



ОБЩЕСТВЕННО-НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ВЕСТНИК РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

Издается с 2001 г.
Выходит 4 раза в год
Издается с 2001 г.
Выходит 4 раза в год

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

Шахвердиев А.Х. (РФ)

Заместитель главного редактора

Ростанец В.Г. (РФ)

Алексеев А.С. (РФ)
Башкирцева Н.Ю. (РФ)
Бобров А.В. (РФ)
Гулиев И.С. (Азербайджан)
Жданов М.С. (США)
Закиров Э.С. (РФ)
Капаунов Д.Р. (РФ)
Кервалишвили П.Д. (Грузия)
Мандрик И.Э. (РФ)
Михайлов Н.Н. (РФ)
Можаев Е.Е. (РФ)
Мымрин В.А. (Бразилия)
Петросян В.С. (РФ)
Петров В.А. (РФ)
Сулейманов Б.А. (Азербайджан)
Чень Цзяньпин (Китай)
Чжао Пенда (Китай)
Шевченко Ю.А. (РФ)
Шестопалов Ю.В. (РФ)
Шогенов Б.А. (РФ)
Яннакопулос П. (Греция)

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Аренс В.Ж. (РФ)
Бурак П.И. (РФ)
Воловик А.М. (РФ)
Гейхман И.А. (РФ)
Золотарев В.А. (РФ)
Мелуа А.И. (РФ)
Новиков В.С. (РФ)
Панин А.Н. (РФ)
Панов Ю.П. (РФ)
Степашин С.В. (РФ)
Хайруллин М.Х. (РФ)

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

Руководитель редакции
Иваницкая Л.В.

Ответственный секретарь
Поротникова М.В.

Технический секретарь
Горежкина Е.И.

Журнал зарегистрирован в Министерстве по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций РФ.
Рег. свид. ПИ № 77-11708
Все права защищены. Никакая часть этого издания не может быть воспроизведена в какой-либо форме без письменного разрешения издателя. Редакция не несет ответственности за содержание рекламных материалов.
© РАЕН 2025 г.

119002, Москва,
пер. Сивцев Вражек, 29/16
тел.: +7 (495) 954-73-05

Тираж 500 экз.

Отпечатано в издательстве «Маска»
Москва, ул. Малая Юшуньская, д. 1, корп. 1

Журнал включен в перечень ВАК РФ
по 10 группам специальностей;
размещается на сайтах РИНЦ
и «РОССИЙСКИЕ НАУЧНЫЕ
ЖУРНАЛЫ»



doi

СОДЕРЖАНИЕ

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

ЦЕОЛИТСОДЕРЖАЩИЕ ТРЕПЕЛЫ
ХОТЫНЕЦКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ
(ОРЛОВСКАЯ ОБЛАСТЬ):
ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ,
МИНЕРАЛЬНОГО И ХИМИЧЕСКОГО
СОСТАВА
**А.А. Рассказов,
Н.Д. Карелина,
И.В. Деревяшкин,
Т.П. Морозова** 3

КОЛЬМАТАЦИЯ ФИЛЬТРОВ И
ПРИФИЛЬТРОВЫХ ЗОН
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН
СКВАЖИННОГО ПОДЗЕМНОГО
ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА
**А.С. Бабкин,
А.Г. Иванов,
Ю.А. Арсентьев,
Е.Ю. Мешков,
Н.А. Чернобровкин,
Д.Д. Орехов,
Р.И. Гаврилов** 11

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ АРРЕНИУСА
О ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЗЕМНОЙ
СИСТЕМЫ НА ВЫБРОСЫ
АНТРОПОГЕННЫХ
ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ
В.В. Тетельмин 24

ТЕХНОЛОГИИ

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ГЕОЛОГОРАЗВЕДЧНЫХ РАБОТ
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ
РАСШИРЕНИЯ РЕСУРСНОЙ БАЗЫ
ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕРРИТОРИЙ
**С.А. Кириллов,
А.М. Алисолтанов** 34

ВЛИЯНИЕ ПРИСАДОК
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ
(Cu, Zn, Ni, Cd) НА
ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
СМАЗКИ ЦИАТИМ-201
**Х. Нгуен,
А.А. Кужаров,
В.М. Нгуен** 43

ИННОВАЦИОННАЯ
ПРИРОДОПОДОБНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ
АКТИВАЦИИ САМОЗАРАСТАНИЯ
НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ
**С.В. Осташ,
О.С. Осташ,
А.В. Головенко,
А.А. Смирнова** 53

ПРИМЕНЕНИЕ
ТЕРМОГАЗОХИМИЧЕСКОГО
СОСТАВА ДЛЯ ОБРАБОТКИ
ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЫ
ПЛАСТА С ЦЕЛЬЮ УДАЛЕНИЯ
АСФАЛЬТОСМОЛОПАРАФИНОВЫХ
ОТЛОЖЕНИЙ ДЛЯ УСЛОВИЙ
АСФАЛЬТИНГОВОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЛАБОРАТОРНОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ)
**В.А. Милютин, А.О. Малахов,
Н.А. Козырев, Е.В. Маратканова,
А.Ф. Шагеев,
С.А. Долгих** 60

ПРИМЕНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНО-
АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ
И НАНОЧАСТИЦ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ
ПРОДУКТИВНОСТИ СКВАЖИН И
ГАЗОКОНДЕНСАТООТДАЧИ
**Д.П. Аникеев,
А.С. Ушакова,
Э.С. Аникеева** 67

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ
ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ
ЭКОЛОГИЧЕСКОГО УЩЕРБА
И РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ НА
ПРИМЕРЕ АДАПТИВНОЙ
СИСТЕМЫ «АСТРА»

**Е.Ф. Шамаева,
М.Ш. Саламанова,
А.А. Асонов,
М.В. Гречитаева** 76

НОВЫЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ
ПРИЗАБОЙНЫХ ЗОН
ДОБЫВАЮЩИХ СКВАЖИН
С ВНУТРИПЛАСТОВОЙ
ГЕНЕРАЦИЕЙ ДВУОКИСИ УГЛЕРОДА
**С.В. Арефьев, А.В. Бруслов,
А.В. Денисов** 86

АНАЛИЗ СВОЙСТВ ЗОЛЬНЫХ
РАСТВОРОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ
ДЛЯ СООРУЖЕНИЯ, РЕМОНТА И
ЛИКВИДАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
СКВАЖИН СКВАЖИННОГО
ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ
УРАНА
**А.Г. Иванов,
Ю.А. Арсентьев,
Н.В. Соловьев,
А.Л. Вильмис,
Д.Д. Орехов** 96

ИНЖЕНЕРНЫЙ КЕЙС КАК
ИНСТРУМЕНТ ФОРМИРОВАНИЯ
ИННОВАЦИОННЫХ КОНЦЕПЦИЙ НА
ПРИМЕРЕ ПРОЕКТА ПО СОЗДАНИЮ
СТРАТОСФЕРНОГО РАКЕТНО-
КОСМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА
**Д.К. Щеглов, Д.А. Фёдоров,
С.К. Савельев,
А.Г. Сайбель,
С.Е. Ерошин** 111

СТАТЬИ ПОБЕДИТЕЛЕЙ ЕЖЕГОДНОГО МОЛОДЕЖНОГО
КОНКУРСА НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РАБОТ И ПРОЕКТОВ
ПО НАПРАВЛЕНИЮ «ТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНЖЕНЕРНЫЕ
НАУКИ» НА СОИСКАНИЕ ПРЕМИИ ИМЕНИ АКАДЕМИКА
А.И. БЕРГА

РАСПОЗНАВАНИЕ
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ
ПО РАДИОТЕХНИЧЕСКИМ
ПАРАМЕТРАМ СИГНАЛОВ
С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ
МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ
**Е.В. Вагапов,
А.Н. Никулина,
Е.В. Рябикина** 121

СЕМИЭЛЕМЕНТНАЯ АНТЕННАЯ
РЕШЕТКА ДЛЯ ПРИЕМА
СИГНАЛОВ ГЛОНАСС И GPS В
ДИАПАЗОНАХ ЧАСТОТ L1, L2
**В.В. Дорошенко, Д.С. Аносов,
Д.А. Орлов** 128

КОМПЛЕКС РАДИОЭЛЕКТРОННОГО
ПОДАВЛЕНИЯ БПЛА
**Д.Ш. Исмятов, А.С. Кудрявцев,
А.А. Морозов** 132

ПРАВО

УТЕЧКА УМОВ ИЛИ ЭКСПОРТ
БУДУЩЕГО?
РОССИЯ ПЕРЕД ВЫБОРОМ
И.А. Трунов 143

ХРОНИКА

МЕСТО ФИЛОСОФИИ В РЕШЕНИИ
ПРОБЛЕМ ГОРНОГО ДЕЛА
В.Ж. Аренс 152



SCIENTIFIC & PUBLIC JOURNAL

BULLETIN

OF RUSSIAN ACADEMY OF NATURAL SCIENCES

Published since 2001
4 issues per year

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief –
A.Kh. SHAHVERDIEV (RF)

Deputy Editor-in-Chief –
V.G. ROSTANETS (RF)

A.S. ALEKSEEV (RF)
N.Yu. BASHKIRTSEVA (RF)
A.V. BOBROV (RF)
I.S. GULIEV (AZERBAIJAN)
M.S. ZHDANOV (USA)
E.S. ZAKIROV (RF)
D.R. KAPLUNOV (RF)
P.D. KERVALISHVILI (GEORGIA)
I.E. MANDRIK (RF)
N.N. MIKHAILOV (RF)
E.E. MOZHAEV (RF)
V.A. MYMRIN (BRAZIL)
V.S. PETROSYAN (RF)
V.L. PETROV (RF)
B.A. SULEYMANOV (AZERBAIJAN)
CHEN JIANPING (CHINA)
ZHAO PENGDA (CHINA)
YU.L. SHEVCHENKO (RF)
YU.V. SHESTOPALOV (RF)
B.A. SHOGENOV (RF)
P. YANNAKOPOULOS (GREECE)

EDITORIAL COUNCIL

V.Zh. ARENS (RF)
P.I. BURAK (RF)
A.M. VOLOVIK (RF)
I.L. GEYKHMAN (RF)
V.A. ZOLOTAREV (RF)
A.I. MELUA (RF)
V.S. NOVIKOV (RF)
A.N. PANIN (RF)
YU.P. PANOV (RF)
S.V. STEPASHIN (RF)
M.Kh. KHAIRULLIN (RF)

EDITORIAL BOARD

Editorial Head
L.V. IVANITSKAYA

Executive Secretary
M.V. POROTNIKOVA

Technical Secretary
E.I. GORELKINA

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced in any form or by any means without permission in writing from the publisher.

© RANS 2025

ISSN 1682–1696 / 1727-7892

✉ Editorial Board Address:
29/16, Sivev Vrazhek, 119002,
Moscow, Russia,
tel.: +7 (495) 954-26-11

CONTENTS

EARTH SCIENCES

ZEOLITE-CONTAINING TRIPOLI
OF KHOTINETSK DEPOSIT
(OREL DIST.): FEATURES OF THE
STRUCTURE, MINERAL AND
CHEMICAL COMPOSITION
**A.A. RASSKAZOV, N.D. KARELINA,
I.V. DEREVYASHKIN,
T.P. MOROZOVA** 3

COLMATATION OF FILTERS AND
FILTER ZONES OF PROCESS
WELLS OF IN-SITU URANIUM
LEACHING
**A.S. BABKIN, A.G. IVANOV,
Y.A. ARSENTYEV, E.Yu. MESHIOV,
N.A. CHERNOBROVKIN,
D.D. OREKHOV,
R.I. GAVRILOV** 11

SOLUTION TO
ARRHENIUS'S PROBLEM OF THE
EARTH SYSTEM SENSITIVITY TO
EMISSIONS OF ANTHROPOGENIC
GREENHOUSE GASES
V.V. TETELMIN 24

TECHNOLOGIES

INNOVATIVE DIGITAL
TECHNOLOGIES OF
GEOLOGICAL EXPLORATION
TO SOLVE URGENT PROBLEMS
OF THE DEVELOPMENT OF THE
HYDROCARBON RESOURCE
BASE
**S.A. KIRILLOV,
A.M. ALISOLTANOV** 34

THE INFLUENCE OF METALLIC
NANOPARTICLE ADDITIVES
(Cu, Zn, Ni, Co) ON THE
TRIBOTECHNICAL PROPERTIES
OF SIATIM-201 GREASE
**H. NGUYEN, A.A. KUZHAROV,
V.M. NGUYEN** 43

INNOVATIVE NATURE-LIKE
TECHNOLOGY FOR ACTIVATING
SELF-OVERGROWING
OF OIL-CONTAMINATED LANDS
**S.V. OSTAKH, O.S. OSTAKH,
A.V. GOLOVENKO,
A.A. SMIRNOVA** 53

APPLICATION OF A
THERMOCHEMICAL FLUID
FOR NEAR-WELLBORE ZONE
TREATMENT TO REMOVE
ASPHALTENE-RESIN-
PARAFFIN DEPOSITS UNDER
ASHALCHINSKOYE FIELD
CONDITIONS (LABORATORY
MODELING)
**V.A. MILYUTINA,
A.O. MALAKHOV,
N.A. KOZYREV,
E.V. MARATKANOVA,
A.F. SHAGEEV,
S.A. DOLGIKH** 60

USING SURFACTANTS AND
NANOPARTICLES TO IMPROVE
WELL PRODUCTIVITY AND GAS
CONDENSATE RECOVERY
**D.P. ANIKEEV, A.S. USHAKOVA,
E.S. ANIKEEVA** 67

MODERN WASTE PROCESSING
TECHNOLOGIES FOR MINIMIZING
ENVIRONMENTAL DAMAGE AND
REGIONAL DEVELOPMENT: THE
CASE OF THE ADAPTIVE SYSTEM
«ASTRA»
**E.F. SHAMAEVA,
M.Sh. SALAMANOVA,
A.A. ASONOV,
M.V. GRECHITAIEVA** 76

A NEW METHOD OF PRODUCTION
WELLS BOTTOM-HOLE ZONE
TREATMENT WITH IN-SITU CARBON
DIOXIDE GENERATION
**S.V. AREFYEV, A.V. BRUSLOV,
A.V. DENISOV** 86

ANALYSIS OF THE PROPERTIES
OF ASH SOLUTIONS TO
DETERMINE THE POSSIBILITY
OF THEIR USE FOR THE
CONSTRUCTION, REPAIR AND
ABANDONMENT OF PROCESS
WELLS OF IN-SITU URANIUM
LEACHING
**A.G. IVANOV, Yu.A. ARSENTYEV,
N.V. SOLOVYOV, A.L. WILMIS,
D.D. OREKHOV** 96

ENGINEERING CASE AS A TOOL
FOR FORMING INNOVATIVE
CONCEPTS: THE EXAMPLE
OF A PROJECT TO CREATE A
STRATOSPHERIC ROCKET-SPACE
COMPLEX
**D.K. SHCHEGLOV,
D.A. FYODOROV,
S.K. SAVELYEV, A.G. SAIBEL,
S.E. EROSHIN** 111

ARTICLES BY THE WINNERS OF THE ANNUAL YOUTH COMPETITION OF SCIENTIFIC AND TECHNICAL WORKS AND PROJECTS IN THE FIELD OF "TECHNICAL AND ENGINEERING SCIENCES" FOR THE ACADEMICIAN A.I. BERG PRIZE

RECOGNITION OF RADAR
STATIONS BY RADIO TECHNICAL
SIGNAL PARAMETERS USING
MACHINE-LEARNING METHODS
**E.V. VAGAPOV, A.N. NIKULINA,
E.V. RYABIKINA** 121

SEVEN-ELEMENT ANTENNA ARRAY
FOR RECEPTION GLONASS AND
GPS SIGNALS IN FREQUENCY
BANDS L1, L2
**V.V. DOROSHENKO, D.S. ANOSOV,
D.A. ORLOV** 128

UAVS ELECTRONIC
COUNTERMEASURE COMPLEX
**D.S. ISMYATOV,
A.S. KUDRYAVTSEV,
A.A. MOROZOV** 132

LAW
BRAIN DRAIN OR EXPORT
OF THE FUTURE?
RUSSIA AT A CROSSROADS
I.L. TRUNOV 143

CHRONICLE
THE PLACE OF PHILOSOPHY
IN SOLVING MINING PROBLEMS
V.Zh. ARENS 152

УДК 553.074

DOI: 10.52531/1682-1696-2025-25-3-3-10

Научная статья

EDN: BLCXUP

ЦЕОЛИТСОДЕРЖАЩИЕ ТРЕПЕЛЫ ХОТЫНЕЦКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ОРЛОВСКАЯ ОБЛАСТЬ): ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ, МИНЕРАЛЬНОГО И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА

А.А. РАССКАЗОВ¹, Н.Д. КАРЕЛИНА¹,
И.В. ДЕРЕВЯШКИН²,
Т.П. МОРОЗОВА³

¹ РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ
НАРОДОВ ИМЕНИ ПАТРИСА ЛУМУМБЫ,
МОСКВА, РФ

² ФГАОУ ВО «МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИ-
ЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», МОСКВА, РФ

³ ФГБОУ ВО «РОССИЙСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ СЕРГО
ОРДЖОНИКИДЗЕ" (МГРИ)», МОСКВА, РФ

Цеолиты являются важным природным материалом, имеющим широкое применение во многих отраслях промышленности. Благодаря своим уникальным ионообменным и сорбционным свойствам он востребован сразу в нескольких ключевых сферах современности, одной из которых является охрана окружающей среды. Статья посвящена изучению геологического строения цеолитсодержащих трепелов Хотынецкого месторождения, минерального состава и их химическим особенностям. Микроскопические, рентгенофазовые и рентгенофлуоресцентные анализы выполнялись в лаборатории рудных месторождений ИГЕМ РАН, обработка данных осуществлялась в лаборатории компьютерных технологий РУДН в программах Statistica и Starter. Макро- и микроскопически породы характеризуются светлыми оттенками, имеют массивные, неяснослоистые текстуры и микро- и мелкозернистые структуры. Результаты исследований показали, что породы Хотынецкого месторождения имеют комплексный состав и представляют собой так называемый полезный компонент – сумму минералов группы цеолита (клиноптилолит), смектита и опал-кristобалита в сочетании с карбонатами. Карбонаты понижают качество сырья, и их содержание колеблется от 5 до 35%. Выявлено слоистое строение толщи по соотношению полезного компонента и вредной примеси.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Хотынецкое месторождение, Орловская область, цеолитсодержащие породы, трепел, сорбционные свойства, загрязнение окружающей среды, минералогия, химический состав

Original article

**ZEOLITE-CONTAINING TRIPOLI OF
KHOTINETSK DEPOSIT (OREL DIST.):
FEATURES OF THE STRUCTURE,
MINERAL AND CHEMICAL COMPOSITION**

A.A. RASSKAZOV¹, N.D. KARELINA¹,
I.V. DEREVYASHKIN², T.P. MOROZOVA³

¹ PATRICE LUMUMBA PEOPLES' FRIENDSHIP
UNIVERSITY OF RUSSIA (RUDN
UNIVERSITY), MOSCOW, RF

² MOSCOW POLYTECHNIC UNIVERSITY,
MOSCOW, RF

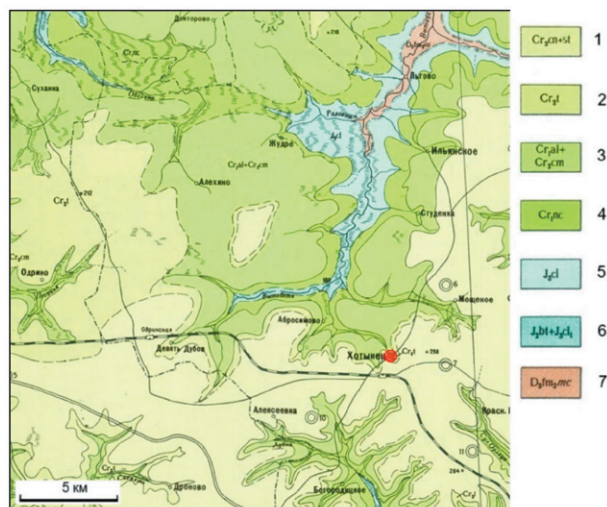
³ SERGO ORDZHONIKIDZE RUSSIAN STATE
GEOLOGICAL EXPLORATION UNIVERSITY
(MGRI), MOSCOW, RF

Zeolites are an important natural material that is widely used in many industries. Due to its unique ion exchange and sorption properties, it is in demand in several key areas of our time, one of which is environmental protection. The article is devoted to the study of the geological structure of zeolite-containing tripels of the Khotynets deposit, mineral composition and their chemical features. Microscopic, X-ray phase and X-ray fluorescence analyses were performed in the laboratory of ore deposits of IGEM RAS, data processing was carried out in the laboratory of computer technologies of RUDN in the programs Statistica and Starter. Visually, zeolite-containing tripoli is a rock of light shades with massive, indistinctly layered textures, and micro- and fine-grained structures. The research results have shown that the rocks of the Khotynets deposit have a complex composition and represent the so-called useful component – the sum of the minerals of the zeolite (clinoptilolite), smectite and opal-cristobalite group in combination with carbonates. Carbonates reduce the quality of raw materials, and their content ranges from 5 to 35%. The layered structure of the thickness was revealed by the ratio of the useful component and the harmful impurity.

KEYWORDS: Khotynets deposit, Oryol Region, zeolite-containing rocks, trepel, sorption properties, environmental pollution, chemical composition, mineralogy

Геологическое строение района месторождения приведено на основании фондовых материалов.

Месторождение приурочено к верхнему отделу меловой системы, коньяк-сантонскому ярусу (рис. 1). Морфологически толща трепелов характеризуется пластовым строением, имеющим сплошное распространение по всей площади участка. Нижняя граница залежи имеет ровную субгоризонтальную поверхность и плавно погружается в юго-западном направлении до 2 м на 1 км. Мощность толщи в среднем составляет 20 м.



Условные обозначения: 1–4 меловая система: 1–коньякский и сантонский ярусы. Трепелы и опоки; 2 – туронский ярус. Белый писчий мел; 3 – альбский и сеноманский ярусы. Кварцевые пески; 4 – валанжский, готеривский и барремский ярусы. Песчано-глинистые отложения с конкрециями сидерита; 5–6 юрская система: 5 – келловейский ярус. Глины с конкрециями сидерита; 6 – батский ярус. Пески с прослоями глин; 7 – девонская система, фаменский ярус. Известняки, доломиты, мергели

РЕЗУЛЬТАТЫ

Генезис. Цеолиты Хотынецкого месторождения относятся к осадочному типу. В результате многолетних тщательных исследований было показано, что цеолиты группы клиноптилолита присутствуют в морских терригенных и карбонатных отложениях различных фаций, но при этом тяготеют к глинистой части осадков [9, 11]. По целому ряду признаков доказывается, что природа таких цеолитов – диагенетическая [3, 8, 11]. А.Д. Савко формулирует необходимые условия формирования цеолитов в диагенезе [10, 11]: а) щелочная среда (именно по этой причине цеолиты находятся в антагонизме с каолинитом, образование которого требует кислой среды); б) присутствие в среде высокорекреационного биогенного аморфного кремнезема; в) присутствие катионов калия и натрия из захороненной морской воды; г) наличие в среде алюминия в глинистых частицах.

Для данного типа месторождений цеолитов характерно образование в морских, платформенных бассейнах со спокойной гидродинамической обстановкой, в условиях гумидного или полуаридного климата [5].

Материалом для образования служат алюмосиликатные гели, плохоокристаллизованные глинистые минералы и аморфный биогенный кремнезем (диатомовые водоросли и кремнистые губки). Они поступают с речными стоками с суши в морские и озерные бассейны. Благоприятным источником материнского вещества служат коры выветривания алюмосиликатных пород на начальной стадии выветривания на суше [11].

Макроскопия. Все породы полезной толщи характеризуются светлыми цветами – от белоснежного до сероватого с бежевым оттенком. Основная часть образцов имеет однородную, массивную текстуру. Встречаются образцы со слоистой либо полосчатой текстурой, а также образцы, покрытые черным органическим дендритом (рис. 2).

Микроскопия. Структуры образцов определялись методом изучения прозрачно-полированных шлифов под поляризационным микроскопом. Структура образцов микро- и мелкозернистая. Основная масса представлена глинистыми минералами с примесью зерен кварца, полевого шпата и карбонатов. Зерна цеолита (клиноптилолита) представлены игольчатыми выделениями длиной в 100–150 мкм (рис. 3А). Встречаются образцы с оолитовой структурой (рис. 3Б), а также образцы с остатками диатомовых водорослей.

Минералогия. Более детально минеральный состав был определен с помощью рентгенофазового анализа (табл. 1). Порядок определения минералов приведен во многих литературных источниках [2, 15].

Полученные данные позволяют сделать вывод, что основную массу породы составляет цеолит, содержание которого колеблется от 23 до 39%, смектит (20–27%) и минералы аморфной и кристаллической разновидности кремнезема (кварц, тридимит, кристобалит,

аморфный кремнезем) – 20–25%. Содержание карбонатов (кальцита) распределено неравномерно по разрезу. В виде примесей также присутствуют полевой шпат, иллит и в незначительном количестве анатаз.

По данным минералогического анализа в программе Starter был построен график изменения количества минералов с глубиной (рис. 4).

Из графика видно, что толща имеет слоистое строение – на изученном интервале выделяются две пачки: верхняя (0–1,8 м) и нижняя (1,8–2,4 м). Содержание полезных минералов (клиноптилолит, смектит и др.) в верхней пачке достигает 90%, а содержание карбонатов не превышает 5%. И напротив, количество минералов, содержащих полезный компонент, в нижней пачке резко уменьшается, тогда как содержание карбонатов достигает 30%.

Химический состав. Для изучения химического состава трепелов проводился рентгенофлуоресцентный анализ. По результатам анализа видно, что основными элементами, определяющими качество, является кремнезем и оксид кальция, на сумму которых приходится

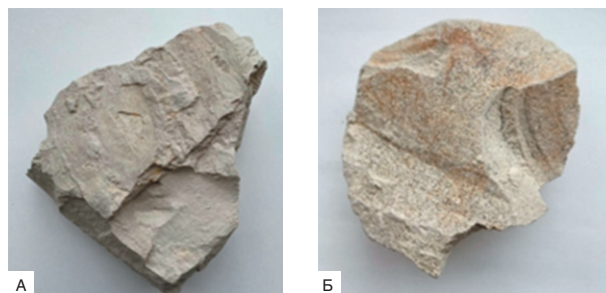


Рис. 2.

Текстурно-структурные особенности цеолитсодержащих трепелов Хотынецкого месторождения: А – порода серо-бежевого цвета, массивная текстура; Б – порода бежевого цвета, неяснослоистая текстура с прослоями черного органического дендрита

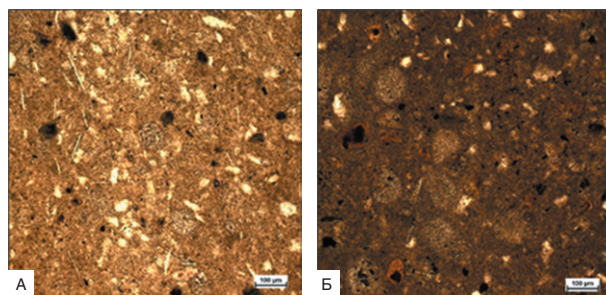


Рис. 3.

Микрофотографии полированных шлифов цеолитсодержащего трепела Хотынецкого месторождения: А – основная масса представлена глинистыми минералами и трепелом (в образце присутствуют зерна кварца и КПШ, а также игольчатые агрегаты цеолита); Б – образец с оолитовой структурой (основная масса представлена глинистыми минералами, аморфным кремнеземом, кварцем и КПШ)

ТАБЛИЦА 1.

Минеральный состав цеолитсодержащего трепела Хотынецкого месторождения, %

Минерал / Mineral	Образец 1-1 Sample 1-1	Образец 1-2 Sample 1-2	Образец 1-3 Sample 1-3	Образец 1-4 Sample 1-4	Образец 1-5 Sample 1-5	Образец 1-6 Sample 1-6
Кварц / Quartz	10,3	13,3	13,9	13	10,8	10,2
Тридимит / Tridymite	1,2	2	2,4	1,6	1,5	1,8
Кристобалит / Cristobalite	1,5	1,5	1,2	1,5	0,6	0,6
Анализ / Anataz	0,8	0,8	<0,5	<0,5	0,5	0,5
КПШ (микроклин) / feldspar microcline	5	8,7	10,2	8,3	6,8	5,4
Кальцит / Calcite	<0,5	–	0,8	–	30,5	33,5
Цеолит / Zeolite	34,3	34,8	30,8	39	24,7	23,2
Смектит / Smectite	27,5	25,8	23,8	26,8	20,6	19,2
Иллит / Illit	7,5	4,4	6,2	4,3	2,2	3
Аморф SiO ₂ / Amorphous SiO ₂	11,5	8,7	10,3	5,1	1,8	2,6

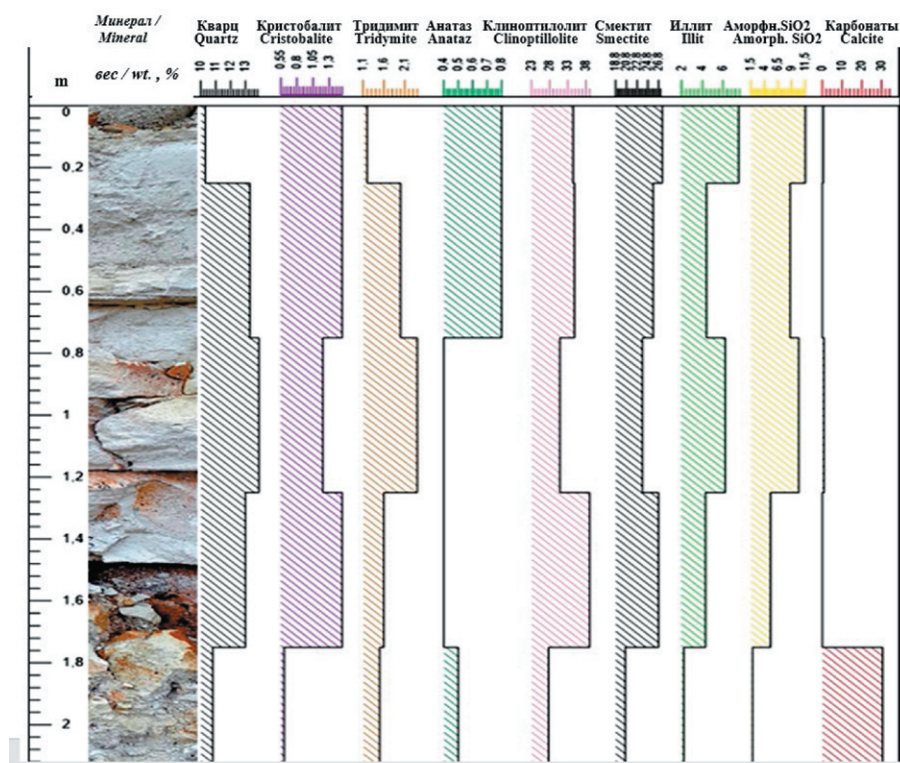


РИС. 4.

График изменения содержания минералов в породах Хотынецкого месторождения с глубиной

от 70 до 80%. На долю остальных элементов приходится порядка 15% (табл. 2).

Несмотря на то, что в целом у всех образцов близкий химический состав, можно сделать несколько выводов:

1. С глубиной планомерно уменьшается содержание кремнезема.

2. Содержание CaO резко увеличивается у подошвы обнажения.

3. Содержания Al₂O₃, K₂O, TiO₂, P₂O₅, Fe₂O₃ и MgO коррелируют и с одинаковым соотношением меняются с глубиной.

5. Содержание MnO по всей толще невелико, однако на интервале 0,75–1,3 м резко увеличивается до 0,014%.

ТАБЛИЦА 2.

Химический состав цеолитсодержащих трепелов Хотынецкого месторождения, %

Обр. №	ППП	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅
	%										
1–1	16,61	0,12	1,13	6,34	56,92	1,34	14,12	0,43	0,004	2,61	0,18
1–2	10,83	0,12	1,58	8,73	67,82	1,65	3,53	0,53	0,005	4,01	0,99
1–3	9,26	0,10	1,35	7,33	72,95	1,45	2,49	0,46	0,014	3,58	0,56
1–4	9,12	0,10	1,27	6,77	75,75	1,34	1,73	0,43	0,003	3,13	0,19
1–5	10,27	0,11	1,53	8,09	71,97	1,50	1,98	0,50	0,004	3,58	0,27

По данным химического анализа в программе Strater был построен график изменения содержаний химических элементов с глубиной (рис. 5).

На основании детального изучения минерального и химического состава скважин было выделено 2 пачки: верхняя и нижняя (рис.5). Суммарное содержание клиноптилолита, монтмориллонита и опал-кристобалита в верхнем слое изменяется от 63 до 94%, а содержание карбонатов не превышает 5%. Мощность верхней пачки в среднем составляет 5,5 м. Суммарное содержание клиноптилолита, монтмориллонита и опал-кристобалита нижнего слоя варьирует от 45 до 94%, содержание кальция – более 5%; его средняя мощность составляет 9 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований удалось подробно изучить представленные образцы цеолитсодержащего трепела при помощи электронного микроскопа, а также проанализировать минеральный и химический составы цеолитсодержащих трепелов Хотынецкого месторождения. Большая часть состава приходится на полезный компонент – сумму минералов группы цеолита (клиноптилолит), смектита и опал-кристобалита. Содержание полезного компонента высокое в верхних слоях разреза, но уменьшается к нижним слоям, тогда как содержание вредной примеси – кальцита – не превышает 5% в верхних частях толщи, но значительно увеличивается с глубиной. Изученные цеолитсодержащие трепелы относятся к осадочному типу образования, их природа диагенетическая. На основании фоновых материалов и геологических карт было приведено детальное описание геологических и структурных особенностей месторождения.

ВКЛАД АВТОРОВ

Рассказов Андрей Александрович – собрал полевой каменный материал для статьи, разработал концепцию статьи, подготовил текст статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Карелина Надежда Дмитриевна – изучила минеральный состав представленных образцов при помощи рентгенофазового анализа; химический состав трепелов – при помощи рентгенофлуоресцентного

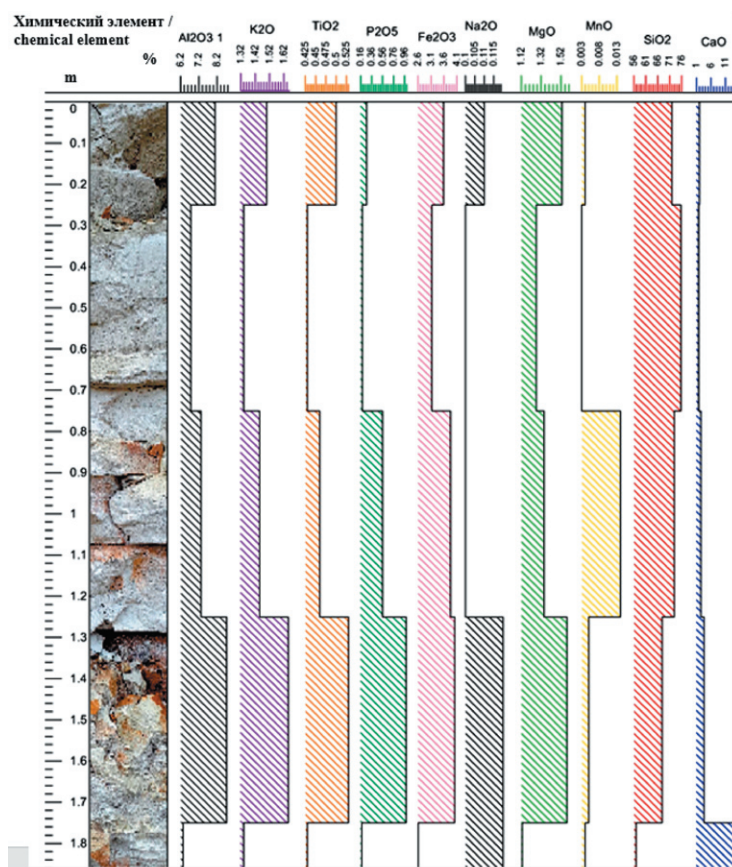


РИС. 5.

