1. A moderate positive correlation was found between CO<sub>2</sub> and LST, a stronger one – between CO<sub>2</sub> and NDVI, and the strongest – between LST and NDVI. Thus, productivity (NDVI) of vegetation in Western Siberia is primarily determined by temperature (LST). Moreover, vegetation indices, such as NDVI, are positively related to carbon sequestration by plant biomass [13].

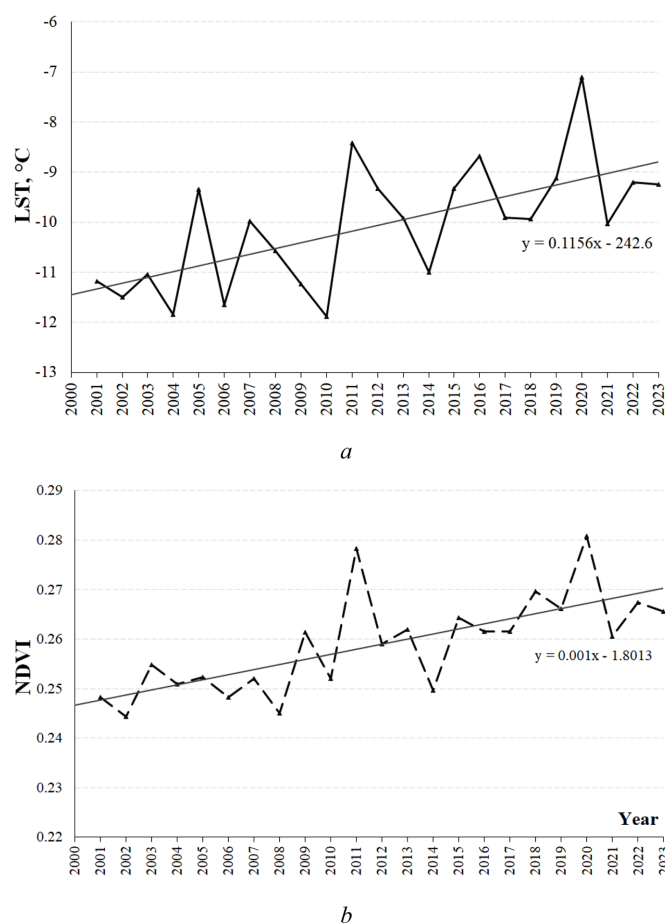


Fig. 3. Multiyear variations in the annual average Land Surface Temperature (LST) – (a) and average NDVI values from March to October – (b) in Krasnoyarsk Krai over 2001–2023

Table 1. Correlation (Pearson correlation coefficient ( $r$ )) between year-to-year CO<sub>2</sub> concentration and year-to-year LST and NDVI (March–October) in Krasnoyarsk Krai over a period of 2003–2021

	CO <sub>2</sub>	LST
LST	0.55	–
NDVI	0.63	0.77

The relationships between CO<sub>2</sub>, LST, and NDVI were analyzed for 2021 using the maps of spatial distribution of concentration of atmospheric CO<sub>2</sub>, Land Surface Temperature (LST), and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (Fig. 4).

Higher CO<sub>2</sub> concentrations (about 415 ppm) were found in the west of Krasnoyarsk Krai, as far as the Yenisei River (Fig. 4 a). Lower CO<sub>2</sub> concentrations (about 414 ppm) were found in the northern, island region of the area (ice-covered area and Arctic deserts) and in the regions of the Central Siberian Plateau and Sayan Mountains (green color). Presumably, the distribution of CO<sub>2</sub> in Krasnoyarsk Krai is correlated with the terrain features and the process of movement of air masses from west to east.

Analysis of correlation of the LST and NDVI spatial distributions for 2021 supports the positive correlation between NDVI and LST (Fig. 4 b, 4 c, 4 d). In the northernmost, island part of Krasnoyarsk Krai, in the zone of ice and Arctic deserts, the negative LST value is correlated with the negative NDVI value. Farther south, a classical increase in LST and NDVI occurs [14].

The relationship between LST and NDVI is determined by the land cover structure. In the regions with a large proportion of green vegetation, there is a strong positive correlation between LST and NDVI because in such regions NDVI is increased more substantially in the early growing season, when the air and surface temperatures are rising [15].

### Conclusion

Analysis of multiyear (2003–2021) and seasonal variations in the concentration of atmospheric CO<sub>2</sub>, Land Surface Temperature (LST), and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in Krasnoyarsk Krai, based on satellite data, resulted in the following findings:

- Over the study 19 years, the annual average concentration of atmospheric CO<sub>2</sub> had increased by 41 ppm. Analysis of the seasonal variations in CO<sub>2</sub> concentration showed a carbon dioxide decrease in summer and increase in winter.
- There was a positive trend in the annual average Land Surface Temperature (LST) in Krasnoyarsk Krai over 2001–2023.
- Another positive trend was revealed by analyzing variations in the average NDVI values over a period between March and October during 2001–2023.
- Analysis of the spatial distribution of CO<sub>2</sub> in the atmosphere of Krasnoyarsk Krai in 2021 revealed higher CO<sub>2</sub> concentrations (about 415 ppm) in the west of Krasnoyarsk Krai, as far as the Yenisei River. Lower CO<sub>2</sub> concentrations (about 414 ppm) were found in the northern, island region of the area (ice-covered area and Arctic deserts) and in the regions of the Central Siberian Plateau and Sayan Mountains.
- Analysis of correlation of the LST and NDVI spatial distributions for 2021 supports the positive relationship of NDVI to LST. In the northernmost, island part of Krasnoyarsk Krai, the negative LST

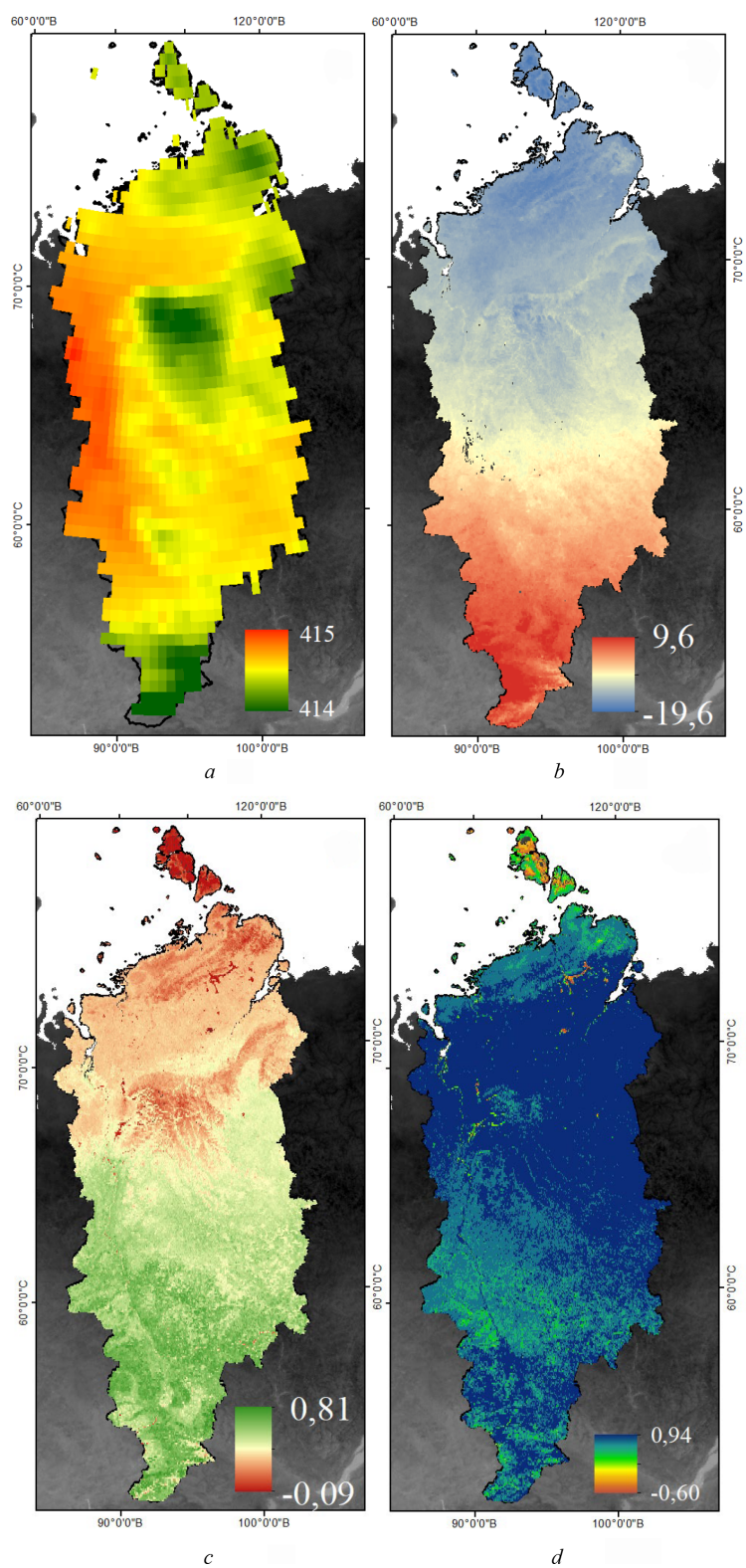


Fig. 4. The spatial distribution of annual average CO<sub>2</sub> concentrations in the atmosphere of Krasnoyarsk Krai (2021) – *a*, LST values (2021) – *b*, NDVI values (the averaging period – between March and October 2021) – *c*, correlations between NDVI and LST from 2000 to 2023 (March–October) – *d*

value is correlated with the negative NDVI value. Farther south, a classical increase in LST and NDVI occurs. The coefficient of correlation between LST and NDVI over the entire area of Krasnoyarsk Krai is rather high: 0.83.

### Список литературы / References

[1] Смирнов Б.М., Сон Э.Е. Роль углекислого газа в тепловом балансе Земли. *Известия РАН. Энергетика*, 2020, № 2, 16–27. [Smirnov B.M., Son E.E. The role of carbon dioxide in the Earth's heat balance. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, 2020, No. 2, 16–27 (in Russian)]

[2] Рублев А.Н., Голомзин В.В., Успенский А.Б., Киселева Ю.В., Козлов Д.А., Белан Б.Д., Аршинов М.Ю., Тимофеев Ю.М., Панов А.В., Прокушкин А.С. Определение общего содержания диоксида углерода в атмосфере по данным спутникового Фурье-спектрометра ИКФС-2: анализ и опыт применения. *Исслед. Земли из космоса*, 2024, № 4, 56–68. [Rublev A.N., Golomzin V.V., Uspensky A.B., Kiseleva Yu.V., Kozlov D.A., Belan B.D., Arshinov M. Yu., Timofeev Yu.M., Panov A. V., Prokushkin A. S. Determination of total atmospheric carbon dioxide based on data from the IKFS-2 satellite Fourier spectrometer: analysis and application experience. *Issled. Zemli iz kosmosa (Earth studies from space)*, 2024, No. 4, 56–68 (in Russian)]

[3] Rayner P.J., O'Brien D.M. The utility of remotely sensed CO<sub>2</sub> concentration data in surface source inversions. *Geophysical Research Letters*, 2001, V. 28, № 1, 175–178.

[4] [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/oco2/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/oco2/index.html)

[5] [https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets?keywords=CO<sub>2</sub>&sort=-timeRes&page=1](https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets?keywords=CO2&sort=-timeRes&page=1)

[6] Романюк В.А., Шумилов И.В., Ващенко Д.А. Обзор методов наблюдений за содержанием атмосферного CO<sub>2</sub>. *Евразийский Союз Ученых. Серия: междисциплинарные науки*, 2023, V. 108, № 10, 8–14. [Romanyuk V.A., Shumilov I.V., Vaschenko D.A. Review of methods for observing atmospheric CO<sub>2</sub> content. *Eurasian Union of Scientists. Series: interdisciplinary sciences*, 2023, V. 108, No. 10, 8–14 (in Russian)]

[7] Keeling C.D., Piper S.C., Bacatow R.B., Wahlen M., Whorf T.P., Heimann P.M., Meijer H.A. Atmospheric CO<sub>2</sub> and <sup>13</sup>CO<sub>2</sub> exchange with the terrestrial biosphere and oceans from 1978 to 2000: observations and carbon cycle implications // *"A History of Atmospheric CO<sub>2</sub> and its effects on Plants, Animals, and Ecosystems"* / Editors, Ehleringer, J.R., T.E. Cerling, M.D. Dearing. Springer Verlag, New York. 2005. 83–113.

[8] Тимохина А.В., Прокушкин А.С., Онучин А.А., Панов А.В., Кофман Г.Б., Хайманн М. Динамика приземной концентрации CO<sub>2</sub> в среднетаежной подзоне Приенисейской Сибири. *Экология*, 2015, № 2, 110–119. [Timokhina A. V., Prokushkin A. S., Onuchin A. A., Panov A. V., Kofman G. B., Heimann M. Dynamics of surface concentration of CO<sub>2</sub> in the middle taiga subzone of Yenisei Siberia. *Ecology*, 2015, No. 2, 110–119 (in Russian)]

[9] Тимохина А.В., Прокушкин А.С., Панов А.В., Колосов Р.А., Сиденко Н.В., Лаврич Й., Хайманн М. Межгодовая изменчивость концентрации диоксида углерода в атмосфере над центральной частью Сибири (по данным международной обсерватории ZOTTO за 2009–2015 гг.). *Метеорология и гидрология*, 2018, № 5, 20–29. [Timokhina A. V., Prokushkin A. S., Panov A. V., Kolosov R. A., Sidenko N. V., Lavrich J., Heimann M. Interannual variability of atmospheric carbon

dioxide concentration over central Siberia (based on ZOTTO international observatory data for 2009–2015). *Meteorology and Hydrology*, 2018, No. 5, 20–29 (in Russian)]

[10] Pickett-Heaps C., Rayner P., Law R., Ciais P., Patra P. et al. Atmospheric CO<sub>2</sub> inversion validation using vertical profile measurements. *J. Geophys. Res.*, 2011, 116(D 12), D 12305.

[11] Panov A., Prokushkin A., Korets M., Putilin I., Zrazhevskaya G., Kolosov R., Bondar M. Variation in Soil CO<sub>2</sub> Fluxes across Land Cover Mosaic in Typical Tundra of the Taimyr Peninsula, Siberia. *Atmosphere*, 2024, № 15, 698. DOI.org/10.3390/atmos15060698.