График изменения содержаний химических элементов в трепелах Хотынецкого месторождения с глубиной

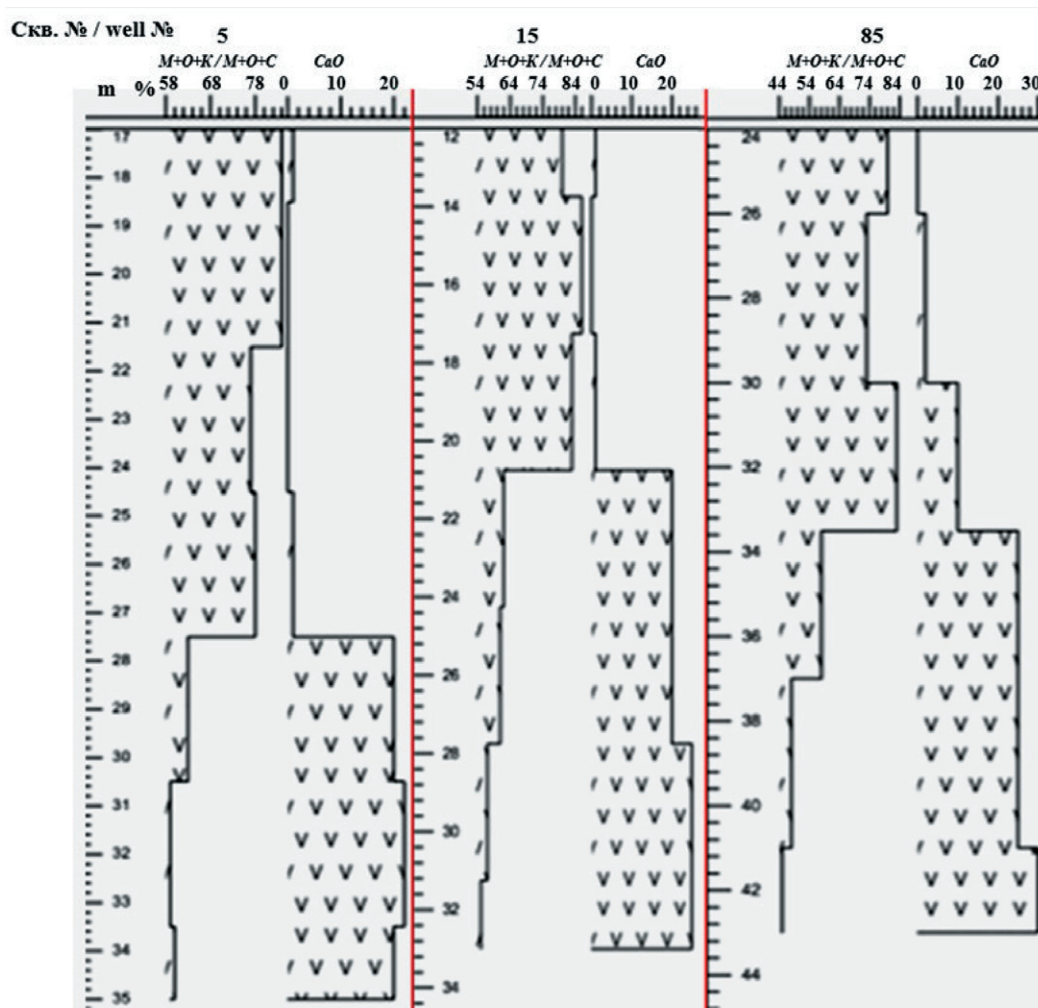


РИС. 6.

График изменения содержаний полезных компонентов М+О+К (монтмориллонит+опал-кристобалит +клиноптилолит) и карбонатов (СаО) в пределах выделенных пачек

анализа. Разработала концепцию статьи, подготовила текст статьи, окончательно утвердила публикуемую версию статьи и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Деревяшкин Игорь Владимирович – проанализировал геологическое строение района месторождения на основании фондовых материалов. Разработал концепцию статьи, подготовил текст статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Морозова Татьяна Петровна – разработала концепцию статьи, подготовила текст статьи, окончательно утвердила публикуемую версию статьи и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адушкин В.В., Санина И.А., Владимиров И.С., Габсатаров Ю.В., Горбунова Э.М., Иванченко Г.Н. Исследование неотектонической активности морфоструктур центральной части Восточно-Европейской платформы с использованием дистанционных методов // Физика Земли. 2014. №2. С. 21–28. DOI: 10.7868/S000233371402001X/
2. Белоусов П.Е., Бочарникова Ю.И., Боева Н.М. Аналитические методы диагностики минерального состава бентонитовых глин // Вестник РУДН. Серия Инженерные исследования. 2015. № 4. С. 94–101.
3. Белоусов П.Е., Чупаленков Н.М., Карелина Н.Д., Крупская В.В. Геолого-структурная позиция месторождений бентонита и цеолита России // Породо-, минерало- и рудообразование: достижения и перспективы исследований. Труды к 90-летию ИГЕМ РАН, 2020. С. 826–830.

4. БУХТОЯРОВ И.С., ГОФФЕНШЕФЕР С.Я. Геологическая карта, Лист N-36-XXX, м-б 1:200 000. ВСЕГЕИ, 1957.
5. ДИСТАНОВ У.Г., АКСЕНОВ Е.М., САБИТОВ А.А. Фанерозойские осадочные палеобассейны России: проблемы эволюции и минерализации неметаллов. М.: Изд-во "Геоинформатика". 2000. 399. [1] С. 83–96.
6. КОТОВА О. Б., ХАРЖА М., КРЕТЕСКУ И., НОЛИ Ф., ПЕЛОВСКИЙ Й., ШУШКОВ Д.А. Цеолиты в технологиях предотвращения и восстановления водных систем от загрязнения // Вестник ИГ Коми НЦ Ур. отд. РАН, май, 2017. № 5. С. 49–53. DOI: 10.19110/2221-1381-2017-5-49-53.
7. ПАНИНА Л.В., ЗАЙЦЕВ В.А., СЕНЦОВ А.А., АГИБАЛОВ А.О. Неотектоника центральной части Восточно-Европейской платформы // Бюл. Моск. о-ва испытателей природы. Отд. Геол. 2016. Т. 91, вып. 4–5. С. 51–60.
8. ПЕТРОВА В.В. Низкотемпературные вторичные минералы и их роль в литогенезе. М.: Изд-во ГЕОС, 2005. 240 с.
9. РАССКАЗОВ А.А., БУЯНОВ М.И., ГОРБАТОВ И.С., ВАСИЛЬЕВА Е.Ю. К вопросу о возможности освоения перспективных цеолитопоявлений Монголии с учетом особенностей их формирования. Материалы XIV Международной научно-практической конференции "Новые идеи в науках о Земле". М.: Изд-во МГРИ им. Серго Орджоникидзе. 2019. Т. 4. С. 49–51.
10. САВКО А.Д., СВИРИДОВ В.А. О генезисе цеолитов в мезокайнозойских отложениях Воронежской антеклизы // Геохимия литогенеза. Мат-лы Российского совещания, с международным участием. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2014. 334 с. С. 206–209.
11. САВКО А.Д., СВИРИДОВ В.А. Эволюция минерального состава глин в зависимости от условий их седиментации и диагенеза (на примере кайнозойских отложений Воронежской антеклизы) // Эволюция осадочных процессов в истории Земли: материалы 8-го Всероссийского литологического совещания (Москва, 27–30 октября 2015 г.). М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2015. Т. 1. 419 с. С. 293–296.
12. СЫЧЕВА В.Е. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации на 1 января 2018 года. Вып. 41. Цеолиты. ФГБУ Российский федеральный геологический фонд, 18 л., 1 кн.
13. ХАТЬКОВА А.Н., РАЗМАХНИН К.К., ШУМИЛОВА Л.В., ЧЕРКАСОВ В.Г., РАЗМАХНИНА И.Б. Обогащение и модификация свойств цеолитосодержащих пород с целью расширения областей их практического применения // Горный бюллетень. 2021. № 3–2. С. 153–163. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-32-0-153
14. ЧУЛКОВ А.Н., ДЕЙНЕКА В.И., ДЕЙНЕКА Л.А. Особенности оценки ионообменных характеристик

глин // Научные ведомости. Серия Естественные науки. 2011. № 15 (110). Вып. 16. С. 88–94.

15. GUATAME-GARCIA A., BUXTON M. The Use of Infrared Spectroscopy to Determine the Quality of Carbonate-Rich Diatomite Ores. Minerals 2018, 8, 120. <https://doi.org/10.3390/min8030120>.
16. KALITA B., BORA S.S., GOGOI B. Zeolite: a soil conditioner // International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. Vol. 9. N 1. P. 1184–1206. <https://doi.org/10.20546/ijcmac.2020.901.133>
17. SEMENKOVA A., BELOUSOV P., RZHEVSKAIA A., IZOSIMOVA YU., MASLAKOV K., TOLPESHTA I., ROMANCHUK A., KRUPSKAYA V. U(VI) sorption onto natural sorbents // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2020. V. 326(1). P. 293–301. DOI: 10.1007/S10967-020-07318-Y.
18. RAZMAKHININ K.K. On the question of using natural zeolites to increase the environmental safety of mining regions // Mining Sciences and Mineral Field Development: Challenges and Solutions. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 991. P. 12–39. DOI: 10.1088/1755-1315/991/1/012039.
19. TAZIĆ Z., BOGDANOVIĆ G.D., ANTONIJEVIĆ M.M. Application of natural zeolites in wastewater treatment – A review. Journal of Mining and Metallurgy A: Mining. 2019. Vol. 55, N1. P. 67–79. DOI:10.5937/JM-MA1901067T
20. WILLIAMS C.D. Applications of zeolites to environmental remediation. Chapter 19 in book Urban pollution: Science and Management. First Edition. Edited by Susanne M. Charlesworth and Colin A. Booth. 2018. N 423. P. 249–258.

REFERENCES

1. ADUSHKIN V.V., SANINA I.A., GORBUNOVA E.M., IVANCHENKO G.N., VLADIMIROVA I.S., GABSA TAROV Y.V. Study of neotectonic activity of morphostructures in the central part of the east european craton by remote sensing methods. *Fizika Zemli*. 2014;50;(2): 169–176. DOI: 10.1134/S1069351314020013. (In Russian).
2. BELOUSOV P.E., BOCHARNIKOVA YU.I., BOEVA N. M. Analytical methods for diagnostic of mineral composition in bentonite clay. *Vestnik RUDN*. 2015;4:94–101. (In Russian).
3. BELOUSOV P.E., CHUPALENKOV N.M., KARELINA N.D., KRUPSKAYA V.V. Geological and structural position of bentonite and zeolite deposits in Russia// Rock, mineral and ore formation: achievements and prospects of research. Proceedings for the 90th anniversary of IGEM RAS, 2020;930:826–830. ISBN 978-5-88918-060-9. (In Russian).
4. BUKHTOYAROV I. S., GOFFENSCHER S. YA. Geological map, Sheet N-36-XXX, m-b 1:200 000. VSEGEI, 1957. (In Russian).

5. **DISTANOV U.G., AKSENOV E.M., SABITOV A.A.** Phanerozoic sedimentary paleobasins of Russia: problems of evolution and minerageny of nonmetals. Moscow: Geoinformatika, 2000:83–96. (In Russian).
6. **KOTOVA O., HARJA M., CRETESCU I., NOLI F., PELOVSKI Y., SHUSHKOV D.** Zeolites in technologies of pollution prevention and remediation of aquatic systems. *Vestnik IG Komi SC UB RAS*, May, 2017;5:49–53. DOI: 10.19110/2221-1381-2017-5-49-53. (In Russian).
7. **PANINA L.V., ZAITSEV V.A., SENTSOV A.A., AGIBALOV A.O.** Neotectonics of the East European Platform central part. *Byul. Mosk. o-va ispytateley prirody. Otd. Geol.* 2016;91:4–5:51–60. (In Russian).
8. **PETROVA V.V.** Low-temperature secondary minerals and their role in lithogenesis (silicates, aluminosilicates, hydroxides). Moscow: GEOS, 2005:247. ISBN: 5-89118-372-9. (In Russian).
9. **RASSKASOV A.A., BUYANOV M.I., GORBATOV I.S., VASILYEVA E.YU.** On the question of the possibility of developing promising zeolite manifestations of Mongolia, taking into account the peculiarities of their formation. Materials of the XIV International Scientific and Practical Conference "New Ideas in Earth Sciences". Moscow: Izd-vo MGRI im. Sergo Ordzhonikidze. 2019;4:49–51. ISBN 978-5-6040812-0-4 (In Russian).
10. **SAVKO A. D., SVIRIDOV V. A.** On the genesis of zeolites in mesozoic deposits of the Voronezh antecline. Geochemistry of lithogenesis. Materials of the Russian Meeting, with international contribution. Syktyvkar: IG KomiSC UB RAS. 2014:206–209. (In Russian).
11. **SAVKO A. D., SVIRIDOV V. A.** Evolution of the mineral composition of clays depending on the conditions of their sedimentation and diagenesis (on the example of Cenozoic deposits of the Voronezh antecline). Evolution of sedimentary processes in the history of the Earth: Materials of the 8th All-Russian Lithological Meeting (Moscow, October 27–30, 2015). Moscow: RGU нефти i gaza imeni I.M. Gubkina. 2015;1:293–296. (In Russian).
12. **SYCHEVA V.E.** State balance of mineral reserves of the Russian Federation as of January 1, 2018. Issue 41. Zeolites. FSBI Russian Federal Geological Fund. 18 sheets 1 book. (In Russian).
13. **KHATKOVA A.N., RAZMAKHIN K.K., SHUMILOVA L.V., CHERKASOV V.G., RAZMAKHINA I.B.** Beneficiation and modification of properties of zeolite-bearing rocks toward expansion of their application range. *MIAB. Gornyy byulleten'.* 2021;(3-2):153-163. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-32-0-153. (In Russian).
14. **CHULKOV A.N., DEINEKA V.I., DEINEKA L.A.** Features of the assessment of ion-exchange characteristics of clays. *Nauchnyye vedomosti. Seriya Yestestvennyye nauki.* 2011;15;(110):16:88–94. (In Russian).
15. **GUATAME-GARCIA A.; BUXTON M.** The Use of In-

А.А. РАССКАЗОВ, Н.А. КАРЕЛИНА, И.В. ДЕРЕВЯШКИН, Т.П. МОРОЗОВА
ЦЕОЛИТСОДЕРЖАЩИЕ ТРЕПЕЛЫ ХОТЫНЕЦКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ОРАОВСКАЯ ОБЛАСТЬ): ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ, МИНЕРАЛЬНОГО И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА

- frared Spectroscopy to Determine the Quality of Carbonate-Rich Diatomite Ores. *Minerals* 2018, 8, 120. <https://doi.org/10.3390/min8030120>
16. **KALITA B., BORA S. S., GOGOI B.** Zeolite: a soil conditioner. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences.* 9;1:1184–1206. <https://doi.org/10.20546/ijcmac.2020.901.133>
17. **SEMENKOVA A., BELOUSOV P., RZHEVSKAYA A., IZOSIMOVA YU., MASLAKOV K., TOLPESHTA I., ROMANCHUK A., KRUPSKAYA V.** U(VI) sorption onto natural sorbents. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry.* 2020;326;(1):293–301. DOI: 10.1007/S10967-020-07318-Y
18. **RAZMAKHIN K.K.** On the question of using natural zeolites to increase the environmental safety of mining regions. Mining Sciences and Mineral Field Development: Challenges and Solutions. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2022;991:12–39 DOI: 10.1088/1755-1315/991/1/012039.
19. **TAZIĆ, Z.Z., BOGDANOVIĆ G.D., ANTONIJEVIĆ M.M.** Application of natural zeolites in wastewater treatment – A review. *Journal of Mining and Metallurgy A: Mining.* 2019;55;(1):67–79. DOI:10.5937/JMMA1901067T
20. **WILLIAMS C.D.** Applications of zeolites to environmental remediation. Chapter 19 in book *Urban pollution: Science and Management.* First Edition. Edited by Susanne M. Charlesworth and Colin A. Booth. 2018;423:249–258.

Рассказов Андрей Александрович, профессор Российского университета дружбы народов имени Патриса Лумумбы Департамента недропользования и нефтегазового дела, Инженерная академия

✉ e-mail: rasskasov_aa@pfur.ru

Карелина Надежда Дмитриевна, аспирант Российского университета дружбы народов имени Патриса Лумумбы Департамента недропользования и нефтегазового дела, Инженерная академия

✉ 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6,
117198, Moscow, Miklukho-Maklaya st., 6,
e-mail: karelina_ev@pfur.ru

Деревяшкин Игорь Владимирович, д.т.н., профессор кафедры техники и технологии горного и нефтегазового производства ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет»

✉ 107023, г. Москва, ул. Большая Семеновская, д. 38,
107023, Moscow, Bolshaya Semenovskaya St., 38,
e-mail: div-05@mail.ru

Морозова Татьяна Петровна, к.г.-м.н., доцент кафедры геологии месторождений полезных ископаемых ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ)

✉ 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23,
117997, Moscow, Miklukho-Maklaya st., 23,
e-mail: morozovatp@mgri.ru

УДК 622.227

DOI: 10.52531/1682-1696-2025-25-3-11-23

Обзорная статья

EDN: CCRISO

КОЛЬМАТАЦИЯ ФИЛЬТРОВ И ПРИФИЛЬТРОВЫХ ЗОН ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН СКВАЖИННОГО ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА

А.С. Бабкин, А.Г. Иванов¹,
Ю.А. Арсентьев²,
Е.Ю. Мешков¹,
Н.А. Чернобровкин¹,
Д.Д. Орехов², Р.И. Гаврилов²

¹ АО «Ведущий проектно-
изыскательский и научно-
исследовательский институт про-
мышленной технологии», Москва,
Российская Федерация

² Российский Государственный гео-
логоразведочный университет имени
Серго Орджоникидзе – МГРИ, Москва,
Российская Федерация

В статье рассмотрены виды кольматации фильтров и при-
фильтровых зон технологических скважин скважинного
подземного выщелачивания урана. Приведена классифика-
ция видов кольматации на стадиях сооружения и эксплуата-
ции скважин. На основании выполненных работ и анализа
результатов геофизических исследований установлены раз-
меры зон кольматации глинистым раствором песков различ-
ного гранулометрического состава. Рассмотрены различные
варианты работ по декольматации фильтров и прифильтро-
вых зон. Приведены рекомендации по выбору ремонтно-
восстановительных работ.

Ключевые слова: скважинное подземное выщелачивание
урана, технологическая скважина, фильтр, прифильтровая
зона, кольматация, восстановление производительности
скважин

Процессы сооружения и эксплуатации технологи-
ческих скважин скважинного подземного выщелачи-
вания (СПВ) урана сопровождаются снижением про-
ницаемости фильтров и прифильтровых зон (ПФЗ).

В процессе сооружения технологических сква-
жин вскрытие продуктивного водоносного горизонта

Review article

COLMATATION OF FILTERS AND FILTER ZONES OF PROCESS WELLS OF IN-SITU URANIUM LEACHING

A.S. Babkin, A.G. Ivanov¹
Y.A. Arsenyev², E.Yu. Meshkov¹,
N.A. Chernobrovkin¹, D.D. Orekhov²
R.I. Gavrilov²

¹ JSC "LEADING DESIGN, SURVEY AND
RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL
TECHNOLOGY", MOSCOW, RUSSIAN
FEDERATION

² RUSSIAN STATE GEOLOGICAL PROSPECTING
UNIVERSITY NAMED AFTER SERGO
ORDZHONIKIDZE – MGRI, MOSCOW, RUSSIAN
FEDERATION

The article discusses the types of colmatation of filters and filter
zones of process wells of in-situ uranium leaching. The classifi-
cation of types of colmatation at the stages of well construction
and operation is given. On the basis of the work performed and
the analysis of the results of geophysical studies, the sizes of the
zones of colmatation with clayey solution of sands of various
granulometric were established. Various options for working
on the decolmatation of filters and filter zones are considered.
Recommendations are given for choosing the most options for
repair and restoration work.

KEYWORDS: in-situ leaching of uranium, technological well, fil-
ter, filtration zone, colmatation, recovery of well productivity

с применением различных видов очистных агентов
приводит к кольматации прифильтровой зоны как ча-
стицами выбуриваемого шлама, так и твердой фазой
промывочного агента. В подавляющих случаях в про-
дуктивный горизонт проникает глинистый раствор, а
на стенках образуется глинистая корка.

В процессе эксплуатации происходит снижение
производительности откачных и приемистости на-
гнетательных скважин. Основной причиной является
кольматация как порового пространства продуктив-
ного горизонта и ПФЗ скважин, так и внутренней и

© А.С. Бабкин, А.Г. Иванов, Ю.А. Арсентьев, Е.Ю. Меш-
ков, Н.А. Чернобровкин, Д.Д. Орехов, Р.И. Гаврилов
Поступила в редакцию 05.04.2025

наружной поверхности фильтров, а также отверстий фильтра (диски, щели и пр.).

Авторами предлагается приведенная в табл. 1 классификация видов кольматации фильтров и ПФЗ технологических скважин СПВ урана.

1. ВИДЫ КОЛЬМАТАЦИИ ПРИ СООРУЖЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН.

1.1. Механическая кольматация представляет собой блокирование порового пространства песков продуктивного горизонта проникновением в него промывочного (глинистого) раствора на основе бентонитовых глин и образованием глинистой корки на стенках скважины. Степень кольматации определяется глубиной проникновения раствора в продуктивный горизонт и физико-механическими свойствами глинистой корки. Авторами были выполнены работы по определению глубины проникновения глинистого раствора в пески различного гранулометрического состава. Работы выполнялись на установке исследования проницаемости керна УИПК-1М. Исследования проводились с созданием на образец бокового давления (имитатор горного давления), превышающим осевое давление глинистого раствора.

Глинистый раствор, который используют для вскрытия продуктивного водоносного горизонта, обогащается частицами разбурываемых пород, в т.ч. пе-

сков, и контактируя после этого со стенками скважины в интервале водоносного горизонта, кольматирует пески в том числе и частицами содержащихся в нем пород горизонта. Таким образом, твердая фаза (шлам в виде зерен песка) блокирует поровое пространство в породах вскрываемого горизонта, уменьшая при этом глубину проникновения глинистого раствора в породу. Изучение этого вопроса является важным с точки зрения выбора наиболее эффективных методов декольматации прифильтровой зоны на стадии сооружения технологических скважин СПВ урана.

С целью определения глубины проникновения глинистого раствора с различным содержанием твердой фазы (табл. 2) в поры песчаных водоносных горизонтов, представленных крупно-, средне-, мелко- и разнозернистыми песками, были проведены лабораторные работы с использованием 46 образцов керна и установки исследования проницаемости керна (УИПК-1М) (рис. 1).

В качестве твердой фазы в глинистый раствор добавлялся шлам, представляющий собой разрушенные и просеянные образцы крнвового материала. Размер частиц шлама соответствовал размеру зерен песка исследуемого образца керна. Для каждого образца выполнялось не менее 3-х замеров. Высота исследуемых образцов составляла 50 мм. Для предупреждения гидроразрыва образцов и исключения гидропрорыв-

ТАБЛИЦА 1.

Классификация видов кольматации фильтров и ПФЗ технологических скважин СПВ урана

Стадия формирования кольматанта	Вид кольматации	Примечание
1. Сооружение скважин	1.1. Механическая	
	1.2. Газовая	
2. Эксплуатация скважин	2.1. Механическая	
	2.2. Газовая	
	2.3. Химическая	2.3.1. Обратимая 2.3.2. Необратимая 2.3.3. Кольматация фильтра 2.3.4. Кольматация ПФЗ
	2.4. Ионообменная	
	2.5. Биологическая	

ТАБЛИЦА 2.

Параметры глинистого раствора с твердой фазой

Глинистый раствор	Параметры раствора			
	Плотность, г/см ³	Вязкость, С	Водоотдача, см ³ /30 мин	Содержание песка, %
Раствор 1	1,07	31	14	до 3
Раствор 2	1,10	33	21	5
Раствор 3	1,13	33	25	10
Раствор 4	1,17	34	25	20

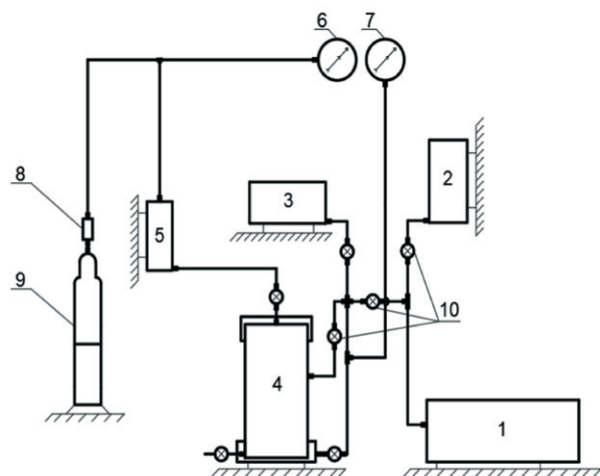


РИС. 1.

Принципиальная схема УИПК: 1 – пресс высокого давления; 2 – емкость для гидравлической жидкости; 3 – пресс ручной; 4 – кернодержатель; 5 – контейнер жидкостной; 6 – манометр давления жидкости; 7 – манометр давления в гидросистеме; 8 – редуктор газовый; 9 – баллон газовый; 10 – вентили запорные

ва глинистого раствора по контакту «кернодержатель – боковая поверхность образца» давление обжата образца превышало давление подачи глинистого раствора на образец при кольматации.

Образцы для экспериментов отбирались из кернового материала, поднятого с глубины 200–220 м, поэтому давление обжата было принято равным 2–2,2 МПа. Для равномерного нагружения торцевых плоскостей исследуемых образцов керна в качестве распределителя потока глинистого раствора использовался перфорированный диск с отверстиями диаметром 3 мм. При проведении экспериментальных работ давление подачи глинистого раствора для кольматации керна составляло 0,5; 1,0; 2,0 МПа.

Результаты исследований по определению глубины проникновения глинистого раствора с твердой фазой в образцы керна приведены в табл. 3 и на рис. 2.

Снижение проницаемости образца определялось созданием технической водой противодействия на противоположную закольматированную торцевую плоскость образца. При этом давление технической воды было равно давлению глинистого раствора. Давление технической воды поднималось постепенно, при этом фиксировалось давление начала декольматации. Полученные результаты приведены в таблице 4.

Меньшие значения $R_{ндк}$, из приведенных в табл. 4, соответствуют крупнозернистым, а большие – мелкозернистым пескам. Существенного различия в значениях $R_{ндк}$ в зависимости от концентрации твердой фазы в глинистом растворе и давлении кольматации R_k не выявлено, что свидетельствует об определяющем влиянии прочности глинистой корки на поверхности образца на величину давления декольматации. В процессе проведения экспериментов было отмечено следующее. Давление $R_{ндк}$ увеличивалось до 0,25–0,3 МПа ($R_k=1,0$ МПа, $A=25–30\%$) при многократной кольматации образцов глинистым раствором 2, причем перед каждым очередным циклом

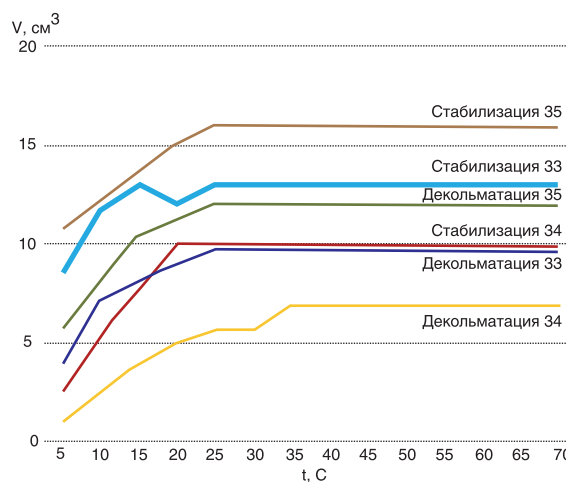


РИС. 2.

Графики кольматации глинистым раствором и декольматации технической водой 3-х образцов, представленных мелкозернистыми песками при давлении 1,0 МПа

ТАБЛИЦА 3.

Глубина проникновения глинистого раствора с твердой фазой

Глинистый раствор	Показатели				
	Глубина проникновения глинистого раствора в образец, мм			Время дости- жения полно- йкольматации, минут	Снижение про- ницаемости после декольматации, %
	Гранулометрический состав песков образцов				
	мелкозернистые	среднезернистые	крупнозернистые		
Раствор1	1–1,5	1,5 – 3	3 – 5	до 1	30 – 50
Раствор 2	1	3	3,5 – 4	до 2	20 – 40
Раствор 3	1	1,5 – 2	3	до 4	10 – 20
Раствор 4	1	1,5 – 2	3	до 8	10

ТАБЛИЦА 4.

Соотношение давления декольматации к давлению кольматации

Давление кольматации P_k , МПа	Давление начала декольматации $P_{ндк}$, МПа	Отношение $A=(P_{ндк}/P_k) \cdot 100\%$
0,5	0,15–0,2	30–40
1,0	0,15–0,2	15–25
2,0	0,2–0,3	10–15

нагружения образца с его поверхности удалялась глинистая корка. Эти результаты близки к результатам, полученным Н.А. Прусовой [10].

Результаты позволяют сделать вывод о том, что при отсутствии условий для гидроразрыва пород, представленных песками различной крупности, глубина проникновения глинистого раствора в водоносный горизонт не превышает 5 мм при условии содержания в глинистом растворе твердой фазы в количестве не менее 3%. Доказательством того, что ускоренная (до 8 минут) кольматация пор водоносного горизонта происходит за счет системы «глинистый раствор + твердая фаза» подтверждается результатами кольматации образцов глинистым раствором без добавок твердой фазы. Результаты измерения продолжительности кольматации в зависимости от состава глинистого раствора показаны в табл. 5 и на рис. 3.

Полученные при исследованиях результаты по кольматации водоносных горизонтов, представленных песками различной крупности, глинистым раствором, содержащим твердофазную добавку, могут быть использованы как для разработки технологических материалов по освоению скважин различного назначения (водозаборных, технологических), так и для проведения ликвидационных работ на скважинах, оборудованных фильтрами, с минимальным загрязнением водоносных горизонтов. В последнем случае прифильтровая зона скважины перед заполнением последней материалом гидроизоляции промывается глинистым раствором, содержащим твердую фазу. Размер частиц твердой фазы при этом принимается равным

ТАБЛИЦА 5.

Результаты измерения продолжительности кольматации образцов

Глинистый раствор	Время выхода первой капли фильтрата, секунды	Выход фильтрата за 10 минут фильтрации, cm^3
Без добавок твердой фазы	2,0	9,0
С добавкой твердой фазы	1,0	4,0

А.С. БАБКИН, А.Г. ИВАНОВ, Ю.А. АРСЕНТЬЕВ, Е.Ю. МЕШКОВ, Н.А. ЧЕРНОВРОВКИН, А.А. ОРЕХОВ, Р.И. ТАВРИЛОВ
КОЛЬМАТАЦИЯ ФИЛЬТРОВ И ПРИФИЛЬТРОВЫХ ЗОН ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН СКВАЖИННОГО ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА

размеру частиц водоносного горизонта. Образовавшийся при этом объем «цилиндра загрязнения» можно рассчитать следующим образом:

$$V_3 = 1,57 \times L_{\phi} \cdot (D_{\phi}^2 + 2 \times l_k), \quad (1)$$

где: V_3 – объем «цилиндра загрязнения», m^3 ; L_{ϕ} – длина фильтра, м; D_{ϕ} – наружный диаметр фильтра, м; l_k – глубина проникновения глинистого раствора с твердой фазой в водоносный горизонт.

Результаты показали, что глубина проникновения в пески различного гранулометрического состава твердой фазы глинистого раствора находится в диапазоне 1–5 мм: (1–1,5 мм для мелкозернистых песков; 1,5–3 мм для среднезернистых песков; 3–5 мм для крупнозернистых песков). Время достижения полной кольматации, в зависимости от содержания в глинистом растворе твердой фазы, составляет от 1 до 8 минут. Твердая фаза при исследованиях представлялась песками гранулометрического состава, соответствующего составу исследуемого образца. Минимальное время достижения кольматации получено для глинистого раствора с содержанием песка до 3%, максимальное – для глинистого раствора с содержанием песка в 20%.

При проведении исследований определялось давление начала декольматации по отношению к давлению кольматации. Для давлений кольматации 0,5; 1,0; 2,0 МПа оно составило 0,15–0,2; 0,15–0,2; 0,2–0,3 МПа соответственно или от 10 до 40% от давления кольматации.

Таким образом, для полной декольматации водоносного горизонта обязательным условием является поинтервальное освоение участков фильтра на стадии сооружения скважины.

1.2. Газовая кольматация наблюдается на стадии освоения технологических скважин методом эрлифтной прокачки со спуском смесителя воздушного

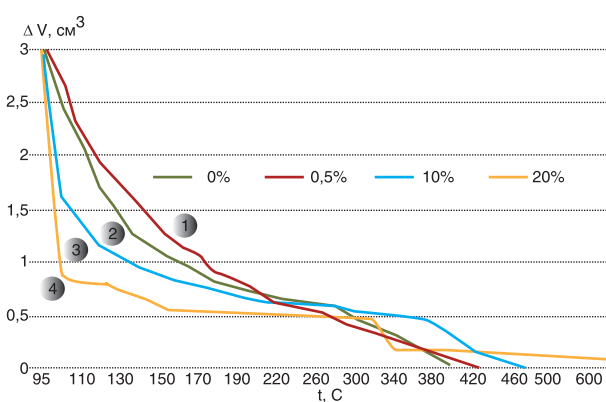


РИС. 3.

Графики кольматации образца керна глинистым раствором с различным содержанием твердой фазы: 1, 2, 3, 4 – содержание твердой фазы в глинистом растворе соответственно 0; 0,5; 10 и 20%

шланга в зону фильтра и ниже [9]. При этом эксплуатационная колонна является водоподъемной колонной и подвергается воздействию ударно-вибрационных нагрузок. Газовая кольматация на стадии освоения проявляется в скважинах с низким статическим уровнем.

2. ВИДЫ КОЛЬМАТАЦИИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН

Виды кольматации, возникающие при эксплуатации технологических скважин, определяются тем, что при фильтрации выщелачивающего раствора через поровое пространство продуктивного горизонта происходит изменение его проницаемости, характер и величина которого определяются природой и концентрацией выщелачивающего реагента и минералогическим составом вмещающих горных пород. Движение выщелачивающих растворов в продуктивном горизонте происходит с переменной проницаемостью, что определяет производительность технологических скважин на протяжении всего периода их эксплуатации.

2.1. Механическая кольматация наблюдается в фильтрах вследствие несоответствия размеров проходных отверстий фильтров гранулометрическому составу вмещающих пород. В результате водопримные отверстия фильтров заклиниваются или перекрываются песком, глиной, гравием, в связи с чем удельный дебит скважин снижается.

Этот вид кольматации наблюдается в песчаных отложениях в результате суффозии или подачи в пласт растворов, содержащих взвешенные частицы.

Под суффозией подразумевают перемещение наиболее мелких частиц по поровым каналам под действием напорного градиента при большой скорости фильтрации жидкости. Суффозия может повлечь за собой как улучшение проницаемости пород (при выносе частиц), так и ее снижение (при закупорке поровых каналов).

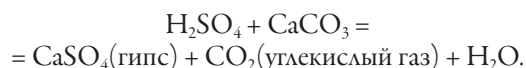
К суффозии приводит резкое увеличение производительности скважин как закачных, так и откачных. С увеличением производительности при закачке в отверстиях фильтров и поровом пространстве прифилтровой зоны продуктивного горизонта происходит увеличение скорости фильтрации, которая затухает с удалением от оси ствола скважины. Создаются условия для перемещения частиц грунта и переосаждения их на некотором расстоянии от стенки фильтра. В результате происходит закупорка поровых каналов и приемистость скважин уменьшается.

С увеличением производительности откачных скважин происходит вынос частиц пород в фильтр (пескование скважины) и увеличение пропускной способности прифилтровой зоны.