[12] Мячина К.В., Керимов И.А., Дубровская С.А., Ряхов Р.В., Щавелев А.Н., Безбородникова Р.М. Анализ секвестрационного потенциала геосистем на основе расчетов NDVI по спутниковым данным. *Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка»*, 2022, Т. 66, № 5, 60–72. [Myachina K. V., Kerimov I. A., Dubrovskaya S. A., Ryakhov R. V., Shchhavelev A. N., Bezborodnikova R. M. Analysis of the sequestration potential of geosystems based on NDVI calculations using satellite data. *News of universities “Geodesy and aerial photography”*, 2022, Vol. 66, No. 5, 60–72 (in Russian)]. DOI:10.30533/0536–101X-2022–66–5–60–72.

[13] Lv Z, Shi Y, Zang S, Sun L. Spatial and Temporal Variations of Atmospheric CO<sub>2</sub> Concentration in China and Its Influencing Factors. *Atmosphere*, 2020, V. 11, No. 3, 231. DOI: 10.3390/atmos11030231.

[14] Taylor J. A., Orr J. C. The natural latitudinal distribution of atmospheric CO<sub>2</sub>. *Global and Planetary Change*, 2000, № 26, 375–386.

[15] Шинкаренко С. С., Кошелева О. Ю., Гордиенко О. А., Дубачева А. А., Омаров Р. С. Связь сезонной динамики температуры поверхности и NDVI урбанизированных территорий засушливой зоны (на примере Волгоградской агломерации). *Исслед. Земли из Космоса*, 2021, № 4, 72–83. [Shinkarenko S. S., Kosheleva O. Yu., Gordienko O. A., Dubacheva A. A., Omarov R. S. Relationship between seasonal dynamics of surface temperature and NDVI of urbanized territories of arid zone (a case study of Volgograd agglomeration). *Issled. Zemli iz Kosmosa (Earth studies from space)*, 2021, No. 4, 72–83 (in Russian)]

**Math Modeling.  
Numerical Experiment**

**Математическое  
моделирование.  
Численный  
эксперимент**



EDN: WHNHWI

УДК 621.396.4

**Model for Bit Error Rate Estimation  
in the UAV Control Radio Channel  
for Wildfire Monitoring Using a LoRa Module  
in Forested Environments**

**Victor I. Filatov<sup>\*a</sup>,  
Evgeny N. Garin<sup>b</sup> and Gennady M. Aldonin<sup>b</sup>**  
*<sup>a</sup>Bauman Moscow State Technical University  
Moscow, Russian Federation  
<sup>b</sup>Siberian Federal University  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 16.02.2026, received in revised form 24.02.2026, accepted 15.03.2026

**Abstract.** The influence of vegetation on radio wave propagation introduces additional signal losses not only along the ground surface but also in slant radio paths. Calculations based on ITU-R P. 833 have shown that, depending on the distance between the UAV and the ground control stations, as well as the presence of forested areas whose average height exceeds the elevation of the ground control station's antenna, it is necessary to account for additional propagation losses. These losses are functionally related to several parameters, including frequency, season, and vegetation type.

**Keywords:** radio channel, unmanned aerial vehicle (UAV), bit error, radio signal loss.

Citation: Filatov V. I., Garin E. N., Aldonin G. M. Model for Bit Error Rate Estimation in the UAV Control Radio Channel for Wildfire Monitoring Using a LoRa Module in Forested Environments. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(3), 388–409. EDN: WHNHWI



# Модель оценки битовой ошибки в радиоканале управления БЛА мониторинга пожаров с использованием модуля LoRa в условиях лесного массива

В. И. Филатов<sup>а</sup>, Е. Н. Гарин<sup>б</sup>, Г. М. Алдонин<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Московский государственный технический  
университет имени Н. Э. Баумана  
Российская Федерация, Москва

<sup>б</sup>Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, Красноярск

**Аннотация.** Влияние растительности на распространение радиоволн создает дополнительные потери на распространение радиосигнала не только вдоль земной поверхности, но и в наклонных радиопутьях. С целью определения значения запаса помехоустойчивости и предельной дальности управления БЛА встала необходимость оценить ослабления радиосигнала для диапазона частот функционирования модуля Long Range (LoRa). В статье рассмотрены различные методы оценки ослабления радиосигнала в условиях хвойной и лиственной растительности с учетом сезона, а также проведена оценка вероятности битовой ошибки для приведенного радиосигнала модуля LoRa. Проведенные расчеты на основании МСЭ-R.833 показали, что в зависимости от удаления БЛА от наземных пунктов управления и лесного массива, средняя высота которого превышает точку расположения антенны наземного пункта управления, необходимо учитывать дополнительные потери в распространении радиосигнала. При этом значение потерь функционально связано с несколькими параметрами, такими как частота, сезон и тип растительности. Результаты статьи включают полученные значения вероятности битовой ошибки на предельных дальностях управления БЛА в пределах зоны прямой видимости.

**Ключевые слова:** радиоканал, беспилотный летательный аппарат, битовая ошибка, потери радиосигнала.

Цитирование: Филатов В. И. Модель оценки битовой ошибки в радиоканале управления БЛА мониторинга пожаров с использованием модуля LoRa в условиях лесного массива / В. И. Филатов, Е. Н. Гарин, Г. М. Алдонин // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(3). С. 388–409. EDN: WHNHWI

## Введение

Беспилотная авиация в последние десятилетия получила значительное развитие на множестве направлений. В современных условиях применение недорогих малоразмерных беспилотных летательных аппаратов (БЛА) позволяет существенно сократить время при проведении различного рода работ в широком спектре отраслей.

В частности, уже сейчас применение БЛА малого и среднего классов значительно упрощает оперативные мероприятия по поиску пропавших людей и при мониторинге лесных пожаров. Последнее стало особенно актуальным на этапе, когда локализация первичных пожаров затруднена или невозможна авиационными средствами. С другой стороны, использование БЛА позволило не только сократить время обнаружения появляющихся очагов, но и в некоторых случаях зафиксировать лиц, по вине которых такие источники появляются.

Тем не менее применение БЛА в лесном массиве, в том числе и при мониторинге пожаров, во многом ограничено дальностями радиолинии, поскольку в процессе управления и передачи изображения в условиях растительности радиосигнал претерпевает существенные ослабления, что, в свою очередь, может привести не только к сокращению дальности мониторинга, но и к потере управления самим БЛА.

В условиях густых высоких лесных массивов наилучшим решением стало бы размещение наземного пункта управления БЛА на одиночной возвышенности, позволяющей обеспечить прямое прохождение электромагнитных волн радиосигнала. Но особенности рельефа местности далеко не всегда позволяют воспользоваться такой возможностью. Поэтому при проведении планирования полетов в условиях растительности оценка влияния лесных массивов на ослабление радиоволн становится важной задачей как с теоретической, так и с практической точки зрения.

Целью работы является получение теоретической оценки потерь в радиоканале, учитывающей влияние лесного массива на распространение радиоволн для равнинной поверхности, исключая препятствия в виде холмов и гор, и получение оценки вероятности битовой ошибки для различных значений отношения сигнал-шум.

Результаты экспериментов, описанных в [1], показали, что для частот УКВ-диапазона کرونا деревьев будет вносить дополнительные потери в наклонной трассе, что, соответственно, будет ограничивать дальность радиолинии управления и передачи данных от БЛА.

Для проведения исследований по вопросу оценки запаса помехоустойчивости в радиоканале рассмотрим условие, при котором в качестве управляющего модуля формирования передаваемого радиосигнала в БЛА используется LoRa UART CDEBYTE E 220–900T22D-V1.2 (рис. 1) с рабочими частотами  $f \in [850; 390]$  МГц и мощностью сигнала  $P_{\text{БЛА}} = 22$  дБм (158 мВт).

Данный модуль позволяет обеспечить скорость передачи данных от 0.3 до 2.5 кбит/с с полосой радиосигнала от 7.8 до 500 кГц ( $\Delta W = 0.0078\text{--}0.5$  МГц) и фактором расширения полосы (Spreading Factor),  $SF = 7\text{--}12$ .

На рис. 2 и 3 соответственно приведены спектрограмма и осциллограмма радиосигнала, полученного с помощью модуля LoRa UART CDEBYTE E 220–900T22D-V1.2.

На рис. 3 показаны чип-сигналы во времени, соответствующие разным LoRa-символам при  $SF=7$ . Каждый цвет представляет собой сигнал для одного из символов (0, 32, 64, 96, 127).

Частота чипа сдвигается пропорционально значению символа, от нижней границы (0) до верхней (127). LoRa модулирует информацию в этом частотном сдвиге внутри чипа.

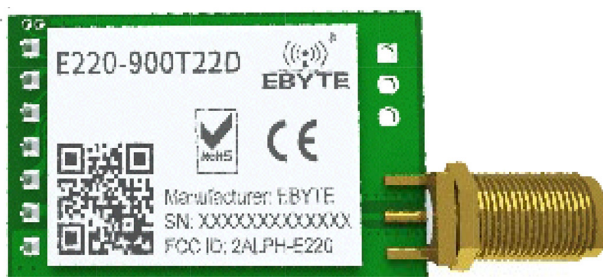


Рис. 1. Модуль LoRa UART CDEBYTE E 220–900T22D-V1.2

Fig. 1. LoRa UART CDEBYTE E 220–900T22D-V1.2 module

Таблица 1. Параметры модуля LoRa UART

Table 1. LoRa UART Module Parameters

Характеристика	Параметры
Тип модуляции	Chirp Spread Spectrum (CSS)
Частота	433/868/915 МГц
Режим передачи данных	Полудуплекс
Режим энергопотребления	Модель «сон – передача»
Скорость передачи	0.3–50 кбит/с
Шифрование	128-битное шифрование AES в LoRaWAN

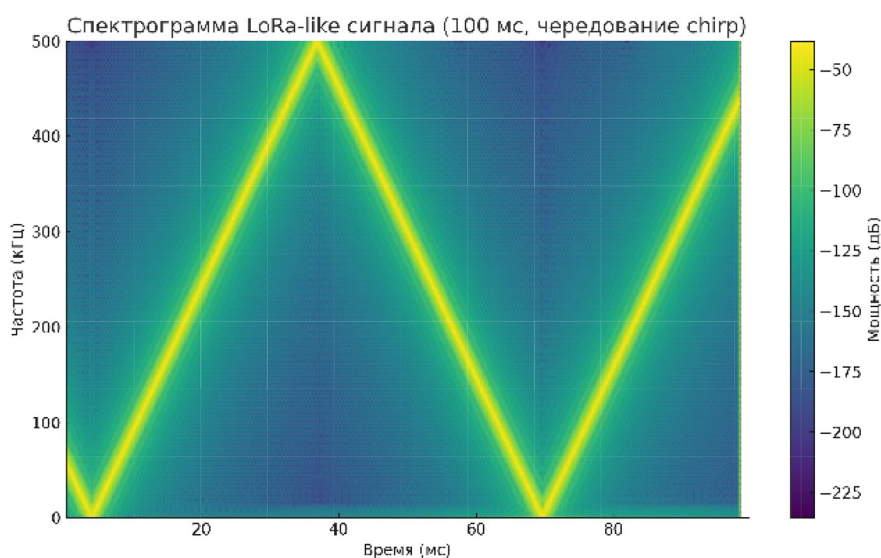


Рис. 2. Спектрограмма радиосигнала, полученного с помощью модуля LoRa UART CDEBYTE E 220–900T22D-V1.2

Fig. 2. Spectrogram of the radio signal obtained using the LoRa UART CDEBYTE E 220–900T22D-V1.2 module

На рис. 4 представлены спектрограммы чип-сигналов для различных LoRa-символов (при  $SF = 7$ ). Каждый график рис. 4 отображает частотно-временную структуру одного символа, от которого зависит частотный сдвиг (0 – нижняя частота, 127 – верхняя частота). Таким образом, LoRa модулирует данные в сдвиге частоты чип-сигнала, что обеспечивает высокую устойчивость к шуму и устойчивую демодуляцию даже при слабом сигнале.

Как видно из рис. 5а и б, особенностью сигнала является то, что его частота плавно изменяется от минимального к максимальному значениям, и затем снова снижается до минимума, что позволяет уменьшить влияние узкополосных помеховых воздействий в некоторой полосе функционирования ( $\Delta f_n < \Delta f_{LoRa}$ ).

Изменение фазы для такого радиосигнала представлено на рис. 6. Из рисунка видно, что фаза испытывает некоторое нелинейное изменение.

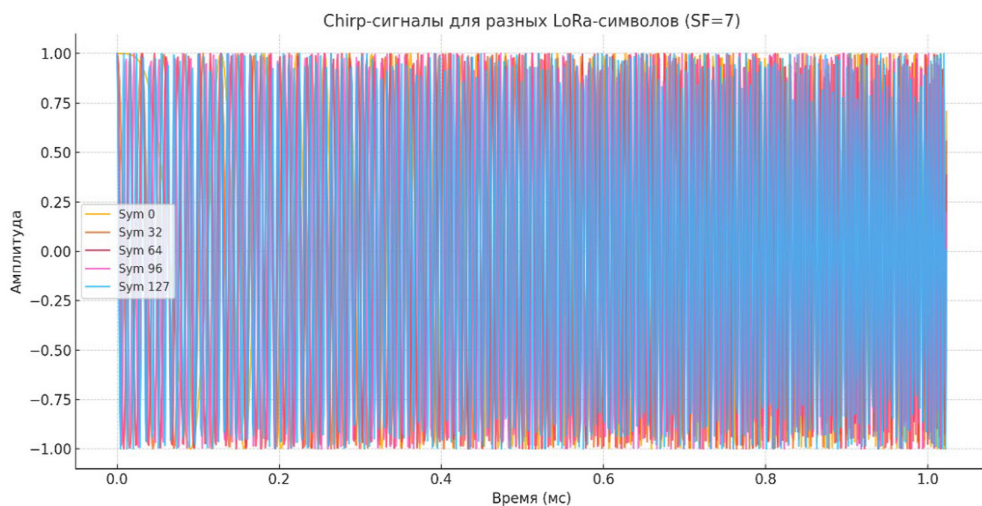


Рис. 3. Осциллограмма LoRa-символов (SF = 7)

Fig. 3. Waveform of LoRa symbols (SF = 7)