Причиной механической кольматации служат не только суффозионные явления, но и загрязнение вы-

щелачивающих растворов продуктами технологической переработки (частицы смолы, гидроуборка полов, атмосферная пыль, твердые примеси серной кислоты и др.).

2.2. Газовая кольматация связана с выделением свободного газа в поровом пространстве пород, чаще всего углекислого, образующегося в результате реакции серной кислоты с карбонатами, например, карбонатом кальция:



Влияние газовой кольматации на проницаемость продуктивного горизонта может быть значительной. При заполнении жидкостью 50% порового объема ее фазовая проницаемость падает в 10 раз, а если жидкость занимает менее 25% порового объема, то ее фильтрация полностью прекращается, а в движении может участвовать только газ [11].

Продолжительность воздействия на проницаемость пород газовая кольматация имеет обычно временный характер. Образующийся при реакции газ покидает водоносный горизонт через откачные скважины как в виде газовой фазы, так и вместе с жидкостью в растворенном состоянии.

Среди карбонатов наиболее активно взаимодействует с серной кислотой карбонат кальция – CaCO_3 . Остальные карбонаты реагируют с серной кислотой значительно медленнее, что не приводит к образованию свободного газа.

При содержании CaCO_3 менее 0,2% или использовании раствора серной кислоты с концентрацией до 2 г/дм³ свободный газ при атмосферном давлении не образуется. В условиях водоносных горизонтов (в особенности высоконапорных) растворимость газа растет прямо пропорционально гидростатическому давлению жидкости в продуктивном горизонте, т.е. при гидростатическом давлении, превышающем в 10 раз атмосферное давление, минимальные значения концентрации серной кислоты и карбоната кальция, не приводящие к образованию свободного газа, могут быть увеличены в 8,4 раза.

Для некоторых месторождений возможно образование сероводорода при взаимодействии растворов серной кислоты с сульфидами [2, 3 и др.]. При сохранении производительности скважин объем его продуцирования недостаточен для газовой кольматации ПФЗ и продуктивного горизонта.

Таким образом, процесс газовой кольматации контролируется содержанием CaCO_3 и концентрацией серной кислоты в растворах.

2.3. Химическая кольматация характеризуется выпадением из рабочих растворов химических осадков в результате взаимодействия серной кислоты с породами.

Кольматацию этого вида можно разделить на следующие подвиды: 2.3.3 – кольматация фильтра; 2.3.4 – кольматация прифильтровой зоны (ПФЗ).

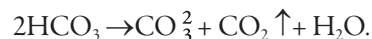
2.3.3. Химическая кольматация фильтра заключается в закупоривании отверстий в фильтре химическими осадками. При этом известно, что чем выше скважность фильтра, тем меньше скорость закупоривания его пропускных отверстий. Поэтому подбор типа фильтра – важнейший момент, определяющий эффективность формирующейся конструкции скважины и влияющий на продолжительность межремонтного цикла (МРЦ). Анализ рекомендаций специалистов в области гидравлики течения пластовых вод в фильтре и ПФЗ, а также результаты работ по извлечению на поверхность различных типов фильтров показал, что оптимальным является однокаркасный щелевой фильтр с горизонтальными щелями [1], представленный на рис. 4.

Двухкаркасные фильтры типа КДФ, ФКД и других, конструкция которых включает размещение фильтрующих дисков на перфорированном трубном каркасе, наименее пригодна по следующим основным причинам:

- низкая скважность (работают только те участки щелей фильтрующих дисков, которые расположены против перфорированных отверстий каркаса);
- межкаркасное пространство в зонах сплошного тела трубы-каркаса не работает (застойная зона) и быстро зарастает химическими осадками. Этот факт многократно подтверждается извлечением на поверхность двухкаркасных фильтров, где межкаркасное пространство зацементировано химическими осадками, не удаляемыми никакими способами обработок фильтра. Прямое определение состава осадков, кольматирующих фильтры и ПФЗ скважин, извлеченные через различные периоды работы, показывают, что они в основном представлены $\text{Fe}(\text{OH})_{2/3}$, $\text{Al}(\text{OH})_3$, CaCO_3 , $\text{Mn}(\text{OH})_2$, $\text{Mn}(\text{OH})_4$, $\text{SiO}_2 \times n\text{H}_2\text{O}$, сульфидами металлов.

На стадии закисления продуктивного горизонта, когда откачиваются пластовые воды, химическая коль-

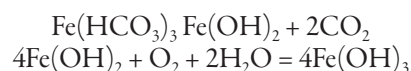
матация обуславливается нарушением химического состава подземных вод в результате изменения гидродинамических параметров фильтрационного потока. При изменении пластового давления уменьшается растворимость газов (в основном CO_2), происходит их выделение и нарушается углекислотное равновесие:



Присутствие катионов кальция и магния и нарушение углекислотного равновесия приводит к образованию CaCO_3 и MgCO_3 . Интенсивно происходит выделение карбонатных осадков в зоне фильтров, при удалении от них, т.е. вглубь продуктивного горизонта, интенсивность выпадения осадков уменьшается. В фильтрах, имеющих большие гидравлические сопротивления, возрастают потери давления, что приводит к более активному выделению из воды CO_2 и увеличению количества карбонатных осадков. Этому способствует турбулизация потока подземных вод и их перемешивание при прохождении через водоприсмную часть фильтра.

Если кольматация происходит только карбонатными соединениями, то осадки по структуре близки к кристаллическим и имеют серовато-белый цвет. При взаимодействии с соляной кислотой наблюдается интенсивное выделение углекислого газа.

Распространенными кольматантами при этом являются железистые осадки, которые выделяются при откачке подземных вод, содержащих закисное железо. Переход железа из закисного в окисное и выпадение в осадок происходит при наличии в подземных водах растворенного кислорода. Этому также способствует выделение CO_2 и повышение pH воды вследствие нарушения углекислотного равновесия:



Гидрат оксида железа имеет студнеобразный вид и откладывается на поверхности фильтров и в поровом пространстве ПФЗ продуктивного горизонта. Интенсивность выпадения железистых осадков возрастает при неравномерной откачке воды из скважин с использованием эрлифта, приводящей к насыщению рабочего раствора кислородом воздуха. Железосодержащие осадки характеризуются желто-коричневым цветом, пачкают руки.

На кольматацию фильтра большое влияние оказывает наличие в подземных водах сероводорода H_2S . Содержание гидросульфитов HS приводит к образованию труднорастворимых и непроницаемых сернистых отложений железа, меди, цинка. Сульфиды металлов в виде корковидных наростов черного цвета образуют прочное пленочное покрытие на поверхности средств раствороподъема (погружных электро-



РИС. 4.

Конструкция щелевого фильтра из труб НПВХ с горизонтальными щелями

насосов) и постепенно разрушают их. При взаимодействии с рабочими растворами эти осадки бурно выделяют сероводород.

При наличии в железосодержащих подземных водах кремнекислоты наблюдается образование трудно-растворимых силикатных отложений с примесью закисного железа, придающего им бурю окраску. Эти осадки характеризуются высокой прочностью и практически нерастворимы в кислотах.

Предотвратить химическую кольматацию фильтров и прифильтровой зоны скважин, обусловленную нарушением углекислотного равновесия, невозможно, поскольку ее причиной является нарушение естественного режима водоносного пласта.

По характеру воздействия на фильтрационные свойства пород химическая кольматация может быть обратимой и необратимой. К обратимой (временной) следует отнести кольматацию, вызванную выпадением в осадок гидроксидов железа и алюминия.

При снижении величины рН в процессе закисления пород образовавшиеся ранее осадки снова начинают растворяться (сначала гидроксид железа (II) при $\text{pH} = 6$ и менее, затем гидроксид алюминия при $\text{pH} = 4$ и ниже и железа (III) при $\text{pH} = 3$ и ниже), и проницаемость пород восстанавливается. Однако при высоком содержании алюминия и железа в породах и большом расстоянии между закачными и откачными скважинами осадок гидроксидов может полностью закольматировать ПФЗ откачных скважин и привести их к выходу из строя.

К необратимой химической кольматации приводит выпадение гипса, растворимость которого невелика (около 2 г/дм^3) и практически не зависит от величины рН. Гипсовая кольматация начинает проявляться несколько позднее газовой.

Кольматация порового пространства гипсом определяется содержанием иона Ca^{2+} в породах и не зависит от концентрации иона SO_4^{2-} .

2.4. Ионообменная кольматация проявляется в горных породах, содержащих значительное количество глинистых минералов, главным образом, монтмориллонитовой группы. Она приводит к постепенному, нередко значительному (в 2 раза и более) ухудшению проницаемости песчано-глинистых пород в результате набухания глинистых частиц при замещениях в их мицеллах (дисперсная частица вещества в коллоидах с адсорбированными на ее поверхности ионами) и гидратными оболочками (диполями воды) двухвалентных катионов одновалентными ионами металлов.

Ионообменные процессы влияют на проницаемость пород могут и косвенно. Например, переходящий в раствор в результате этих процессов ион кальция, соединяясь с сульфат-ионом серной кислоты, вызывает частичную необратимую кольматацию порового пространства гипсом.

Образование гипса сопровождается в той или иной мере процесс подземного выщелачивания при использовании в качестве растворителя серной кислоты ввиду накопления солей в оборотных растворах и малой его растворимости.

Ионный обмен определяется двумя рядами факторов.

К первому ряду факторов относятся:

1. Минералогический состав глинистой части породы. Наибольшей способностью к ионному обмену обладает группа монтмориллонита, средней – иллита, наименьшей – каолинита.
2. Размер глинистых частиц, определяющий удельную поверхность породы. С повышением степени раздробленности минералов увеличивается их способность к ионному обмену.

Ко второму ряду факторов относятся:

1. Величина рН, определяющая толщину диффузионного слоя глинистой частицы.
2. Концентрация серной кислоты в растворе. С ее увеличением способность к ионному обмену возрастает.
3. Природа обменивающихся ионов. По энергии обмена катионы располагаются в следующий ряд (в порядке уменьшения энергии):



Ион H^+ , вводимый в большом количестве в раствор при использовании серной кислоты, стоит особняком, занимая в этом ряду место между двух- и трехвалентными катионами. Замещая в диффузионной оболочке глинистой частицы обычно содержащийся там ион Ca^{2+} , имеющий значительно меньший радиус, H^+ -ион способствует набуханию глинистых частиц и сокращению порового пространства. В особенности склонен к набуханию монтмориллонит.

Наличие в растворе значительного количества трехвалентных катионов (например Fe^{3+}), наоборот, способствует сокращению размеров диффузионных оболочек и сохранению проницаемости песчано-глинистых пород в кислой среде (при отсутствии других форм кольматации).

Таким образом, кольматацию, связанную с ионообменными процессами, контролируют монтмориллонитовые глины и содержание серной кислоты.

2.5. Биологическая кольматация связана с образованием растительных и животных микроорганизмов в поровом пространстве пород продуктивного горизонта и в настоящей работе не рассматривается.

Описание методов удаления продуктов различных видов кольматации приведено во многих работах [7, 8 и др.]. Авторами рассмотрены основные виды работ по декольматации фильтров и ПФЗ, приведенные в табл. 6.

Рассмотрим основные варианты выполнения работ.

А.1.1. Эрлифтная прокачка с водоподъемом по эксплуатационной колонне производится с обязательным

оборудованием устья скважины прокачным оголовником. Варианты оголовников приведены на рис. 5.

Процесс сопровождается подачей в колонну сжатого воздуха, аэрацией скважинной жидкости, подъемом газожидкостной смеси до устья и ее изливом на поверхность или в специальную емкость через отводной шланг. В подавляющем большинстве случаев эта смесь имеет пробковую структуру, в которой основная масса газа движется в виде сплошных столбиков-чечек, чередующихся со столбиками жидкости. При средних условиях работы эрлифта скорость излива газожидкостной смеси составляет $V_{\text{вос}} = 9-10$ м/с. Приведенный вариант эрлифтной прокачки сопровождается ударными нагрузками $N_{\text{уд}}$ на торцевую – горизонтальную или наклонную – поверхность оголовника. В варианте Б это приводит к возникновению осевого воздействия и соударению с восходящим потоком газожидкостной смеси. Этот процесс вызывает вибрационные нагрузки в обсадных трубах эксплуатационной колонны, что может приводить к разрушению, прежде всего, резьбовых соединений. При использовании оголовника в варианте Б (с наклонной поверхностью) изгибающая нагрузка, действующая на верх полимерной эксплуатационной колонны, существенно снижается. Поэтому только такой вариант оголовника допускается использовать в редчайших случаях при эрлифтной прокачке скважин.

Сводные таблицы ударных импульсов на оголовник при эрлифтной прокачке технологических скважин СПВ урана для трех залежей приведены в табл. 7, 8, 9.

Приведенные данные получены при проведении РВР методом эрлифтной прокачки с использованием оголовников конструкции рис. 5. Продолжительность одной прокачки до восстановления проектной производительности составляет в среднем 6 часов. Соответственно на эксплуатационную колонну за это время наносится от 1000 до 20000 ударов, что существенно сокращает срок ее службы. Кроме того, эрлифтные прокачки таким методом приводят к возникновению изгибающей составляющей нагрузки на

верхний участок эксплуатационной колонны. Графики изменения дебита при проведении эрлифтной прокачки при выполнении ремонтно-восстановительных работ по залежам 1, 2, 3 приведены на рис. 6.

А.1.2. Эрлифтная прокачка с водоподъемом по специальной водоподъемной колонне.

Опыт показывает, что наиболее приемлемым вариантом может быть только вариант эрлифтной прокачки с параллельным расположением воздушной и водоподъемной колонн.

Схема эрлифта с параллельным расположением воздушной и водоподъемной колонн исключает воздействие ударных, вибрационных и изгибающих нагрузок на эксплуатационную колонну. Все эти нагрузки воспринимаются водоподъемной колонной, которая выполняется из шлангов типа ШАПП-50

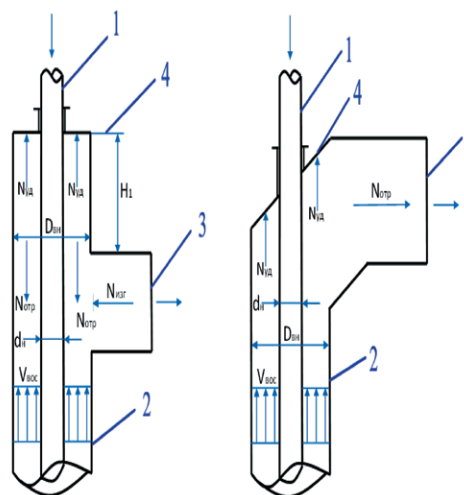


Рис. 5.

Варианты прокачных оголовников (А – вариант с горизонтальной поверхностью оголовника; Б – вариант с наклонной поверхностью оголовника): 1 – воздушный шланг; 2 – эксплуатационная колонна; 3 – отводной патрубок; 4 – поверхность оголовника, воспринимающая ударные нагрузки

ТАБЛИЦА 6.

Основные виды работ по декольматации фильтров и прифильтровых зон

Вид работ	Варианты выполнения работ	Примечание
А.1. Эрлифтная прокачка	А.1.1. Водоподъем по эксплуатационной колонне	Только для скважин небольшой глубины при фиксации колонны на устье
	А.1.2. Водоподъем по специальной водоподъемной колонне	Рекомендуется для всех скважин на стадии сооружения и эксплуатации
А.2. Ударные способы	А.2.1. Пневмоимпульсная обработка	Рекомендуется только для разрушения монолитных продуктов химической коагуляции
	А.2.2. Механическая импульсная обработка	Основной вид работ по удалению любых продуктов коагуляции
А.3. Химические способы		Состав реагента для декольматации подбирается в зависимости от вида коагулянта

ТАБЛИЦА 7.

Залежь 1, обсадные трубы ПНД160 × 18

Дебит при от- качке Q_0 ($Q_{оср}$), м³/час	Среднее количе- ство импульсов, ед./мин	Дебит единичного удара $Q_{1уд}$, м³/уд
0–1,0 (0,7)	2,8	0,042
1,1–2,0 (1,96)	5,2	0,063
2,1–3,0 (2,78)	6,9	0,067
3,1–4,0 (3,31)	11,2	0,049
4,1–5,0 (4,5)	13,6	0,055
5,1–6,0 (5,66)	22,8	0,041
6,1–7,0 (6,46)	30,7	0,035
7,1–8,0 (7,73)	27,8	0,046
8,1–9,0 (-)	–	–
9,1–10,0 (10)	36	0,046

ТАБЛИЦА 8.

Залежь 2, обсадные трубы ПНД160 × 18

Дебит при откачке Q_0 ($Q_{оср}$), м³/час	Среднее коли- чество импуль- сов, ед./мин	Дебит единич- ного удара $Q_{1уд}$, м³/уд
0–1,0 (-)	–	–
1,1–2,0 (1,53)	3,8	0,086
2,1–3,0 (2,69)	8,9	0,05
3,1–4,0 (3,7)	12,1	0,51
4,1–5,0 (4,7)	22,1	0,036
5,1–6,0 (5,64)	38,1	0,002
6,1–7,0 (6,84)	64,4	0,002
7,1–8,0 (7,75)	46,3	0,027
8,1–9,0 (8,48)	31,8	0,004

ТАБЛИЦА 9.

Залежь 3, обсадные трубы ПНД110 × 18

Дебит при откачке Q_0 ($Q_{оср}$), м³/час	Среднее коли- чество импуль- сов, ед./мин	Дебит единич- ного удара $Q_{1уд}$, м³/уд
0 – 1,0 (0,79)	3,8	0,008
1,1 – 2,0 (1,3)	4,7	0,005

Примечание: количество скважин для проведения анализа по скважинам составило по залежи 1–20 скважин, по залежи 2–19 скважин, по залежи 3–4 скважины. Статические уровни пластовой жидкости составляли: залежь 1–110 м (средняя глубина скважин 215 м); залежь 2–200 м (80 м), залежь 3–230 м (130 м). Динамика восстановления производительности при эрлифтной прокачке скважин приведена в табл. 10.

(шланг из полиэтилена низкого давления (ПНД) армированный полипропиленовой нитью). В качестве воздушной колонны используется шланг типа ПНД-25. Использование шлангов позволяет исключить газовую кольматацию фильтра и ПФЗ при выполнении прокачки. Поинтервальное перемещение торцевого входного отверстия водоподъемной колонны при прокачке вдоль фильтра обеспечивает полное удаление кольматанта из ПФЗ по всей его длине. Метод реализован в установках УОС (установка освоения скважин) и УПОС (установка промывки и освоения скважин), монтируемых на автомобильных шасси высокой проходимости [5]. Следует также отметить, что такой способ эрлифтной прокачки обеспечивает высокие скорости движения пластовой жидкости на входе в фильтр, которые могут существенно превышать скорости движения рабочих растворов при эксплуатации скважин. Это обеспечивает вынос из обрабатываемого интервала прифильтровой зоны мелких фракций песков продуктивного водоносного горизонта, что исключает суффозионные явления на стадии эксплуатации.

А.2.1. Пневмоимпульсная обработка фильтров и ПФЗ.

Этот вид обработки был разработан с участием Вольницкой Э.М., суть которого заключается в воздействии знакопеременных ударных импульсов на ПФЗ и широко описан в литературе [4, 5 и др.].

Указанный вид обработки является одним из видов РВР, выполняемых установкой «Гидропульс» производства фирмы «TLM hydropuls GmbH» (Германия). Технические характеристики установок пневмоимпульсной обработки АСП – ПВ и «Гидропульс», а также механизм обработки приведены в работе Иванова А.Г. и др. [7]. Опыт применения пневмоимпульсного метода обработки ПФЗ технологических скважин показал, его эффективность только для разрушения продуктов химической кольматации, которые затем удаляются из скважины эрлифтной прокачкой. Метод непригоден для удаления мелких продуктов кольматации поскольку при его реализации ударный импульс в направлении из фильтра в водоносный горизонт имеет большую мощность по сравнению с возвратным импульсом в направлении из водоносного горизонта в фильтр. Т. е. применение такого метода приводит к оттеснению частиц кольматанта в водоносный горизонт. Форма импульсов приведена на рис. 7.

А.2.2. Механическая импульсная обработка.

Этот вид обработки является универсальным и отличается от пневмоимпульсной обработки значительно более высокой эффективностью. Метод проходил испытания в конце 1990 г. на одном из уранодобывающих предприятий в Республике Казахстан. Механизм его работы описан в одной из статей [8]. На рис. 8 приведены графики изменения производитель-

ности скважин после пневмоимпульсной обработки скв. 10-2-15 и 12-2-4а и после механической импульсной обработки скв. 12-2-13.

На рис. 9 приведен график формы ударных импульсов при механической импульсной обработке фильтров и прифильтровых зон.

Анализ приведенного графика позволяет сделать вывод о том, что механическое истирание кольматанта в фильтре и прифильтровой зоне с ударным импульсом одинаковой величины как в направлении водоносного горизонта, так и в направлении фильтра позволяет эффективно разрушать любой кольматант с последующим удалением его мелкодисперсных частиц на поверхность. Такой способ позволяет производить обработку фильтра и прифильтровой зоны поинтервально по всей длине фильтра перемещением устройства на буровых трубах. Этот вид обработки хорошо сочетается с эрлифтной прокачкой с парал-

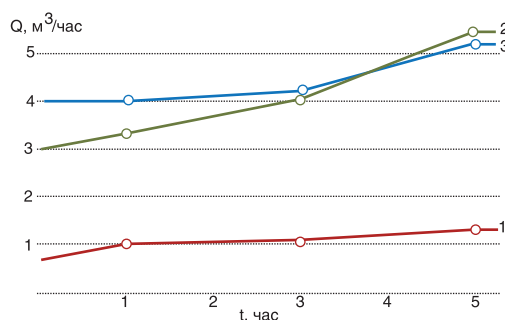


РИС. 6.

Графики повышения дебита скважин при проведении эрлифтных прокачек: 1, 2, 3 – номера скважин

лельным расположением воздушной и водоподъемной колонн, приведенным на рис. 7.

С учетом полученных результатов кафедрой механики и инженерной графики им. Б.М. Ребрика РГГРУ имени Серго Орджоникидзе – МГРИ разработана конструкция устройства разрушения кольматанта (УРК), действующая на принципах механической импульсной обработки фильтров и прифильтровых зон водозаборных и технологических скважин. Основные технические характеристики УРК, показанного на рис. 11, приведены в табл. 11.

Приведенная конструкция позволяет устанавливать два и более дисков, создающих вибрационное воздействие на кольматант как фильтра, так и прифильтровой зоны. Количество дисков и расстояние между ними определяется длиной фильтра. Рекомендуемое максимальное расстояние между дисками составляет 0,4 м. Авторами рекомендуется максимальное расстояние между крайними верхним и нижним дисками 2,0 м.

ВЫВОДЫ

1. Механическая кольматация на стадии сооружения скважин имеет незначительную глубину проникновения в водоносный горизонт и легко удаляется путем поинтервального освоения фильтра и прифильтровой зоны перемещением водоприемного устройства, расположенного в составе обвязки для эрлифтной прокачки с применением гибких воздушной и водоподъемной колонн.

2. Эрлифтная прокачка с применением параллельного расположения воздушной и водоподъемной колонн обеспечивает высокое качество работ и исключает как газовую кольматацию прифильтровой зоны

ТАБЛИЦА 10.

Динамика восстановления дебита скважин и данные визуального контроля откачиваемой пластовой жидкости

Дебит, м³/час	Время, час	Вид раствора
1,2	0,1	Бурые растворы, присутствие мехвзвесей
1,25	0,5	Бурые растворы, присутствие мехвзвесей
1,3	1	Грязные растворы, присутствие мехвзвесей
1,5	1,5	Сизые растворы, присутствие мехвзвесей
1,6	2	Сизые растворы, присутствие мехвзвесей
1,67	2,5	Сизые растворы, присутствие мехвзвесей
1,6	3	Сизые растворы, присутствие мехвзвесей
1,7	3,5	Растворы с осветлением, видимое присутствие мехвзвесей
1,65	4	Растворы с осветлением, видимое присутствие мехвзвесей
1,6	5	Растворы с осветлением, видимое присутствие мехвзвесей
1,67	6	Растворы с осветлением, незначительные мехвзвеси
1,6	7	Растворы с осветлением, весьма незначительные мехвзвеси
1,7	8	Растворы с осветлением, весьма незначительные мехвзвеси
1,65	9	Растворы с осветлением, весьма незначительные мехвзвеси

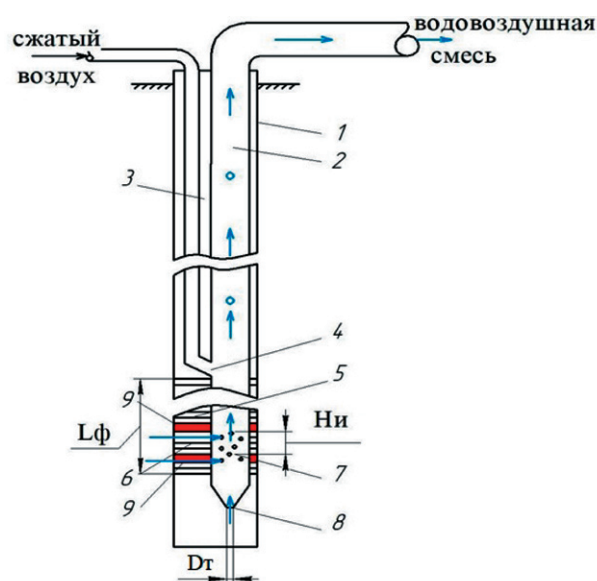


Рис. 7.

Схема эрлифта с параллельным расположением воздушной и водоподъемной колонн: 1 – эксплуатационная колонна; 2 – водоподъемная колонна из полимерного шланга; 3 – воздушная колонна из полимерного шланга; 4 – смеситель; 5 – фильтр; 6 – осваиваемый интервал фильтра и прифильтровой зоны; 7 – перфорация водоприемной части водоподъемной колонны из мягкого пористого материала; 8 – торцевое отверстие водоприемной части водоподъемной колонны; 9 – ограничители водопритока по высоте фильтра. Параметры: L_f – длина фильтра, H_n – высота осваиваемого интервала, D_t – диаметр торцевого отверстия водоприемной части водоподъемной колонны

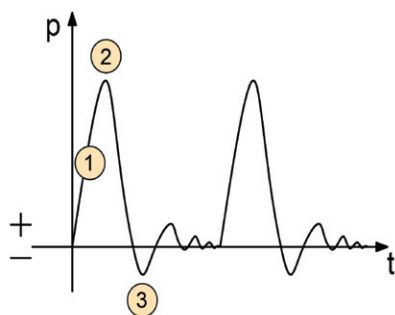


Рис. 8.

Форма ударных импульсов при пневмоимпульсной обработке фильтров и прифильтровых зон: 1 – график ударных импульсов; 2 – максимальный импульс в направлении от фильтра в водоносный горизонт; 3 – максимальный импульс в направлении из водоносного горизонта в фильтр

на стадии сооружения скважины, так и суффозионные явления в прифильтровой зоне в процессе эксплуатации скважин.

3. Применение эрлифтной прокачки для освоения скважин и при выполнении ремонтно-восстановительных работ с использованием эксплуатационной колонны недопустимо, поскольку данный вид обработки ведет к разрушению любых видов резьбовых соединений полимерных обсадных труб.

А.С. БАБКИН, А.Г. ИВАНОВ, Ю.А. АРСЕНТЬЕВ, Е.Ю. МЕШКОВ, Н.А. ЧЕРНОБРОВКИН, А.А. ОРЕХОВ, Р.И. ТАВРИЛОВ
КОЛЬМАТАЦИЯ ФИЛЬТРОВ И ПРИФИЛЬТРОВЫХ ЗОН ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН СКВАЖИННОГО ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА

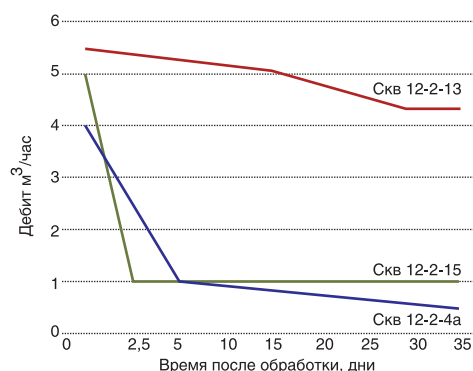


Рис. 9.

Графики изменения производительности обработанных скважин

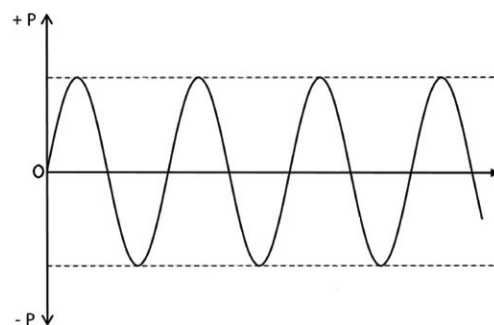


Рис. 10.

График формы ударных импульсов при механической импульсной обработке фильтров и прифильтровых зон: +P – ударный импульс в направлении от фильтра в водоносный горизонт; -P – ударный импульс в направлении из водоносного горизонта в фильтр

4. Для разрушения и удаления продуктов механической и химической коагуляции наиболее перспективным является применение устройств механической импульсной обработки фильтров и прифильтровых зон типа УРК с последующей эрлифтной прокачкой при условии параллельного расположения воздушной и водоподъемной колонн.

ЛИТЕРАТУРА

1. АЛЕКСЕЕВ В.С., ТЕСЛЯ В.Г. Критерии проектирования фильтров водозаборных скважин // Водоснабжение и санитарная техника. 2009. №11. С. 21–29.
2. БАБКИН А.С., ИВАНОВ А.Г., МИХАЙЛОВ А.Н., ГУРУЛЕВ Е.Н., АЛЕКСЕЕВ Н.А. и др. Восстановление производительности технологических скважин при скважинном подземном выщелачивании урана // Московский экономический журнал. 2019. №2. С. 84–100.
3. БЕЛЕЦКИЙ В.И., ДАВЫДОВА А.Г., ДОЛГИХ П.Ф. и др. Методы исследований при подземном выщелачивании руд: Учебное пособие // М.: МГРИ. 1982. 109 с.

ТАБЛИЦА 11.

Основные технические характеристики УРК

Характеристика	Значение
Внутренний диаметр эксплуатационной колонны: минимальный, мм максимальный, мм,	75 220
Расход рабочего агента, дм³/С	Регулируемый до 10
Амплитуда колебаний дисков рабочего органа, мм	Регулируемая до 20
Частота колебаний дисков рабочего органа, Гц	Регулируемая до 50
Энергия рабочего удара, Н × м	Регулируемая до 80
Перепад давления в вибраторе, МПа	до 1,5
Габаритные размеры, мм: длина диаметр корпуса диаметр дисков	Определяет количество дисков(до 2 м) До 65 70–210
Масса, кг	До 30 кг, вес определяет удельный вес материалов изделия



РИС. 11.

Модель конструкции устройства разрушения кольматанта УРК

4. Вольницкая Э.М. Разработка и внедрение импульсно-волновой технологии интенсификации притоков в гидрогеологических скважинах // Автореферат дисс. на соискание уч. ст. к.т.н. Всесоюзный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по взрывным методам геофизической разведки. 1990. 19 с.
5. Геотехнология урана (российский опыт): монография // Под ред. Солодова И.Н., Камнева Е.Н. М.: «КДУ», «Университетская книга». 2017. 576 с.
6. Иванов А.Г., Арсентьев Ю.А., Иванов Д.А., Назаров А.П. Влияние содержания твердой фазы в глинистом растворе на кольматацию песков при вскрытии водоносных горизонтов // Разведка и охрана недр. 2023. №9. С. 48–51.
7. Иванов А.Г., Михайлов А.П., Алексеев Н.А., Арсентьев Ю.А., Соловьев Н.В., Назаров А.П. Методы и технические средства обработки фильтров и прифильтровых зон технологических скважин // Разведка и охрана недр. 2020. №7. С. 40–44.
8. Иванов А.Г., Арсентьев Ю.А., Орехов Д.Д., Гаврилов Р.И. О некоторых особенностях механической импульсной обработки фильтров и прифильтровых зон технологических скважин подземного выщелачивания урана // Известия ВУЗов. Геология и разведка. 2025. №1. С. 41–52.
9. Пенкевич С.В. Методические указания к расчету

эрлифта при откачке из гидрогеологических скважин // М.: МГРУ им. С. Ораджоникидзе (МГРИ). 2003. 20 с.

10. Прусова Н.А. Исследование процесса закупоривания проницаемых пород дисперсной фазой различных буровых растворов и разработка очистительных устройств // Автореферат дисс. на соискание уч. ст. к.т.н. Всесоюзный научно-исследовательский институт буровой техники. 1988. 24 с.
11. Справочник по геотехнологии урана. Под ред. Д.И. Скороварова. М.: ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ. 1997. С. 216–218.

REFERENCES

1. ALEKSEEV V.S., TESLYA V.G. Criteria for designing filters of water intake wells. *Vodosnabzheniye i sanitarnaya tekhnika*. 2009;11:21–29. (In Russian).
2. BABKINA S., IVANOVA G., MIKHAILOVA N., GURULEV E.N., ALEKSEEV N.A. ET. AL. Restoring the productivity of process wells during borehole underground leaching of uranium. *Moskovskiy ekonomicheskii zhurnal*. 2019;2:84–100. (In Russian).
3. BELETSKY V.I., DAVYDOVA L.G., DOLGIKH P.F., Methods of research in underground leaching of ores: Textbook. Moscow: MGRI. 1982:109. (In Russian).
4. VOLNITSKAYA E.M. Development and implementation of pulse-wave technology of intensification of tributaries in hydrogeological wells. Avtoref. dis. on the soisk. Uchen. Step. Cand. Tech. Sciences. All-Union. n.-i. and project. -konstr. Institute for Explosive Methods Geophys. Intelligence. 1990:19. (In Russian).
5. Uranium Geotechnology (Russian Experience): Monograph. Ed. by Solodov I.N., Kamnev E.N. Moscow: "KDU". "Universitetskaya kniga". 2017:576. (In Russian).
6. IVANOV A.G., ARSENTYEV YU.A., IVANOV D.A., NAZAROV A.P. Influence of solid phase content in clay

- solution on colmatation of sands during the opening of aquifers. *Razvedka i okhrana nedr.* 2023;9:48–51. (In Russian).
7. **IVANOV A.G., MIKHAILOV A.P., ALEKSEEV N.A., ARSENTYEV YU.A., SOLOVIEV N.V., NAZAROV A.P.** Methods and technical means of processing filters and filter zones of technological wells. *Razvedka i okhrana nedr.* 2020;7:40–44. (In Russian).
 8. **IVANOV A.G., ARSENTYEV YU.A., OREKHOV D.D., GAVRILOV R.I.** On some features of mechanical pulse processing of filters and filter zones of technological wells of underground uranium leaching. *Izvestiya VUZov. Geologiya i razvedka.* 2025;1:41–52. (In Russian).
 9. **PENKEVICH S.V.** Guidelines for the calculation of air-lift when pumping out of hydrogeological wells. Moscow: MGRI. 2003:20. (In Russian).
 10. **PRUSOVA N.L.** Study of the process of capping permeable rocks with a dispersed phase of various drilling solutions and the development of cleaning devices. All-Union Scientific Research Institute of Drilling Equipment. 1988:24. (In Russian).
 11. Handbook of uranium geotechnology. Moscow: ENERGOATOMIZDAT. 1997:216–218. (In Russian).