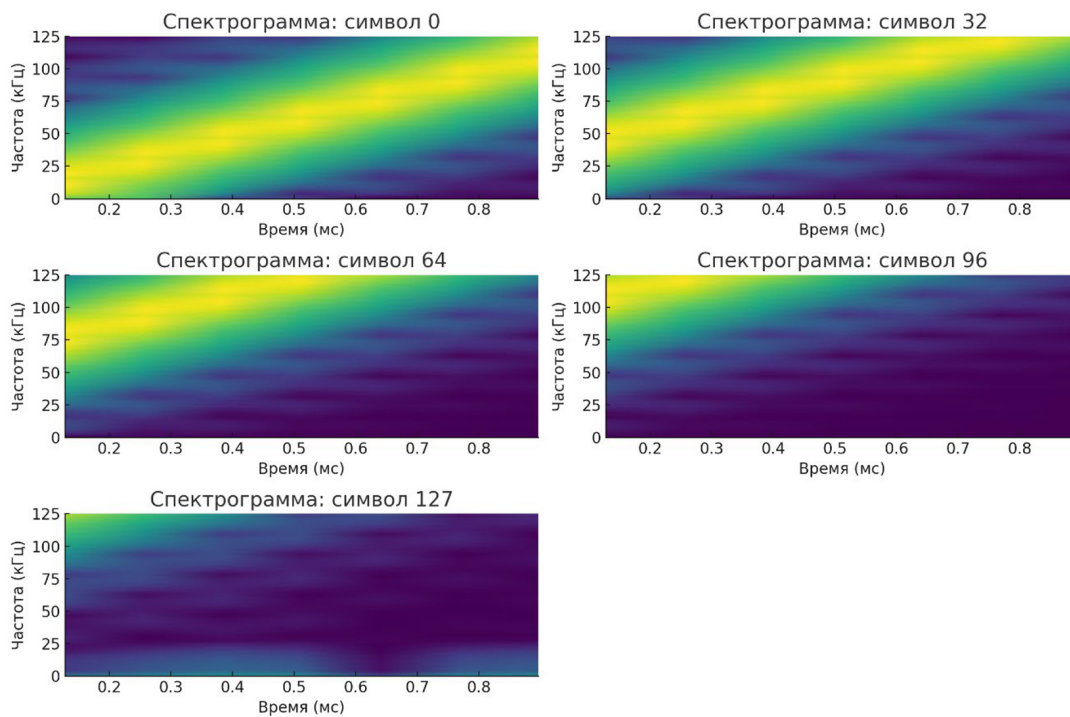


Рис. 4. Спектрограммы чип-сигналов для различных LoRa-символов (при SF = 7)

Fig. 4. Spectrograms of chip signals for various LoRa symbols (at SF = 7)

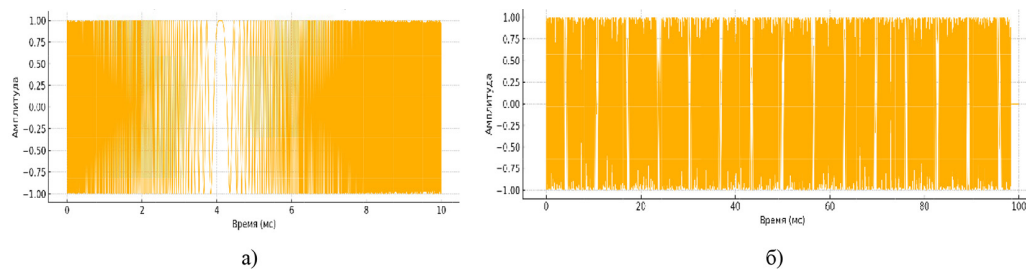


Рис. 5. Осциллограммы радиосигнала, полученного с помощью модуля LoRa а) для 10 мс; б) 100 мс  
 Fig. 5. Waveforms of the radio signal received using the LoRa module a) for 10 ms; b) for 100 ms

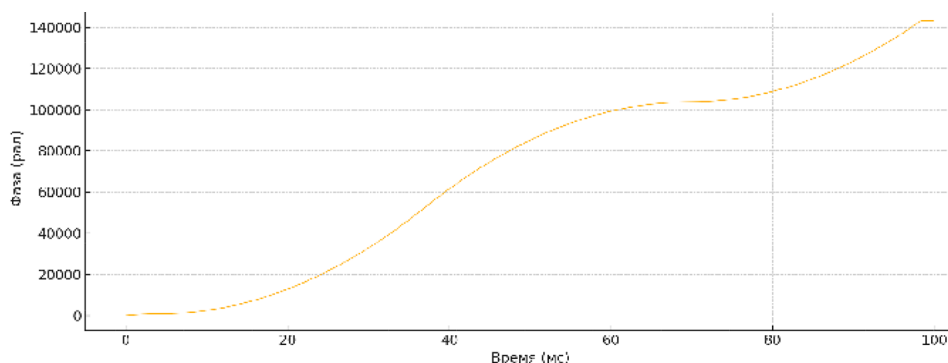


Рис. 6. Изменение фазы радиосигнала, полученного с помощью модуля LoRa  
 Fig. 6. Phase change of the radio signal received using the LoRa module

Для расчетов примем, что пункт управления представляет собой модуль, установленный на треноге высотой  $h_{пу} = 1.5$  м, а управляемый БЛА находится на некотором удалении  $D_{БЛА}$  на высоте  $h_{БЛА} = 100$  м. Будем считать, что лес однородный, состоит из хвойных пород (кедровый) со средней высотой стволов  $h_f = 20$  м.

При расчете радиоканала в целом возможны два варианта геометрического построения. Первый вариант учитывает кривизну поверхности и характерен для трасс, при которых дальность радиолинии не менее 12 км ( $D_{БЛА} \geq 12$  км, рис. 7а). Второй вариант учитывает условие, когда поверхность можно считать плоской ( $D_{БЛА} < 12$  км, рис. 7б). Для обоих вариантов требуется оценить отдельно расстояние между пунктом управления и БЛА, а также между пунктом управления и точкой выхода прямой из лесного массива. Будем считать, что за пределами зоны прямой видимости ослабления будут критическими, и для рассматриваемого диапазона частот передача информации не возможна.

Важно отметить, что первый вариант применим, если при его расчете будет выполняться условие требуемого запаса помехоустойчивости:

$$P_{БЛА} + G_{БЛА} - L_{loss}(D_{БЛА}) + G_T \geq P_{Tmin}, \quad (1)$$

В случае, если данное условие не будет выполняться, становится невозможным обеспечить требуемый уровень битовой ошибки (BER) и вероятностно-временных характеристик

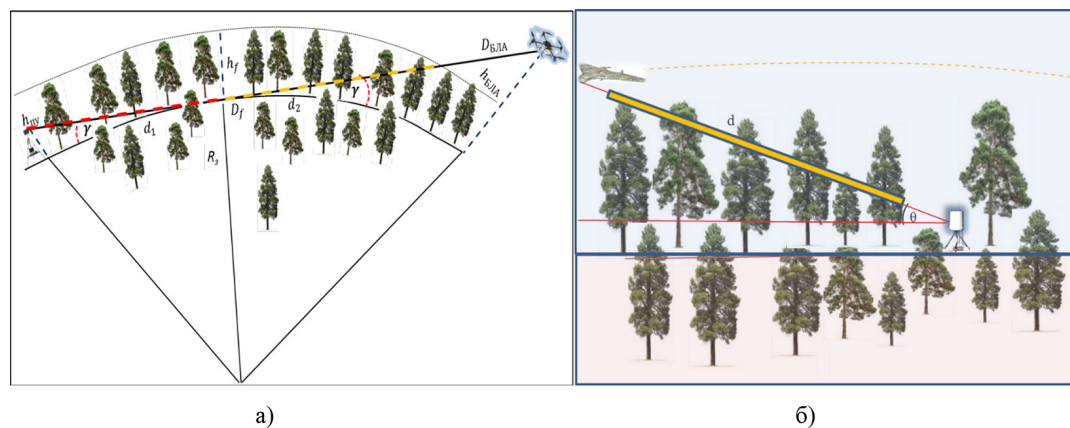


Рис. 7. Функционирование радиоканала «пункт управления – БЛА» с наземным ретранслятором в условиях растительности а)  $D_{\text{БЛА}} < 12$  км; б)  $D_{\text{БЛА}} < 12$  км

Fig. 7. Operation of the «control point – UAV» radio channel with a ground repeater in vegetation conditions а)  $D_{\text{БЛА}} \geq 12$  km; б)  $D_{\text{БЛА}} < 12$  km

(ВВХ) по доставке пакетов с сигналами управления. Поэтому в дальнейшем будет необходимо рассматриваемую задачу решить методом от обратного, а именно определить граничное значение  $D_{\text{БЛА}}$ , при котором неравенство (1) станет верным.

**Оценка запаса помехоустойчивости на дальности радиоканала «пункт управления – БЛА».** Для первого варианта, который учитывает теоретическое предельное значение дальности радиоканала, значение  $D_{\text{БЛА}}$ , с учетом рефракции радиоволн, будет определяться из выражения:

$$D_{\text{БЛА}} = 4.12 \cdot \left( \sqrt{h_{\text{пу}}} + \sqrt{h_{\text{БЛА}}} \right). \quad (2)$$

Для заданных  $h_{\text{пу}}$  и  $h_{\text{БЛА}}$  дальность прямой видимости составит  $D_{\text{БЛА}} = 46.25$  км. Полученный расчет ограничивает дальность прямой видимости и будет предельным для проведения расчетов в рассматриваемых условиях. Таким образом, в расчетах будем рассматривать динамику потерь для радиолиний от 100 м до 46.25 км ( $D \in [0.1; 42.25]$  км). На предельной дальности угол наклона между поверхностью и прямой, соединяющей точки пункта управления и БПЛА, определяется согласно их геометрическому расположению:

$$\varphi_{D_{\text{БЛА}}} = \text{asin} \left( \frac{h_{\text{БЛА}} - h_{\text{пу}}}{D_{\text{БЛА}}} \right). \quad (3)$$

Для приведенных значений составляет  $\varphi_{D_{\text{БЛА}}} = 0.122^\circ$ .

Поскольку высота БЛА в несколько раз превышает высоту сплошного лесного массива, следовательно, длина радиолинии, проходящей по лесу, будет значительно меньше  $D_{\text{БЛА}}$ . Максимальная длина радиолинии может быть определена из предположения, что луч, соединяющий пункт управления и сам БЛА, касается поверхности Земли в некоторой точке. Тогда, при допущении, что радиус Земли для некоторого расстояния не изменяется ( $R_3 = 6371$  км = const), можно построить систему уравнений, решение которой позволит рассчитать длину радиолинии вдоль леса  $D_f$ :

$$\begin{cases} d_1 + d_2 = D_f \\ \sqrt{(R_3 + h_{ny})^2 - R_3^2} = d_1 \\ \sqrt{(R_3 + h_f)^2 - R_3^2} = d_2 \end{cases} \quad (4)$$

В конечном итоге предельная дальность распространения радиоволн в лесном массиве  $D_f$  после упрощения примет вид:

$$D_f = \sqrt{h_{ny}^2 + 2 \cdot R_3 \cdot h_{ny}} + \sqrt{h_f^2 + 2 \cdot R_3 \cdot h_f}. \quad (5)$$

С учетом исходных параметров решение (4) позволило определить  $D_f = 25.49$  км. Важно отметить, что полученное расчетное значение  $D_f$  является максимально возможным, а его расчет предусматривал, что лесная поверхность практически ровная и не имеет препятствий в виде холмов или скал. В случае если такие препятствия имеются, предельная дальность будет ограничена прямой видимостью с учетом их высоты и дополнительных ослаблений.

Для второго варианта значения  $D_{БЛА}$  и  $D_f$  будут функционально зависимы от угла места  $\theta_{D_{БЛА}}$ :

$$D_{БЛА} = \frac{h_{БЛА} - h_{ny}}{\sin \theta_{D_{БЛА}}}, \quad D_f = \frac{h_f - h_{ny}}{\sin \theta_{D_{БЛА}}}. \quad (6)$$

Тогда ослабление при распространении радиосигнала в свободном пространстве будет определяться в виде [1]:

$$L_{fs} = 32.45 + 20 \cdot \lg(D_{БЛА} \cdot f). \quad (7)$$

С учетом (2) для условий первого варианта получим:

$$L_{fs} = 32.45 + 20 \cdot \lg\left(4.12 \cdot \left(\sqrt{h_{ny}} + \sqrt{h_{БЛА}}\right) \cdot f\right). \quad (8)$$

Тогда для второго варианта (7) примет вид:

$$L_{fs} = 32.45 + 20 \cdot \lg\left(\frac{(h_{БЛА} - h_{ny})}{\sin \theta_{D_{БЛА}}} \cdot f\right). \quad (9)$$

На основании (7) для различных  $D_{БЛА}$  был построен график поверхности, характеризующий изменение потерь в свободном пространстве для заданного интервала частот (рис. 8).

Согласно полученным расчетам, для максимального удаления на частоте 930 МГц уровень потерь составил 78.93 дБ, в то время как для 850 МГц значение – 78.39 дБ. При этом на минимальном удалении уровень потерь составил 52.14 дБ и 51.74 дБ соответственно.

**Расчет потерь при распространении радиосигнала в лесном массиве.** Для расчета потерь при распространении радиоволн в лесном массиве рассмотрим ряд существующих моделей, описывающих зависимость ослабления радиосигнала от его частоты, дальности распространения, типа лесного массива, а также времени года и процента растительности.

Наиболее подробно такие модели представлены в [1, 2]. В [1], в частности, показаны несколько отдельных моделей, из которых для условий лесного массива подходят Р.833(1), Р.833(2) и Р.833(3).

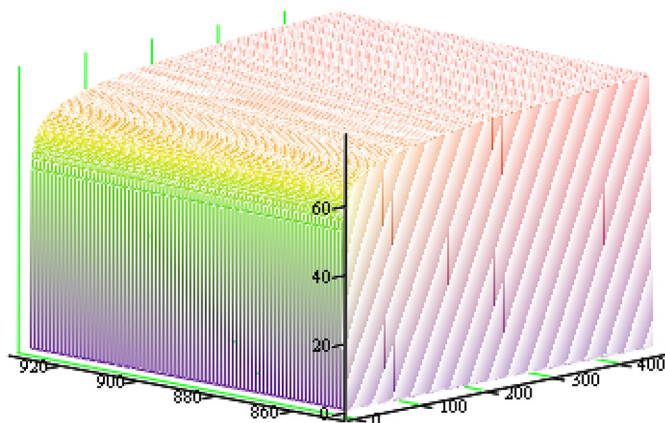


Рис. 8. Расчет потерь при распространении в свободном пространстве радиосигнала модуля LoRa (расстояние в сотнях метров)

Fig. 8. Calculation of losses during propagation in free space of the radio signal of the LoRa module (distance in hundreds of meters)

**Модель P.833(1).** Для описания потерь на ослабление  $L_v$  при распространении вдоль горизонтальной или наклонной трассы, покрытой зеленой растительностью, на практике используется модель на основе показательной функции [1]:

$$L_{f1} = A \cdot f^B \cdot d^C \cdot (\theta + E)^G, \quad (10)$$

где  $f$  – частота (МГц),  $d$  – глубина растительности (м),  $\theta$  – угол места (градусы), а  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $E$  и  $G$  – эмпирические параметры, характерные для конкретного типа растительности с учетом сезонности. В частности, в табл. 2 представлены коэффициенты, необходимые для расчета потерь в наклонной трассе с учетом соснового леса.