Бабкин Александр Степанович,
ветеран ГК «Росатом», пенсионер

✉ e-mail: babkin.a.s@mail.ru

Иванов Александр Георгиевич,
к.т.н., главный специалист АО «Ведущий проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии»

✉ 115409, г. Москва, Каширское ш., д. 33,
115409, Moscow, Kashirskoe sh., 33
e-mail: ivanov_ag@mail.ru, 8-914-804-18-53

Арсентьев Юрий Александрович,
к.т.н., доцент кафедры механики и инженерной графики им. Б.М. Ребрика Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе – МГРИ

✉ 117485, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23,
117485, Moscow, Miklukho-Maklaya st., 23,
тел.: +7 (985) 145-62-07, e-mail: arsentev1956@yandex.ru

Мешков Евгений Юрьевич,
начальник лаборатории АО «Ведущий проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии»

✉ 115409, г. Москва, Каширское ш., д. 33,
115409, Moscow, Kashirskoe sh., 33
тел.: +7 (926) 369-75-53, e-mail: eumeshkov@mail.ru

Чернобровкин Николай Антонович,
главный специалист АО «Ведущий проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии»

✉ 115409, г. Москва, Каширское ш., д. 33,
115409, Moscow, Kashirskoe sh., 33
тел.: +7 (926) 429-07-70,
e-mail: Chernobrovkin.N.A.@rosatom.ru

Орехов Данила Дмитриевич,
студент Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе – МГРИ

✉ 117485, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23,
117485, Moscow, Miklukho-Maklaya st., 23,
тел.: +7 (920) 088-56-88, e-mail: danilaohv@yandex.ru

Гаврилов Руслан Игоревич,
студент Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе – МГРИ

✉ 117485, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23,
117485, Moscow, Miklukho-Maklaya st., 23,
тел.: +7 (985) 145-62-07,
e-mail: supermouse27228@gmail.com

УДК 551.583

DOI: 10.52531/1682-1696-2025-25-3-24-33

Научная статья

EDN: CUFGUI

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ АРРЕНИУСА О ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ
ЗЕМНОЙ СИСТЕМЫ НА ВЫБРОСЫ АНТРОПОГЕННЫХ
ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

В.В. ТЕТЕЛЬМИН

Институт экологии РУДН им. Патриса
Лумумбы, Москва, Российская Федерация

Решена задача, которую в конце XIX века сформулировал шведский химик Аррениус по определению чувствительности земной системы к выбросам парниковых газов, включая увеличение в два раза содержания в атмосфере диоксида углерода. На основании анализа термодинамических параметров климатической системы в доиндустриальный и последний ледниковый периоды истории Земли получены функции зависимости радиационно-равновесной температуры глобального потепления от накопленной в атмосфере концентрации антропогенных выбросов парниковых газов. Определена объемная концентрация 850 ppm-eq (млн^{-1}), соответствующая состоянию насыщения атмосферы антропогенными парниковыми газами. Эта концентрация определяет максимально возможную радиационно-равновесную температуру $8,7^\circ\text{C}$ глобального потепления, которая может быть обеспечена на Земле антропогенным парниковым эффектом. Дается определение парникового эффекта как потока тепловой энергии определенной мощности, перехваченного содержащимися в атмосфере парниковыми газами.

Ключевые слова: глобальное потепление, парниковые газы, чувствительность климатической системы, антропогенный парниковый эффект, радиационно-равновесная температура

В XXI веке климатологи всего мира пришли к заключению, что наблюдаемое глобальное изменение климата – это следствие роста содержания антропогенных парниковых газов (ПГ) в атмосфере. Содержание основных антропогенных ПГ в атмосфере (CO_2 , CH_4 , N_2O) приводится в единицах объемной концентрации K (млн^{-1}), эквивалентных потенциалу

Original article

SOLUTION TO ARRHENIUS'S PROBLEM
OF THE EARTH SYSTEM SENSITIVITY
TO EMISSIONS OF ANTHROPOGENIC
GREENHOUSE GASES

V.V. TETELMIN

INSTITUTE OF ECOLOGY OF RUDN
UNIVERSITY NAMED AFTER PATRICE
LUMUMBA, MOSCOW, RUSSIAN FEDERATION

The problem formulated by the Swedish chemist Arrhenius at the end of the 19th century to determine the Earth system sensitivity to greenhouse gas emissions, including a doubling of the atmospheric carbon dioxide content, has been solved. Based on the analysis of the thermodynamic parameters of the climatic system in the preindustrial and last glacial periods of the Earth's history, the functions of the radiation-equilibrium temperature dependence of global warming on the concentration of anthropogenic greenhouse gas emissions accumulated in the atmosphere are obtained. The volume concentration of 850 ppm-eq (млн^{-1}) corresponding to the state of the atmosphere saturation with anthropogenic greenhouse gases is determined. This concentration determines the maximum possible radiation-equilibrium temperature of $8,7^\circ\text{C}$ of global warming, which can be ensured on Earth by the anthropogenic greenhouse effect.

A definition of the greenhouse effect is given as a flow of thermal energy of a certain power intercepted by greenhouse gases contained in the atmosphere.

KEYWORDS: global warming, greenhouse gases, climatic system sensitivity, anthropogenic greenhouse effect, radiative equilibrium temperature

GWP глобального потепления диоксида углерода CO_2 (ppm-eq). За последние полтора века человечество за счет преимущественного использования ископаемого топлива произвело около $8,3 \cdot 10^{15}$ кВт·ч энергии, в результате чего к 2020 г. в атмосфере накопилось около 182 ppm-eq антропогенных ПГ [9], содержание которых повысилось до значений: CO_2 – 416 ppm, CH_4 – 1,88 ppm, N_2O – 0,335 ppm (табл. 1). Сильные полосы поглощения фотонов водяным паром (1,35–1,45; 1,8–1,95; 5,5–7,5 мкм), диоксидом углерода (4,5–5,0; 14–18 мкм), метана (7,5–8,0 мкм) и закиси

ТАБЛИЦА 1.

Показатели роста выбросов и накопленной в атмосфере объемной концентрации антропогенных парниковых газов

Период, годы	CO ₂ ppm	CH ₄ ppm-eq	N ₂ O ppm-eq	Суммарное значение, ppm-eq
1990–2000	14,28	1,75	1,86	17,89
2000–2010	20,0	0,7	2,07	22,77
2010–2020	24,75	1,96	2,6	29,54
1850–2020	132	33	17	182

азота (3,0–5,0; 7,5–9,0 мкм) обеспечивают непрозрачность атмосферы на этих длинах волн. Попавшие в атмосферу молекулы антропогенных ПГ начинают работать на потепление климата в соответствии с законами молекулярной физики, поглощая отраженное земной поверхностью излучение в дальнем инфракрасном диапазоне электромагнитных волн (3,0–70 мкм).

При климатическом прогнозировании важно знать предельное значение максимальной радиационно-равновесной температуры Т_{МАХ}, к которой стремится глобальное потепление при фиксированном содержании антропогенных парниковых газов К в атмосфере. Основу для развития количественной модели по определению влияния парниковых газов на глобальное изменение климата заложил нобелевский лауреат шведский химик Сванте Аррениус [12]. В конце XIX века Аррениус подсчитал, что повышение содержания CO₂ в атмосфере в два раза должно привести за счет увеличения радиационного эффекта к росту средней глобальной температуры до 6 °С. Другой нобелевский лауреат Сукуро Манабе с учетом общей циркуляции атмосферы дал другой ответ на эту задачу – по его мнению удвоение концентрации CO₂ приведет к глобальному потеплению в приповерхностном слое атмосферы примерно на 2 °С [13]. Согласно современным оценкам, полученным с помощью сложных климатических моделей, удвоение содержания CO₂ в атмосфере увеличит глобальную температуру приземного слоя атмосферы на 2–4,5 °С [5, 6, 14].

Подобный разброс оценок влияния антропогенных выбросов ПГ на климатическое будущее цивилизации не может удовлетворить научную общественность. По этой причине в «Федеральной научно-технической программе в области экологического развития РФ и климатических изменений на 2021–2030 гг.» (ФНТП) в ряду фундаментальных задач исследований поставлена следующая: уточнение оценок чувствительности климатической системы (КС) Земли к антропогенным выбросам парниковых газов для определения экономически оправданных возможностей их сокращения.

Основными источниками информации о происходящих в КС Земли процессах являются Оценочные доклады Межправительственной группы экспертов ООН (МГЭИК) по изменению климата [4, 14]. В названных источниках разброс оценок при опреде-

лении концентрации ПГ в атмосфере не превышает ±3%, погрешность в определении глобального тренда температуры составляет ±20%, а разброс оценок накопленной КС Земли парниковой тепловой энергии в пределах ± 30%. В табл. 2 приводятся систематизированные показатели происходивших до 2020 г. изменений в КС Земли. Эти натурные данные являются результатом действия всех энергетических потоков на Земле, включая действие положительных и отрицательных климатических обратных связей. К 2020 г. текущее значение средней глобальной температуры приземного слоя атмосферы увеличилось примерно на 1,2 °С. Такого быстрого темпа роста средней земной температуры не наблюдалось никогда.

Сила воздействия единицы содержания парниковых газов на глобальное потепление зависит от их концентрации К (ppm-eq) в атмосфере. По мере насыщения атмосферы парниковыми газами радиационная эффективность единицы их содержания в атмосфере снижается [5, 6, 11]. Например, поступившая в атмосферу дополнительная масса диоксида углерода будет поглощать только ту часть длинноволнового излучения земной поверхности, которая не была поглощена уже присутствующим в атмосфере этим газом. Добавление новых порций CO₂ оказывает меньшее воздействие на потепление, потому что им приходится конкурировать с ранее поступившим в атмосферу газом за излучение в диапазонах длин волн 4–4,4 мкм и 14–19 мкм. По этой причине удвоение содержания CO₂ в атмосфере не увеличит вдвое поглощение ИК-излучения.

Атмосфера со своей теплоемкостью и парниковыми газами препятствует идеальному радиационному теплообмену в системе «Космос-Земля-Космос». Совокупный спектр поглощения содержащихся в атмосфере антропогенных ПГ формирует в дальнем ИК-диапазоне электромагнитных волн соответствующую единичную мощность (интенсивность) потенциала радиационного усиления J_R Вт/м² [10]. Каждому значению концентрации К (ppm-eq) содержащихся в атмосфере ПГ соответствует свое значение потенциала радиационного усиления J_R и определенное значение максимальной радиационно-равновесной температуры глобального потепления Т_{МАХ} °С приземного слоя атмосферы. Функциональная зависимость между

ТАБЛИЦА 2.

Примерные показатели происходивших до 2020 г. изменений в климатической системе Земли, вызванных антропогенными выбросами парниковых газов

Годы	Содержание парниковых газов, К ppm-eq	Интенсивность поглощения тепла КС Земли $Q_0 \times 10^{15}$ кВт·ч/10 лет	Накопленная энергия в КС Земли, $Q_{КС} \times 10^{15}$ кВт·ч	Рост средней глобальной температуры, °С
1910	24,0	10,0	15,0	0,12
1930	34,3	11,5	37,0	0,18
1950	44,6	12,5	61,5	0,24
1970	70,0	13,8	88,0	0,30
1980	90,0	16,6	101,8	0,48
1990	112	22,6	121,1	0,66
2000	132	28,2	145,7	0,84
2010	155	34,5	176,7	1,02
2020	182	42,0	215,0	1,20

этим двумя физическими величинами определяется уравнением Стефана-Больцмана [2]:

$$(150 + J_R) + S(1 - a)/4 = \sigma \times (288 + T_{MAX})^4 \text{ Вт/м}^2, (1)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$ – постоянная Стефана; $S = 1368 \text{ Вт/м}^2$ – современное значение Солнечной постоянной; $a = 0,3$ – среднее значение глобального альбедо; 150 Вт/м^2 – потенциал радиационного усиления, сформированный всеми ПГ в доиндустриальную эпоху; 288 К – средняя температура приповерхностного слоя атмосферы по шкале Кельвина в доиндустриальную эпоху.

В понимании С. Аррениуса чувствительность КС Земли к воздействию антропогенных ПГ характеризуется значением максимальной радиационно-равновесной температуры T_{MAX} глобального потепления, соответствующей тому или иному значению концентрации K (ppm-eq) ПГ в атмосфере. Для определения температуры T_{MAX} строятся математические модели, которые учитывают соотношение между физическими, химическими и биологическими процессами, происходящими в климатической системе Земли, включающими динамические процессы атмосферной и океанической циркуляции. Полученные решения дают большой разброс результатов. Например, из опубликованных в докладе МГЭИК ОД-4 результатов расчетов семи климатических сценариев следует, что при концентрации антропогенных ПГ в атмосфере на уровне 550 ppm-eq оценка соответствующей глобальной температуры T_{MAX} составляет от 2 до 4,5°С, а при $K = 800 \text{ ppm-eq}$ – от 3 до 7°С [6].

Поставленную Аррениусом задачу о «температурной чувствительности» земной системы можно решить, используя полученные в последние десятилетия данные о параметрах климатической системы Земли в

последний ледниковый период [3]. Изменение средней глобальной температуры на Земле, происходит в первую очередь за счет изменения солнечной постоянной S , которая в настоящее время равна 1368 Вт/м^2 . Из трех известных циклов Миланковича [2] периодически происходящие на Земле ледниковые периоды обеспечиваются только одним циклом – изменением эксцентриситета $\varepsilon = c/a$ эллиптической орбиты Земли, где c – половина фокусного расстояния, a – большая полуось эллиптической орбиты.

Началу последнего ледникового периода послужила существенная корректировка орбиты Земли гравитационным воздействием планет Солнечной системы, увеличившая примерно 130 тыс. лет назад эксцентриситет орбиты от значения 0,017 до значения 0,042. Изменение эксцентриситета орбиты Земли снизило интенсивность лучистой энергии на внешней границе земной атмосферы, в результате летний приход Солнечной радиации на широте 65° северной широты уменьшился на 40 Вт/м^2 по сравнению с современным периодом, что на 100 тыс. лет ввергло планету в ледниковый период. В этот длительный период температура изменялась в диапазоне 5,8–16,4°С, концентрация CO_2 в диапазоне 190–290 ppm, CH_4 в диапазоне 0,35–0,70 ppm, N_2O в диапазоне 0,20–0,27 ppm. При этом независимо от того, что было первичным – изменение температуры, вслед за которым изменялась концентрация ПГ в атмосфере, или наоборот, осредненные значения названных величин изменялись согласованно.

После возвращения эксцентриситета орбиты и Солнечной постоянной к современным значениям, соответственно, 0,017 и 1368 Вт/м^2 планета Земля в период своей истории от 20 до 8 тыс. лет назад медленно выходила из ледникового периода к современному межледниковому состоянию. Можно принять, что по

причине малой скорости этого процесса КС Земли на протяжении всей фазы выхода из состояния ледникового периода, длившейся около 12 тыс. лет, проходила через ряд квазистационарных термодинамических состояний. В таком случае на каждый момент времени соотношение средней глобальной температуры T_{MAX} и средней концентрации K парниковых газов в атмосфере примерно отвечало состоянию радиационного баланса КС Земли. Подобный подход к анализу финальной части палеопериода позволяет получить значения предельных отношений $P_K = T_{\text{MAX}}/K$ (град./ppm-eq) для трех отмеченных точек на графике рис. 1.

Функции зависимости предельного значения «нагревательного» потенциала единицы объемной концентрации $P_K = T_{\text{MAX}}/K$ от содержащихся в атмосфере ПГ можно получить, используя свойство тесной корреляции между концентрацией ПГ в палеоатмосфере Земли и соответствующей глобальной радиационно-равновесной температурой в последней фазе ледникового периода (рис. 1). В табл. 3 приводятся фактические значения концентрации K парниковых газов в палеоатмосфере и соответствующие значения температуры T_{MAX} для трех моментов времени, рассчитанные на основе данных графиков рис. 1.

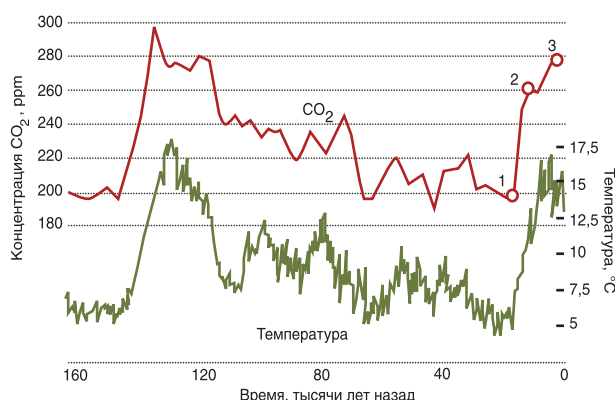


РИС. 1.

Ход изменения глобальной температуры и концентрации диоксида углерода в атмосфере за последние 160 тыс. лет и три расчетные точки [3]

ТАБЛИЦА 3.

Натурные данные радиационно-равновесной температуры атмосферы T_{MAX} для трех квазистационарных состояний климатической системы Земли в последней фазе (20–8 тыс. лет назад) ледникового периода при трех значениях концентрации основных (CO_2 , CH_4 , N_2O) парниковых газов в атмосфере

Период, тыс. лет назад	Концентрация CO_2 К ppm	Концентрация трех ПГ К ppm-eq	Нагрев атмосферы всеми ПГ, град	Доля нагрева тремя ПГ, град	Доля нагрева одним CO_2 , град
20–18	193	261	24,8	7,0	5,35
14–12	262	346	32,0	8,8	6,90
8–0	280	370	33,4	9,4	7,20

Примерное постоянство содержания ПГ в атмосфере на протяжении последних восьми тысяч лет современного межледникового периода обеспечивало квазистационарное состояние климатической системы Земли. Эта особенность позволяет получить первую искомую точку графика функции $P_K = f(K)$ град./ppm-eq. В доиндустриальный период средняя концентрация каждого из трех основных ПГ в атмосфере составляла CO_2 – 280 ppm, CH_4 – 0,7 ppm, N_2O – 0,27 ppm. В переводе на единицы, эквивалентные потенциалу глобального потепления диоксида углерода GWP, общая доиндустриальная объемная концентрация этих ПГ составляла 370 ppm-eq. Известно, что в доиндустриальном периоде доля основных ПГ (CO_2 , CH_4 и N_2O) в общем увеличении глобальной температуры на Земле составляла 9,4°С из 33,4°С [1]. Отсюда находим свойственный для этого периода потенциал нагревания содержащихся в атмосфере ПГ в единицах объемной концентрации $P_K = T_{\text{MAX}}/K = 9,4^\circ\text{C}/370 \text{ ppm-eq} = 25,4 \times 10^{-3} \text{ град./ppm-eq}$.

На рис. 2 приводятся графики зависимости «нагревательного потенциала» единицы объема отдельно диоксида углерода и смеси трех парниковых газов $P_K = T_{\text{MAX}}/K$ в зависимости от их общего содержания

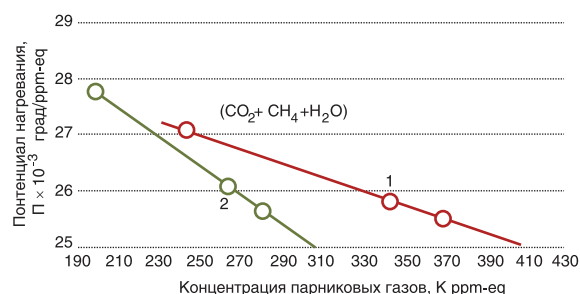


РИС. 2.

Зависимость потенциала нагревания парниковых газов от их общего объемного содержания в атмосфере: 1 – для смеси трех парниковых газов; 2 – для диоксида углерода в составе смеси парниковых газов

в атмосфере. Графики имеют вид падающих прямых линий. Для смеси трех ПГ график 1 описывается следующей линейной функцией:

$$T_{\text{MAX}}/K = 29,8 \cdot 10^{-3} - 12,3 \cdot 10^{-6} \cdot K \text{ (град/ррм-eq)}, (2)$$

где K (ррм-eq) – общая концентрация трех ПГ в атмосфере.

Из выражения (2) получается функция зависимости радиационно-равновесной температуры глобального потепления (чувствительности земной системы) от общей концентрации K содержащихся в атмосфере трех основных (CO_2 , CH_4 и N_2O) парниковых газов:

$$T_{\text{MAX}} = (29,8 \cdot 10^{-3} \cdot K - 12,3 \cdot 10^{-6} \cdot K^2 - 9,4)^\circ \text{C}, (3)$$

где $T_{\text{MAX}}^\circ \text{C}$ – температура глобального потепления приземного слоя атмосферы (чувствительность) от действия антропогенного парникового эффекта; K ррм-eq – **общая объемная концентрация содержащихся** в атмосфере трех основных парниковых газов, изменяющаяся в пределах ($370 \leq K \leq 1220$) ррм-eq.

Радиационно-равновесная температура T_{MAX} , к которой через продолжительное время приходит содержащая парниковые газы земная атмосфера, определяется нелинейным уравнением параболического типа. Исследуя функцию (3) на экстремум, получаем максимальное значение $K = 1210$ ррм-eq общей концентрации трех основных ПГ, при которой наступит «парниковое насыщение» атмосферы. Этому значению общей концентрации соответствует температура максимально возможного антропогенного потепления $T_{\text{MAX}} = 8,7^\circ \text{C}$ от действия антропогенного парникового эффекта в современных условиях межледникового периода.

Зависимость между общей концентрацией K трех основных парниковых газов в атмосфере и концентрацией K_A антропогенных выбросов этих газов следующая: $K = (K_A + 370)$ ррм-eq. Подставляя это выражение в (3), получаем функцию зависимости радиационно-равновесной температуры глобального потепления T_{MAX} (чувствительности земной системы) от концентрации содержащихся в атмосфере выбросов антропогенных парниковых газов [9]:

$$T_{\text{MAX}} = 20,9 \times 10^{-3} \times K - 12,3 \times 10^{-6} \times K^2 (^\circ \text{C}), (4)$$

где K ррм-eq – **объемная концентрация содержащихся** в атмосфере антропогенных выбросов парниковых газов, изменяющаяся в пределах ($0 \leq K \leq 850$) ррм-eq; коэффициент первого слагаемого имеет размерность $20,9 \cdot 10^{-3}$ (град/ррм-eq); коэффициент второго слагаемого имеет размерность $12,3 \cdot 10^{-6}$ град/(ррм-eq)².

Функции (3) и (4) определяют радиационно-равновесную температуру $T_{\text{MAX}}^\circ \text{C}$ глобального потепления по шкале Цельсия, формируемую парнико-

вым эффектом. Отсчет температуры в этих функциях ведется от значения температуры 288K ($+15^\circ \text{C}$), соответствующей средней глобальной температуре в доиндустриальный период.

Исследуя функцию (4) на экстремум, получаем максимальное значение концентрации содержащихся в атмосфере антропогенных парниковых газов $K = 850$ ррм-eq, при которой наступает «парниковое насыщение» атмосферы. Этому значению концентрации соответствует максимальная радиационно-равновесная температура глобального потепления $T_{\text{MAX}} = 8,7^\circ \text{C}$, которая может быть обеспечена антропогенными выбросами в атмосферу парниковых газов. С использованием функций (3) и (4) находим, что в 2020 г. при содержании в атмосфере антропогенных ПГ в количестве 182 ррм-eq (табл. 1) их «нагревательный потенциал» был использован на 71%.

Полученные функции определяют зависимость радиационно-равновесной температуры глобального потепления $T_{\text{MAX}}^\circ \text{C}$ от общей концентрации (3) содержащихся в атмосфере трех парниковых газов и от концентрации антропогенных выбросов (4) парниковых газов. Эти же функции определяют «чувствительность» реакции климатической системы Земли на выбросы антропогенных парниковых газов, как её понимал С. Аррениус [12].

На рис. 3 приводится единый график функций (3) и (4) в двух системах отсчета: в системе отсчета общей концентрации трех ПГ в атмосфере и в системе антропогенной концентрации этих газов. Точка начала антропогенной системы отсчета имеет координаты 370 ррм-eq и $9,4^\circ \text{C}$, соответствующие состоянию КС Земли в начале индустриального периода. О справедливости предлагаемых функций свидетельствует принципиальное совпадение их графика с графиком Д. Сильвера [6], который свел воедино результаты математического моделирования семи климатических

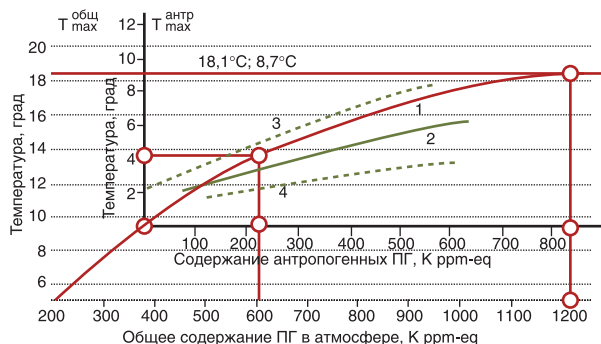


РИС. 3.

Совмещенный график 1 функций зависимости максимального глобального потепления (3) и (4) от содержания в атмосфере парниковых газов: 2 – точка парникового насыщения атмосферы; 3 и 4 – полученные моделированием верхний и нижний пределы оценки T_{MAX}

сценариев, приведенных в докладе МГЭИК ОД-4. График функций (3) и (4) укладывается в диапазон оценок чувствительности реакции КС Земли на изменение концентрации ПГ в атмосфере, полученный математическим моделированием семи климатических сценариев (рис. 3).

В справедливости полученных функций можно также убедиться, обратившись к уравнению Стефана-Больцмана (1). Земля отражает получаемую солнечную радиацию в виде длинноволнового теплового излучения мощностью 240 Вт/м^2 , из которых около 40 Вт/м^2 свободно проходят через «окно прозрачности» атмосферы в пределах длин волн от $7,5$ до 13 мкм [3]. Из оставшейся мощности излучения 200 Вт/м^2 около 150 Вт/м^2 было перехвачено содержащимися в атмосфере всеми ПГ еще в доиндустриальный период. Таким образом, в современных условиях на долю антропогенных ПГ остается ресурс около 50 Вт/м^2 по перехвату мощности отражаемой земной поверхностью радиации. Подстановка этого значения «свободной» мощности в уравнение Стефана-Больцмана (1) дает максимальную температуру глобального потепления около $T_{\text{MAX}} = 8,7^\circ \text{C}$, которую могут обеспечить антропогенные ПГ. Этот результат совпадает с экстремумом функций (3) и (4), что также подтверждает их справедливость.

Наконец, в достоверности полученных функций можно убедиться, используя данные радиационного баланса Земли в 2009 г., приведенные в работе К. Тренберта [15], в которой приводится количественная характеристика потенциала радиационного усиления $J_R = 17 \text{ Вт/м}^2$, присутствовавшего в атмосфере в виде «явного тепла». Из табл. 2 находим, что в 2009 г. концентрация антропогенных ПГ в атмосфере составляла 152 ppm-eq . Из функции (4) находим соответствующую этой концентрации радиационно-равновесную температуру $T_{\text{MAX}} = 2,86^\circ \text{C}$. Подстановкой этой температуры в уравнение Стефана-Больцмана (1) получаем значение «явного тепла» $J_R = 17 \text{ Вт/м}^2$, совпадающего с приведенным Тренбертом значением в числе составляющих радиационного баланса Земли в 2009 г. Этот расчет является третьим подтверждением справедливости «функций чувствительности» (3) и (4) к антропогенным выбросам парниковых газов.

Из функции (4) следует практически важный вывод: чтобы ограничить рост средней глобальной температуры значением $+2^\circ \text{C}$, которую назначает Парижское соглашение, человечество должно было полностью прекратить выбросы ПГ в 1990 г., когда их концентрация в атмосфере составляла около 100 ppm-eq [8]. Этот результат подтверждает справедливость формулировки п. 17 Климатической доктрины РФ, в котором также отмечается, что «удержать рост глобальной температуры ниже $+2^\circ \text{C}$ по сравнению с 1900 г. не удастся». Действительно, в настоящее время при намного большем содержании в атмосфере

антропогенных ПГ (около 190 ppm-eq) ставить перед человечеством такую цель бессмысленно и антинаучно.

Из графика 2 рис. 2 аналогичным образом выводится функция вклада антропогенных выбросов диоксида углерода CO_2 в обеспечение радиационно-равновесной температуры глобального потепления [9]:

$$T_{\text{MAX}} = 19,2 \times 10^{-3} \times K - 23,1 \times 10^{-6} \times K^2 (^\circ \text{C}), \quad (5)$$

где $0 \leq K \leq 416 \text{ ppm-eq}$ – **объемная концентрация антропогенных выбросов CO_2 в составе трех ПГ в атмосфере.**

Из выражения (5) получаем максимально возможный вклад в глобальное потепление выбросов антропогенного диоксида углерода: $T_{\text{MAX}} = 4^\circ \text{C}$ при $K = 416 \text{ ppm-eq}$. На рис. 4 приводятся графики квадратичных функций (4) и (5), которые определяют чувствительность климата в том смысле, в котором её понимал С. Аррениус [12]. Например, в 2020 г. в атмосфере содержалось 182 ppm-eq антропогенных парниковых газов, из которых на долю диоксида углерода CO_2 приходилось 135 ppm . Из «уравнений чувствительности» климатической системы Земли (4) и (5) и графиков рис. 4 следует, что присутствовавшая в 2020 г. в атмосфере смесь трех парниковых газов обеспечила бы в будущем глобальное потепление КС Земли до радиационно-равновесной температуры $T_{\text{MAX}} = 3,4^\circ \text{C}$, из которой на долю вклада диоксида углерода CO_2 приходилось бы $2,2^\circ \text{C}$. В 2020 г. общий «нагревательный потенциал» этого парникового газа с учетом его доиндустриального содержания в атмосфере был использован на 84%. Оставшийся нереализованный нагревательный потенциал диоксида углерода около $1,8^\circ \text{C}$ будет полностью реализован тогда, когда в атмосферу будет дополнительно выброшено около 280 ppm этого парникового газа.

Из функции (5) находится решение канонической задачи Аррениуса: при увеличении концентрации диоксида углерода CO_2 в атмосфере относительно естественного доиндустриального уровня на 280 ppm-eq (то есть в два раза) радиационно-равновесная температура глобального потепления приземного слоя атмосферы увеличится примерно на $3,6^\circ \text{C}$. Это решение является средним между решениями Аррениуса $5-6^\circ \text{C}$ [12] и Манабе 2°C [13], а также укладывается в диапазон оценок в докладе МГЭИК ОД-4, систематизированных в монографии [6].

Полученные функции подтверждают известную закономерность, что по мере насыщения атмосферы парниковыми газами радиационная эффективность единицы их содержания в атмосфере снижается [5]. Например, из (4) следует, что при концентрации $K = 200 \text{ ppm-eq}$ выброс в атмосферу 1 ppm-eq увеличивает радиационно-равновесную температуру T_{MAX} на $0,016^\circ \text{C}$. Это означает, что при

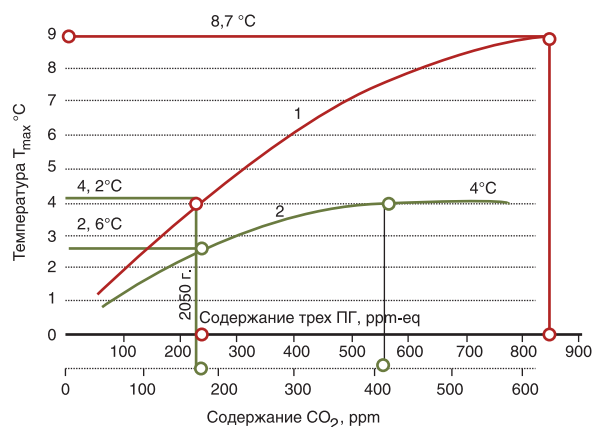


РИС. 4.

Графики зависимости максимальной температуры приземного слоя атмосферы от объемной концентрации антропогенных выбросов парниковых газов: 1 — для смеси трех основных парниковых газов; 2 — для диоксида углерода в составе смеси трех парниковых газов

$K = 200$ ppm-eq радиационная эффективность парниковых газов (чувствительность КС Земли к выбросам ПГ), представляющая собой производную $dT_{\max}/dK$, равна $0,016^\circ\text{C}/\text{ppm-eq}$. Соответственно, из (4) получаем: при увеличении концентрации до значения $K = 400$ ppm-eq радиационная эффективность (чувствительность КС Земли) снижается до $dT_{\max}/dK = 0,011^\circ\text{C}/\text{ppm-eq}$; при $K = 600$ ppm-eq радиационная эффективность (чувствительность КС Земли) снижается до $0,006^\circ\text{C}/\text{ppm-eq}$. При концентрации близкой к состоянию насыщения атмосферы парниковыми газами $K = 800$ ppm-eq радиационная эффективность новых порций выбросов (чувствительность КС Земли) закономерно приближается к нулевому значению $dT_{\max}/dK = 0,001^\circ\text{C}/\text{ppm-eq}$.

Полученные параболические функции представляют собой аналитические решения задачи С. Аррениуса о чувствительности реакции климатической системы Земли на выбросы в атмосферу антропогенных парниковых газов, которую он сформулировал в конце XIX века. Предлагаемые функции зависимости радиационно-равновесной температуры глобального потепления от антропогенных выбросов ПГ исключают неопределенность оценок чувствительности КС Земли, и делает более достоверными прогнозные расчеты параметров климатического будущего цивилизации. Задачу С. Аррениуса по снижению неопределенности оценок чувствительности КС Земли на выбросы антропогенных ПГ, обозначенную в действующей до 2030 г. Федеральной научно-технической программе в области экологического развития РФ и климатических изменений как одно из фундаментальных направлений исследований, можно считать решенной.

«Функцию чувствительности КС Земли» (4) можно использовать совместно с уравнением Стефана-

Больцмана (1) для нахождения потенциала радиационного усиления J_R , который является энергетическим эквивалентом антропогенного парникового эффекта [11]. На рис. 5 приводятся графики зависимости максимальной температуры глобального потепления $T_{\max}$ и потенциала радиационного усиления J_R от концентрации K антропогенных ПГ в атмосфере, построенные с помощью функции (4) и функции (1). Присутствующий в атмосфере в виде явного тепла потенциал радиационного усиления J_R ($\text{Вт}/\text{м}^2$) является основным фактором, определяющим и характеризующим энергетику антропогенного парникового эффекта (рис. 5А). Потенциал радиационного усиления J_R присутствует в атмосфере в виде явного тепла, которое постепенно нагревает все составляющие КС Земли и увеличивает среднюю глобальную приземную температуру до значения $T_{\max}$, соответствующего радиационно-равновесному состоянию Земли.

В связи со сказанным парниковому эффекту можно дать следующее «энергетическое» определение. Парниковый эффект — это поток перехваченной парниковыми газами и остающейся в атмосфере в виде явного тепла части J_R ($\text{Вт}/\text{м}^2$) мощности теплового излучения Земли. В соответствии с данным определение парниковый эффект как физическое явление имеет энергетическое наполнение и соответствующую размерность единичной мощности (интенсивности). Величина парникового эффекта — это потенциал мощности радиационного усиления J_R ($\text{Вт}/\text{м}^2$, значение которого при известной концентрации антропогенных ПГ в атмосфере определяется с помощью уравнения Стефана-Больцмана (1) и функции «температурной чувствительности» (4).

Точка 1 рис. 5 соответствует потенциалу радиационного усиления (единичной мощности парникового эффекта) $J_R = 19,5 \text{ Вт}/\text{м}^2$ и температуре $T_{\max} = 3,4^\circ\text{C}$, которые соответствуют значению концентрации антропогенных ПГ в атмосфере в 2020 г. Точка 2 определяет соответствующие параметры $J_R = 32,5 \text{ Вт}/\text{м}^2$ и $T_{\max} = 5,8^\circ\text{C}$ при концентрации антропогенных ПГ в атмосфере $K = 350$ ppm-eq, которая установится в 2100 г. при умеренном сценарии декарбонизации с темпом снижения выбросов ПГ $\Delta K = 2 \text{ ppm-eq}/10 \text{ лет}$ [10]. Точка 3 соответствует максимально возможному проявлению антропогенного парникового эффекта на Земле в состоянии насыщения атмосферы антропогенными ПГ при концентрации $K = 850$ ppm-eq и температуре $T_{\max} = 8,7^\circ\text{C}$.

На рис. 6 приводятся графики синхронного роста концентрации 1 антропогенных ПГ в атмосфере до 2100 г. и соответствующего роста радиационно-равновесной температуры 2 для умеренного сценария декарбонизации мировой энергетики. При достижении в 2100 г. углеродной нейтральности при $K = 350$ ppm-eq процесс глобального потепления будет продолжаться не менее 200 лет. В течение этого

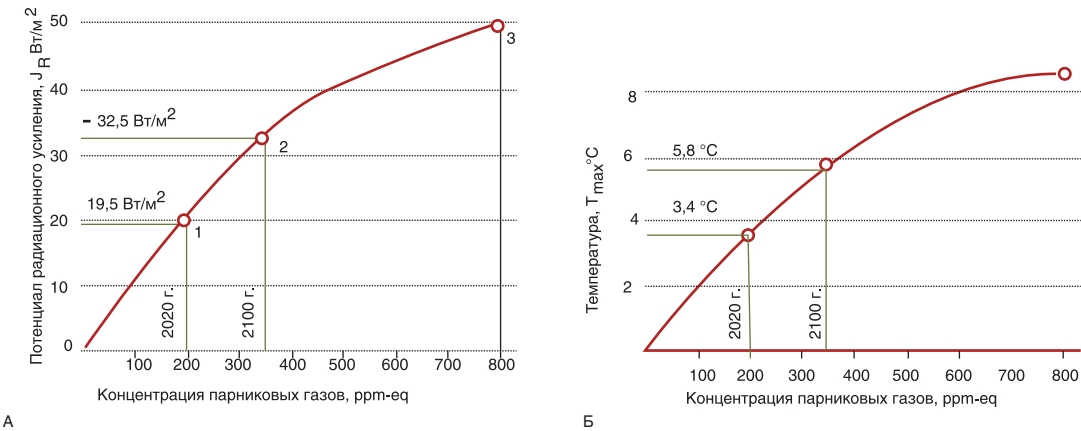


Рис. 5. Графики зависимости потенциала радиационного усиления J_R (А) и максимальной температуры глобального потепления T_{max} (Б) от концентрации антропогенных ПГ в атмосфере

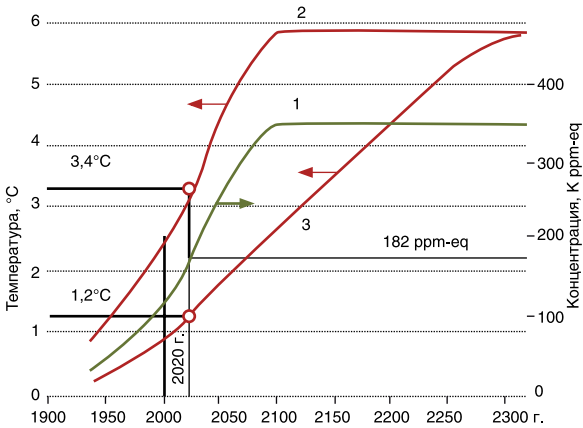


Рис. 6. Расчетные графики изменения параметров КС Земли при умеренном сценарии декарбонизации: 1 – рост концентрации антропогенных ПГ в атмосфере; 2 – соответствующий рост радиационно-равновесной температуры глобального потепления; 3 – рост средней глобальной температуры при-земного слоя атмосферы до достижения климатической системой Земли радиационно-равновесного состояния [10]

времени текущее значение средней глобальной температуры будет увеличиваться и достигнет максимально-го радиационно-равновесного значения $T_{max} = 5,8^{\circ}C$ примерно в 2320 г.

В табл. 4 приводятся расчетные данные о средней чувствительности энергетических параметров парникового эффекта к изменению концентрации антропогенных ПГ в атмосфере в пределах изменения концентрации антропогенных ПГ от современного значения 200 ppm-eq до 350 ppm-eq в 2100 г. при умеренном сценарии декарбонизации энергетики [11]. Например, в рассматриваемом диапазоне концентраций среднее значение «температурной чувствительности» климатической системы Земли к выбросам антропогенных ПГ определяется производной функции (4) и равно $dT_{max}/dK = 0,015$ град/ppm-eq. Увеличение мощности парникового эффекта от роста выбросов антропогенных ПГ можно представить в виде эквивалента уменьшения расстояния от Земли до Солнца. Эмиссия в атмосферу одной порции антропогенных

ТАБЛИЦА 4.

Чувствительность энергетических параметров парникового эффекта к изменению концентрации антропогенных парниковых газов в XXI веке при умеренном сценарии декарбонизации энергетики [11]

Энергетический параметр парникового эффекта	Среднее значение параметра в период 2020–2030 гг. ($K = 200$ ppm-eq)	Чувствительность параметра, $\Delta/ppm-eq$
Потенциал радиационного усиления (явное тепло), J_R	20,8 Вт/м ²	+0,08 (Вт/м ² .ppm-eq)
Температура максимального глобального потепления, T_{max}	3,7 $^{\circ}C$	+0,015 ($^{\circ}C/ppm-eq$)
Интенсивность накопления тепловой энергии всей земной поверхностью, ΔQ	47,2·10 ¹⁵ кВт·ч/10 лет	+0,276·10 ¹⁵ (кВт·ч/10 лет.ppm-eq)
Нетто-поглощение тепловой энергии Землей, I_0	1,05 Вт/м ²	+0,006 (Вт/м ² .ppm-eq)
Эквивалент уменьшения расстояния от Земли до Солнца за счет усиления парникового эффекта	2,1 млн км	11·10 ³ (км/ppm-eq)

ПГ в количестве 1 ppm-eq увеличивает среднее значение потенциала радиационного усиления в XXI веке примерно на $0,08 \text{ Вт/м}^2$, что по кумулятивному тепловому воздействию на планету эквивалентно приближению Земли к Солнцу на 11 тыс. км. Человек, выбрасывая в атмосферу миллиарды тонн ПГ и трансформируя энергетические потоки в КС Земли, совершает действия поистине космического масштаба.

ВЫВОДЫ

Получено аналитическое решение задачи, сформулированной в конце XIX века нобелевским лауреатом Сванте Аррениусом, о количественной оценке чувствительности земной системы к антропогенным выбросам парниковых газов. Для термодинамических условий современного межледникового периода предложены не имеющие аналогов функции зависимости чувствительности радиационно-равновесной температуры T_{MAX} глобального потепления от концентрации К антропогенных парниковых газов в атмосфере.

Предлагаемое решение задачи Аррениуса снижает неопределенность оценок чувствительности климатической системы Земли к выбросам парниковых газов и делает более достоверными прогнозные расчеты параметров климатического будущего цивилизации.

Формируемый антропогенный парниковый эффект характеризуется единичной мощностью (интенсивностью) J_R (Вт/м^2) перехваченного парниковыми газами потока теплового излучения Земли, который присутствует в атмосфере в виде явного тепла и увеличивает глобальную приземную температуру до значения T_{MAX} , соответствующего радиационно-равновесному состоянию системы «Земля–Космос».

Полученное эмпирическое решение «температурной чувствительности» (4) свидетельствует о том, что при накопленной в атмосфере концентрации антропогенных парниковых газов $K = 850 \text{ ppm-eq}$ наступит состояние «парникового насыщения» атмосферы, при котором радиационно-равновесная температура глобального потепления достигнет своего максимального возможного значения $T_{\text{MAX}} = 8,7^\circ\text{C}$, после чего климатическая система Земли не будет откликаться повышением температуры на дальнейшие выбросы парниковых газов.

Парниковый эффект, формируемый тремя основными антропогенными парниковыми газами (CO_2 , CH_4 , N_2O), не может повысить среднюю глобальную температуру приземного слоя атмосферы более чем на $8,7^\circ\text{C}$ сверх доиндустриального уровня $+15^\circ\text{C}$ (288K). Человечеству следует готовиться к возможному установлению на Земле в будущем именно такой максимальной температуры глобального потепления и предпринимать соответствующие необходимые адаптивные действия.

При умеренном темпе декарбонизации мировой экономики на протяжении всего XXI века до-

бавление в атмосферу одной миллионной объемной доли (1 ppm-eq) антропогенных парниковых газов будет увеличивать единичную мощность потенциала радиационного усиления J_R (интенсивность парникового эффекта) примерно на $0,08 \text{ Вт/м}^2$, что по возрастанию получаемого планетой потока энергии эквивалентно приближению Земли к Солнцу примерно на 11 тыс. км/ppm-eq.

Намеченная Парижским Соглашением ограничительная цель по удержанию роста средней глобальной температуры ниже $+2^\circ\text{C}$ по сравнению с доиндустриальным периодом нереальна и не может быть обеспечена ни при каких обстоятельствах. Ограничительную температуру глобального потепления $+2^\circ\text{C}$ можно было удержать в долгосрочном плане при условии, если бы человечество обеспечило углеродную нейтральность в 1990 г., когда концентрация антропогенных парниковых газов в атмосфере не превышала 100 ppm-eq. Современная концентрация около 190 ppm-eq антропогенных парниковых газов в атмосфере способна гарантированно нагреть климатическую систему Земли до $3,5^\circ\text{C}$ по сравнению с доиндустриальным уровнем.

В 2020 г. сформированный антропогенными парниковыми газами потенциал парникового эффекта по повышению радиационно-равновесной температуры приземного слоя атмосферы был использован на 71%, а потенциал диоксида углерода CO_2 – на 84%. На оставшиеся 16% нереализованного вклада «нагревательного потенциала» диоксида углерода приходится около $1,8^\circ\text{C}$, из которой на долю выбросов от сжигания ископаемого топлива приходится примерно $1,4^\circ\text{C}$.

Человечеству следует выполнить сравнительный анализ и сопоставить высокую для современной цивилизации социально-экономическую цену осуществления сценария полного отказа от использования ископаемого топлива с тем эффектом, который будет получен в будущем от смягчения глобального потепления на $1,4^\circ\text{C}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. **БАЖИН Н.М.** Метан в окружающей среде. Новосибирск: СО РАН. 2010. 126 с.
2. **БРИНКМАН Э.** Физические проблемы экологии. М.: ИНТЕЛЛЕКТ. 2012. 288 с.
3. **ДЖИРАД ДЖ.** Основы химии окружающей среды. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2008. 640 с.
4. **ПАЧАУРИ Р., МЕЙЕР Л. и др.** МГЭИК. Изменение климата, Обобщенный доклад. Вклад рабочих групп I, II и III в пятый оценочный доклад МГЭИК. Женева: МГЭИК, 2014. С. 44.
5. **СЕМЕНОВ С.М.** Парниковый эффект: открытие, развитие, концепции, роль в формировании глобального климата и его антропогенных изменений. Фундаментальная и прикладная климатология. 2015. №2. С. 103–126.

6. СИЛВЕР ДЖ. Глобальное потепление без тайн. М.: Эксмо. 2009. 336 с.
7. ТЕТЕЛЬМИН В.В. Энергетический анализ особенностей глобального потепления и его последствий. Вестник Российской академии естественных наук. 2023. №3. Т. 23. С. 91–99.
8. ТЕТЕЛЬМИН В.В. Расчетное подтверждение недосягаемости климатических целей Парижского соглашения. Экология промышленного производства. 2024. №2. С. 58–63.
9. ТЕТЕЛЬМИН В.В. Энергетические особенности и пределы глобального потепления. Энергия: экономика, техника, экология. 2023. №3. С. 27–34.
10. ТЕТЕЛЬМИН В.В. Расчетные функции обогревающего воздействия антропогенного парникового эффекта // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2024. №4. С. 23–31.
11. ТЕТЕЛЬМИН В.В. Физика антропогенного парникового эффекта и глобальное потепление в XXI веке при умеренном сценарии декарбонизации мировой энергетики. Использование и охрана природных ресурсов в России. 2025. №1. С. 31–41.
12. ARRHENIUS S. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1896. 41. P. 237–276.
13. MANABE S., WETHERALD R.T. The effects of doubling of the CO₂ concentration on the climate of a general circulation model. Journal of the Atmospheric Science, Vol. 32. N 1. P. 3–15.
14. Technical Summary. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. P. 33–144.
15. TRENBERTH K.E., FASULLO J.T., KIEHL J. Earth's global energy budget. Bulletin of American Meteorological Society, march 2009. P. 311–323.
6. SILVER J. Global warming without secrets. Moscow: Eksmo. 2009:336. (In Russian).
7. TETELMIN V.V. Energy analysis of the features of global warming and its consequences. Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences. 2023;23:91–99. (In Russian).
8. TETELMIN V.V. Calculated confirmation of the unattainability of the climate goals of the Paris Agreement. Ecology of industrial production. 2024;2: 58–63. (In Russian).
9. TETELMIN V.V. Energy features and limits of global warming. Energy: economics, technology, ecology. 2023;3:27–34. (In Russian).
10. TETELMIN V.V. Calculated functions of the heating effect of the anthropogenic greenhouse effect. *Ispol'zovaniye i okhrana prirodnnykh resursov v Rossii*. 2024;4:23–31. (In Russian).
11. TETELMIN V.V. Physics of the anthropogenic greenhouse effect and global warming in the 21st century under a moderate scenario of decarbonization of the world energy sector. *Ispol'zovaniye i okhrana prirodnnykh resursov v Rossii*. 2025;1:31–41. (In Russian).
12. ARRHENIUS S. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1896;41:237–276.
13. MANABE S., WETHERALD R.T. The effects of doubling of the CO₂ concentration on the climate of a general circulation model. *Journal of the Atmospheric Science*, 32;1:3–15.
14. Technical Summary. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 33–144.
15. TRENBERTH K.E., FASULLO J.T., KIEHL J. Earth's global energy budget. Bulletin of American Meteorological Society, March 2009:311–323.

REFERENCE

1. BAZHIN N.M. Methane in the environment. Novosibirsk: SB RAS. 2010:126. (In Russian).
2. BRINKMAN E. Physical problems of ecology. Moscow: INTELLECT. 2012:288. (In Russian).
3. GIRARD J. Fundamentals of environmental chemistry. Moscow: FIZMATLIT. 2008:640. (In Russian).
4. PACHAURI R., MEYER L. ET AL. IPCC. Climate Change, Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II, and III to the IPCC Fifth Assessment Report. Geneva: IPCC, 2014:44. (In Russian).
5. SEMENOV S.M. Greenhouse effect: discovery, development, concepts, role in shaping the global climate and its anthropogenic changes. Fundamental and Applied Climatology. 2015;2:103–126. (In Russian).

Тетельмин Владимир Владимирович,
д.т.н., главный специалист Института экологии РУДН
им. Патриса Лумумбы, член Общественного совета при Минэнерго РФ

✉ 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6,
117198, Moscow, Miklukho-Maklaya st., 6,
e-mail: v-tetelmin@rambler.ru

УДК 550.834

DOI: 10.52531/1682-1696-2025-25-3-34-42

Научная статья

EDN: FQVHQN

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ РАСШИРЕНИЯ РЕСУРСНОЙ БАЗЫ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

**С.А. Кириллов,
А.М. Алисолтанов**АО «ЦЕНТРАЛЬНАЯ ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ
ЭКСПЕДИЦИЯ», МОСКВА, РОССИЙСКАЯ
ФЕДЕРАЦИЯ

Использование комплекса геолого-геофизических и промышленных данных в единой информационной и вычислительной среде с применением современных компьютерных технологий – от 2D/3D сейсморазведки до ГИС позволяет проводить визуальный и инструментальный анализ качества всего набора данных, который позволит сформировать граф для дополнительной обработки данных с целью их согласования по координатам и высотам в пространстве, амплитудной и фазово-частотной согласованности сейсмических профилей. Представленная технология способствует определению детальных сейсмогеологических и геологических моделей как на всей изучаемой территории недр, так и на отдельных ее участках. В связи с чем интеграция этих данных значительно углубляет понимание геологической структуры и повышает эффективность геологоразведочных работ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: большой объем геолого-геофизических данных, цифровая технология обработки, профильная сейсморазведка, геологическая модель залежи, программно-вычислительные средства, визуальные окна анализа, многопараметровые и многомерные системы, лицензионный участок, мониторинг

Эффективное и экономически обоснованное применение современных технологий в сфере добычи углеводородов невозможно без детальных цифровых моделей залежей (геологическая модель) и процессов, протекающих в них (фильтрационная модель).

Результаты геологического моделирования участка недр очевидны: они более точно и полно описывают геологические объекты и служат основой для гидродинамических расчетов и выбора оптимальных режимов эксплуатации месторождения.

Original article

INNOVATIVE DIGITAL TECHNOLOGIES OF GEOLOGICAL EXPLORATION TO SOLVE URGENT PROBLEMS OF THE DEVELOPMENT OF THE HYDROCARBON RESOURCE BASE

S.A. KIRILLOV, A.M. ALISOLTANOV
JSC «CENTRAL GEOPHYSICAL EXPEDITION»,
MOSCOW, RUSSIAN FEDERATION

The use of a complex of geological, geophysical and well data in a single information and computing environment using modern computer technologies – from 2D/3D seismic exploration to well data allows for visual and instrumental analysis of the quality of the entire data set, which will allow forming a graph for additional data processing in order to coordinate them according to coordinates and altitudes in space, amplitude and phase-frequency consistency of seismic profiles. This approach helps to determine detailed seismic and geological models both in the entire studied subsurface area and in its individual sections. Thus, the integration of these data significantly deepens the understanding of the geological structure and increases the efficiency of exploration work.

KEY WORDS: large amount of data, digital analysis technology, profile seismic exploration, geological model of the deposit, software and computing tools, visual analysis windows, multiparameter and multidimensional systems, license area, monitoring

Геологическая модель залежи служит основой для выявления нефтегазоперспективных объектов, проведения детальных геологоразведочных работ и выбора оптимальных мест для бурения скважин. Она способствует значительному снижению общих затрат и финансовых рисков, а также решает основную проблему нефтедобычи – выбор обоснованных решений по бурению конкретной скважины и реализации геолого-технологических мероприятий.

Как показывает практика, геологическая модель должна активно использоваться на всех этапах изучения и разработки месторождения. Она требует регулярного обновления в соответствии с поступлением новой сейсмической и скважинной информации, а

также после переобработки и переосмысления ретроспективных данных.

Таким образом, поддержание актуальности геологической модели является ключевым фактором для эффективного управления процессами добычи углеводородов и минимизации рисков.

Цифровая структура геолого-технологической модели участка недр, как показано на рис. 1, включает в себя геолого-геофизическую и промысловую базу данных и программное обеспечение [1–3]:

Геолого-геофизическую и промысловую базу данных – это набор исходных и результирующих данных о месторождении, собранных и обработанных в процессе проведения геологических и геофизических исследований.

Программное обеспечение – это комплекс алгоритмов и процедур, позволяющих реализовать все этапы обработки, интерпретации, построения и сопровождения геологической модели. Программное обеспечение должно соответствовать геологическим представлениям об образовании и строении залежи, а также учитывать существующие разнородные и разномасштабные геолого-геофизические данные. Кроме того, оно должно обеспечивать визуальный и инструментальный контроль качества промежуточных и конечных результатов, что позволяет специалистам адекватно оценивать результаты своей работы.

Таким образом, интеграция этих компонентов в цифровую структуру модели способствует более эффективному управлению процессами геологоразведки и разработки месторождений.

Вычислительные средства – это компьютеры и другое оборудование, обеспечивающие работу программного обеспечения для обработки, интерпретации геофизических данных и моделирования. Эти средства должны быть доступны на всех этапах и уровнях работы геологических служб, чтобы гарантировать эффективную и быструю обработку данных, а также обеспечить надежную поддержку всех геологоразведочных и эксплуатационных процессов. Наличие современных

вычислительных ресурсов позволяет оптимизировать задачи моделирования и анализа, что в свою очередь способствует повышению качества принимаемых решений в области разработки месторождений.

Для создания региональной сейсмогеологической модели Терско-Каспийской, Центральной и Восточно-Предкавказской нефтегазоносных областей используются сейсмические данные МОГТ-2D в объеме 17 000 погонных километров, полученные по 330 профилям, которые образуют взаимосвязанную сеть. Также используются результаты бурения и коротажные диаграммы различных геофизических методов, полученные по 272 скважинам, включая плотностной гамма-гамма-каротаж (ГГКп) по 2 скважинам и акустический каротаж (АК) по 25 скважинам [4].

Основная геологическая задача этих региональных исследований заключается в уточнении структурно-тектонического строения региона на основе согласованной региональной сейсмогеологической модели. Это позволит выявить нефтеперспективные участки недр и разделить их на отдельные лицензионные участки для детальных геологоразведочных работ недропользователями.

Для решения задачи выбора сейсмической информации из большого объема одновременно полученных данных используются программно-вычислительные средства цифровой технологии быстрого доступа к базе данных. Эти инструменты позволяют оперативно визуально анализировать характерные особенности временных полей по профилям, сортировать данные по годам получения и сопоставлять их с качественным материалом.

С помощью таких инструментов можно определять амплитудные и фазово-частотные характеристики поля, а также подбирать параметры дополнительной обработки для повышения качества данных. Это значительно ускоряет процесс анализа и улучшает точность интерпретации, что является ключевым аспектом в геологоразведке и управлении недрами.



РИС. 1.

Содержание цифровой геолого-технологической модели

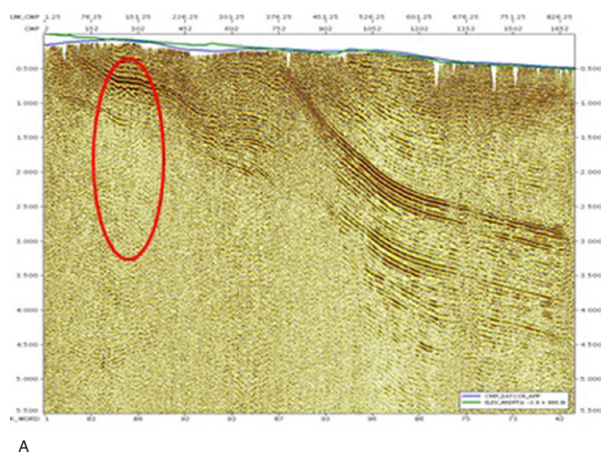
При разработке этого графа дополнительной обработки уделили особое внимание повышению разрешенности сейсмической картины, что должно было усилить амплитуду полезного сигнала по отношению к уровню помех. В процессе обработки выделили следующие основные этапы:

- расчет априорных статических поправок по первым волнам отраженных волн;
- построение глубинно скоростной модели ВЧР. Анализ горизонтальных спектров скоростей для анализа качества статических поправок, рассчитанных за рельеф и по первым вступлениям и выбора результата для дальнейшей обработки;
- коррекция статических и кинематических поправок – это позволяет минимизировать влияние различных искажений на результаты;
- ослабление промышленных и нерегулярных помех, поверхностных волн, многократных и частично кратных регулярных волн;
- миграция до суммирования – мы провели миграцию данных как в глубинной, так и во временной области, что помогает улучшить пространственное разрешение и точность интерпретации.

Для иллюстрации этих процессов рассмотрим пример анализа временных разрезов по профилю 201203, представленных с априорными статическими поправками, полученными двумя различными способами. Это позволит продемонстрировать эффективность применяемых методов и их влияние на качество сейсмической картины.

Первый способ – за рельеф (рис. 2А). Линия приведения составляет 850 м, а скорость замещения – 2300 м в секунду. Рельеф на этом профиле плавно понижается от 800 м в левой части до 300 м в правой, без резких изменений.

Второй способ – по рефрагированным волнам, полученным из первых вступлений сейсмограмм МОВ (рис. 2Б).



А

РИС. 2.

Суммарный разрез по профилю 201203 с априорными статическими поправками: А – априорные статические поправки по способу за рельеф; Б – априорные статические поправки по первым вступлениям

Наиболее заметное изменение волнового поля наблюдается в районе пикетов 220–320 с максимумом на ПК 270. Это приводит к возникновению ярко выраженной структуры (антиклиналь) правее ПК 300 – отмечено красным овалом (рис. 2Б).

Если сравнить этот рисунок с рис. 2А, то можно увидеть, что на разрезе, полученном с использованием статики за рельеф, в этой зоне не наблюдается сильного перегиба, а склон имеет плавный наклон с небольшим изгибом.

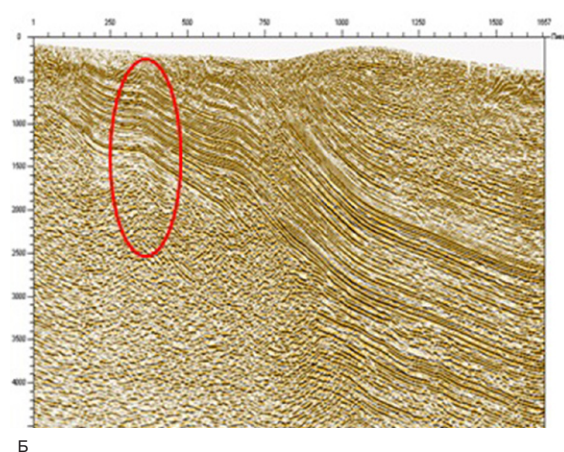
Таким образом, мы имеем два варианта разрезов, которые заметно отличаются друг от друга. Анализ рисунков позволяет сделать вывод, что это различие обусловлено значительными отличиями в поведении функции статических поправок и свидетельствует о резких изменениях скоростей в толще, слагающей верхнюю часть разреза.

Для получения информации о надежности вариантов статических поправок по профилю 201203 был проведен анализ интервальных скоростей для обоих вариантов.

На рис. 3 представлены временной разрез (рис. 3А) с нанесенными горизонтами и горизонтальные спектры интервальных скоростей (рис. 3Б) для вариантов статики за рельеф и по первым волнам.

По форме горизонтальных спектров скорости, полученных с помощью метода ОГТ, можно сделать вывод, что спектры скоростей вдоль разреза с априорными статическими поправками, рассчитанными по рефрагированным волнам, демонстрируют большую устойчивость и информативность. На этих спектрах отсутствуют значительные искажения и расфокусировки, что делает их более узкими и четкими для интерпретации.

В отличие от этого, спектры скоростей вдоль профиля, полученного со статическими поправками за рельеф, показывают сильную изрезанность и значительные скоростные аномалии. Это вызывает сомнения в



Б

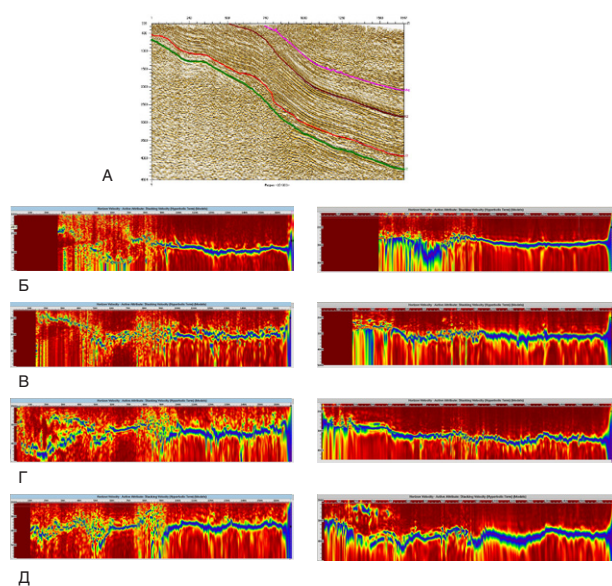


РИС. 3.

Суммарный временной разрез (а) и спектры скорости ОГТ (б-д). Профиль 201203: А – временной разрез и оси синфазности по отражающим горизонтам, по способу за рельеф, по способу рефрагированным волнам; Б – Спектр скорости $V_{огт} \cdot OG Hpr - 1 M_{кр}$; В – Спектр скорости $V_{огт} \cdot OG Hpr 2-K_2$; Г – Спектр скорости $V_{огт} \cdot OG Hpr 3-J_3$; Д – Спектр скорости $V_{огт} \cdot OG Hpr 4-J_2$

корректности рассчитанных априорных статических поправок, основанных на рельефе. Такие аномалии могут указывать на необходимость пересмотра методов коррекции или на наличие дополнительных факторов, влияющих на распределение скоростей в данном районе.

Помимо использования методов определения априорной статистики по первым волнам, тщательного скоростного анализа и многократной итеративной коррекции статических и кинематических поправок, мы также применяли процедуры ослабления промышленных и случайных волн помех, поверхностных волн, многократных и частично кратных регулярных волн. Кроме того, мы обеспечили пространственную амплитудную согласованность, провели робастную деконволюцию и временную миграцию по сейсмограммам.

Благодаря использованию современных подходов к обработке сейсмических данных качество волнового поля значительно улучшилось по сравнению с ранее полученными результатами. Это позволило значительно повысить соотношение сигнала к помехе в целевых временных окнах и динамически согласовать ретроданные с недавно полученными.

На рис. 4–6 представлены волновые поля по пересекающимся профилям, обработанным в разные годы с использованием различных способов обработки. Эти разрезы наглядно демонстрируют, что совре-

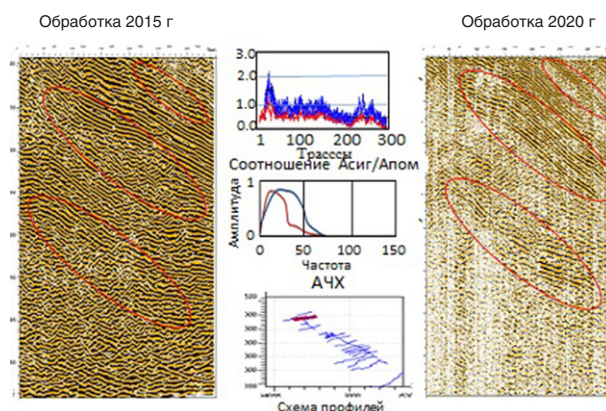


РИС. 4.

Дополнительная обработка данных сейсмического профиля 027723

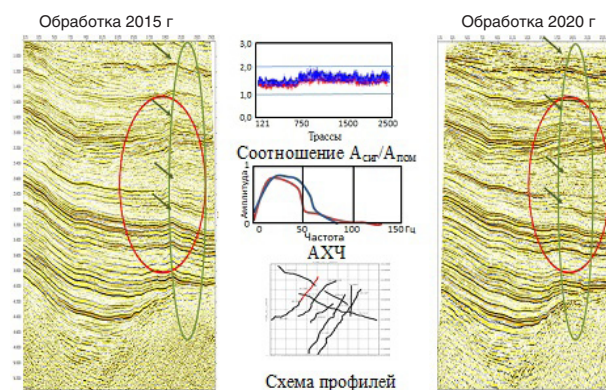


РИС. 5.

Дополнительная обработка сейсмического профиля 011501

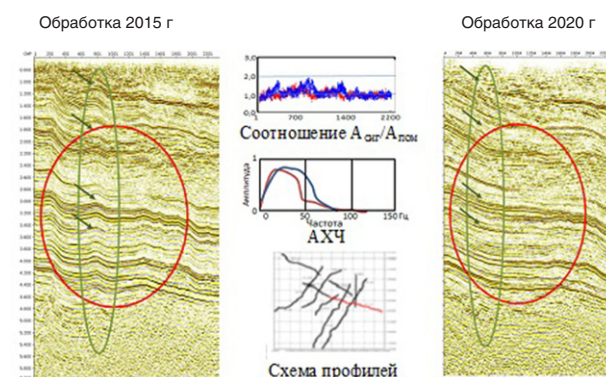
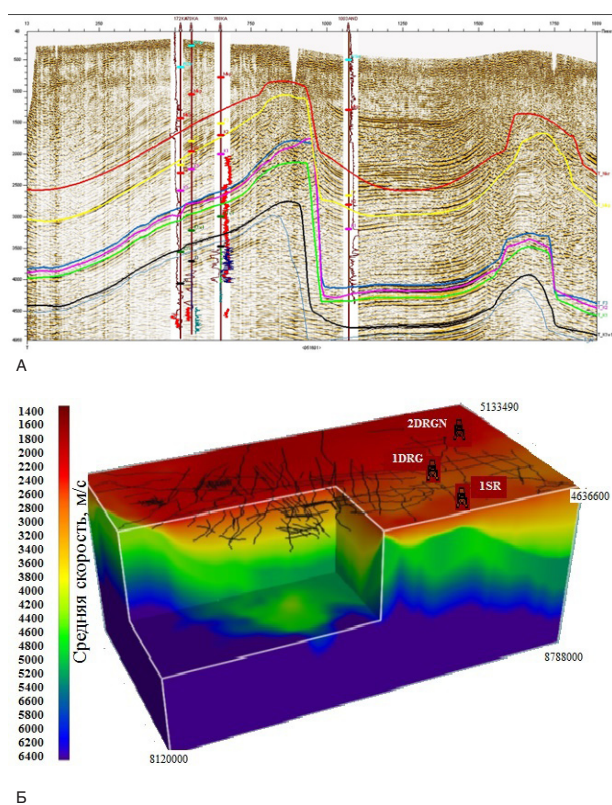


РИС. 6.

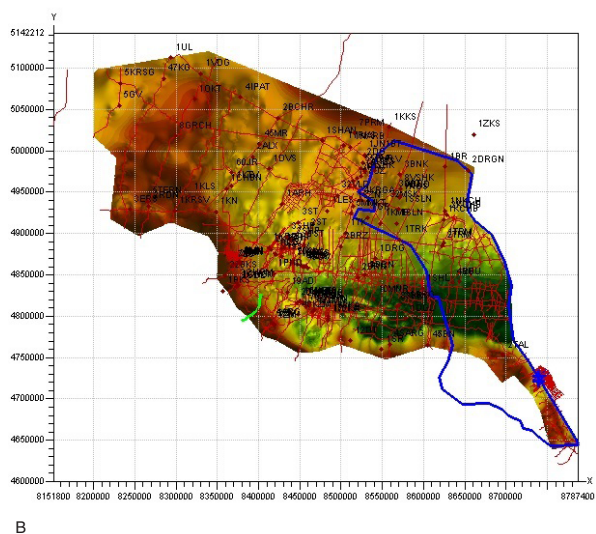
Дополнительная обработка сейсмического профиля 051516



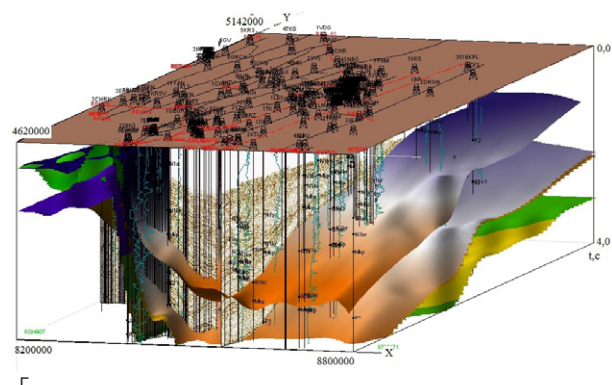
Б

РИС. 8.

Структурно-тектоническая региональная модель территории недр и региональная база геолого-геофизических данных: А – сейсмогеологический профиль 051601; Б – региональная база сейсмических и скважинных данных на структурной основе; В – куб средней скорости региональной сейсмогеологической модели; Г – региональная сейсмогеологическая модель



В



Г

4. Граничные значения петрофизических параметров – характеристики горных пород, которые важны для оценки их свойств.

5. Корреляционные связи между сейсмическими атрибутами и геологическими параметрами, которые позволяет лучше понять структуру залежей.

6. Технологическую последовательность построения модели – описание процедур и алгоритмов, используемых для создания и оптимизации модели, включая их параметры.

В дальнейшем созданная база знаний активно используется специалистами для сопровождения региональной геологической модели и для моделирования других объектов, расположенных в аналогичных геологических условиях. Это позволяет эффективно использовать накопленные знания, последовательность и оптимальные параметры вычислительных процедур построения, улучшая качество и достоверность точность геологического моделирования.

Среди многих требований к программному обеспечению сопровождения (мониторинга) геологиче-

ской модели следует выделить несколько ключевых аспектов:

1. Дозагрузка новых исходных данных: система должна иметь возможность интеграции новых данных в базу проекта без значительных задержек.

2. Контроль качества данных: необходимо обеспечить как визуальный, так и количественный контроль качества существующих и новых данных для поддержания надежности модели.

3. Редакция данных с протоколированием: важно, чтобы изменения в данных фиксировались с протоколированием, что позволяет отслеживать историю изменений и их влияние на модель.

4. Определение противоречий: система должна обеспечивать качественное и количественное выявление противоречий между моделью и вновь поступающими данными, что критично для актуализации модели.

5. Передача знаний: создание протокола всех этапов построения модели, включая последовательность операций, алгоритмы и их параметры, позволяет по-

вторять процесс над новыми данными и корректировать модель. Это способствует накоплению и передаче знаний.

6. Сохранение и редактирование графиков: возможность сохранять и редактировать графики построения и сопровождения модели, что формирует базу знаний.

7. Сегментация проектов: необходимо обеспечить возможность разделения единой геологической модели на сегментированные проекты по отдельным локальным участкам лицензионной площади, сохраняя полную номенклатуру объектов модели.