Тогда для соснового леса выражение (4) примет вид:

$$L_{f1} = 0,25 \cdot f^{0,39} \cdot d^{0,25} \cdot (\theta + E)^{0,05}. \quad (11)$$

Для условия первого варианта необходимо учесть, что угол места  $\theta = 0$ , тогда расчетное выражение примет вид:

$$L_{f1} = A \cdot f^B \cdot \left( \sqrt{h_{ny}^2 + 2 \cdot R_3 \cdot h_{ny}} + \sqrt{h_f^2 + 2 \cdot R_3 \cdot h_f} \right)^C \cdot E^G. \quad (12)$$

Таблица 2. Коэффициенты для расчета потерь в растительности

Table 2. Coefficients for calculating vegetation losses

Тип деревьев	A	B	C	E	G
Сосна	0,25	0,39	0,25	0	0,05
Кедр	1,87	-	-	0,01	-0,12
Можжевельник	1,5	-	-	0,01	-0,12

Для эмпирических коэффициентов кедра потери в лесном массиве  $L_v = 570.042$  дБ. Значение ослаблений будет нелинейно убывать с ростом  $\theta$ . При  $\theta = 1^\circ$  показатель ослабления снизится до 327.634 дБ.

Для второго варианта ослабления в зависимости от  $\theta_{D_{\text{БЛА}}}$ :

$$L_{f1}(\theta_{D_{\text{БЛА}}}) = A \cdot f^B \cdot \left( \frac{h_f - h_{\text{пу}}}{\sin \theta_{D_{\text{БЛА}}}} \right)^C \cdot (\theta_{D_{\text{БЛА}}} + E)^G. \quad (13)$$

Выражение (13) применимо в условиях, когда наземный пункт управления расположен внутри лесного массива. Для случая, если пункт управления расположен на некотором удалении от «лесной стены»  $d_v$  (1–50 м), сначала необходимо определить максимальный угол кромки леса  $\theta_{\text{max}}$ , град. Для расчетов потерь от растительности будем полагать, что мониторинг пожара производится в условиях кедрового (соснового) леса высотой  $h_f$  около 20 м (характерная высота кедрового леса для Западной и Центральной Сибири). В зависимости от значения  $d_v$  будет изменяться предельное значение секторального угла  $\theta_{\text{max}}$  между прямой, параллельной поверхности Земли, и прямой, проходящей через кромку лесного массива из точки расположения наземного терминала:

$$\theta_{\text{max}}(D_f) = \text{arctg} \left( \frac{h_f - h_{\text{пу}}}{d_v} \right). \quad (14)$$

График зависимости представлен на рис. 9.

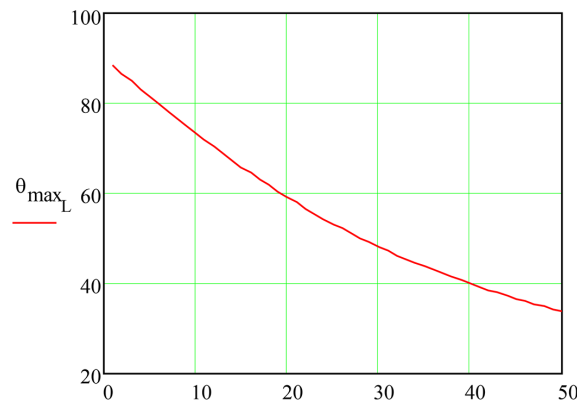


Рис. 9. Функционирование радиоканала «пункт управления – БЛА» с наземным ретранслятором в условиях растительности

Fig. 9. Operation of the radio channel “control point – UAV” with a ground repeater in vegetation conditions

Тогда протяженность радиолинии в лесу  $D_f$  можно определить из выражения:

$$D_f(\theta_{D_{\text{БЛА}}}) = \frac{h_f - h_{\text{пу}} - d_v \cdot \text{tg}(\theta_{D_{\text{БЛА}}})}{\sin(\theta_{D_{\text{БЛА}}})}. \quad (15)$$

В итоге представим (1) в виде:

$$L_v(\theta_{D_{\text{БЛА}}}) = A \cdot f^B \cdot \left( \frac{h_f - h_{\text{пн}} - d_v \cdot \text{tg}(\theta_{D_{\text{БЛА}}})}{\sin(\theta_{D_{\text{БЛА}}})} \right)^C \cdot (\theta_{D_{\text{БЛА}}} + E)^G. \quad (16)$$

На основании (5) были построены графики ослаблений для 850 и 930 МГц для различных удалений пункта управления от лесного массива.

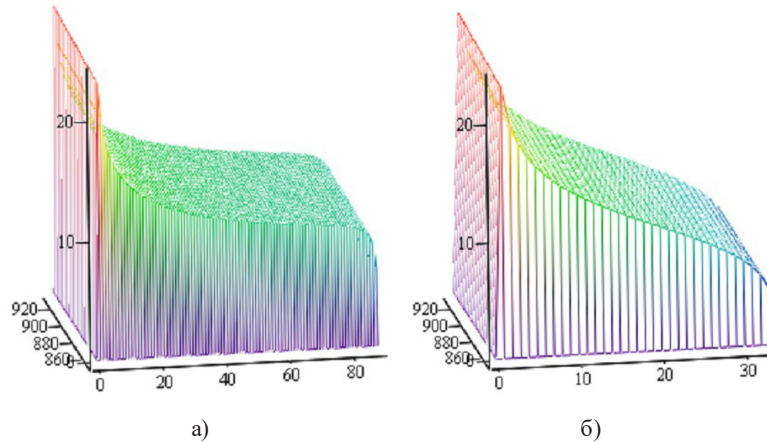


Рис. 10. Рассчитанные значения потерь для 850 и 930 МГц для различных удалений пункта управления от «лесной стены» а) 1 м; б) 50 м

Fig. 10. Calculated loss values for 850 and 930 MHz for different distances of the control center from the «forest wall» а) 1 m; б) 50 m

**Модель, учитывающая сезонность времени года Р.833(2).** Для учета изменения влияния растительности на потери в радиоканале в зависимости от времени года (сезона) используется модель (1), одним из параметров которой является номер месяца времени года  $M = 1, 2, 3, \dots, 12$ , который используется в определении значения коэффициента  $B$ :

$$B = (0.30281 - 0.003624 \cdot (|M - 6,5|)) \left( \frac{f}{1000} \right)^{(0.0013118 - 0.026236 \cdot (|M - 6,5|))}. \quad (17)$$

С учетом (17) для определения ослаблений радиоволн в лесном массиве используется выражение:

$$L_{f2} = A \cdot f^B \cdot \lg(D_f) \cdot (\theta_{D_{\text{БЛА}}} + E)^G - 4. \quad (18)$$

где  $f$  – частота (МГц),  $A$ ,  $E$  и  $G$  – эмпирические коэффициенты (табл. 1). Тогда для первого варианта с учетом (5) и  $\theta = 0$  выражение (18) примет вид:

$$L_{f2} = A \cdot f^B \cdot \lg \left( \sqrt{h_{\text{пн}}^2 + 2 \cdot R_3 \cdot h_{\text{пн}}} + \sqrt{h_f^2 + 2 \cdot R_3 \cdot h_f} \right) \cdot E^G - 4. \quad (19)$$

Для кедровых лесов (табл. 1) полученное значение составило  $L_{v_s} = 95.262$  дБ.

Для второго варианта, с учетом (15), в зависимости от  $\theta_{D_{\text{БЛА}}}$  и  $d_{\text{veg}}$  значение  $L_{v_s}$  можно определить с помощью выражения:

$$L_{fz}(\theta_{D_{\text{БЛА}}}) = A \cdot f^B \cdot \lg\left(\frac{h_f - h_{\text{ны}} - d_{\text{veg}} \cdot \text{tg}(\theta_{D_{\text{БЛА}}})}{\sin(\theta_{D_{\text{БЛА}}})}\right) \cdot (\theta_{D_{\text{БЛА}}} + E)^G - 4. \quad (20)$$

На рис. 11а и б приведены расчеты поверхностей потерь  $L_{v_s}(\theta, d_{\text{veg}})$  для верхней (930 МГц) и нижней (850 МГц) частот.

На основе выражений (17), (19), (20) для расчетов P.833(2) был разработан алгоритм определения потерь в радиоканале наклонной линии (рис. 12).

Особенностью данного алгоритма является то, что он позволяет определять потери для углов наклона, значения которых не могут превышать некоторой максимальной величины (угла до «лесной стены»), т.е. учитывается нелинейный характер роста ослабления радиоволн с увеличением расстояния их прохождения в лесной толще. При этом полученное максимальное значение также определяется с учетом заданной удаленности от лесного массива.

Из рис. 11 видно, что на кромке лесного массива получены отрицательные значения потерь, что соответствует интерференционным явлениям усиления сигнала на кромке леса. В частности, при  $f = 850$  МГц и дистанции до лесного массива, равной 50 м, были получены результаты, приведенные в табл. 1

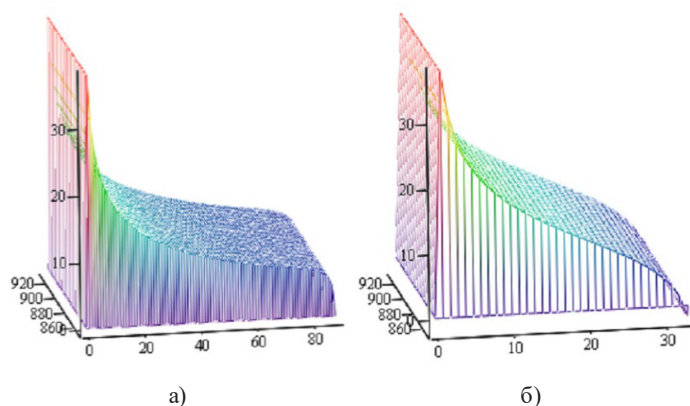


Рис. 11. Рассчитанные значения потерь для 850 и 930 МГц для различных удалений пункта управления от лесного массива: а) 1 м; б) 50 м

Fig. 11. Calculated loss values for 850 and 930 MHz for various distances of the control point from the forest area: a) 1 m; b) 50 m

Таблица 3. Результаты расчета потерь по углам при  $f = 850$  МГц (дистанция до растительности 50 м)

Table 3. Results of loss calculation at angles at  $f = 850$  MHz (distance to vegetation 50 m)

0	-	4	20.9	8	15.32	12	11.89	16	9.02	20	5.89
1	33.25	5	19.09	9	14.35	13	11.15	17	8.3	21	4.9
2	26.78	6	17.63	10	13.47	14	10.43	18	7.55	22	3.72
3	23.28	7	16.39	11	12.66	15	9.73	19	6.75	23	2.19

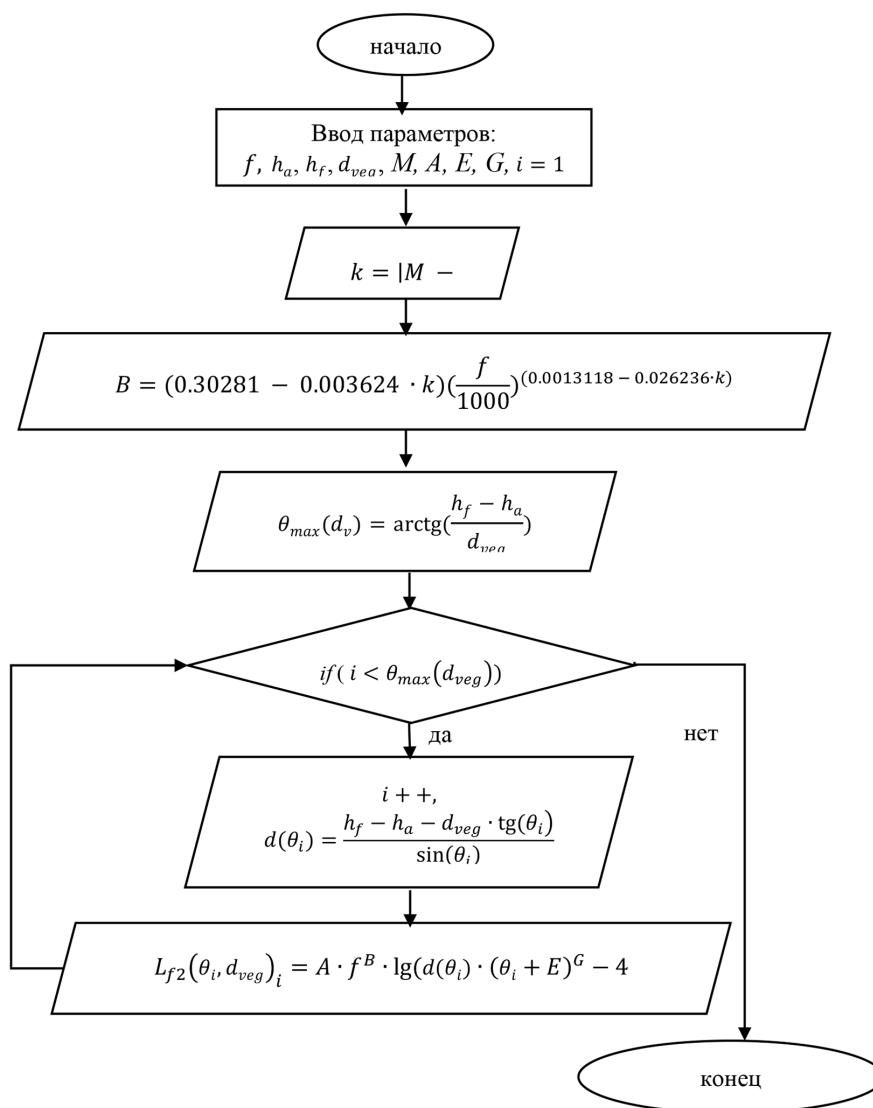


Рис. 12. Алгоритм расчета значения потерь в наклонной дальности

Fig. 12. Algorithm for calculating the value of losses in the inclined range

Типичная радиотрасса в лесистой местности: длина трассы с растительностью  $d$ , средняя высота деревьев  $h_v$ , высота антенны  $R_x$  над землей  $h_a$ , угол места радиотрассы  $\theta$ , расстояние от антенны до придорожной лесистой местности  $d_v$ .