8. Интеграция локальных баз данных: возможность соединения локальных баз данных отдельных сегментов модели в единую базу данных для комплексного анализа.

9. Доступность для специалистов: все инструменты и данные должны быть доступны для практического использования специалистами на производственных нефтедобывающих предприятиях.

Технология моделирования действительно играет ключевую роль в создании трехмерных сейсмогеологических региональных моделей, которые обеспечивают целостное представление о недрах. Генерализованная модель охватывает всю исследуемый региональную территорию недр, что помогает избежать несогласованности данных, особенно на границах различных площадей сейсмической полевой съемки, на которых различные авторы обрабатывают и интерпретируют комплекс сейсмических и скважинных данных.

На таких границах могут возникать различия в обработке и интерпретации сейсмических и скважинных данных, что может привести к несоответствиям в результатах. Использование единой модели позволяет интегрировать данные от разных авторов и обеспечивает более точное и согласованное представление о геологической структуре региона. Это, в свою очередь, улучшает качество геологических исследований и повышает эффективность разработки месторождений.

При наличии большого объема данных действительно возможно создание моделей для отдельных площадей, что позволяет более детально анализировать геологические особенности. Вертикальное разделение региональной информации помогает учитывать изменения в составе пород, наличие структурных нарушений и другие факторы на конкретном участке недр, которые могут существенно влиять на разработку месторождений.

Такой подход обеспечивает более глубокое понимание геологической структуры и характеристик каждого пласта, что, в свою очередь, повышает точность и надежность геологических исследований и проектирования. Это не только оптимизирует процессы разработки, но и минимизирует риски, связанные с добычей полезных ископаемых, что является ключевым аспектом эффективного управления ресурсами.

На рис. 8А синим цветом выделен лицензионный участок недропользователя, который планирует проводить геологоразведочные работы для детализации геологической модели нефтеперспективных объектов. В связи с этим необходимо выделить согласованную базу данных, базу знаний и сейсмогеологическую в границах данного конкретного участка из региональной модели.

Нарис. 9Б представлена пространственная сейсмогеологическая модель, охватывающая указанные границы, а также согласованные геолого-геофизические данные, основанные на региональной базе (рис. 9А). Такой подход позволяет интегрировать информацию и обеспечивает более точное представление о геологической структуре и характеристиках участка, что критически важно для успешного проведения дальнейших исследований и разработки месторождений.

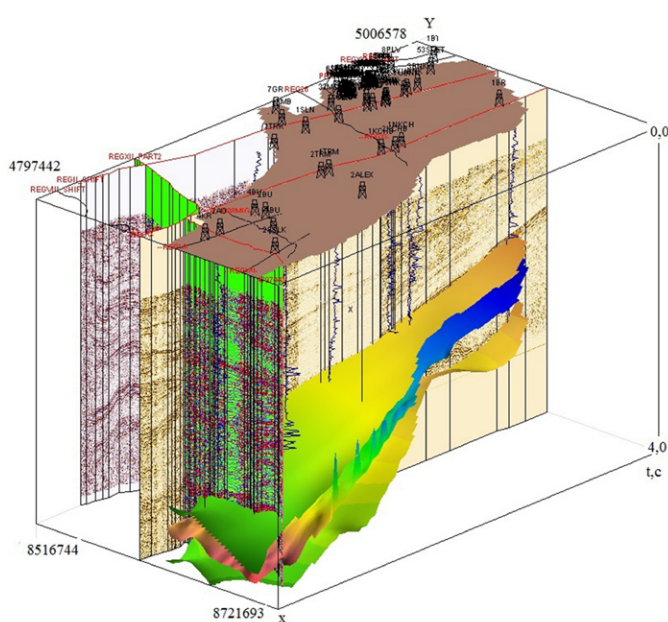
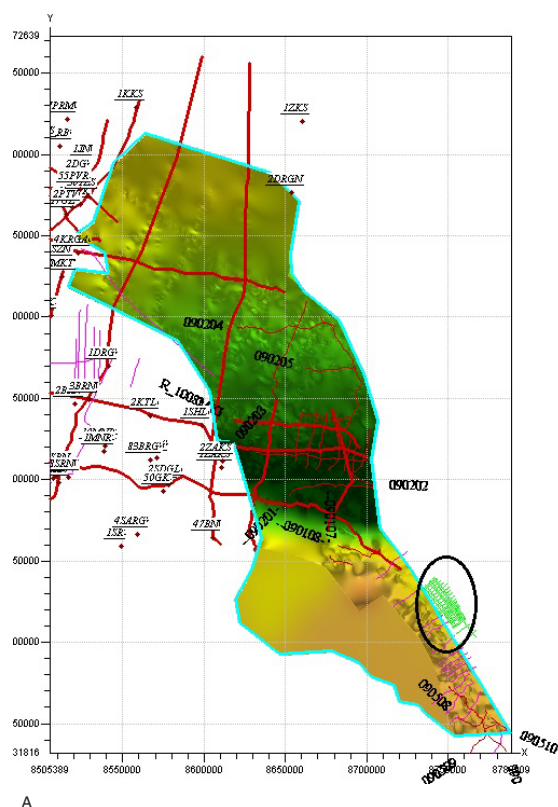
Проведены детальные сейсмические работы методом МОГТ-2D на востоке площади, при этом схема профилей обозначена черной окружностью на рис. 9А. Для обеспечения точности и согласованности данных необходимо увязать временные разрезы, полученные в ходе этих работ, с сейсмическими разрезами региональной модели, представленными на рис. 9Б.

Кроме того, важно интегрировать эти данные с региональной моделью, показанной на рис. 8Б. Такой подход позволит создать более полное и согласованное представление о геологической структуре, что, в свою очередь, повысит точность геологоразведочных работ и улучшит планирование дальнейших исследований и разработки месторождений.

На рис. 10 представлено сравнение времен волновых полей по трем сеймофациальным комплексам, полученным в результате региональных и детальных сейсморазведочных работ. Как видно из сейсмических разрезов по двум профилям, выделенным цветными прямоугольниками, структура волновых полей, форма и количество фаз сигнала соответствуют друг другу.

Это свидетельствует о высокой степени согласованности между данными, полученными в ходе различных исследований, и подтверждает корректность выполненных сейсмических работ. Данная согласованность является важным шагом для дальнейшей интерпретации и оценки геофизических данных, что, в свою очередь, способствует более точному пониманию геологической структуры и повышает надежность прогнозов относительно нефтегазовых объектов.

Анализ волновой картины на временных разрезах в региональной сейсморазведке действительно является важным инструментом для выделения отражающих горизонтов, определяющих структуру нефтеперспективных объектов, подчеркивает ключевые аспекты этого процесса и предлагает пути для повышения эффективности сейсмических исследований в условиях ограниченного финансирования.



Б

РИС. 9.

База данных и сейсмогеологическая модель лицензионного участка: А – база сейсмических и скважинных данных на лицензионном участке; Б – трехмерная сейсмогеологическая модель лицензионного участка

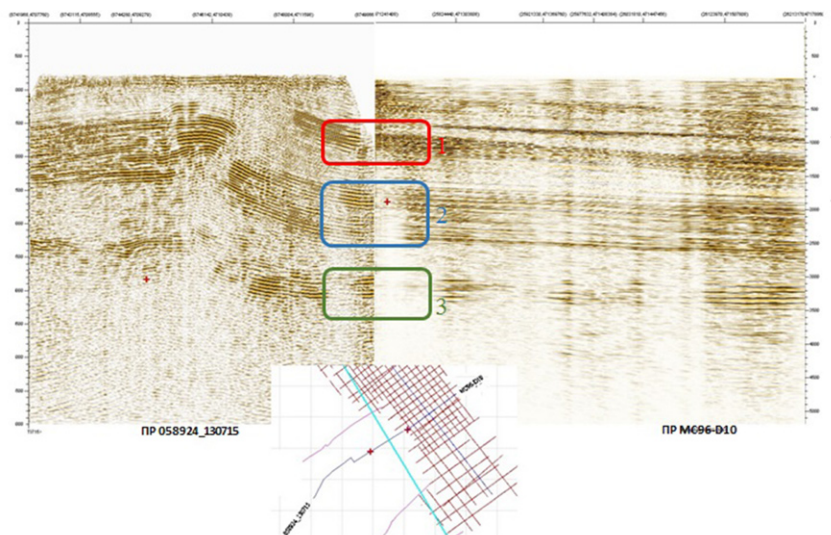


РИС. 10.

Сопоставление сейсмических разрезов различных съемок

Основные направления для повышения эффективности сейсмических исследований:

1. Качественный отбор данных:

– отбраковка некондиционных материалов. Важно тщательно анализировать собранные данные и отбраковывать те, которые не соответствуют необходимым стандартам. Это позволяет сосредоточиться на достоверной информации, что особенно актуально в сложных условиях;

– фокусировка на достоверной информации. Обработка данных, собранных в разные полевые сезоны и различными специалистами, требует внимательного подхода к выбору источников информации.

2. Единая цифровая переобработка:

– применение современных алгоритмов. Использование передовых технологий для устранения скоростных неоднородностей и подавления шумов (как

регулярных, так и нерегулярных) может значительно улучшить качество данных;

- согласование амплитудно-фазовых характеристик критически важно для получения точных результатов интерпретации.

3. Стандартизация данных:

- регуляризация на единую сеть позволит улучшить сопоставимость данных и снизить погрешности;
- учет скоростных неоднородностей за верхнюю часть разреза поможет избежать ошибок в интерпретации.

4. Глубинное моделирование:

- построение изотропных и анизотропных скоростных моделей позволит более детально отобразить геологический разрез и улучшить качество миграции данных.

5. Интеграция данных. Для совместного анализа сейсмической и скважинной информации используется единое интерпретационное ПО для интеграции данных, позволяющее более эффективно выделять нефтегазоперспективные объекты.

Интеграция методов сейсморазведки с современными технологиями, включая искусственный интеллект и цифровые решения, предоставляет уникальные возможности для повышения эффективности и точности исследований. В условиях сокращения финансирования особенно важно оптимизировать существующие данные и процессы, что позволит сохранить темпы поиска нефтегазоносных объектов и сосредоточиться на наиболее перспективных зонах для дальнейшего изучения. Это не только поможет сократить затраты на новые полевые работы, но и повысит детальность и достоверность интерпретации, что критически важно для успешной геологоразведки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кашик А.С., Билибин С.И., Гогоненков Г.Н., Кириллов С.А. Новые технологии при построении цифровых геологических моделей и подсчете запасов месторождений углеводородов / Интенсификация добычи нефти и газа. Труды международного технологического симпозиума. М., 2003.
2. Кашик А.С., Кириллов С.А., Федоров А.А. и др. Построение пространственной геологической модели нефтяной залежи в программном комплексе DV-SeisGeo на основе комплексной интерпретации данных сейсморазведки, каротажа и петрофизики / Тезисы докладов пятой научно-практической конференции «Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО», 13–17 ноября 2001, Ханты-Мансийск, 2001. С. 70–71.
3. Кириллов С.А., Алисолтанов А.М. Концепция технологии цифровой информационной экспертной оценки комплексных моделей нефтегазовых промысловых объектов // Вестник РАЕН. 2024. №3.

С.А. КИРИЛЛОВ, А.М. АЛИСОЛТАНОВ
ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ
РАБОТ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ РАСШИРЕНИЯ
РЕСУРСНОЙ БАЗЫ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

С. 34–41 DOI:10.52531/1682-1696-2024-23-3-34-41. EDN: CHQDRJ.

4. Кириллов С.А., Федоров А.А., Ческис О.А. Коррекция взаимных времен в точках пересечения профилей комплексе DV-SeisGeo. Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО. Пятая научно-практическая конференция. Под ред. Карасева И.И., Ахпателова Э.А., Волкова В.А.- Ханты-Мансийск, 2002. Т. 2. С. 83–89.

REFERENCES

1. KASHIK A.S., BILIBIN S.I., GOGONENKOV G.N., KIRILLOV S.A. New technologies in the construction of digital geological models and calculation of reserves of hydrocarbon deposits. Intensification of oil and gas production. Proceedings of the international technology symposium. Moscow, 2003. (In Russian).
2. KASHIK A.S., KIRILLOV S.A., FEDOROV A.L. ET AL. Construction of a spatial geological model of an oil deposit in the DV-SeisGeo software package based on the integrated interpretation of seismic exploration, logging and petrophysics data. Abstracts of the fifth scientific and practical conference "Ways to realize the oil and gas potential of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug", November 13-17, 2001, Khanty-Mansiysk, 2001:70–71. (In Russian).
3. KIRILLOV S.A., ALISOLTANOV A.M. Concept of technology of digital information expert assessment of complex models of oil and gas field facilities. *Vestnik RAYEN*. 2024;3:34–41 DOI: 10.52531/1682-1696-2024-23-3-34-41. EDN: CHQDRJ. (In Russian).
4. KIRILLOV S.A., FEDOROV A.L., CHESKIS O.L. Correction of mutual times at the intersection points of profiles in the DV-SeisGeo complex. Ways to realize the oil and gas potential of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug. Fifth scientific and practical conference. Ed. by Karasev I.I., Akhpatelov E.A., Volkov V.A. Khanty-Mansiysk, 2002;2:83–89. (In Russian).

Кириллов Сергей Александрович,
д.т.н., к.ф.-м.н., доцент, советник АО «Центральная геофизическая экспедиция»

✉ e-mail: sakirillov@cge.ru

Алисолтанов Алибек Магомедмуратович,
управляющий директор АО «Центральная геофизическая экспедиция»

✉ e-mail: AlisoltanovAM@rusgeology.ru

✉ 123298, г. Москва, ул. Народного Ополчения, 38/3
123298, Moscow, 38/3 Narodnaya Opolcheniya str.,
e-mail: kirillovsa@rusgeology.ru

УДК 621.891/620.22

DOI: 10.52531/1682-1696-2025-25-3-43-52

Научная статья

EDN: GLQMNT

ВЛИЯНИЕ ПРИСАДОК МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ (Cu, Zn, Ni, Cd) НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СМАЗКИ ЦИАТИМ-201

**Х. Нгуен¹, А.А. Кужаров²,
В.М. Нгуен¹**¹ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ, ХАНОЙ,
ВЬЕТНАМ² ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ,
РОСТОВ-НА-ДОНУ, РОССИЙСКАЯ
ФЕДЕРАЦИЯ

В данной статье представлены результаты исследования по применению металлических наночастиц (Cu, Zn, Ni, Cd) в качестве присадок к пластичной смазке ЦИАТИМ-201 (ГОСТ 6267-74) с целью повышения её триботехнических характеристик. Металлические наночастицы, синтезированные методом электролиза, преимущественно имеют размеры в нанометровом диапазоне.

Экспериментально установлено, что добавление наночастиц (Cu, Zn, Ni, Cd) в качестве присадок к смазке ЦИАТИМ-201 (ГОСТ 6267-74) существенно улучшает её противоизносные, противозадирные и антифрикционные свойства, максимальная эффективность наблюдается при использовании комбинации наночастиц всех четырёх металлов (Cu+Zn+Ni+Cd). Кроме того, в работе выявлено влияние природы, размера, формы и концентрации наночастиц на триботехнические свойства смазки ЦИАТИМ-201.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: наночастицы, ЦИАТИМ-201, триботехника, смазка, трение, износ, реметаллизант

Original article

THE INFLUENCE OF METALLIC NANOPARTICLE ADDITIVES (Cu, Zn, Ni, Cd) ON THE TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF SIATIM-201 GREASE

**H. NGUYEN¹, A.A. KUZHAROV²,
V.M. NGUYEN¹**¹ INSTITUTE OF TECHNOLOGY, HANOI,
VIETNAM² DON STATE TECHNICAL UNIVERSITY,
ROSTOV-ON-DON, RUSSIAN FEDERATION

his article presents the results of a study on the use of metallic nanoparticles (Cu, Zn, Ni, Cd) as additives to SIATIM-201 grease (GOST 6267-74) to enhance its tribotechnical properties. Metallic nanoparticles synthesized by the electrolysis method predominantly exhibit sizes within the nanometer range.

Experimental results show that the addition of nanoparticles (Cu, Zn, Ni, Cd) as additives to SIATIM-201 grease (GOST 6267-74) significantly improves its anti-wear, anti-seizure, and antifriction properties, the maximum efficiency is observed when using a combination of nanoparticles from all four metals (Cu+Zn+Ni+Cd). Furthermore, the study revealed the influence of the nature, size, shape, and concentration of nanoparticles on the tribotechnical properties of CIATIM-201 grease.

KEYWORDS: Nanoparticles, SIATIM-201, tribotechnics, grease, friction, wear, remetallizant

1. ВВЕДЕНИЕ

Трение и износ представляют собой серьезную проблему, требующую решения практически во всех областях промышленности, особенно в машиностроении. Ежегодно убытки от трения и износа машин составляют миллиарды долларов. Многочисленные научные исследования подтверждают, что одним из наиболее действенных способов решения данной

проблемы является использование смазочных материалов нового поколения, содержащих различные типы ультрадисперсных порошков (УДП). Частицы УДП, размеры которых обычно находятся в пределах от нанометров до микрометров, способны существенно снижать трение и износ в узлах трения, включая скользящие подшипники и опоры деталей машин [3, 5, 16, 19, 25]. Основная суть процесса снижения коэффициента трения и износа заключается в том, что в результате физико-химических реакций, непрерывно происходящих под воздействием давления и темпера-

туры в области трения, формируется относительно стойкое межметаллическое покрытие с очень низкой шероховатостью поверхности [13–15]. В результате процесс трения и износа осуществляется поочередно: старая поверхность постепенно изнашивается, одновременно с этим образуется новый слой устойчивой межметаллической структуры, заменяющий утраченный материал. Таким образом, коэффициент трения и скорость износа значительно снижаются.

Основным материалом для формирования межметаллического покрытия являются ультрадисперсные металлические частицы, содержащиеся в смазочных материалах. Процесс образования нового поверхностного слоя в англоязычной специальной терминологии называется «remetalization», а на русском – «реметаллизация». Сами металлоплакирующие присадки к смазочным материалам называют «реметаллизантами». Процесс реметаллизации также известен как «эффект Гаркунова», открытый российскими учеными Д.Н. Гаркуновым и И.В. Крагинским [4, 8]. Механизм этого процесса также может быть интерпретирован с помощью принципа самоорганизации (self-organization) согласно теории и алгоритмам кибернетики [20–22].

На современном рынке автохимии можно найти разнообразные виды реметаллизантов. Существует большое количество запросов на решения, гарантирующие безыносность и даже возможность проведения безразборного ремонта, таких как восстановление изношенных деталей машин, например, двигателей внутреннего сгорания, с применением таких «чудодейственных» составов. Тем не менее, на данный момент не разработаны присадки или добавки, которые могли бы обеспечить полное достижение эффекта безыносности в трансмиссионных, моторных или промышленных маслах.

Следует отметить, что благодаря развитию науки и техники, в том числе в машиностроении, исследование и внедрение методов нанотехнологий и их продуктов в области трибологии способствовали широкому применению наночастиц металлов, оксидов, солей, сплавов и их органических соединений в качестве присадок и добавок к смазочным материалам [17, 18, 24].

К сожалению, на сегодняшний день доказательства надежности и эффективности реметаллизантов в составах материалов, предназначенных для триботехнических применений, а также их влияния на долговечность и работоспособность узлов трения машин и качество продукции машиностроения остаются недостаточно изученными. Количество экспериментальных испытаний, проведенных для выявления факторов, влияющих на триботехнические свойства базовых смазок при добавлении к ним металлоплакирующих присадок, является недостаточным. Остается ряд вопросов, действительно связанных с эффективностью использования УДП в качестве присадок к

Х. НГУЕН, А.А. КУЖАРОВ, В.М. НГУЕН
ВЛИЯНИЕ ПРИСАДОК МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
НАНОЧАСТИЦ (Cu, Zn, Ni, Cd)
НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
СМАЗКИ ЦИАТИМ-201

смазочным материалам, например, как зависит этот эффект от природы, размера, формы частиц и их количества. Кроме того, при разработке металлоплакирующих смазочных материалов необходимо учитывать типы используемой смазки и условия ее испытаний [7]. Таким образом, необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований с целью определения оптимальных параметров, обеспечивающих эффективное применение наномодифицированных металлоплакирующих смазочных материалов для снижения коэффициента трения и износа в узлах деталей машин.

В данной статье поставлена задача исследования влияния присадок нанодисперсных частиц различных металлов (Cu, Zn, Ni, Cd), полученных из отработанных электродов аккумуляторов, на триботехнические свойства пластичной смазки ЦИАТИМ-201. Особое внимание уделено изучению влияния природы, размера и концентрации наночастиц на эффективность смазки ЦИАТИМ-201 в снижении трения и износа трущихся поверхностей.

2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Объекты исследования. В ходе экспериментальных исследований использовались металлические частицы УДП Cu, Zn, Ni, Cd нанометровым размером, синтезированные в лаборатории методом электроосаждения в сочетании с ультразвуковой обработкой (УЗ-обработкой) с следующими параметрами: сила тока – 200 мА; плотность тока – 100 А·м⁻²; напряжение – 5 В; частота ультразвука – 22 кГц. Для преобразования переменного тока в постоянный использовался преобразователь ТЭК-14, а для ультразвуковой обработки – установка УЗД-22/44 с частотой генератора излучателя 22 кГц и выходной мощностью 2,5 Вт/см².

Схема технологии получения металлических ультрадисперсных частиц представлена на рисунке 1. Для этого электроды из различных отработанных металлов (Cu, Zn, Ni, Cd), выступающие в роли анодов, погружались в водный раствор аммиака $[\text{NH}_4]^+\text{OH}^-$. Электролиз приводил к растворению металлического анода (Cu, Zn, Ni, Cd) с образованием катионов, которые переносились к катоду и восстанавливались на его поверхности. Раствор аммиака одновременно выполняет функцию электролита и среды для стабилизации образующихся наночастиц металлов.

Под действием ультразвуковых волн происходило диспергирование слоя восстановленного металла, формировались кластеры из металлических наночастиц, которые затем удалялись с поверхности катода и стабилизировались в коллоидной форме в водном растворе аммиака. После этого нанокластеры в растворе подвергались центрифугированию и сушке до достижения постоянной массы. Таким образом получили УДП изучаемых металлов (Cu, Zn, Ni, Cd).

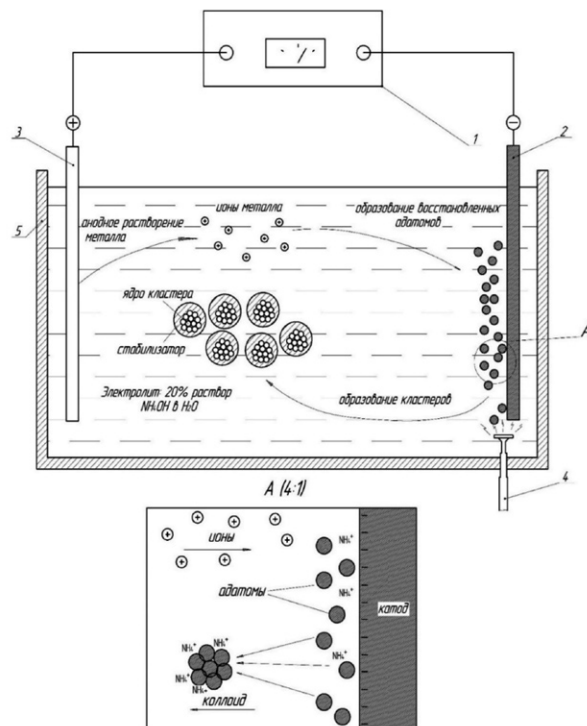


РИС. 1.

Схема технологии получения ультрадисперсных частиц металлов методом электроосаждения в сочетании с УЗ-обработкой: 1 – источник постоянного тока: ТЭК-14; 2 – катод: медь; 3 – анод (Cu, Zn, Ni, Cd); 4 – источник ультразвука УЗД-22/44; 5 – электролизер

В качестве основы исследуемых образцов металлоплакирующих смазочных композиций была использована пластичная смазка ЦИАТИМ-201 (ГОСТ 6267-74).

Полученные наночастицы металлов (Cu, Zn, Ni, Cd) были высушены и по отдельности вводились в смазку ЦИАТИМ-201 в различных концентрациях (по масс. %). Для достижения высокой степени однородности композиций введение наночастиц проводилось под воздействием ультразвука в течение 15–20 минут с последующим тщательным перетиранием. Однородность смазочных материалов оценивали методом визуального осмотра. Для этого испытуемый образец наносили тонким слоем (1–2 мм) на стеклянную пластину. При просмотре в проходящем свете невооруженным глазом в нанесенном слое не должно было наблюдаться наличие капель масла, сгустков загустителя или твердых включений.

2.2. Методики исследования. Размер и распределение полученных наночастиц металлов (Cu, Zn, Ni, Cd) по размерам определяли методом седиментационного анализа с использованием центрифуги Disk Centrifuge DC24000 (CPS, США) в соответствии со стандартом ISO 13318-1:2024. Этот прибор работает по принципу седиментационного фракционирования в центробежном поле и особенно эффективен для ана-

лиза наночастиц и микрочастиц в диапазоне от ~3 нм до 50 мкм. Метод основан на том, что частицы разного размера оседают с разной скоростью. Обработка данных и получение функции распределения частиц по размерам выполняется способом нелинейной регрессии. Форма и размеры наночастиц также исследовались с помощью сканирующего электронного микроскопа SEM EVO 40 HV (Carl Zeiss, Германия).

Экспериментальная оценка смазывающих свойств, а также эффективности снижения трения и износа металлоплакирующих композиций ЦИАТИМ-201 проводилась на четырехшариковой трибологической машине (Four Ball) с частотой вращения 1470 об/мин в соответствии с ГОСТ 9490-75 (шарики из стали ШХ-15 с радиусом 12,7 мм). Смазочные свойства материала ЦИАТИМ-201, модифицированного металлическими наночастицами Cu, Cd, Zn, Ni, оценивались по противоизносным и антифрикционным характеристикам:

- диаметр пятна износа (D_n), характеризующий противоизносные свойства смазочного материала (его способность препятствовать износу трущихся пар);
- нагрузка сваривания (P_s), определяющая предельную работоспособность смазки в условиях испытаний. Величина P_s представляет собой минимальную нагрузку, при которой наблюдаются заедание механизма и схватывание (сваривание) шаров;
- индекс задира (I_z), отражающий противозадирные свойства и предельную работоспособность смазки.

Исследование антифрикционных свойств смазочных композиций проводилось на приборе Tribotester T-11, где трение происходило между парами стали Р6М5 и 30ХГСА. Измерения проводились в соответствии со стандартом ASTM G 99-90 (аналогично DIN 50324).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 2 представлены кривые распределения по размерам частиц УДП (Cu, Zn, Ni, Cd), синтезированных методом электроосаждения в сочетании с УЗ-обработкой. Видно, что полученные образцы УДП металлов характеризуются достаточно широким распределением частиц по размерам. Однако следует отметить, что за исключением случая порошка никеля для всех остальных образцов большинство металлических частиц находится в нанометровом диапазоне (размер частиц в основном не превышает 100 нм). Для порошка металлического никеля характерна значительная доля частиц с размером более 200 нм. Возможно, это обусловлено агрегацией наночастиц с образованием более крупных структур.

Результаты электронно-микроскопического анализа (рис. 3) подтверждают данные о размере частиц

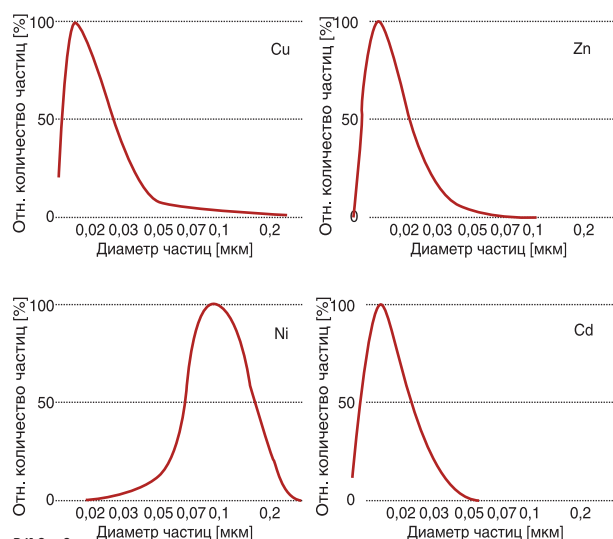


Рис. 2.

Распределение частиц синтезированных методом электроосаждения УДП (Cu, Zn, Ni, Cd) по размерам

полученных металлов. Установлено, что синтезированные металлические образцы порошков обладают высокой дисперсностью и характеризуются достаточно однородной морфологией. Большинство частиц металлических порошков Cu, Zn и Ni имеет округлую форму, причем обнаружено определенное количество игольчатых и дендритных частиц. Наночастицы Cd в основном обладает пластинчатой формой. Следует отметить, что для всех образцов характерна склонность металлических частиц к агрегации. Особенно в случае образца порошка никеля на SEM-фотографии отчетливо видны крупные сферические гранулы микронного размера. Тем не менее эти гранулы обладают наноструктурой, поскольку состоят из нанодисперсных металлических частиц никеля.

Представленные данные и анализ подтверждают, что все металлические частицы, полученные путем утилизации отработанных металлов, обладают нанометровыми размерами и относятся к наноматериалам. В целом размерный диапазон и морфологические характеристики полученных УДП металлов (Cu, Zn, Ni, Cd) обеспечивают возможность эффективного и рационального применения их в качестве присадок к смазочным композициям на основе смазки ЦИАТИМ-201.

На рисунке 4 представлены результаты экспериментов по исследованию противоизносных свойств образцов смазочных композиций с присадками металлических частиц различной природы на трибологическом тестере Four Ball. Критерием оценки является радиус пятна износа (D_n) на шариках трибосистемы после $t = 1$ ч при нагрузке $P = 196$ Н. Полученные результаты показывают, что добавление присадок металлических частиц Cu, Zn, Ni, Cd в смазку ЦИАТИМ-201 приводит к значительному уменьше-

Х. НГУЕН, А.А. КУЖАРОВ, В.М. НГУЕН
ВЛИЯНИЕ ПРИСАДОК МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
НАНОЧАСТИЦ (Cu, Zn, Ni, Cd)
НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
СМАЗКИ ЦИАТИМ-201

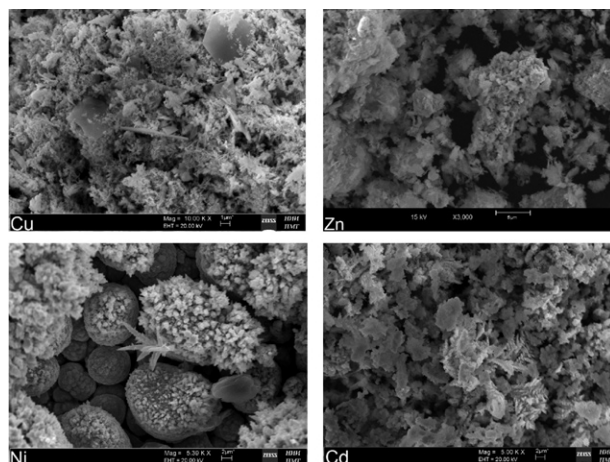


Рис. 3.

Результат электронно-микроскопического анализа образцов УДП металлов Cu, Zn, Ni, Cd

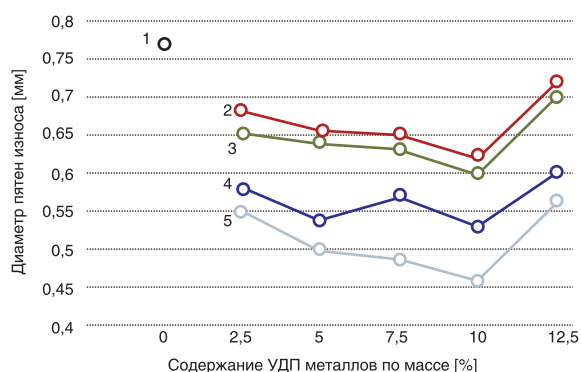


Рис. 4.

Результат по исследованию противоизносных свойств образцов смазочных композиций: 1 – ЦИАТИМ-201; 2 – ЦИАТИМ-201+Cu; 3 – ЦИАТИМ-201+Zn; 4 – ЦИАТИМ-201+Ni; 5 – ЦИАТИМ-201+Cd

нию величины радиуса пятна износа (D_n) по сравнению с базовым образцом (без присадок).

Таким образом, добавки УДП Cu, Zn, Ni, Cd позволяют эффективно улучшить противоизносные свойства пластичной смазки ЦИАТИМ-201. При этом эффективность снижения износа зависит от природы и концентрации металлических частиц присадок. Введение наночастиц кадмия обеспечивает максимальное снижение интенсивности изнашивания (примерно в 2 раза по сравнению с чистой смазкой).

При изучении зависимости величины D_n от содержания УДП металлов отмечено, что сначала с увеличением концентрации присадок металлов D_n уменьшается до минимального значения, после чего дальнейшее увеличение концентрации приводит к росту D_n .

Такая зависимость скорее всего связана с несколькими следующими физико-химическими аспектами:

– На начальных стадиях повышение концентрации наночастиц металлов способствует улучшению противоизносных свойств смазки, так как наночастицы могут заполнять микродефекты на поверхности трения, образуя тонкую защитную пленку, которая снижает контактное давление и уменьшает износ.

– При превышении определенного уровня концентрации наночастицы начинают агломерироваться (слипаться), образуя более крупные агрегаты. Это приводит к уменьшению количества свободных наночастиц, которые могли бы участвовать в защите поверхности. Кроме того агрегаты частиц могут стать источником абразивного износа, увеличивая трение и повреждение поверхностей, тем более, что избыточное количество частиц металлов увеличивает вязкость смазки и затрудняет ее циркуляцию, ухудшая распределение смазочного материала в зоне трения. Это может приводить к локальному перегреву и, как следствие, ухудшению противоизносных свойств.

Отмечено, что для всех исследуемых образцов смазочных композиций оптимальная концентрация добавок металлических наночастиц в смазке, при которой достигается максимальная эффективность снижения износа, составляет 10 масс. % независимо от природы металлов.

Полученные результаты в данной работе хорошо согласуются с литературными данными, т.е. присутствие высокодисперсных частиц металлов в смазочных основах оказывает значительное влияние на их триботехнические характеристики, причем эти характеристики существенно зависят от их природы и количества [9].

Эксперименты для определения величины нагрузки сваривания (P_c , характеризующей предельную работоспособность смазки, и индекса задира (I_z) были проведены при времени испытания $t=10$ с и варьировании нагрузки в интервале 300–2800 Н. Полученные

результаты показали, что для всех исследуемых образцов введение наночастиц металлов в концентрации 10 масс. % приводит к существенному увеличению величины P_c (рис. 5А) и I_z (рис. 5Б). Эффект снижения износа наиболее выражен в области больших нагрузок, именно в диапазоне от 1000 до 2500 Н. Таким образом, применение присадок наночастиц металлов позволяет повысить противоизносные и противозадирные свойства смазки ЦИАТИМ-201, а также ее предельную работоспособность.

Отмечено, что порядок увеличения величин P_c и I_z соответствует следующему ряду добавок наночастиц металлов: $Ni \rightarrow Cu \rightarrow Zn \rightarrow Cd \rightarrow (Cu+Zn+Ni+Cd)$. Максимальные значения P_c и I_z наблюдаются при добавлении частиц всех четырех металлов (2,5% Cu + 2,5% Zn + 2,5% Ni + 2,5% Cd) в сочетании, что почти в 2 раза превышает значения для образца ЦИАТИМ-201 без присадок.

В то же время, изучение антифрикционных свойств образцов смазочных композиций, проведенное на приборе Tribotester T-11, выявило снижение коэффициента трения (на поверхностях пары трения) при добавлении в смазку металлических наночастиц как в условиях малых ($V_1=0,1 \text{ м} \times \text{с}^{-1}$, рис. 6А), так и больших ($V_2=0,5 \text{ м} \times \text{с}^{-1}$, рис. 6Б) скоростей скольжения при нагрузке $P=0,8 \text{ МПа}$.