**Модель, учитывающая процент растительности P.833(3).** При расчетах для любой местности согласно [1] предлагается использовать модель, в основе которой изначально задается процент растительности  $p$ . В отличие от (7), в данном выражении  $D_f$  задается не геометрически:

$$D_f = 2.43 \cdot p \cdot (\theta_{\text{ДБЛА}} + 1)^{-0,93047} + 1. \quad (21)$$

тогда с учетом (21) выражение для расчета ослаблений в общем виде примет вид:

$$L_{f3}(\theta_{D_{\text{БЛА}}}) = A \cdot f^B \cdot \lg \left[ \left( 2.43 \cdot p \cdot (\theta_{D_{\text{БЛА}}} + 1)^{-0.93047} + 1 \right) \cdot (\theta_{D_{\text{БЛА}}} + E)^G - 0.04 \cdot p + 0.4 \right]. \quad (22)$$

Оно будет полностью соответствовать условиям расчета второго варианта. Для первого варианта с учетом (22) получим:

$$L_{f3} = A \cdot f^B \cdot \lg [2.43 \cdot p + 1] \cdot E^G - 0.04 \cdot p + 0.4. \quad (23)$$

При  $p = 100\%$  с учетом кедрового леса и  $\theta_{D_{\text{БЛА}}} = 0^\circ$  значение ослаблений составит 55.721 дБ для 850 МГц. График поверхности для различных углов наклона и удалений от кедрового массива от 1 до 50 м с учетом 100 % растительности (первая половина лета) представлен на рис. 13.

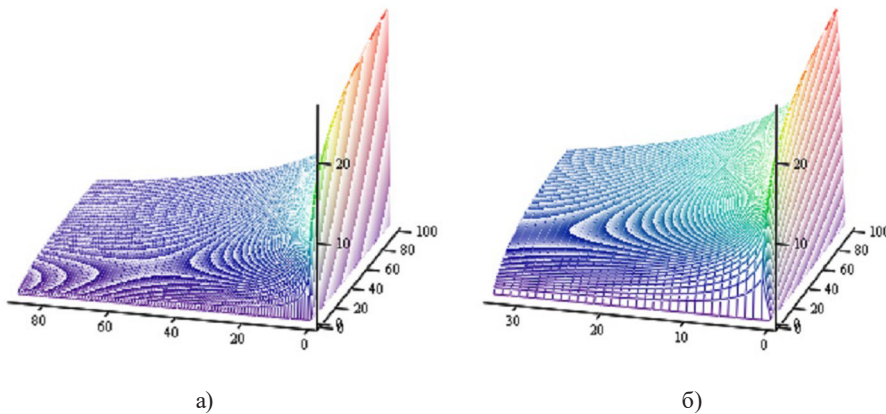


Рис. 13. Рассчитанные значения потерь для 850 МГц для различных значений процента с растительности от лесного массива а) 1 м; б) 50 м

Рис. 13. Calculated loss values for 850 MHz for different percentage values of vegetation from forest area: a) 1 m; b) 50 m

**Показательная модель ослабления с учетом типа растительности.** В [2] описана альтернативная модель определения ослаблений радиоволн в растительности. Ее особенностью является то, что модель значительно проще Р.833 и позволяет производить расчет для лиственного или хвойного лесов, не включая эмпирические коэффициенты конкретных деревьев:

$$L_{fp}(D_f) = \begin{cases} 0.2 \cdot f^{0.3} \cdot D_f^{0.6}, & \text{лиственный лес} \\ 0.15 \cdot f^{0.4} \cdot D_f^{0.55}, & \text{хвойный лес} \end{cases}. \quad (24)$$

Для условий первого варианта (14) примет вид:

$$L_{f-p} = \begin{cases} 0.2 \cdot f^{0.3} \cdot \left( \sqrt{h_{\text{пы}}^2 + 2 \cdot R_3 \cdot h_{\text{пы}}} + \sqrt{h_f^2 + 2 \cdot R_3 \cdot h_f} \right)^{0.6}, & \text{лиственный лес} \\ 0.15 \cdot f^{0.4} \cdot \left( \sqrt{h_{\text{пы}}^2 + 2 \cdot R_3 \cdot h_{\text{пы}}} + \sqrt{h_f^2 + 2 \cdot R_3 \cdot h_f} \right)^{0.55}, & \text{хвойный лес} \end{cases}. \quad (25)$$

Для хвойного леса расчетное значение ослабления составит  $L_v = 590.692$  дБ. Для второго варианта с учетом (15) получим:

$$L_{f,p}(\theta_{D_{\text{БЛА}}}) = \begin{cases} 0.2 \cdot f^{0.3} \cdot \left( \frac{h_f - h_{\text{пу}} - d_{\text{veg}} \cdot \text{tg}(\theta_{D_{\text{БЛА}}})}{\sin(\theta_{D_{\text{БЛА}}})} \right)^{0.6}, & \text{лиственный лес} \\ 0.15 \cdot f^{0.4} \cdot \left( \frac{h_f - h_{\text{пу}} - d_{\text{veg}} \cdot \text{tg}(\theta_{D_{\text{БЛА}}})}{\sin(\theta_{D_{\text{БЛА}}})} \right)^{0.55}, & \text{хвойный лес} \end{cases} \quad (26)$$

На рис. 14 показательная модель позволяет в упрощенном виде рассчитывать распространение радиоволн в лесном массиве без учета сезонности времени года.

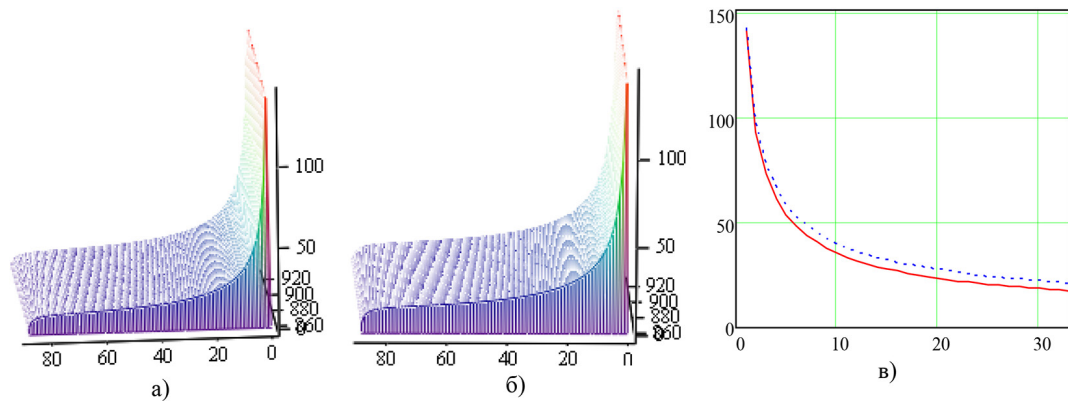


Рис. 14. Рассчитанные значения потерь согласно «показательной» модели а) для лиственного леса; б) для хвойного леса; в) ослабления в лиственном и хвойном лесу для 930 МГц

Fig. 14. Calculated loss values according to the «exponential» model a) for deciduous forest; b) for coniferous forest; c) attenuation in deciduous and coniferous forest for 930 MHz

**Модель MED (Modified Exponential Model).** Модель MED позволяет производить расчет ослаблений в растительности в диапазоне частот  $f$  в интервале 200–9500 МГц для  $D_f$  до 400 м, что характерно для небольших лесополос или отдельных чащ:

$$L_{f_{\text{med}}}(D_f) = \begin{cases} 1.33 \cdot \left( \frac{f}{1000} \right)^{0.284} \cdot D_f^{0.588}, & \text{где } 14 \leq D_f \leq 400 \\ 0.45 \cdot \left( \frac{f}{1000} \right)^{0.284} \cdot D_f, & \text{где } D_f < 14 \end{cases} \quad (27)$$

Выражение (14) равнозначно применимо как для первого, так и для второго варианта.

На рис. 15 представлена зависимость данной модели оценки ослабления для различных частот.

Согласно данной модели для предельного значения протяженности радиоканала по лесному массиву (400 м) для частоты 850 МГц ослабление может составить порядка 43.035 дБ, в то время как для 930 значение составит 44.148 дБ. Очевидным недостатком модели является отсутствие возможности расчета более протяженных радиолиний, проходящих через растительность, и влияние типа лесного массива.

**Модель COST 235.** Модель COST 235 позволяет рассчитывать ослабления в растительности для частот 30–3000 МГц, как и показательная, учитывая только тип растительности (лиственный или хвойный лес):

$$L_{f_{cost}}(D_f) = \begin{cases} 26.6 \cdot f^{-0.2} \cdot D_f^{0.5}, & \text{лиственный лес} \\ 15.6 \cdot f^{-0.009} \cdot D_f^{0.26}, & \text{хвойный лес} \end{cases} \quad (28)$$

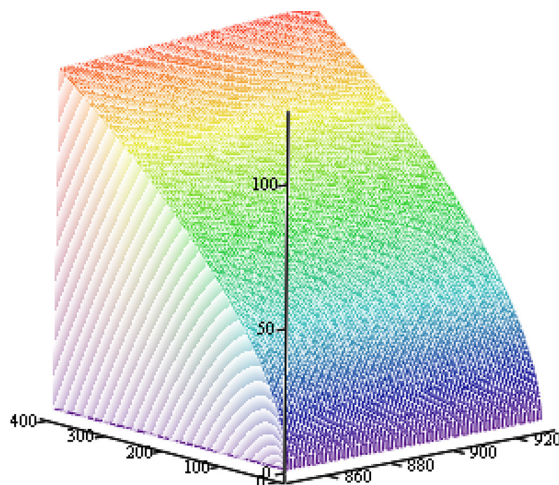


Рис. 15. Рассчитанные значения потерь согласно модели MED

Fig. 15. Calculated loss values according to the MED model

Для первого варианта с учетом (51) выражение (28) примет вид:

$$L_{f_{cost}} = \begin{cases} 26.6 \cdot f^{-0.2} \cdot \left( \sqrt{h_{ny}^2 + 2 \cdot R_3 \cdot h_{ny}} + \sqrt{h_f^2 + 2 \cdot R_3 \cdot h_f} \right)^{0.5}, & \text{лиственный лес} \\ 15.6 \cdot f^{-0.009} \cdot \left( \sqrt{h_{ny}^2 + 2 \cdot R_3 \cdot h_{ny}} + \sqrt{h_f^2 + 2 \cdot R_3 \cdot h_f} \right)^{0.26}, & \text{хвойный лес} \end{cases} \quad (29)$$

С учетом хвойного леса расчетное значение ослабления составит  $L_{v_{cost}} = 205.313$  дБ.

Для второго варианта расчетов получим:

$$L_{f_{cost}}(\theta_{ДБЛА}) = \begin{cases} 26.6 \cdot f^{-0.2} \cdot \left( \frac{h_f - h_{ny} - d_{veg} \cdot \text{tg}(\theta_{ДБЛА})}{\sin(\theta_{ДБЛА})} \right)^{0.5}, & \text{лиственный лес} \\ 15.6 \cdot f^{-0.009} \cdot \left( \frac{h_f - h_{ny} - d_{veg} \cdot \text{tg}(\theta_{ДБЛА})}{\sin(\theta_{ДБЛА})} \right)^{0.26}, & \text{хвойный лес} \end{cases} \quad (30)$$

Графики расчетов по модели COST 235 для диапазона частот 850–930 МГц и их сравнение представлены на рис. 16а, б, в.

Расчеты показали, что в данной модели разница в значении потерь между 850 и 930 МГц для лиственного леса не превышает 2 дБ при наклоне в 10 градусов, а для хвойного леса практически пренебрежимо мала.

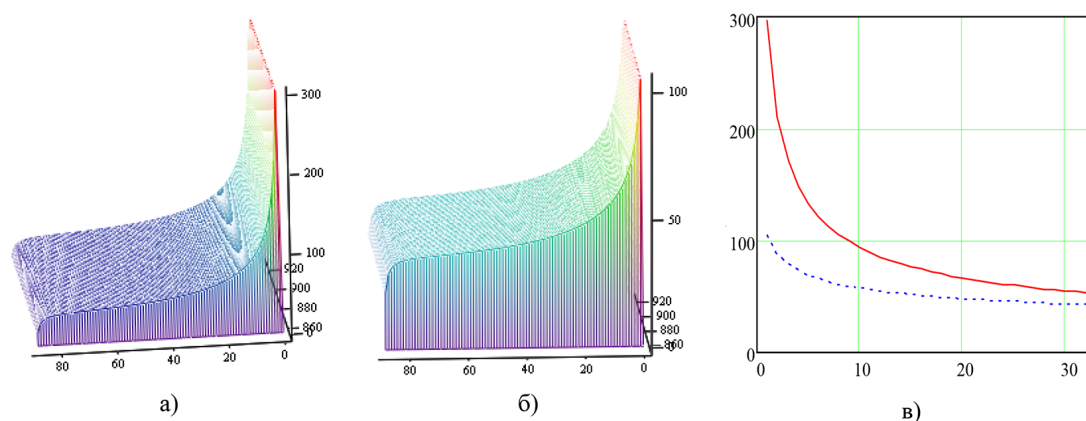


Рис. 16. Рассчитанные значения потерь для частот функционирования модуля LoRa согласно модели COST 235 а) для лиственного леса; б) для хвойного леса; в) сравнение ослаблений в лиственном и хвойном лесу для 930 МГц

Fig. 16. Calculated loss values for the operating frequencies of the LoRa module according to the COST 235 model a) for deciduous forest; b) for coniferous forest; c) comparison of attenuation in deciduous and coniferous forest for 930 MHz

### Оценка результатов расчетов ослаблений в растительности

Обобщенные результаты расчетов для представленных выше моделей показаны в табл. 4. Знаком \* в графе примечаний показаны расчеты, в которых не учитывались конкретные коэффициенты растительности.

Из анализа полученных расчетов ослабления радиоволн в лесном массиве можно сделать следующие выводы:

- при расчете P.833(1), P.833(2), P.833(3) использовались эмпирические коэффициенты для кедра. При этом модель P.833(3) отличается от P.833(1) и P.833(2) тем, что в ней значение  $D_f$  определяется формализованно и зависит только от процента растительности и угла места, что делает эту модель не пригодной для расчетов при максимальной дальности, поскольку она становится инертна к расстоянию;

Таблица 4. Ослабления в растительности для частоты 850 МГц для рассчитанного значения дальности  $D_{\text{БЛА}}$

Table 4. Attenuation in vegetation for a frequency of 850 MHz for the calculated value of the  $D_{\text{UAV}}$  range

Модели расчета ослаблений	Расчётные значения ослаблений вдоль горизонта, дБ	Примечания
P.833(1)	570.042	
P.833(2)	95.262	
P.833(3)	55.721	при $p = 100\%$
Показательная	590.692	*
MED	43.035	для дальности 400 м,*
COST 235	205.313	*

– расхождение в расчетах «показательной» модели и P.833(1) не превышает 3.5 %. Значения ослаблений, полученные в данных моделях, в несколько раз превышают расчеты других моделей;

– модель MED позволяет рассчитывать ослабления только для  $D_f < 400$  м, что делает ее, так же как P.833(3), не применимой для больших протяженностей радиолинии в лесном массиве;

– полученные выражения для расчетов в условиях первого варианта позволяют учесть предельную дальность радиолинии с учетом сферичности Земли, в то время как выражения для второго варианта позволяют это сделать для условий, когда расстояния между пунктом управления и БЛА ( $D_{\text{БЛА}} < 12$  км);

– учитывая ограниченную функциональность моделей MED и P.833(3), минимальное значение ослаблений  $L_f$ , которое допустимо учитывать в расчетах для предельного  $D_{\text{БЛА}}$ , соответствует 205.313 дБ (COST 235), в то время как максимальное значение соответствует 590.692 дБ («показательная» модель).

Для дальнейших расчетов в качестве  $L_f$  будем использовать худшее с точки зрения радиосвязи значение, полученное в ходе расчетов для «показательной» модели ( $L_f = L_{f,p} = 590.692$  дБ). Тогда суммарные потери в радиоканале будут определяться согласно выражению:

$$L_{\Sigma} = L_{fs} + L_f. \quad (31)$$

С учетом (2) и (14) расчеты показали, что суммарные ослабления в радиоканале для 850 МГц  $L_{\Sigma} = 648.432$  дБ.

**Расчет запаса помехоустойчивости.** Мощность сигнала на входе приемника в радиоканале «пункт управления – БЛА» определяется согласно выражению:

$$P_{\text{вх}} = P_{\text{БЛА}} + G_{\text{БЛА}} - L_{\Sigma} + G_T. \quad (32)$$

где  $P_{\text{БЛА}}$  – мощность передатчика борта (в данном случае модуля LoRa), дБВт,  $G_{\text{БЛА}}$  – коэффициент усиления бортовой антенны в направлении на терминал, дБ,  $G_T$  – коэффициент усиления терминала в направлении на БЛА, дБ.

В современных наземных терминалах существует широкое многообразие антенн для организации радиоканала с БЛА. Это многообразие в первую очередь обусловлено частными конкретными задачами, решаемыми используемыми средствами. В условиях леса необходимо выбирать антенны с большими коэффициентами усиления и использовать их отдельно для заданного сектора. Для рассматриваемого диапазона частот, как правило, могут быть использованы антенны с коэффициентом усиления около 5 дБ, т.е.  $G_{\text{БЛА}} = 5$  дБ. На наземных терминалах проще применять большую по размеру антенну, поскольку нет таких жестких ограничений, как на борту БЛА, и поэтому для диапазона частот применяют антенны типа Уда-Яги с коэффициентом усиления до 15 дБ,  $G_T = 15$  дБ.

Чувствительность приемника современного наземного терминала может составлять порядка  $-110..-115$  дБм ( $P_{T_{\text{min}}} = -110..-115$  дБм), тогда отношение сигнал-шум на выходе приемного устройства будет равно:

$$\frac{E_6}{N_0} [\text{дБ}] = P_{\text{БЛА}} + G_{\text{БЛА}} - L_{\Sigma}(D_{\text{БЛА}}) + G_T - P_{T_{\text{min}}} \geq 0. \quad (33)$$

С учетом приведенных значений отношение сигнал-шум  $\frac{E_b}{N_0}$  для 850 МГц составит  $-491.432$  дБм. Полученное значение крайне велико и показывает глубокий дефицит запаса помехоустойчивости, что не позволяет обеспечить требуемое отношение сигнал-шум (SNR) и BER. Это означает, что на предельной дальности с учетом заданных параметров не представляется возможным обеспечить радиоканал требуемым уровнем помехоустойчивости, поэтому необходимо определить максимальное значение  $D_{\text{БЛА}}$  и  $D_f$ , при котором неравенство (1) станет верным. Таким образом, на основании (1) и (14) получим:

$$P_{\text{БЛА}} + G_{\text{БЛА}} - (32.45 + 20 \cdot \lg(D_{\text{БЛА}} \cdot f) + 0.15 \cdot f^{0.4} \cdot D_f^{0.55}) + G_T \geq P_{T.min}. \quad (34)$$

Предполагая, что для решения неравенства (17) значение дальности радиоканала управления БЛА не должно превышать 12 км ( $D_{\text{БЛА}} < 12$  км), получим неравенство вида:

$$P_{\text{БЛА}} + G_{\text{БЛА}} - \left( 32.45 + 20 \cdot \lg \left( \frac{h_{\text{БЛА}} - h_{\text{пу}} - d_{\text{veg}} \cdot \text{tg}(\theta_{D_{\text{БЛА}}})}{\sin(\theta_{D_{\text{БЛА}}})} \cdot f \right) + \right. \\ \left. + 0.15 \cdot f^{0.4} \cdot \left( \frac{h_f - h_{\text{пу}} - d_{\text{veg}} \cdot \text{tg}(\theta_{D_{\text{БЛА}}})}{\sin(\theta_{D_{\text{БЛА}}})} \right)^{0.55} \right) + G_T \geq P_{T.min}. \quad (35)$$

График решения (35) представлен на рис. 17

Решение неравенства позволило определить критическое значение угла места  $\theta_{D_{\text{БЛА}}} \geq 24^\circ$ , при котором выполняется требование помехоустойчивости. С учетом полученного критического значения  $\theta_{D_{\text{БЛА}}}$  и полагая, что пункт управления расположен внутри леса ( $d_{\text{veg}} = 0$ ), определим  $D_{\text{БЛА}}$  и  $D_f$ :

$$D_{\text{БЛА}} = \frac{h_{\text{БЛА}} - h_{\text{пу}}}{\sin(\theta_{D_{\text{БЛА}}})} = \frac{98,5}{0,407} \approx 242 \text{ м}, \quad D_f = \frac{h_f - h_{\text{пу}}}{\sin \alpha} = \frac{18,5}{0,407} \approx 45,5 \text{ м},$$

Полученные значения  $D_{\text{БЛА}}$  и  $D_f$  позволяют оценить предельную допустимую дальность радиоканала управления БПЛА при использовании модуля LoRa UART CDEBYTE E 220–900T22D-V1.2.

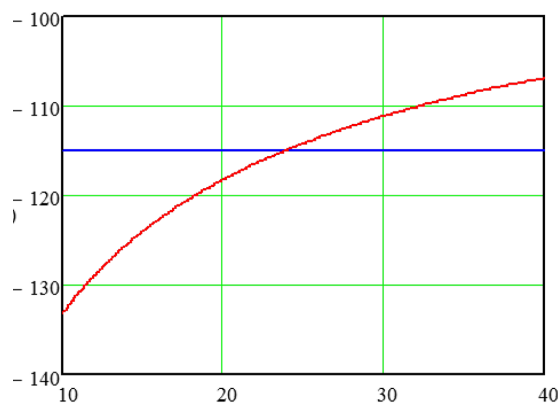


Рис. 17. График решения неравенства определения угла места  $\theta_{D_{\text{БЛА}}}$

Fig. 17. Graph of the solution of the inequality of determining the angle of the seat  $\theta_{D_{\text{БЛА}}}$

**Оценка вероятности битовой ошибки.** Согласно описательной документации, в модулях LoRa используется цифровая модуляция типа CSS (Chirp Spread Spectrum), для которой значение BER можно оценить согласно выражению:

$$P_6 \left( SF, \frac{E_6}{N_0} \right) \approx Q \left( \sqrt{k_e \cdot SF \cdot \frac{E_6}{N_0}} \right), \quad (36)$$

где  $k_e = 0.5..2$  – коэффициент пропорциональности ошибки, зависящий от структуры передаваемого кадра,  $SF = 7..12$  – коэффициент расширения полосы сигнала (определяется длиной чиповой последовательности на бит),  $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt$  – функция вероятности.

Следует отметить, что верхняя граница для оценки BER определяется согласно выражению:

$$P_6 \leq 0.5 \cdot \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{E_6}{N_0}} \right). \quad (37)$$

С учетом представленных выражений были построены графики BER в зависимости от SNR (рис. 18)

Из графика видно, что для удовлетворения условий, при котором обеспечивается  $P_6 \leq 10^{-5}$ , при «пессимистичном» расчете необходимое значение SNR составляет порядка 9.3 (9.7 дБ). Для условия, при котором обеспечивается  $P_6 \leq 10^{-5}$ , значения требуемого SNR представлены в табл. 5

Учитывая, что  $k_e = 2$ , расчетное значение  $D_{\text{БЛА}}$  будет соответствовать 242 м при заданных параметрах лесного массива и высоте полета БЛА.

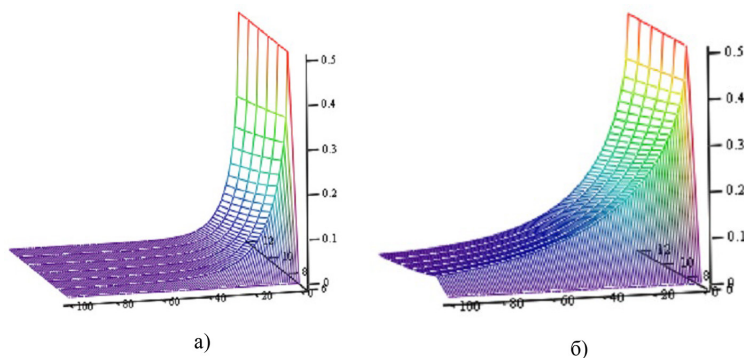


Рис. 18. Рассчитанные значения потерь для частот функционирования модуля LoRa согласно модели COST 235 а) для лиственного леса; б) для хвойного леса; в) ослабления в лиственном и хвойном лесу для 930 МГц

Fig. 18. Calculated loss values for the operating frequencies of the LoRa module according to the COST 235 model a) for deciduous forest; b) for coniferous forest; c) attenuation in deciduous and coniferous forest for 930 MHz

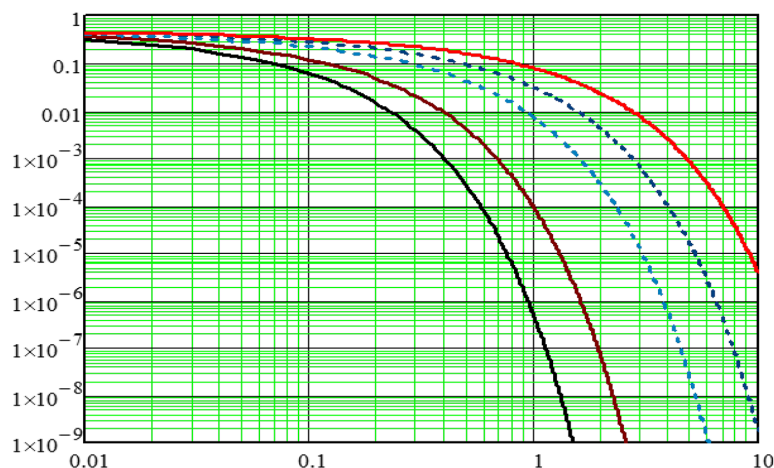


Рис. 19. Рассчитанные значения потерь для 850 МГц для различных значений процента с растительности от лесного массива а) 1 м; б) 50 м

Fig. 19. Calculated loss values for 850 MHz for various values of the percentage of vegetation from the forest area a) 1 m; b) 50 m

Таблица 5. Требуемые значения SNR ( $P_6 \leq 10^{-5}$ )

Table 5. Required SNR values ( $P_6 \leq 10^{-5}$ )

$k_c$	$SF = 7$	$SF = 12$
0.5	5.2(7.16 дБ)	3(4.8 дБ)
2	1.3(1.14 дБ)	0.76(-0.12 дБ)

### Заключение

Результаты, полученные в ходе расчетов, позволяют оценить границы ослаблений в радиоканале передачи данных и управления БЛА с учетом растительности для равнинной поверхности. Расчеты, полученные для каждой из приведенных моделей, показали, что ослабления, вызванные растительностью, могут иметь значения от 20 до 100 дБ в зависимости от наклона.

Полученное в ходе расчетов значение для частных условий ( $h_f = 20$ ,  $h_{\text{БЛА}} = 100$ ,  $h_{\text{пу}} = 1.5$ ,  $d_{\text{veg}} = 0$ ).

### Список источников

1. Рекомендация МСЭ-R P. 833–10 (09/2021).
2. Ипатов В.П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и приложения. М.: Техносфера. 2007. 488 с.
3. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.
4. Torrieri D. Principles of spread-spectrum communication systems, Springer, 2015. 641 p.

### Список литературы / References

- [1] Yi S., Wu Y. Projection-based robust adaptive beamforming with quadratic constraint. *Signal Process*, 2017, 2, 65–74.
- [2] Mishchenko S.E. Method of synthesis of a linear virtual antenna array with angular superresolution of weak signals. *Antennas for radio communication and direction finding systems*, 2021, 6, 23–32.
- [3] Chen H. & Chan E.H. Photonics-based CW/pulsed microwave signal AOA measurement system. *Lightwave Technol.*, 2020, 38, 2292–2298.
- [4] Popov A. V. Development of an Indicator of Optimality of the Special Purpose Communication Network Based on the Theory of Conflicts. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Radio Engineering and Infocommunication Systems*, 2023, 2 (58), 53–63. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2023.2.53>.
- [5] Klyuev D.S., Volobuev A.N., Krasnov S.V., Adyshirin-Zade K.A., Antipova T.A., Aleksandrova N.N. Occurrence of fluctuations in the amplitude and phase of the radio signal in a turbulent atmosphere. *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, 2023, 26(1), 28–37. DOI: [10.18469/1810-3189.2023.26.1.28-37](https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.1.28-37).
- [6] Kostoglotov A. A., Kuznetsov A. A., Lazarenko S. V., Andrashitov D. S. Analysis of the Effectiveness of Innovative Solutions Based on the Unified Principle of Maximum in Information Processing and Management Tasks *Innovation and expertise: scientific papers*, 2015, 2(15), 38–51.
- [7] Kostoglotov A., Lazarenko S., Pugachev I. Synthesis of phase-locked loop systems under conditions of a disturbance based on the model of the combined maximum principle and the discrete invariant immersion method. *Proceedings – 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021*. 2021, 503–508.