Установлено, при малой величине скорости скольжения $V_1=0,1 \text{ м} \times \text{с}^{-1}$ присутствие металлических частиц нанометровым диаметром позволяет значительно снизить коэффициент трения на поверхностях пары трения (кроме образца №2 – с добавлением частиц Ni) по сравнению с образцом основы (без присадок). В то время при большем значении скорости скольжения $V_2=0,5 \text{ м} \times \text{с}^{-1}$ эффективность в снижении коэффициента трения наблюдается для всех образцов смазочных композиций (в том числе и образца с добавлением никеля), причем этот эффект выражен сильнее

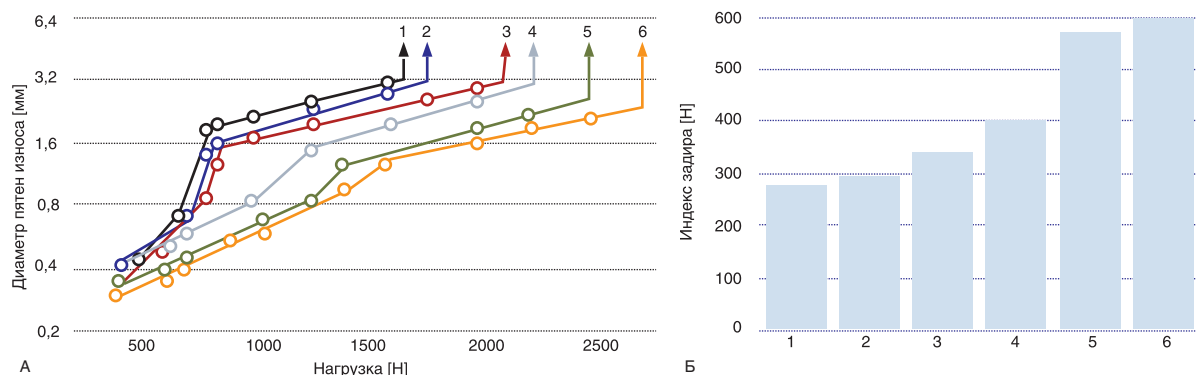


РИС. 5.

Результаты определения (А) величины нагрузки сваривания P_c и (Б) индекса задира I_z для образцов смазочных композиций: 1 – ЦИАТИМ-201; 2 – ЦИАТИМ-201+10% Ni; 3 – ЦИАТИМ-201+10% Cu; 4 – ЦИАТИМ-201+10% Zn; 5 – ЦИАТИМ-201+10% Cd; 6 – ЦИАТИМ-201+ 2,5% Cu + 2,5% Zn + 2,5% Ni + 2,5% Cd

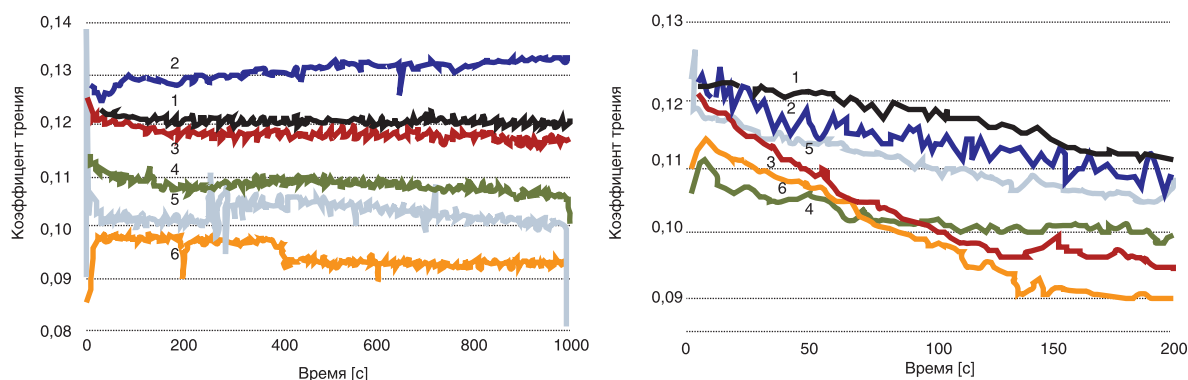


РИС. 6.

Зависимость коэффициента трения от времени при испытаниях со скоростями скольжения (А) $V_1=0,1 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ и (Б) $V_2=0,5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$: 1 – ЦИАТИМ-201; 2 – ЦИАТИМ-201 + 10% Ni; 3 – ЦИАТИМ-201 + 10% Cu; 4 – ЦИАТИМ-201 + 10% Cd; 5 – ЦИАТИМ-201 + 10% Zn; 6 – ЦИАТИМ-201 + 2,5% Cu + 2,5% Zn + 2,5% Ni + 2,5% Cd

по сравнению со случаем малой скорости скольжения. В обоих случаях как при малой, так и большой скорости скольжения наибольшая эффективность достигается при применении комбинации четырех металлов (Cu+Zn+Ni+Cd).

Итоговые результаты триботехнических испытаний для образцов смазочных композиций, созданных на основе пластичной смазки ЦИАТИМ-201, приведены в таблице 1.

Высокая эффективность в снижении износа, задира и трения при введении металлических наночастиц Cu, Zn, Cd в качестве присадок к смазке ЦИАТИМ-201 в снижении износа и задира, вероятно, обусловлена особенностями природы, морфологией и размерными характеристиками частиц металлов.

Положительное влияние присадок металлических частиц, особенно в случаях добавления УПД Cu, Zn, Cd, было отмечено в ряде предыдущих работ. Использование микронных частиц порошков металлов,

таких как Sn, Cu, Pb, а также медных сплавов (латуни, бронзы) и других пластичных соединений, включая Zn-Sn, Cd-Sn и Bi-Pb-Sn-Cd, в качестве металлоплакирующих компонентов способствует улучшению и регулированию противоизносных, противозадириных и антифрикционных характеристик базовых смазочных материалов [10–12].

Показано, что добавление УПД Cd в смазку ЦИАТИМ-201 в основном приводит к более заметным положительным эффектам по сравнению с применением УПД металлов Cu, Zn, Ni. Одним из факторов, обуславливающих такие различия, может являться пластинчатая форма частиц порошка кадмия (рис. 3), которая отличает его от остальных порошков никеля, меди и цинка. Именно такая форма способствует формированию в начальной стадии приработки наноструктурированного слоя на поверхности стали, что способствует снижению коэффициента трения и повышению износостойкости элементов трибосо-

ТАБЛИЦА 1.

Результаты триботехнических испытаний для образцов смазочных композиций на основе смазки ЦИАТИМ-201

Образец	Испытание по ГОСТ 9490-75						Испытание на Т-11	
	D _н , мм					I _з , Н	P _с , Н	Средний коэффициент трения
								V, м·с ⁻¹
								0,1 0,5
ЦИАТИМ-201	0,77					277	1646	0,120 0,118
	Содержание порошков по массе, %					Содержание порошков по массе: 10 %		
	2,5	5,0	7,5	10	12,5			
ЦИАТИМ-201 + Ni	0,58	0,54	0,57	0,53	0,60	294	1744	0,130 0,115
ЦИАТИМ-201 + Cd	0,55	0,50	0,49	0,46	0,56	590	2323	0,108 0,102
ЦИАТИМ-201 + Cu	0,68	0,66	0,65	0,62	0,72	337	2067	0,118 0,105
ЦИАТИМ-201 + Zn	0,65	0,64	0,63	0,60	0,70	403	2195	0,103 0,113
ЦИАТИМ-201 + (Cu+Zn+Ni+Cd)	0,45					600	2646	0,094 0,098

пряжения. Применение металлических частиц пластинчатой формы способствует самопроизвольному образованию стоп пластин на поверхностях трения, благодаря чему формируется и постоянно обновляется защитная металлическая пленка на протяжении всего процесса трения. В случае с кадмием такая пленка уже на начальном этапе эксплуатации приобретает многослойную наноструктуру, ориентированную перпендикулярно поверхности трения, что обеспечивает ее высокую эффективность в снижении износа, задира и трения.

С другой стороны, добавление частиц никеля в ЦИАТИМ-201 оказывается менее эффективным по сравнению с использованием частиц других металлов. Вероятнее всего, это связано с различием в их размерах. Известно, что размер частиц существенно влияет на их взаимодействие со смазкой, а также с трущимися поверхностями. Более того, размер частиц металлических добавок оказывает влияние на механические свойства смазочной основы (прочность, твердость, вязкость), а следовательно, и на ее триботехнические характеристики.

Зависимость интенсивности изнашивания от размера твердых частиц, введенных в смазку, может быть описана различными эмпирическими и теоретическими формулами, учитывающими условия трения, свойства частиц и характеристики контактирующих материалов [2, 23, 26]. Анализ этих формул позволяет предложить общий вид данной зависимости:

$$I = k \times d^n \times P^m \cdot v^l$$

где, I – интенсивность изнашивания; k – коэффициент, зависящий от свойств смазки, природы введенных твердых частиц и материалов поверхностей пар трения; d – средний диаметр твердых частиц в смазке; P – контактное давление; v – скорость скольжения; n, m, l – эмпирические или теоретические показатели, определяемые экспериментально.

Часто наблюдается нелинейная зависимость интенсивности изнашивания от размера частиц. При этом имеются 3 случая:

1) при слишком малых частицах ($d \rightarrow 0$) их воздействие незначительно;

2) при увеличении d до определенного значения ($d < d_0$) интенсивность изнашивания возрастает. Увеличение размера частиц приводит к их менее равномерному распределению в зоне фрикционного контакта, что снижает их эффективность во физико-химическом взаимодействии со смазочной средой и поверхностями трения. Это объясняется тем, что крупным частицам труднее проникать и заполнять макро-, микро- и нанонеровности, трещины и поры. В результате процесс формирования защитных металлических пленок на поверхностях трения затрудняется, что приводит к росту коэффициента трения и износа.

Кроме того, чрезмерно крупные частицы могут выступать в роли абразивных элементов, дополнительно увеличивая износ.

3) при дальнейшем росте ($d > d_0$) частицы уже во все не могут проникать в контактную зону трения, что снижает износ.

Экспериментально показано, что d_0 принимает значения порядка от десятков до несколько сотен микрон. В нашем исследовании выявлено, что размеры частиц находятся в нанометровом диапазоне, т.е. $d < d_0$, и, следовательно, с увеличением размеров частиц присадок интенсивность изнашивания контактных поверхностей возрастает.

Следует также отметить, что частицы никеля обладают формой, близкой к сферической, что затрудняет процесс формирования пограничного слоя на поверхности трения. В результате, по сравнению с частицами УДП Cu, Zn и Cd, влияние порошка никеля на триботехнические свойства смазочной основы оказывается менее значительным [9].

Экспериментальные данные подтверждают, что применение комбинации наночастиц всех 4 металлов (Ni+Cu+Zn+Cd) в качестве присадок к смазке ЦИАТИМ-201 более эффективно, чем использование индивидуальных металлов. Данный эффект также отмечен в ряде опубликованных работ, в которых показано, что использование сплавов металлов в качестве присадок к смазочным материалам приводит к значительному снижению коэффициента трения в узлах трения машин, компенсирует износ стальных деталей, а также улучшает микрогеометрию их рабочих поверхностей за счет заполнения углублений микронеровностей пластичными металлическими частицами. В работе Белого Д.М. и др. [1] установлено, что модифицирование смазки Литол-24 порошками сплава Bi-Pb-Sn снижает интенсивность линейного изнашивания пары трения в 8–10 раз. Результаты исследований [6, 27] показывают, что добавление наночастиц сплавов и соединений металлов в базовые масла способствует формированию тонкой пленки на поверхности трения, благодаря чему значительно уменьшаются интенсивность изнашивания, коэффициент трения, а также склонность поверхности деталей к усталостному разрушению.

Значительное повышение противоизносных, противозадирных и антифрикционных свойств, а также предельной нагрузочной способности смазки ЦИАТИМ-201 в данном случае, вероятно, обусловлено тем, что комбинация переходных металлов в ее составе при фрикционном взаимодействии способствует кластеро- и комплексообразованию между металлами и лигандами органического окружения смазочной среды. Это приводит к формированию на поверхности трения сложных по химическому и элементному составу металлической (сервоитной) и металлоорганической (серфинг) пленок переноса. Эти

пленки, как правило, обладают большей прочностью и стабильностью по сравнению с пленками индивидуальных металлов, что обеспечивает их повышенную эффективность в снижении износа и задира на более длительный срок.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом электроосаждения в сочетании с УЗ-обработкой были синтезированы УДП металлов Cu, Zn, Ni, Cd из отработанных электродов аккумуляторов, размеры которых находятся в нанометровом диапазоне. На основе триботехнических исследований смазочных композиций на базе смазки ЦИАТИМ-201 с добавками полученных металлических частиц сделаны следующие выводы:

1. Применение УДП металлов Cu, Zn, Ni, Cd и их комбинаций позволяет улучшить триботехнические свойства смазочной основы почти в 2 раза. Оптимальная концентрация добавок металлических частиц в смазку составляет 10 масс. %.

2. Эффективность снижения износа, задира и трения на поверхностях пар трения наиболее заметно проявляется при высоких нагрузках (1000–2500 Н) и повышенных скоростях скольжения.

3. На основе проведенного сравнительного анализа триботехнических исследований установлено, что форма и размер частиц УДП металлов оказывают значительное влияние на характеристики смазочных композиций. Показано, что наночастицы кадмия, обладающие пластинчатой морфологией и высокой дисперсностью, способствуют заметному улучшению триботехнических свойств смазки ЦИАТИМ-201. В то же время частицы никеля, имеющие округлую форму и склонность к образованию крупных микронных агрегатов, демонстрируют наименьшую эффективность.

4. Установлено, что введение в смазку ЦИАТИМ-201 комбинации УДП всех четырех металлов (Cu+Zn+Ni+Cd) является более эффективным по сравнению с использованием отдельных металлических присадок. Это связано с формированием на поверхности трения более сложных и устойчивых пленок переноса, обеспечивающих улучшенные триботехнические характеристики.

На основе полученных результатов представляется перспективной разработка смазочных материалов с улучшенными антифрикционными и противоизносными характеристиками, работающих в условиях трения и высоких нагрузок. Их применение может способствовать снижению затрат на ремонт и техническое обслуживание, увеличению эксплуатационного ресурса, а также повышению надежности и экономической эффективности работы технического оборудования и транспортных средств.

Х. НГУЕН, А.А. КУЖАРОВ, В.М. НГУЕН
ВЛИЯНИЕ ПРИСАДОК МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
НАНОЧАСТИЦ (Cu, Zn, Ni, Cd)
НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
СМАЗКИ ЦИАТИМ-201

ЛИТЕРАТУРА

1. БЕЛЫЙ Д.М., Кусочкин В.Я., Мазур И.П. Триботехнические аспекты применения сверхпластичных сплавов // Влияние среды на взаимодействие твердых тел при трении: Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции. Днепропетровск, 1981. С. 41–42.
2. БЕРЕЗНЯКОВ А.И. Управление интенсивности изнашивания трибоузла при наличии частиц загрязнений в смазочном материале // Трение и износ. 1996. Т. 17. № 1. С. 48–49.
3. ГАРКУНОВ Д.Н. Триботехника. М.: Машиностроение, 1985. 424 с.
4. ГАРКУНОВ Д.Н. Научные открытия в триботехнике. Эффект безызносности. Водородное изнашивание металлов. М.: Изд-во МСХА, 2004. 384 с.
5. ГАРКУНОВ Д.Н. Некоторые закономерности износа металлов в условиях сухого и граничного трения и пути его уменьшения // Тр. III Всесоюз. конф. по трению и износу в машинах. 1960. Т. 2. С. 26–34.
6. ЗОЛОТУХИНА Л.В., ФРИШБЕРГ И.В. и др. Влияние ультрадисперсных порошков сплавов металлов на стальные поверхности при трении // Славянотрибо-5: Наземная и аэрокосмическая трибология-2000. СПб.: ВМПАВТО-РГТА, 2000. С. 239–241.
7. КАРПОВ А.С., Ключников В.И., Станчев Д.И. Влияние видов смазки и условий испытаний на износ различных материалов // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2008. № 6. С. 30–31.
8. КРАГЕЛЬСКИЙ И.В. Исследование явления избирательного переноса при трении // Вестн. РАН. 1975. № 1. С. 25–32.
9. КУЖАРОВ А.С., ОНИЩУК Н.Ю. Металлоплакирующие смазочные материалы // Долговечность трущихся деталей машин. 1988. № 3. С. 96–143.
10. КУСОЧКИН В.Я., Лившиц Б.А. Влияние типа смазки на рабочие характеристики закрытых подшипников качения // Трение и износ. 1984. Т. 5. № 5. С. 882–886.
11. ЛАПТЕВА В.Г., Каплина В.Ф. Исследование износостойкости пар трения сталь-сталь при использовании медь- и оловосодержащих присадок к смазочным маслам // Долговечность трущихся деталей машин. М.: Машиностроение, 1990. Т. 5. С. 58–65.
12. Пластичная смазка. А.с. № 518517. СССР С10М 5/12 // Бюллетень изобретений и открытий. 1976. № 23.
13. РАНСКИЙ А.П., Диденко Н.А. и др. Механизм избирательного переноса с точки зрения резонансного потенциала по Нечаеву // Наук. пр. ВНТУ. 2010. № 4. С. 1–4.
14. СИМАКОВ Ю.С., Михин Н.М. О физико-химических процессах при избирательном переносе // Физ.-хим. механика контактного взаимодействия и фреттинг-коррозия. Киев, 1973. С. 21–22.

15. ШЕПЕЛЬ А.Я. Механизм избирательного износа // Физ.-хим. Механика материалов. 1979. Т. 15. № 1. С. 73–74.
16. BIRLEANU C., PUSTAN M., CIOAZA M. ET AL. Effect of TiO₂ nanoparticles on the tribological properties of lubricating oil: an experimental investigation // Sci. Rep. 2022. Vol. 12. P. 5201.
17. CHEN S., LIU W., YU L. Preparation of DDP-coated PbS nanoparticles and investigation of the antiwear ability of the prepared nanoparticles as additive in liquid paraffin // Wear. 1998. Vol. 218. N 2. P. 153–158.
18. HERNANDEZ B.A. ET AL. CuO, ZrO₂ and ZnO nanoparticles as antiwear additive in oil lubricants // Wear. 2008. Vol. 265. N 3. P. 422–428.
19. ILIE F. Studies and researches concerning the tribological behaviour of friction couple functioning with selective transfer // Tribol. Int. 2006. Vol. 39. N 8. P. 774–780.
20. KUZHAROV A.S., MARCHAK R. ET AL. Tribological manifestations of self-organizations in system “brass-glycerol-steel” // Friction and Wear. 1996. Vol. 17. N 1. P. 113–122.
21. KUZHAROV A.S., BULGAREVICH S.B. ET AL. Molecular Mechanisms of Self-Organization in Friction. P. 6. The Analysis of Thermodynamic Features of Tribochemical Reactions // Friction and Wear. 2007. Vol. 28. No. 2. P. 212–216.
22. KUZHAROV A.S., BURLAKOVA V.E. ET AL. Triboelectrochemistry of effect “zero-wear” during friction. Mechanic of formation of boundary layer on steel in self-organization tribosystem “copper-glycerol-steel” // Friction and Wear. 1998. Vol. 19. N 6. P. 768–778.
23. LUDEMA K.C. Wear of Materials: Proceedings of the Ninth International Conference on Wear of Materials, San Francisco, CA, April 13-16, 1993. Elsevier Science Ltd., 1993.
24. PADGURSKAS J., RUKUIZA R., PROSYČEVAS I., KREIVAITIS R. Tribological properties of lubricant additives of Fe, Cu and Co nanoparticles // Tribol. Int. 2013. Vol. 60. N 4. P. 224–232.
25. SINGH A.P., DWIVEDI R.K., SUHANE A. Influence of nano particles on the performance parameters of lube oil – a review // Materials Research Express. 2021. Vol. 8. P. 102001.
26. STACHOWIAK G., BATCHELOR A.W. Engineering Tribology (4th ed.). Butterworth-Heinemann, 2013.
27. ZHANG Y.D., YAN J.SH., YU L.G., ZHANG P.Y. Effect of nano-Cu lubrication additive on the contact fatigue behavior of steel // Tribol. Lett. 2010. Vol. 37. N 2. P. 203–207.
- Scientific and Technical Conference. Dnepropetrovsk, 1981:41–42. (In Russian).
2. BEREZNYAKOV A.I. Control of the wear rate of a tribosystem in the presence of contaminant particles in the lubricant. *Trenie i iznos*. 1996;17(1):48–49. (In Russian).
3. GARKUNOV D.N. Tribotechnics. Moscow: Mashinostroenie, 1985:424. (In Russian).
4. GARKUNOV D.N. Scientific discoveries in tribotechnics. Wearlessness effect. Hydrogen wear of metals. Moscow: MSHA Publishing House, 2004:384. (In Russian).
5. GARKUNOV D.N. Some patterns of metal wear under dry and boundary friction and ways to reduce it. *Tr. III Vsesoyuz. konf. po treniyu i iznosu v mashinakh*. 1960;2:26–34. (In Russian).
6. ZOLOTUKHINA L.V., FRISHBERG I.V., KHARLAMOV V.V., KISHKOPAROV N.V., DUDKO P.P., KUZMIN V.N. Influence of ultrafine metal alloy powders on steel surfaces under friction. *Slavyanotribo-5: Nazemnaya i aerokosmicheskaya tribologiya-2000*. St. Petersburg: VMPAVTO-RGTA, 2000:239–241. (In Russian).
7. KARPOV A.S., KLYUCHNIKOV V.I., STANCHEV D.I. Influence of lubricant types and test conditions on the wear of various materials. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmkh*. 2008;(6):30–31. (In Russian).
8. KRAGELSKY I.V. Investigation of the phenomenon of selective transfer in friction. *Vestnik RAN*. 1975;(1):25–32. (In Russian).
9. KUZHAROV A.S., ONISHCHUK N.YU. Metal-plating lubricants. *Dolgoveshchnost' trushchikhsya detalei mashin*. 1988;(3):96–143. (In Russian).
10. KUSOCHKIN V.YA., LIVSHITS B.A. Influence of lubricant type on the performance characteristics of sealed rolling bearings. *Trenie i iznos*. 1984;5(5):882–886. (In Russian).
11. LAPTEVA V.G., KAPLINA V.F. Investigation of wear resistance of steel-steel friction pairs using copper- and tin-containing additives in lubricating oils. *Dolgoveshchnost' trushchikhsya detalei mashin*. 1990;5:58–65. (In Russian).
12. Plastichnaya smazka. A.S. No. 518517. USSR C10M 5/12. *Byulleten' izobreteniy i otkrytiy*. 1976;(23). (In Russian).
13. RANSKY A.P., DIDENKO N.A., TITOV T.S., BEZVOZYUK I.I. Mechanism of selective transfer from the perspective of Nechaev's resonance potential. *Nauk. pr. VNTU*. 2010;(4):1–4. (In Russian).
14. SIMAKOV YU.S., MIKHIN N.M. On physicochemical processes in selective transfer. *Fiz.-khim. mekhanika kontaktnogo vzaimodeystviya i fretng-korroziya*. Kyiv, 1973:21–22. (In Russian).
15. SHEPEL A.YA. Mechanism of selective wear. *Fiz.-khim. mekhanika materialov*. 1979;15(1):73–74. (In Russian).
16. BIRLEANU C., PUSTAN M., CIOAZA M. ET AL. Effect

REFERENCES

1. BELYI D.M., KUSOCHKIN V.YA., MAZUR I.P. Tribotechnical aspects of using superplastic alloys. The influence of the environment on the interaction of solid bodies during friction: Abstracts of the All-Union

- of TiO₂ nanoparticles on the tribological properties of lubricating oil: an experimental investigation. *Sci. Rep.* 2022;12:5201.
17. CHEN S., LIU W., YU L. Preparation of DDP-coated PbS nanoparticles and investigation of the antiwear ability of the prepared nanoparticles as additive in liquid paraffin. *Wear.* 1998;218;2:153–158.
 18. HERNANDEZ B.A. ET AL. CuO, ZrO₂ and ZnO nanoparticles as antiwear additive in oil lubricants. *Wear.* 2008;265;3:422–428.
 19. ILIE F. Studies and researches concerning the tribological behaviour of friction couple functioning with selective transfer. *Tribol. Int.* 2006;39;8:774–780.
 20. KUZHAROV A.S., MARCHAK R. ET AL. Tribological manifestations of self-organizations in system “brass-glycerol-steel”. *Friction and Wear.* 1996;17;(1):113–122.
 21. KUZHAROV A.S., BULGAREVICH S.B. ET AL. Molecular Mechanisms of Self-Organization in Friction. P. 6. The Analysis of Thermodynamic Features of Tribochemical Reactions. *Friction and Wear.* 2007;28;(2):212–216.
 22. KUZHAROV A.S., BURLAKOVA V.E. ET AL. Triboelectrochemistry of effect “zero-wear” during friction. Mechanism of formation of boundary layer on steel in self-organization tribosystem “copper-glycerol-steel”. *Friction and Wear.* 1998;19;(6):768–778.
 23. LUDEMA K.C. Wear of Materials: Proceedings of the Ninth International Conference on Wear of Materials, San Francisco, CA, April 13–16, 1993. Elsevier Science Ltd., 1993.
 24. PADGURSKAS J., RUKUIZA R., PROSYČEVAS I., KREIVAITIS R. Tribological properties of lubricant additives of Fe, Cu and Co nanoparticles. *Tribol. Int.* 2013;60;(4):224–232.
 25. SINGH A.P., DWIVEDI R.K., SUHANE A. Influence of nano particles on the performance parameters of lube oil – a review. *Materials Research Express.* 2021;8: 102001.
 26. STACHOWIAK G., BATCHELOR A.W. Engineering Tribology (4th ed.). Butterworth-Heinemann, 2013.
 27. ZHANG Y.D., YAN J.SH., YU L.G., ZHANG P.Y. Effect of nano-Cu lubrication additive on the contact fatigue behavior of steel // *Tribol. Lett.* 2010;37;(2):203–207.
-
- Нгуен Хиунь,**
к.т.н., исследователь Технологического института
 ☎ 1 Ван Хой, Ханой 100000, Вьетнам,
 1 Van Hoi, Hanoi 100000, Vietnam,
 тел.: +84981570986, e-mail: Nguyenhuynh1586@gmail.com
- Кужаров Андрей Александрович,**
к.т.н., доцент Донского государственного технического университета
 ☎ 344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1,
 344003, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1,
 тел.: +7 (863) 273-86-34, e-mail: aakuzharov@donstu.ru
- Нгуен Ван Минь,**
к.т.н., исследователь Технологического института
 ☎ 1 Ван Хой, Ханой 100000, Вьетнам,
 1 Van Hoi, Hanoi 100000, Vietnam,
 тел.: +84976248788, e-mail: Chinhnhan88@gmail.com

УДК 504.05

DOI: 10.52531/1682-1696-2025-25-3-53-59

Научная статья

EDN: GTIYRI

ИННОВАЦИОННАЯ ПРИРОДОПОДОБНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ АКТИВАЦИИ САМОЗАРАСТАНИЯ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ

**С.В. Остакх, О.С. Остакх,
А.В. Головенко, А.А. Смирнова**
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕР-
СИТЕТ НЕФТИ И ГАЗА (НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
ИМЕНИ И.М. ГУБКИНА, МОСКВА,
РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

Целью настоящей работы является исследование природо-
подобной технологии активации самозарастания нефте-
загрязненных земель с использованием утилизируемого
бурового шлама в качестве компонента почвоподобных
смесей для проведения рекультивационных работ. Понима-
ние механизмов и специфики процесса самозарастания даст
возможность разработать меры по его ускорению и таким
образом сократить или исключить запланированный ком-
плекс мероприятий по рекультивации земель. Реализация
рассмотренной природоподобной технологии совместно с
методом гидропосева показывает, что адаптированные под
почвенно-климатические особенности применения фитос-
меси способны обеспечивать зарастание на нефтезагрязнен-
ных территориях, в том числе на откосах с углом до 45°.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: буровой шлам, почвоподобная смесь,
природоподобная технология, рекультивация, самозараста-
ние

ВВЕДЕНИЕ

Природные системы обладают потенциалом для
самозарастания и восстановления загрязненных тер-
риторий. Феномен самозарастания основан на есте-
ственных процессах почвообразования, в которых
биологические, химические и физические процессы
взаимодействуют с образованием новых слоев почвы
с течением времени [2].

Интенсивность развития негативного воздействия
техногенного нефтяного загрязнения на геологиче-
скую среду не спадает и обуславливается спецификой
территориальных природно-экономических систем
[9]. Так, при разработке нефтяных и газовых место-
рождений образуется буровой шлам (основной вид

Original article

INNOVATIVE NATURE-LIKE TECHNOLOGY FOR ACTIVATING SELF-OVERGROWING OF OIL-CONTAMINATED LANDS

**S.V. OSTAKH, O.S. OSTAKH,
A.V. GOLOVENKO, A.A. SMIRNOVA**
NATIONAL UNIVERSITY OF OIL AND GAS
“GUBKIN UNIVERSITY”, MOSCOW, RUSSIAN
FEDERATION

The purpose of this work is to study a nature-like technology
for activating self-overgrowing of oil-contaminated lands using
recyclable drilling sludge as a component of soil-like mixtures
for reclamation work. Understanding the mechanisms and spe-
cifics of the self-overgrowing process will make it possible to de-
velop measures to accelerate it and thus reduce or eliminate the
planned set of measures for land reclamation. The implemen-
tation of the considered nature-like technology in conjunction
with the hydraulic seeding method shows that phytomixtures
adapted to the soil and climatic features of the application are
capable of overgrowing in oil-contaminated areas, including on
slopes with an angle of up to 45°.

KEYWORDS: drill sludge, soil-like compound, nature-like tech-
nology, recultivation, self-overgrowing

нефте содержащих отходов бурения) и загрязняется
прилегающая территория. Появляется необходимость
развития подходов по утилизации нефтесодержащего
бурового шлама и технологий рекультивации в резуль-
тате нефтегазодобычи нарушенных земель.

Технология подготовки и использования материа-
лов для рекультивации указанных земель включает ути-
лизацию бурового шлама, состоящего из выбуренной
горной породы и отработанного бурового раствора,
в технологический грунт («техногрунт»), который
представляет собой искусственно созданные смеси,
используемые в строительстве, формировании ис-
кусственных геохимических барьеров и рекультива-
ции земель [1, 3, 7] или искусственный плодородный
грунт («экогрунт») [4].

Экогрунт, состоящий из органических и минераль-
ных компонентов, применим в качестве почвоподоб-

ной смеси для биологического этапа рекультивации и ландшафтного дизайна для улучшения качества почвы.

Комбинированное использование экогрунта и техногрунта для рекультивации нарушенных земель и активации самозарастания может быть стимулировано применением технологии гидропосева для улучшения свойств почвы и повышения возможной всхожести семян.

Целью настоящей работы является исследование природоподобной технологии активации самозарастания нефтезагрязненных земель с использованием утилизируемого бурового шлама в качестве почвоподобных смесей при проведении рекультивационных работ.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На первом этапе экспериментальных исследований проводился подбор наиболее эффективного состава грунтовой смеси для прорастания растений специальной фитосмеси.

Отличие между экогрунтом и техногрунтом состоит в том, что в техногрунте не используется торф, а песок увлажняется раствором гуминового компонента «Био-ГМК» [8].

Для экогрунта и техногрунта было подготовлено семь вариантов смесей (табл. 1, 2), в которые были посажены по десять семян овса (*Avena sativa*) для проведения контактного фитотестирования.

Полив смесей экогрунта и техногрунта проводился 0,1% раствором гуминового компонента. Содержание

бурового шлама принималось одинаковое в формируемых грунтовых смесях. На 6 и 10 день оценивалась всхожесть семян и выражали их содержание в процентном соотношении через специализированный показатель – «энергия прорастания» (рис. 1).

Фитотестирование основано на способности семян адекватно реагировать на экзогенное химическое воздействие путем изменения интенсивности прорастания корней, что позволяет длину последних принять за показатель тест-функции.

Принцип оценки степени опасности и уровня безвредности отхода базируется на экспериментально установленной зависимости величины фитотоксического эффекта от разведения водного экстракта.

Определение параметров фитотоксичности (LimR и ER_{50}), осуществляется с использованием статистической модели [5] по формуле 1:

$$\log R = -mE_T + b, \quad (1)$$

где: E_T – фитоэффект, установленный в эксперименте; R – разведение экстракта отхода; m – коэффициент соответствующий каждому значению фитоэффекта; b – коэффициент регрессии.

Наиболее эффективные составы смесей представлены в таблицах (табл. 3, табл. 4).

Данные смеси – экогрунт Э3 и техногрунт Т7 – использованы при реализации стендового варианта экспериментальных исследований с использованием «Фитоблока».

ТАБЛИЦА 1.

Состав смесей экогрунта

Компоненты, %об.	Смеси экогрунта						
	Э1	Э2	Э3	Э4	Э5	Э6	Э7
Бентонит	1	2	3	4	5	6	7
Диатомит	7	6	5	4	3	2	1
Глауконит	10	10	10	10	10	10	10
Торф	20	20	20	20	20	20	20
Песок речной	31	31	31	31	31	31	31
Буровой шлам	31	31	31	31	31	31	31

ТАБЛИЦА 2.

Состав смесей техногрунта

Компоненты, %об.	Смеси техногрунта						
	Т1	Т2	Т3	Т4	Т5	Т6	Т7
Бентонит	1	2	3	4	2	3	4
Диатомит	4	3	2	1	4	3	2
Глауконит	10	10	10	10	10	10	10
Песок речной	42,5	42,5	42,5	42,5	42	42	42
Буровой шлам	42,5	42,5	42,5	42,5	42	42	42

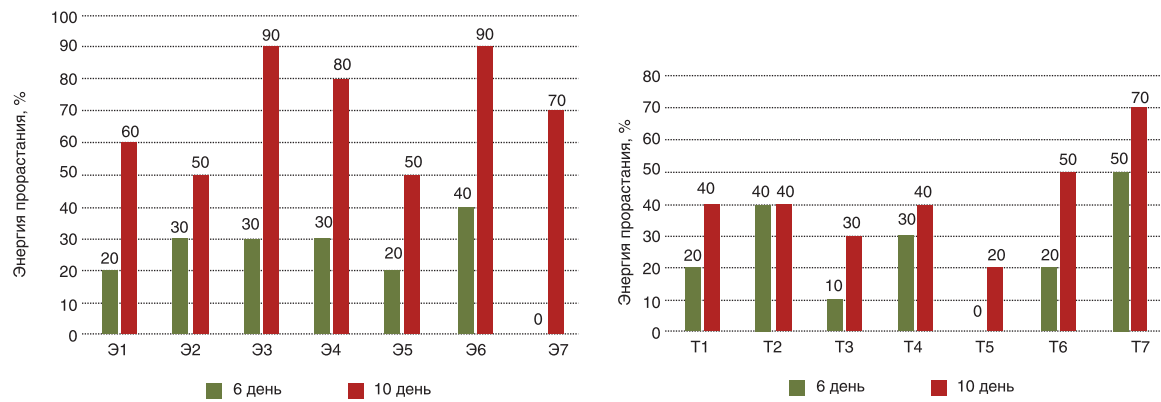


Рис. 1. Оценка энергии прорастания овса в смесях экогрунта и техногрунта на 6 и 10 день

Таблица 3. Состав смеси экогрунта

Экогрунт (Э3), компоненты, %об.					
Торф	Буровой шлам	Бентонит	Глауконит	Диатомит	Песок
20	31	3	10	5	31

Таблица 4. Состав смеси техногрунта

Техногрунт (Т7), компоненты, %об.				
Буровой шлам	Бентонит	Глауконит	Диатомит	Песок
42	4	10	2	42

На втором этапе экспериментальных исследований была апробирована технология самозарастания нарушенных территорий с использованием стенда «Фитоблок», в котором совмещаются методы и технологии почвообразования и гидропосева.

Слой техногрунта, состоящего из бурового шлама, представляет собой вязкую смесь, что способствует благоприятному росту корней растений [6].