EDN: RDDADR

УДК 621.396.96:629.7

## Mathematical Model of Microdopler Signals of Small-Sized Aerial Objects for Radar Recognition Based on Phase Features

Andrey V. Grebennikov<sup>a</sup>, Nikita V. Kopylov<sup>b</sup>,  
Valery M. Vladimirov<sup>a</sup> and Valeria V. Poslavskaya<sup>\*a</sup>

<sup>a</sup>*Siberian Federal University  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

<sup>b</sup>*Yaroslavl Higher Military School of Air Defense  
named after Marshal of the Soviet Union L. A. Govorov  
Yaroslavl, Russian Federation*

Received 16.01.2026, received in revised form 08.02.2026, accepted 15.03.2026

**Abstract.** The article considers the problem of mathematical modeling of Microdopler signals reflected from small-sized aerial objects such as unmanned aerial vehicles and biological targets. A phase-coherent mathematical model of the reflected radar signal has been developed based on the representation of the target as a set of distributed scattering elements with rigid and articulated kinematics. It is shown that the difference in the physical nature of the micro-movements of the target elements leads to a fundamentally different phase structure of the Microdopler components with similar energy characteristics of the spectrum. Based on the analysis of the phase properties of the reflected signals, the use of the phase coherence coefficient as a distinguishing feature for radar recognition of small-sized aerial objects in conditions of a low signal-to-noise ratio is theoretically justified.

**Keywords:** Microdopler effect, small-sized aerial objects, phase coherence, radar recognition, mathematical model, unmanned aerial vehicles.

Citation: Grebennikov A. V., Kopylov N. V., Vladimirov V. M., Poslavskaya V. V. Mathematical Model of Microdopler Signals of Small-Sized Aerial Objects for Radar Recognition Based on Phase Features. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2026, 19(3), 410–419. EDN: RDDADR



© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: poslavskay.lera@mail.ru

# Математическая модель микродоплеровских сигналов малоразмерных воздушных объектов для радиолокационного распознавания на основе фазовых признаков

А. В. Гребенников<sup>а</sup>, Н. В. Копылов<sup>б</sup>,  
В. М. Владимиров<sup>а</sup>, В. В. Пославская<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, Красноярск

<sup>б</sup>Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны  
имени Маршала Советского Союза Л. А. Говорова  
Российская Федерация, Ярославль

**Аннотация.** В статье рассматривается задача математического моделирования микродоплеровских сигналов, отраженных от малоразмерных воздушных объектов, таких как беспилотные летательные аппараты и биологические цели. Разработана фазово-когерентная математическая модель отраженного радиолокационного сигнала, основанная на представлении цели в виде совокупности распределенных элементов рассеяния с жесткой и артикулированной кинематикой. Показано, что различие физической природы микродвижений элементов цели приводит к принципиально различной фазовой структуре микродоплеровских составляющих при близких энергетических характеристиках спектра. На основе анализа фазовых свойств отраженных сигналов теоретически обосновано использование коэффициента фазовой когерентности в качестве разделительного признака для задач радиолокационного распознавания малоразмерных воздушных объектов в условиях низкого отношения сигнал/шум.

**Ключевые слова:** микродоплеровский эффект, малоразмерные воздушные объекты, фазовая когерентность, радиолокационное распознавание, математическая модель, беспилотные летательные аппараты.

Цитирование: Гребенников А. В. Математическая модель микродоплеровских сигналов малоразмерных воздушных объектов для радиолокационного распознавания на основе фазовых признаков / А. В. Гребенников, Н. В. Копылов, В. М. Владимиров, В. В. Пославская // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2026, 19(3). С. 410–419. EDN: RDDADR

## Введение

В последние годы в радиолокации сформировалась устойчивая тенденция перехода от задач обнаружения и сопровождения крупноразмерных аэродинамических целей к задачам распознавания малоразмерных воздушных объектов (МВО) в условиях сложной помеховой обстановки [1]. К числу таких объектов относятся беспилотные летательные аппараты (БПЛА), а также биологические цели, прежде всего птицы. Массовое распространение БПЛА, обладающих малой эффективной площадью рассеяния и низкими радиальными скоростями, существенно усложнило задачу принятия решений в автоматизированных системах управления и противовоздушной обороны [2].

С точки зрения классической теории радиолокации малоразмерные БПЛА и птицы находятся в области параметров, где традиционные энергетические и траекторные признаки теряют разделительную способность [3]. Использование композитных и радиопрозрачных материалов

приводит к снижению эффективной площади рассеивания (ЭПР) БПЛА до величин, сопоставимых с ЭПР биологических объектов. При этом диапазоны скоростей, высот и характер движения центров масс таких целей существенно перекрываются. В результате условные распределения признаков классов «БПЛА» и «птица», сформированные на основе амплитудных и кинематических характеристик, оказываются неразличимыми при малых значениях отношения сигнал/шум [4], что подтверждается сравнительными экспериментальными исследованиями [5].

Попытки переноса задачи распознавания на этап вторичной обработки, основанные на анализе траекторных признаков, сталкиваются с фундаментальными ограничениями. Для формирования статистически устойчивых оценок параметров движения требуется длительное время наблюдения, что противоречит требованиям оперативности. Кроме того, при зависании БПЛА или полете по ветру птиц траекторные признаки вырождаются и становятся кинематически неотличимыми.

Сигнальные методы распознавания, основанные на анализе микродоплеровских спектров отраженного сигнала, обладают большей оперативностью и физической интерпретируемостью [3]. Однако в условиях низкого отношения сигнал/шум их эффективность резко снижается. Амплитудные микродоплеровские компоненты маскируются флуктуационными шумами приемного тракта, особенно при использовании БПЛА с лопастями из композитных материалов, что приводит к значительному перекрытию спектральных признаков разных классов [5, 6]. В этих условиях спектрально-энергетические признаки теряют устойчивость, а классические методы спектрального анализа оказываются недостаточно информативными [4].

Таким образом, возникает фундаментальное научно-техническое противоречие: с одной стороны, требуется обеспечить высокую вероятность правильного распознавания малоразмерных воздушных объектов в реальном масштабе времени, а с другой – существующий научно-методический аппарат, ориентированный на анализ амплитудных и траекторных признаков, не позволяет достичь требуемых показателей качества в условиях низкого отношения сигнал/шум и высокой степени сходства наблюдаемых характеристик целей различной физической природы.

Одним из перспективных направлений разрешения данного противоречия является переход к анализу тонкой структуры отраженного радиолокационного сигнала, в частности его фазовой составляющей. Фазовая структура микродоплеровских сигналов формируется кинематикой движения внутренних элементов цели и обладает принципиально иной статистической природой по сравнению с амплитудными характеристиками. Для технических объектов с жесткой кинематикой фазовые соотношения сохраняют высокую степень когерентности, тогда как для биологических объектов с артикулированной и нестационарной кинематикой наблюдается нарушение фазовой согласованности.

В этой связи актуальной является задача разработки математической модели микродоплеровских сигналов от малоразмерных воздушных объектов, учитывающей фазовую структуру откликов распределенных отражающих элементов, а также обоснование фазовых признаков, обладающих устойчивой разделительной способностью в условиях низкого отношения сигнал/шум. Решение данной задачи создает предпосылки для повышения вероятности правильного распознавания классов МВО и формирования алгоритмов, приближающихся по эффективности к оптимальной корреляционной обработке в условиях априорной неопределенности параметров движения цели.

В когерентных радиолокационных системах вторичная обработка сигналов основана на анализе комплексной огибающей отраженного сигнала, параметры которой определяются геометрией цели, ее кинематикой и электрофизическими характеристиками отражающих элементов. В соответствии с классическими положениями теории радиолокации [1, 4], сложная цель может быть представлена в виде совокупности локальных центров рассеяния, пространственно-распределенных по ее поверхности и обладающих индивидуальными законами движения.

При условии когерентного приема и узкополосного зондирующего сигнала комплексная огибающая отраженного сигнала от МВО может быть записана в виде суммы вкладов от отдельных центров рассеяния [5]:

$$s(t) = \sum_{k=1}^K A_k \exp\left(j \frac{4\pi}{\lambda} R_k(t)\right) + n(t), \quad (1)$$

где  $A_k$  – комплексная амплитуда отражения  $k$ -го элемента,  $\lambda$  – длина волны зондирующего сигнала,  $R_k(t)$  – текущая наклонная дальность до соответствующего центра рассеяния,  $n(t)$  – аддитивная шумовая составляющая, моделирующая собственные шумы приемного тракта. В рамках принятой модели предполагается, что временные флуктуации амплитуд  $A_k$  являются медленными по сравнению с фазовой модуляцией, что соответствует допущениям, традиционно используемым при анализе микродоплеровских эффектов.

Для целей с артикулированной кинематикой дальность  $R_k(t)$  может быть представлена в виде суммы поступательного движения центра масс и микроперемещений, обусловленных внутренней структурой цели:

$$R_k(t) = R_0(t) + \Delta R_k(t), \quad (2)$$

В отличие от объектов с жесткой кинематикой, величина  $\Delta R_k(t)$  в этом случае носит нестационарный характер и определяется совокупностью взаимосвязанных колебательных процессов, что приводит к нестационарной фазовой модуляции отраженного сигнала.

Фазовая структура отраженного сигнала полностью определяется законом изменения дальности  $R_k(t)$ , включающим вклад поступательного движения цели и микродвижений отдельных элементов конструкции. Для малоразмерных воздушных объектов принципиально важным является различие типов микродвижений, обусловленных физической природой объекта. В данной работе рассматриваются два характерных класса кинематики: жесткая кинематика, присущая механическим системам с вращающимися элементами, и артикулированная кинематика, характерная для биологических объектов.

В случае жесткой кинематики движение отражающих элементов может быть аппроксимировано детерминированным вращением с постоянной угловой скоростью. Для такого движения дальность до  $k$ -го центра рассеяния может быть представлена в виде

$$R_k(t) = R_0 + V_r t + r_k \cos(\Omega t + \varphi_k) \cos\beta, \quad (3)$$

где  $R_0$  – дальность до центра масс цели,  $V_r$  – радиальная скорость поступательного движения,  $r_k$  – радиус вращения отражающего элемента,  $\Omega$  – угловая скорость вращения,  $\varphi_k$  – начальная фаза,  $\beta$  – угол между плоскостью вращения и линией визирования радиолокационной стан-

ции. Подобное представление широко используется при анализе микродоплеровских сигналов от роторных и винтовых систем и соответствует классическим моделям вторичного излучения движущихся объектов [3].

Детерминированный характер движения отражающих элементов при жесткой кинематике приводит к гармонической фазовой модуляции отраженного сигнала и формированию устойчивых микродоплеровских компонент, сохраняющих фиксированные фазовые соотношения на интервале когерентного накопления. Данное свойство является следствием кинематической согласованности движения элементов и обуславливает высокую степень фазовой упорядоченности спектральных составляющих.

В отличие от этого, при артикулированной кинематике движение отражающих элементов носит более сложный характер и не может быть описано одним гармоническим процессом. Биомеханические структуры, такие как крылья птиц, представляют собой системы связанных сегментов, движение которых описывается совокупностью колебательных процессов с различными амплитудами, фазами и степенью корреляции. В этом случае дальность до отражающих элементов определяется суммой поступательного движения и нескольких взаимосвязанных угловых перемещений, что приводит к нестационарной фазовой модуляции отраженного сигнала [7].

Для верификации разработанной модели и сравнительного анализа фазовых характеристик было проведено численное моделирование отраженных сигналов в сантиметровом диапазоне длин волн.

В качестве модели цели класса «БПЛА» рассматривался квадрокоптер с четырьмя несущими винтами (длина лопасти  $L=15$  см), частота вращения которых варьировалась в диапазоне  $\Omega=300\text{--}800$  рад/с (3000–7500 об/мин), что соответствует типичным режимам полета малых дронов. Модель биологической цели («Птица») представляла собой совокупность связанных сегментов с артикулированной кинематикой, совершающих маховые движения с частотой  $f_m=2\text{--}15$  Гц. Моделирование выполнялось для когерентной импульсной последовательности с частотой повторения, обеспечивающей однозначное измерение доплеровских частот (более 10 кГц). Длительность когерентного накопления выбиралась из условия квазистационарности модуляционного процесса 0.2–0.3 с. Моделирование шумовой обстановки производилось путем добавления аддитивного белого гауссовского шума для формирования отношений сигнал/шум в диапазоне от – 5 до 20 дБ, что позволяет охватить как условия уверенного приема, так и пороговые ситуации обнаружения.

Отсутствие жесткой кинематической связи между элементами приводит к нарушению устойчивых фазовых соотношений между микродоплеровскими компонентами и росту фазовых флуктуаций даже при сохранении близких энергетических характеристик спектра. Таким образом, различие физической природы микродвижений непосредственно отражается в фазовой структуре микродоплеровского сигнала, тогда как амплитудные характеристики в ряде практических условий оказываются статистически неразличимыми [8].

Полученные соотношения позволяют сделать вывод о том, что фазовая структура отраженного сигнала является информативным носителем сведений о типе кинематики малоразмерного воздушного объекта. Это создает предпосылки для введения количественных фазовых характеристик, отражающих степень согласованности микродоплеровских компонент

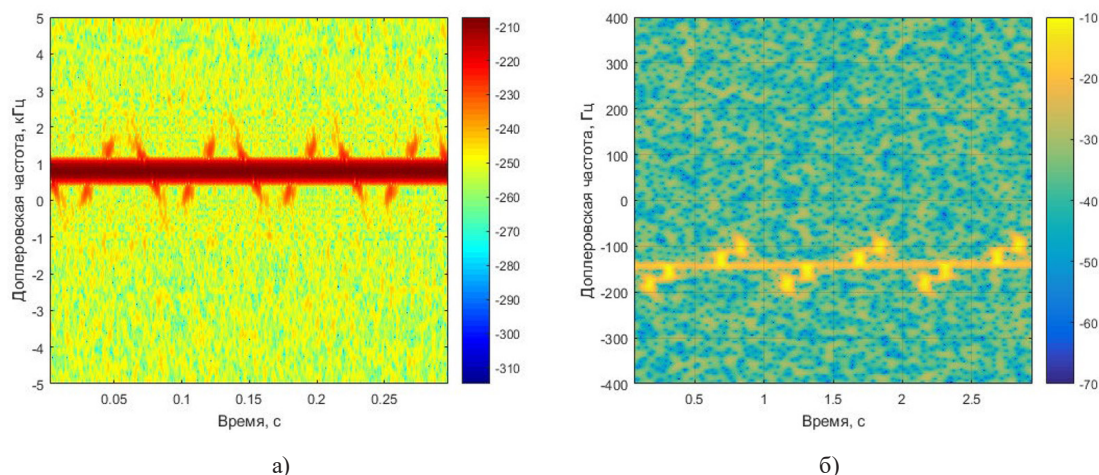


Рис. 1. Амплитудные микродоплеровские спектрограммы отраженных сигналов: (а) малоразмерный БПЛА; (б) птицы

Fig. 1. Amplitude Microdopler spectrograms of reflected signals: (a) small-sized UAV; (b) birds

и пригодных для использования в задачах радиолокационного распознавания в условиях низкого отношения сигнал/шум.

Как показано в предыдущем разделе, различие физической природы микродвижений элементов малоразмерных воздушных объектов приводит прежде всего к различиям фазовой структуры отраженных радиолокационных сигналов. При этом амплитудные характеристики микродоплеровского спектра в ряде практических условий оказываются статистически близкими, что существенно ограничивает их использование в задачах распознавания. В этой связи представляется целесообразным переход от анализа энергетических характеристик к исследованию фазовых соотношений между микродоплеровскими компонентами.

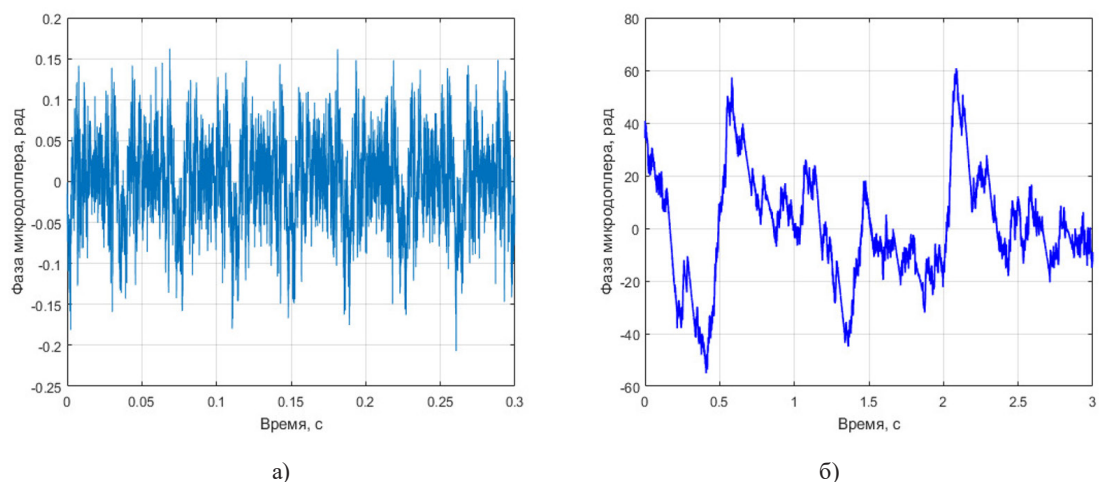


Рис. 2. Фазовая структура микродоплеровских сигналов (а) БПЛА; (б) птица

Fig. 2. Phase structure of Microdopler signals (a); UAV (b) bird

Рассмотрим комплексную спектрограмму отраженного сигнала, полученную в результате кратковременного преобразования Фурье комплексной огибающей: [7]

$$S(t, f) = \int s(\tau)w(\tau - t)e^{-j2\pi f\tau} d\tau, \quad (4)$$

где  $w(\cdot)$  – оконная функция. Каждой точке временно-частотного представления соответствует комплексное значение, фазовая составляющая которого несет информацию о мгновенной структуре микродвижений отражающих элементов.

Для целей количественного анализа фазовой структуры введем коэффициент фазовой когерентности, характеризующий степень согласованности фазовых соотношений микродоплеровских компонент во времени. В простейшем виде коэффициент фазовой когерентности может быть определен как нормированное значение модуля усредненной комплексной экспоненты фазовых отсчетов:

$$C_\varphi = \left| \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \exp(j\varphi_n) \right|, \quad (5)$$

где  $\varphi_n$  – фазовые значения комплексных спектральных отсчетов, отобранных в информативной области микродоплеровского сигнала,  $N$  – число таких отсчетов. Значение коэффициента  $C_\varphi$  принимает показатели в диапазоне от 0 до 1, где большие значения соответствуют высокой степени фазовой согласованности.

Важно отметить, что суммирование производится не по всем элементам разрешения, а селективно. Под «информативной областью» понимается совокупность временно-частотных ячеек, удовлетворяющих двум условиям. Во-первых, исключаются отсчеты, соответствующие нулевой доплеровской частоте (отражения от корпуса/фюзеляжа), так как их высокая собственная когерентность маскирует тонкую структуру микродоплера. Во-вторых, применяется пороговая обработка для отсека шумового фона. Порог адаптивно рассчитывается на основе оценки дисперсии шума, получаемой методом медианной фильтрации спектрограммы в двумерном скользящем окне (с защитными интервалами вокруг сигнала). Для расчета  $C_\varphi$  отбираются только те спектральные отсчеты, мощность которых превышает локальный уровень шума на 3–5 дБ. Такой подход позволяет оценивать фазовую стабильность именно полезных микродоплеровских гармоник, исключая влияние флуктуаций шума и доминирующего вклада планера цели.

Физический смысл введенного коэффициента непосредственно следует из модели формирования микродоплеровского сигнала. В случае жесткой кинематики движение отражающих элементов носит детерминированный характер, а фазовые соотношения между микродоплеровскими компонентами сохраняются на интервале когерентного накопления. Это приводит к концентрации фазовых значений и, как следствие, к высоким значениям коэффициента фазовой когерентности.

Для БПЛА наблюдаются высокие значения коэффициента когерентности, соответствующие сохранению фазовой согласованности, тогда как для биологических объектов характерны пониженные значения вследствие артикулированного характера движения.

При артикулированной кинематике, напротив, движение отдельных сегментов цели сопровождается фазовыми сдвигами и флуктуациями, обусловленными отсутствием жесткой

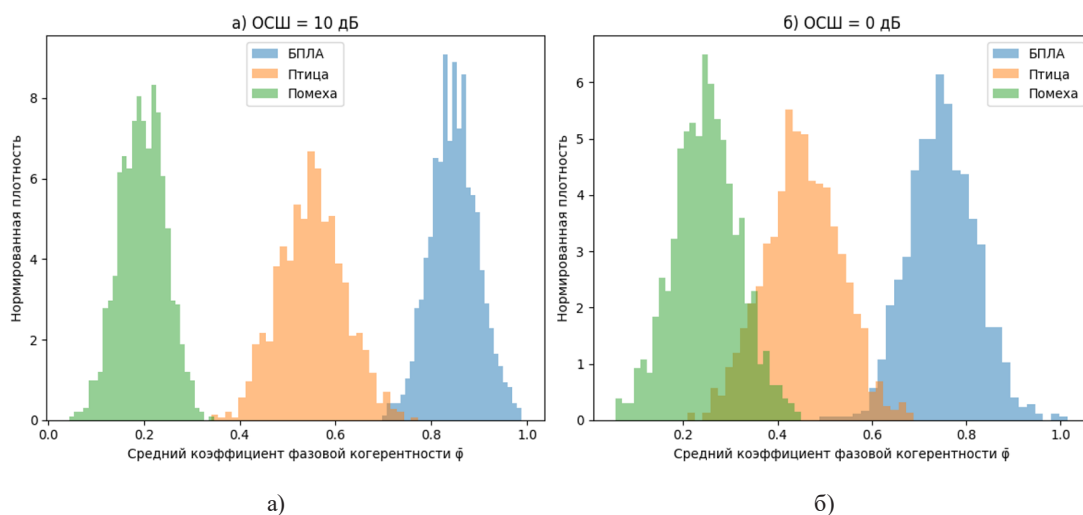


Рис. 3. Распределения коэффициента фазовой когерентности для объектов с различным типом кинематики  
 Fig. 3. Distributions of the phase coherence coefficient for objects with different types of kinematics

кинематической связи между элементами. В этом случае фазовые значения микродоплеровских компонент распределяются более равномерно, что приводит к снижению коэффициента фазовой когерентности. Таким образом, величина  $C_\phi$  отражает степень кинематической согласованности движения отражающих элементов и является физически интерпретируемой характеристикой типа микродвижений цели [1, 8].

Важным свойством коэффициента фазовой когерентности является его относительная устойчивость к амплитудным флуктуациям отраженного сигнала и некоррелированным шумовым воздействиям. В отличие от энергетических признаков, чувствительных к вариациям эффективной площади рассеяния и уровню помех, фазовая когерентность определяется структурой фазовых соотношений и сохраняет информативность даже при снижении отношения сигнал/шум, при условии когерентного приема и корректного выделения микродоплеровских компонент.

Таким образом, введенный коэффициент фазовой когерентности является не эвристическим, а физически обоснованным разделительным признаком, непосредственно следующим из математической модели микродоплеровского сигнала. Его использование позволяет выявлять различия между объектами с жесткой и артикулированной кинематикой в условиях, при которых традиционные амплитудные признаки оказываются недостаточно информативными. Это делает коэффициент фазовой когерентности перспективным инструментом для задач радиолокационного распознавания малоразмерных воздушных объектов.

Полученный физически обоснованный признак может быть использован не только самостоятельно, но и в качестве информативного входного признака для современных алгоритмов машинного обучения, применяемых для классификации радиолокационных образов [11]. В частности, устойчивость фазового признака к шумам может повысить эффективность нейросетевых классификаторов в сложных условиях [12].

В настоящей работе рассмотрена задача математического моделирования микродоплеровских сигналов от малоразмерных воздушных объектов с целью выявления физически обосно-

ванных разделительных признаков для радиолокационного распознавания. В рамках когерентной радиолокационной модели отраженного сигнала разработано представление сложной цели в виде совокупности распределенных центров рассеяния, движение которых определяется жесткой или артикулированной кинематикой.

Показано, что различие физической природы микродвижений элементов цели непосредственно отражается в фазовой структуре микродоплеровского сигнала при близких энергетических характеристиках спектра. Для объектов с жесткой кинематикой характерно сохранение устойчивых фазовых соотношений между микродоплеровскими компонентами на интервале когерентного накопления, тогда как для объектов с артикулированной кинематикой наблюдается разрушение фазовой согласованности вследствие флуктуаций движения отдельных сегментов.

Следует отметить, что предложенный фазовый признак применим при когерентном приеме отраженного сигнала и предполагает фазовую стабильность опорного генератора в пределах интервала когерентного накопления. Указанные условия являются стандартными для современных когерентных радиолокационных систем и не накладывают дополнительных ограничений по сравнению с традиционными методами микродоплеровского анализа.

### Заключение

На основе проведенного анализа введен и теоретически обоснован коэффициент фазовой когерентности, количественно характеризующий степень согласованности фазовых соотношений микродоплеровских компонент отраженного сигнала. Показано, что данный коэффициент является физически интерпретируемым признаком, непосредственно следующим из математической модели формирования микродоплеровского сигнала и обладающим повышенной устойчивостью к амплитудным флуктуациям и некоррелированным шумовым воздействиям.

Полученные результаты позволяют рассматривать коэффициент фазовой когерентности в качестве эффективного разделительного признака для задач радиолокационного распознавания малоразмерных воздушных объектов в условиях низкого отношения сигнал/шум и ограниченного времени когерентного накопления. Разработанная математическая модель и полученные выводы могут быть использованы в качестве физически состоятельной основы для дальнейшего синтеза и анализа алгоритмов распознавания, основанных на фазовых характеристиках микродоплеровских сигналов.

### Список литературы / References

- [1] Ширман Я.Д. *Теоретические основы радиолокации* / под ред. Я.Д. Ширмана. М.: Советское радио, 1970. 560 с. [Shirman Ya. D. *Theoretical foundations of radar* / ed. by Ya. D. Shirman. Moscow: Soviet radio, 1970.– 560 p. (in Russian)]
- [2] Ерёмин Г.В., Гаврилов А.Д., Назарчук И.И. *Малоразмерные беспилотники – новая проблема для ПВО*. 2014 [Eremim G. V., Gavrilov A. D., Nazarchuk I. I. *Small-sized drones – a new problem for air defense*, 2014 (in Russian)]
- [3] Небабин В.Г., Сергеев В.В. *Методы и техника радиолокационного распознавания*. М.: Наука, 1984. 152 с. [Nebabin V. G., Sergeev V. V. *Methods and techniques of radar recognition*. Moscow: Nauka Publ., 1984. 152 p. (in Russian)]

- [4] Chen V. C. The micro-Doppler effect in radar: phenomenon, model and simulation study. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42, 1, 2–21.
- [5] Rahman S., Robertson D. *Radar micro-Doppler signatures of drones and birds at K-band and W-band*. 2018.
- [6] Ritchie M., Horne C., Peters N. *Radar UAV and Bird Signature Comparisons with Micro-Doppler*. 2021.
- [7] Тихонов В. И. *Оптимальный прием сигналов*. М.: Наука, 1983. 384 с. [Tikhonov V. I. *Optimal signal reception*. Moscow: Nauka Publ., 1983, 384 p. (in Russian)]
- [8] Гоноровский И. С. *Радиотехнические цепи и сигналы*. М.: Радио и связь, 1986. 512 с. [Gonorovsky I. S. *Radio engineering circuits and signals*. Moscow: Radio and Communications, 1986. 512 p. (in Russian)]
- [9] Небабин В. Г. *Радиолокация птиц*. Методические и практические аспекты. М.: Наука, 1986. 113 с. [Nebabin V. G. *Bird radar*. Methodological and practical aspects. Moscow: Nauka Publ., 1986. 113 p. (in Russian)]
- [10] Molchanov P., Davis L., et al. Classification of small UAVs and birds by micro-Doppler signatures. *Proceedings of the International Radar Conference*, 2013, 1–6.
- [11] Гелиг А. Х., Матвеев А. С. *Введение в математическую теорию обучаемых распознающих систем и нейронных сетей*. 2014 [Gelig A. H., Matveev A. S. *Introduction to the mathematical theory of learnable recognition systems and neural networks*. 2014. (in Russian)]
- [12] Хайкин С. *Нейронные сети. Полный курс*. 2016. 1103 с. [Khaykin S. *Neural networks. Full course*. 2016, 1103p. (in Russian)]