Для выявления конкурентоспособности и применимости технологии рекультивации методом послойного наложения техногрунта в качестве подложки и экогрунта, имеющих в своем составе буровой шлам, проводились параллельные серии испытаний по самозарастанию с использованием почвоподобной смеси и с использованием грунтовой смеси усредненного состава используемых компонентов (состав приведен в таблице 5).

Для улучшения свойств почв и способности к самозарастанию при наличии загрязнений техногенного характера, обусловленного размещением бурового шлама, была применена технология гидропосева.

Исследовались следующие два варианта наполнения (задействия) «Фитоблока»:

- 1) использование техногрунта Т7, экогрунта Э3, гидропосева раствором Г1 и травосмеси;
 - 2) использование техногрунта Т7, грунтовой смеси, гидропосева раствором В1 и травосмеси.
- По характеристике «Энергия прорастания» показательны результаты на 10 день проведения эксперимента. Среди тестируемых смесей экогрунта лучшими показателями энергии прорастания обладают смеси Э3, Э4 и Э6.
- Среди смесей техногрунта лучшие показатели энергии прорастания встречаются у смесей Т6 и Т7.
- Энергию прорастания больше 50% смог достичь лишь техногрунт Т7.

Таблица 5. Состав грунтовой смеси

Компоненты	Содержание в грунтовой смеси, %об.
Глауконит	10
Торф	10
Песок	20
Грунт	60

Проведено контактное фитотестирование овса в смесях экогрунта и техногрунта на 10 и 15 день. Отбиралось по два растения овса из каждого стенда, измерялись такие показатели, как: длина и масса стебля, длина корня и общая фитомасса. На 10 день были выявлены наилучшие смеси экогрунта и техногрунта по следующим показателям: энергия прорастания, средняя длина стебля, общая фитомасса (рис. 2–5).

К отобранным смесям экогрунта относятся: Э3, Э4, Э6. Техногрунты Т4, Т7 также получили сопоставимые хорошие результаты. Далее на 15 день в грунтовых смесях проводилось контактное фитотестирование. В результате обнаружены смеси экогрунта и техногрунта, которые показали наилучшие результаты фитотестирования. В предварительных испытаниях по самозарастанию в техногрунте с использованием вышеуказанных растворов для гидропосева были зафиксированы положительные результаты по самозарастанию территории и определены оптимальные составы растворов В1 и Г1 (табл. 6).

На рисунке 6 изображен «Фитоблок» в стендовом исполнении с использованием грунтовой смеси и раствора В1 для гидропосева. На рисунке 7 изображен «Фитоблок» в стендовом исполнении с использова-

нием почвоподобной смеси из бурового шлама и раствора Г1 для гидропосева. Индексами «в», «ср», «н» обозначены верхний, средний и нижний слой грунта, соответственно. Алгоритм проведения стендового варианта «Фитоблок» состоит в следующем:

- укладывание песчаный подстилающий слой (ППС);
- укладывание щебеночно-песчаной смеси (ЩПС);
- покрытие песчаным подстилающим слоем щебеночно-песчаную смесь;
- формирование слоя техногрунта Т7 (Т);
- 1) укладывание слоя экогрунта Э3 (Э(в), Э(ср), Э(н)). Слой Э(ср) формирует откос под углом 45°; 2) укладывание слоя грунтовой смеси (Гр(в), Гр(ср), Гр(н)). Слой Гр (ср) формирует откос под углом 45°.

Проведение гидропосева раствором Г1 на слое Э(ср); раствор В1 наносится на слой Гр(ср); также проводится посев травосмеси на слои: (Э(в), Э(н), Гр(в), Гр(н)).

Полив «Фитоблока» осуществлялся 0,1% раствором «Био-ГМК». Для стимулирования активного роста побегов травосмеси использовалась филаментная лампа с физиологически активной радиацией, в спек-

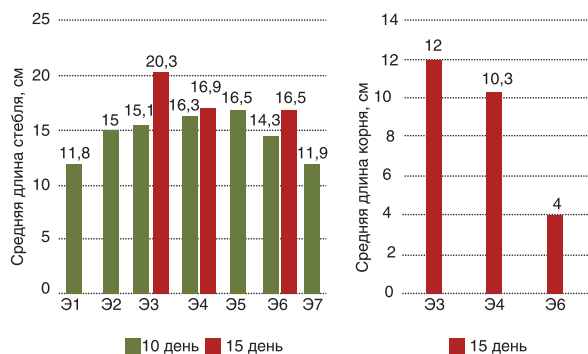


Рис. 2.

Средняя длина стебля и корня овса в смесях экогрунта на 10 и 15 день

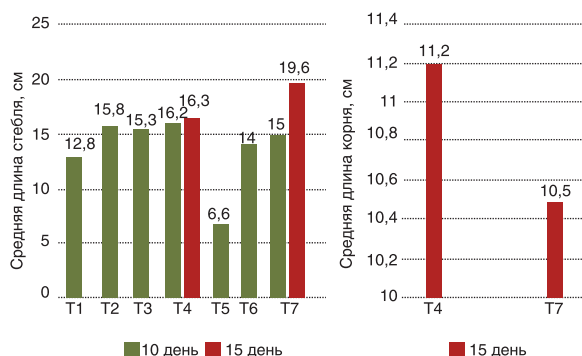


Рис. 4.

Средняя длина стебля и корня овса в смесях техногрунта на 10 и 15 день

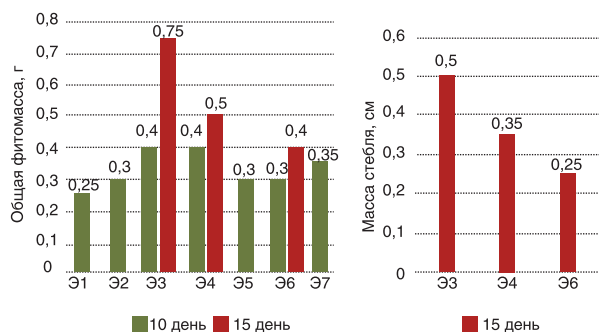


Рис. 3.

Общая фитомасса и масса стебля овса в смесях экогрунта на 10 и 15 день

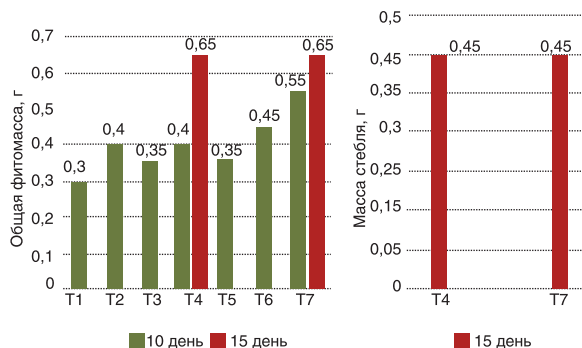


Рис. 5.

Общая фитомасса и масса стебля овса в смесях техногрунта на 10 и 15 день

ТАБЛИЦА 6.

Состав растворов для гидропосева –В1 и Г1

Компоненты, %масс.						
Бентонит	1% р-р «Био-ГМК»	Гуаровая камедь	Травосмесь	Глауконит	Вода	Мульчирующий материал
Раствор В1						
7,92	9,90	0,59	1,19	0,99	79,41	–
Раствор Г1						
0,43	0,87	0,09	2,16	1,3	86,5	8,65

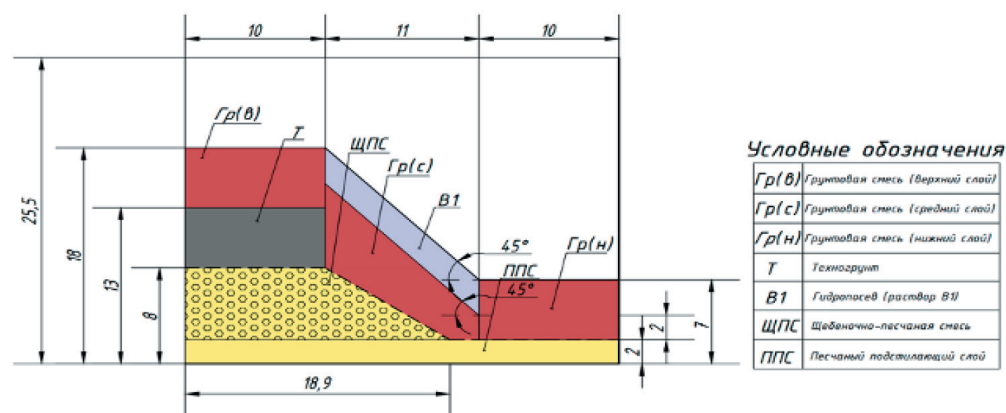


РИС. 6.

Стенд «Фитоблок» с использованием грунтовой смеси и раствора В1

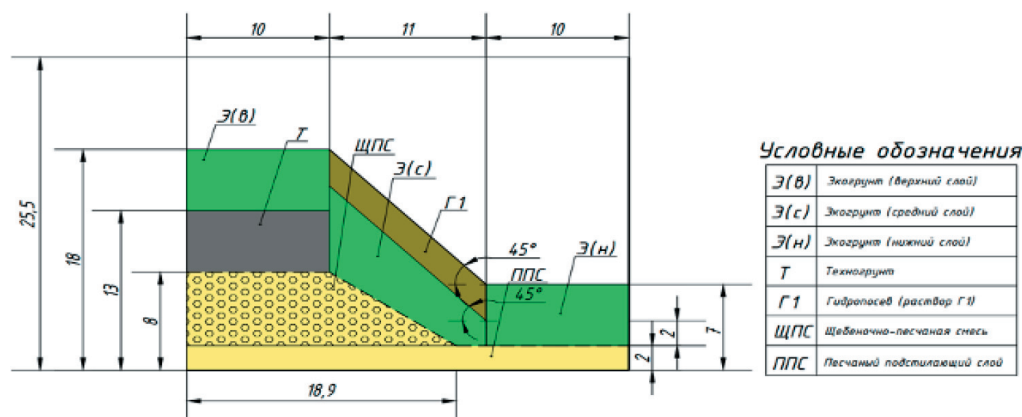


РИС. 7.

Стенд «Фитоблок» с использованием почвоподобной смеси из бурового шлама и раствора Г1

тре которой доминируют синие и красные оттенки (380–800 нм).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Общий вид «Фитоблока» в первый день экспериментальных исследований представлен на рисунке 8.

В стендовом варианте «Фитоблока» на 10 день на наиболее характерных участках для проведения кон-

тактного фитотестирования отбиралась травосмесь из слоев: экогрунта (Э(в), Э(н)), грунтовой смеси (Гр(в), Гр(н)). Также отбиралась травосмесь для реализации метода гидропосева из слоя откоса:

- экогрунта Э(ср) с использованием раствора Г1;
- грунтовой смеси Гр(ср) с использованием раствора В1.

Результаты фитотестирования представлены (рис. 9, рис. 10, рис. 11).

На нижнем слое экогрунта и верхнем слое грунтовой смеси травосмесь дала всходы сравнительно одинакового качества.

Послойное использование экогрунта показало результаты лучше по средней длине стебля, общей фитомассе и массе стебля (7,5 см; 1,1 г; 0,9 см) в отличие от грунтовой смеси (7,4 см; 1,05 г; 0,7 см). Однако средняя длина корня в слое экогрунта составила 1,8 см по сравнению с грунтовой смесью 3,1 см.

Результаты фитотестирования показали, что для всхожести на верхнем слое экогрунта не хватало вла-



Рис. 8.

Общий вид фитоблока в исходном состоянии

С.В. ОСТАХ, О.С. ОСТАХ,
А.В. ГОЛОВЕНКО, А.А. СМЕРНОВА
ИННОВАЦИОННАЯ ПРИРОДОПОДОБНАЯ
ТЕХНОЛОГИЯ АКТИВАЦИИ САМОЗАРАСТАНИЯ
НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ

ги, а на нижнем слое грунтовой смеси, наоборот, влага была в избытке.

При использовании метода гидропосева травосмесь наносилась на откосы под углом 45°.

На откосе с экогрунтом, где использовался раствор для гидропосева Г1, травосмесь показала результаты лучше по средней длине стебля и общей фитомассе (8,6 см; 1,1 г;) в отличие от откоса с грунтовой смесью, где использовался раствор для гидропосева В1 (6,8 см; 0,95 г). Однако средняя длина корня на среднем слое откоса с грунтовой смесью (Г(ср)) составила 2,8 см по сравнению средним слоем экогрунта (Э(ср)) – 3,6 см.

Установлено, что средняя длина стебля и общая фитомасса выше у травосмеси, проросшей на экогрунте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение последовательного послойного размещения техногрунта и экогрунта с содержанием утилизируемого нефтесодержащего бурового шлама более 30% эффективно для восстановления нарушенных земель.

Фитотестирование с использованием семян овса в стендовом варианте «Фитоблока» позволила показать сравнительно прорастание семян на экогрунте и на стандартной грунтовой смеси.

Реализация рассмотренной природоподобной технологии совместно с методом гидропосева показывает, что адаптированные под почвенно-климатические

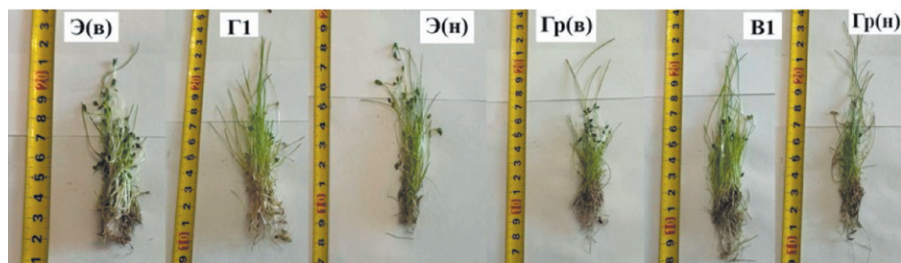


Рис. 9.

Проведение замеров длины стебля и корня травосмеси «Фитоблока» на 10 день

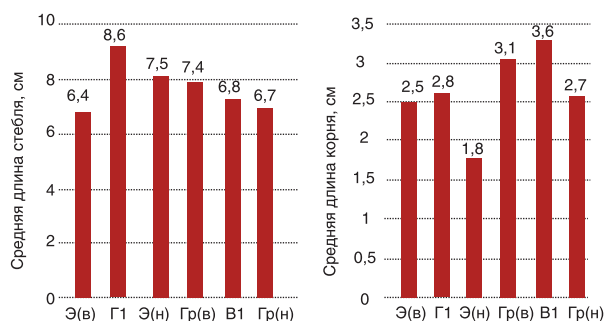


Рис. 10.

Средняя длина стебля и корня травосмеси в «Фитоблоке» на 10 день

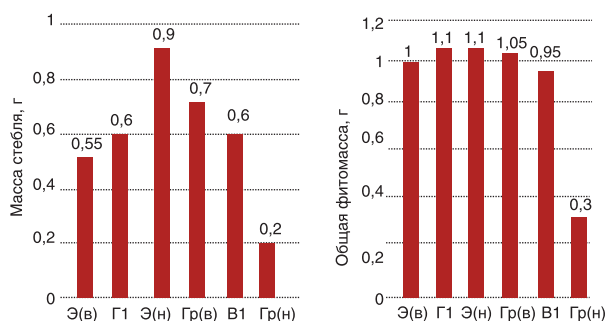


Рис. 11.

Общая фитомасса и масса стебля травосмеси в «Фитоблоке» на 10 день

особенности применения фитосмеси способны обеспечивать зарастание на нефтезагрязненных территориях, в том числе на откосах с углом до 45°.

Полученная почвоподобная смесь применима для рекультивации земель различных типов: техногенных участков с поврежденным почвенно-растительным покровом, нефтезагрязненных территорий, а также участков, занятых кустовыми площадками, амбарами и прилегающих к ним территорий.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Воронкевич С.Д.** Техническая мелиорация грунтов. М.: Академическая наука, 2015. 244 с.
2. **Голеусов П.В.** Формирование почв в условиях самозарастания отвалов вскрышных горных пород // Успехи современного естествознания. 2004. № 11. С. 40–41.
3. **Забелина А.В., Молодкина Н.Р., Сергиенко О.И.** Особенности применения технологического грунта, полученного методом компостирования твердых компостирования твердых коммунальных отходов // Московский экономический журнал. 2022. №6. С. 293–301.
4. **Кузнецова Л.М., Михайлов А.В., Селеннов В.Г.** Искусственные почвенные грунты // Вестник ТГПУ. 2009. №3. С. 145–149.
5. МР 2.1.7.2297-07. Обоснование класса опасности отходов производства и потребления по фитотоксичности. 2007. 30 с.
6. **Остах О.С.** Эколого-экономический потенциал технологий утилизации буровых шламов. дис. канд. техн. наук: 03.02.08. М.: ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина». 2021. 184 с.
7. **Папини М.П., Остах С.В., Остах О.С., Кушелева В.С.** Научно-техническая база восстановления нефтезагрязненных почв и прилегающей геолого-технологической системы нефтегазодобычи // Вестник РАЕН. 2017. Т. 17. № 5. С. 61–65.
8. **Саргин Б.В., Остах С.В., Батарагин В.М., Шурьгина Е.Г., Деньгаев А.В.** Патент № 2763428 С1 Российская Федерация, МПК B09C 1/10, C02F 3/34, C12N 1/20. Препарат для биодegradации нефти и нефтепродуктов (Нефтедеструктор): № 2021115256; заявл. 27.05.2021; опубл. 29.12.2021. Заявитель ООО «Научно-производственное объединение «Волга-Экология».
9. **Степанько Н.Г.** Анализ ресурсных возможностей и экологически ограничений развития различных территориальных природно-экономических систем // Успехи современного естествознания. 2016. № 9. С. 178–184.

REFERENCES

1. **VORONKEVICH S.D.** Technical melioration of soils. Moscow: Akademicheskaya nauka. 2015:244. (In Russian).
2. **GOLEUSOV P.V.** Soil formation in the conditions of self-overgrowth of overburden dumps. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2004;(11):40–41. (In Russian).
3. **ZABELINA, A.V., MOLODKINA N.R., SERGIENKO O.I.** Features of application of technological soil obtained by composting solid municipal waste. *Moskovskij ekonomicheskij zhurnal*. 2022;(6):293–301. (In Russian).
4. **KUZNETSOVA L.M., MIKHAILOV A.V., SELENNOV V.G.** Artificial soil grounds. *Vestnik TGPU*. 2009;(3):145–149. (In Russian).
5. МР 2.1.7.2297-07. Justification of hazard class of production and consumption wastes by phytotoxicity. 2007:30. (In Russian).
6. **OSTAKH O.S.** Ecological and economic potential of technologies of drilling cuttings utilisation dis. PhD in Engineering: 03.02.08. FGAOU VO 'Gubkin University'. Moscow. 2021:184. (In Russian).
7. **PAPINI M.P., OSTAKH S.V., OSTAKH O.S., KUSHEEVA V.S.** The scientific and technical basis for development of recovery strategy for oil-polluted soils and adjacent geology-technological system in oil and gas production. *Vestnik RAEN*. 2017;(17),5:61–65. (In Russian).
8. **SARGIN B.V., OSTAKH S.V., BATARAGIN V.M., SHURYGINA E.G., DENGAEV A.V.** Patent №. 2763428 C1 Russian Federation, MPK B09C 1/10, C02F 3/34, C12N 1/20. Preparation for biodegradation of oil and oil products (Neftedestruktor): № 2021115256; appl. 05.27.2021; publ. 12.29.2021. Applicant LLC Scientific and Production Association 'Volga-Ecology'. (In Russian).
9. **STEPANKO N.G.** Analysis of resource opportunities and environmental constraints of development of various territorial natural-economic systems. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2016;(9):178–184. (In Russian).

Остах Сергей Владимирович,

к.т.н., доцент кафедры промышленной экологии Российского государственного университета нефти и газа (национального исследовательского университета) имени И.М. Губкина

Остах Оксана Сергеевна,

к.т.н., доцент кафедры промышленной экологии Российского государственного университета нефти и газа (национального исследовательского университета) имени И.М. Губкина

Головенко Андрей Витальевич,

студент Российского государственного университета нефти и газа (национального исследовательского университета) имени И.М. Губкина

✉ e-mail: andreigo1ovenko@yandex.ru
тел.: +7(915) 082-88-86

Смирнова Анастасия Алексеевна,

студент Российского государственного университета нефти и газа (национального исследовательского университета) имени И.М. Губкина

✉ 119991, г. Москва, проспект Ленинский, д. 65, корп. 1,
119991, Moscow, Leninsky Ave., 65-1

УДК 553.98(075.8)

DOI: 10.52531/1682-1696-2025-25-3-60-66

Научная статья

EDN: GXKSXO

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОГАЗОХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЫ ПЛАСТА С ЦЕЛЬЮ УДАЛЕНИЯ АСФАЛЬТОСМОЛОПАРАФИНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ДЛЯ УСЛОВИЙ АШАЛЬЧИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ)

В.А. Милютина,
А.О. Малахов,
Н.А. Козырев,
Е.В. Маратканова,
А.Ф. Шагеев, С.А. Долгих
КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ)
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, МОСКВА,
РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

В статье изложены результаты лабораторного тестирования термохимического состава (ТХС), применяемого в качестве основного рабочего агента в технологии термогазозимического воздействия (ТГХВ) на призабойную зону пласта (ПЗП) с целью ее очистки от асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО).

Объектом для возможного применения ТГХВ с тестируемым ТХС является Ашальчинское месторождение. Основная цель проведенного исследования – оценка эффективности применения ТХС для обработки ПЗП с целью удаления существующих АСПО. В результате фильтрационных испытаний было установлено, что применение ТХС позволяет увеличить проницаемость кольтатированного образца, а проведенный SARA-анализ нефти выявил положительное изменение ее компонентного состава – увеличение содержания насыщенных и ароматических углеводородов. Полученные результаты подтверждают эффективность термохимического метода для борьбы с АСПО. Также в работе предложены направления модернизации технологии: добавление ПАВ и других присадок к ТХС для повышения эффективности обработки.

Ключевые слова: термогазохимическое воздействие, кольтатация, АСПО, бинарные смеси, тепловые методы

Original article

APPLICATION OF A THERMOCHEMICAL FLUID FOR NEAR-WELLBORE ZONE TREATMENT TO REMOVE ASPHALTENE- RESIN-PARAFFIN DEPOSITS UNDER ASHALCHINSKOYE FIELD CONDITIONS (LABORATORY MODELING)

V.A. MILYUTINA, A.O. MALAKHOV,
N.A. KOZYREV, E.V. MARATKANOVA,
A.F. SHAGEEV, S.A. DOLGIKH
KAZAN (VOLGA REGION) FEDERAL
UNIVERSITY, MOSCOW, RUSSIAN FEDERATION

This paper presents the results of laboratory testing of a Thermochemical Fluids (TCF), employed as the primary active agent in the Thermo-Chemical Treatment (TCT) technology for the remediation of the near-wellbore zone from Asphaltene-Resin-Paraffin Deposits (ARPD).

The Ashalchinskoye field was identified as the target reservoir for the potential application of TCT utilizing the tested TCF. The primary objective of this study was to evaluate the efficacy of the TCF for the near-wellbore zone treatment aimed at removing existing ARPD. Core flood experiments on damaged core samples demonstrated that TCF application significantly enhanced permeability. Subsequent SARA (Saturates, Aromatics, Resins, Asphaltenes) analysis of the crude oil revealed a favorable shift in its compositional profile, characterized by an increased proportion of saturated and aromatic hydrocarbons. The obtained results confirm the effectiveness of the thermochemical method for ARPD mitigation. Furthermore, the study proposes potential enhancements to the technology, including the addition of surfactants and other additives to the TCF formulation to improve treatment performance.

KEY WORDS: Thermo-Chemical Treatment (TCT), Permeability Impairment, Asphaltene-Resin-Paraffin Deposits (ARPD), Binary Mixtures, Thermal EOR

ВВЕДЕНИЕ

Проблема отложения асфальтосмолопарафиновых веществ (АСПВ) в призабойной зоне пласта (ПЗП) на сегодняшний день является весьма актуальной для большинства нефтедобывающих регионов РФ [1].

Метод термогазохимического воздействия на ПЗП известен давно и применяется при эксплуатации добывающих скважин на месторождениях парафинистых и высокосмолистых нефтей, к которым можно отнести и Ашальчинское месторождение. Суть метода заключается в закачке рабочего агента (как правило одного или нескольких химических реагентов) в скважину с дальнейшим его активированием. Результат активации – экзотермическая реакция с высокоскоростной генерацией горячих газов. В результате продолжительного протекания реакции происходит прогрев призабойной зоны, что позволяет удалять органические отложения со ствола скважины и ПЗП [4].

В качестве рабочего агента как в РФ, так и за рубежом наиболее часто закачивают так называемые бинарные смеси (БС) [7–9]. БС – это водные растворы двух неорганических солей, в которые в зависимости от условий применения добавляется инициатор или ингибитор химической реакции. Одним из компонентов бинарной смеси чаще всего является нитрат аммония, также используется хлорид аммония, но его использование осложняется возможностью образования хлорсодержащих веществ в пластовых условиях. Вторым компонентом БС является нитрит натрия. Выбор этих солей определен коммерческой доступностью и высоким показателем теплового эффекта реакций.

Стоит также отметить, что данная технология не требует специальной подготовки штата и дополнительной комплектации флота, реализация технологии возможна с применением основного состава флота для кислотной обработки скважины.

В рамках программы опытно-промышленного внедрения предприятием ООО «НТРС-КОМИ» с 2014 по 2016 г. технологии термогазохимического воздействия (ТГХВ) БС была успешно реализована на 48 скважинах Усинского месторождения [6]. По результатам проведенных работ в 2017 г. руководство ПАО «ЛУКОЙЛ» приняло решение о переводе технологии ТГХВ БС в промышленное применение. Прирост добычи наблюдается в 95% случаев обработки. В среднем дебит по жидкости увеличивается в 2,5 раза. Дебит по нефти увеличивается в 2 раза.

Фильтрационные исследования, проводимые в ТатНИПИнефть [6], показали, что закачка термохимических композиций значительно увеличивает коэффициент вытеснения высоковязкой нефти – с 23,8 до 33,8%. В процессе реализации технологии произошло улучшение фильтрационно-емкостных характеристик приквасинной зоны пласта в результате ее очистки от асфальтосмолистых отложений, а также увеличение подвижности высоковязкой нефти.

Кокарев М.О. и Мирский А.В. [3] авторы рекомендуют перед проведением метода гидро- и газоразрыва для пластов с ухудшенными коллекторскими свойствами выполнять ТГХВ с целью удаления отложений со стенок скважины в интервале перфорации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Ранее, в патенте [5] был проведен ряд экспериментов по определению оптимальной концентрации термохимического состава (ТХС) на основе нитрита натрия и нитрата аммония при равномольном их соотношении. Эксперименты выполнялись в реакторе высокого давления объемом 300 мл. Исследовались составы с концентрацией в диапазоне от 30 до 70%. В реактор помещался ТХС с определенной концентрацией, далее автоклав герметизировался, производилось удаление воздушной прослойки путем продувки азотом, после чего реактор нагревался до 85°C. В процессе нагрева записывались значения температуры и давления непосредственно внутри реактора. Результаты изменения температуры и давления при различных концентрациях ТХС приведены на рисунках 1 и 2. Согласно результатам, опубликованным в патенте, оптимальной концентрацией ТХС является 60%. Далее все эксперименты проводились с концентрацией 60%.

Исследования разделены на две части. Первая часть включает фильтрационные эксперименты с закачкой ТХС и ее термической активацией. Вторая часть – это сравнение SARA-анализа нефти до и после воздействия ТХС.

Проведение фильтрационных испытаний позволило понять эффективность удаления кольматаций, вызванных АСПВ.

В данной работе проводилось оценка эффективности удаления кольматационных отложений путем сравнения исходной проницаемости, проницаемости с кольматацией и проницаемости после реагирования ТХС. Была взята исходная нефть Ашальчинского месторождения, плотность и вязкость равны 840 кг/м³ и 2667 сПз соответственно. Кольматация проводилась путем добавления и последующего растворения АСПВ в исходной нефти. Для этого на лабораторной установке «Холодный стержень» были сделаны тесты по оценке оптимальной дозировки АСПВ, результаты которого приведены ниже (табл. 1, 2).

Анализ данных демонстрирует стабилизацию массы отложений при дозировке АСПВ 1,5 г на 50 мл нефтяного образца. Дальнейшее увеличение количества реагента не приводит к значимому изменению концентрации АСПВ.

Таким образом, для тестирования на фильтрационной установке была отобрана нефть без искусственно добавленного АСПВ (исходная нефть), а также нефть с добавленным АСПВ (с дозировкой 1,5 г на 50 мл нефти). Зависимость вязкости при изменении скорости сдвига представлена ниже (рис. 3).

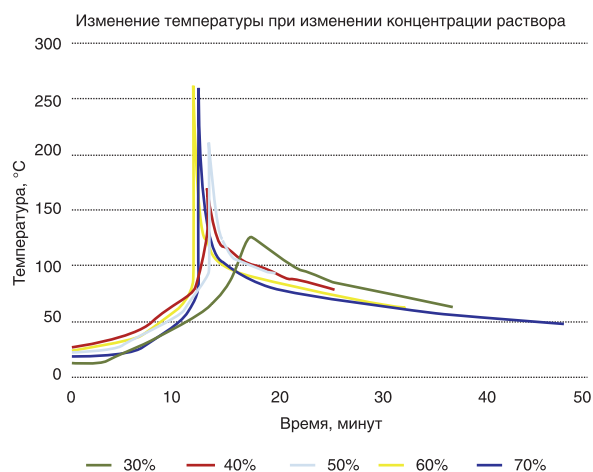


Рис. 1.

График изменения температуры при нагреве и реагировании ТХС с различными концентрациями

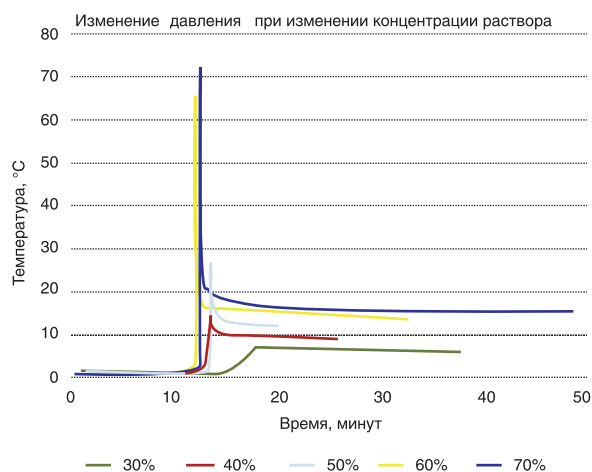


Рис. 2.

График изменения давления при нагреве и реагировании ТХС с различными концентрациями

Таблица 1.

Результаты поиска оптимальной дозировки АСПВ в нефть Ашальчинского м/я

Реагент	Холостой	АСПВ	АСПВ	АСПВ	АСПВ	АСПВ
Дозировка	0 г	0,5 г	1 г	1,5 г	2 г	2,5 г
Фото						

ТАБЛИЦА 2.

Результаты поиска оптимальной дозировки АСПВ в нефть Ашальчинского м/я

Дозировка г/г	Название реагента	Вес осадка, г	Уд. масса АСПВ, мкг/мм ²	Увеличение, %
Холостой (0)	АСПВ	0,1150	33,09	0,00
0,5		0,1342	38,61	16,70
1		0,2704	77,80	135,13
1,5		0,6728	193,59	485,04
2		0,6793	195,46	490,69
2,5		0,6854	197,21	496,00

Значения вязкости нефти без АСПВ и с АСПВ вышли на плато при скорости сдвига 1,12 с-1 и 1,12 с-1 соответственно. При данной скорости нефть начала проявлять свойства ньютоновской жидкости, то есть значение вязкости более не зависело от скорости

сдвига. Таким образом, значение вязкости пластовой исходной нефти и нефти с АСПВ после выхода значений на плато составило 2667,5 сП и 5319,575 сП соответственно.

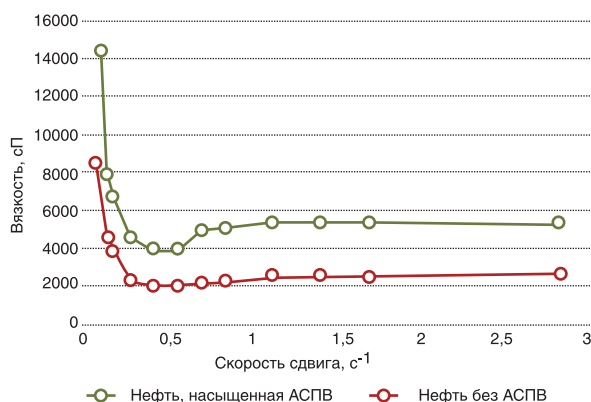


РИС. 3.
Зависимость вязкости от скорости сдвига двух нефтей

ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Для имитации естественных потоков флюидов была собрана схема, имеющая две противонаправленные ветки для закачки реагентов, которые можно отсечь друг от друга кранами. Схема установки состоит из насосов, поршневых цилиндров, кранов, датчиков давления, регулятора давления, системы регистрации и выглядит следующим образом (рис. 4). Длина насыпной модели составляет 15 см, диаметр – 3,2 см.

Таким образом было смитировано 2 потока флюидов. Направление 1 – движение нефти по направлению пласт-скважина: цилиндр с нефтью → насыпная модель (вход №1) → насыпная модель (выход №1) → регулятор давления. Направление 2 – движение ТХС по направлению скважина-пласт: буферная емкость с БС → насыпная модель (выход №2) → насыпная модель (вход №2) → регулятор давления.

В эксперименте использовались нефти Ашальчинского месторождения: стандартная нефть (нефть 1), другая же насыщенная АСПВ (нефть 2).

В данном исследовании в образовании поровой среды использовалась насыпная модель. Она состояла из кварцевого песка и маршалита. Насыпная модель насыщалась пластовой водой, после чего насыщалась нефтью без АСПО не менее 2 поровых объемов (п. о.). Далее система консервировалась для старения насыпной модели в течение 8–16 часов. По завершении старения определялась фазовая проницаемость на трех скоростях прокачки: 0,4 мл/мин, 0,3 мл/мин, 0,2 мл/мин. Расчет фазовой проницаемости (k_0) производился по формуле:

$$k_0 = \frac{q \mu L}{\Delta p F},$$

где k_0 – фазовая проницаемость по агенту, мД; q – объемный расход, мл/мин; μ – вязкость агента, сП; L – длина насыпной модели, см; Δp – перепад давления на конец закачки, бар; F – площадь поперечного сечения насыпной модели, см².

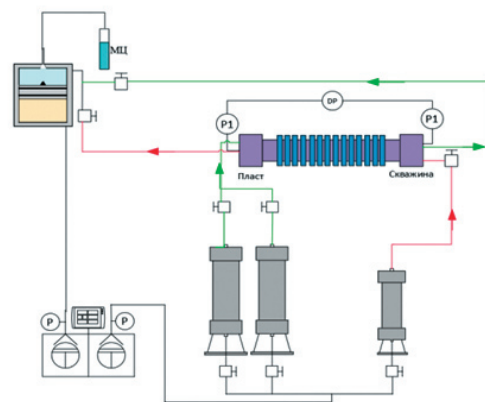


РИС. 4.
Схема фильтрационного эксперимента

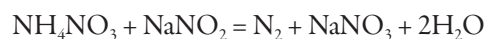
После получения базовой характеристики производилось замещение нефти 1 нефтью 2. Нефть с АСПВ из-за высокой вязкости предварительно подогревалась до 60°C и прокачивалась с расходом 0,4 мл/мин. Прокачивалось не менее 2 п.о. Получив эффект кольтматации от нефти 2 снова определялась фазовая проницаемость по нефти 1.

Для устранения кольтматации проводилась обработка насыпной модели бинарной смесью. Для этого перекрывалась ветка №1 и открывалась ветка №2.

Буферная емкость заполнялась необходимым количеством бинарной смеси (30 мл) и подогревалась до 80°C для активации реакции БС.

По завершении реакции БС и нормализации давления в системе ветка №2 перекрывалась и открывалась ветка №1. По ветке №1 производилось третье измерение фазовой проницаемости по нефти 1.

В исследовании использовался ТХС на основе нитрита натрия и нитрата аммония, уравнение реакции приведено ниже:



Проводился SARA-анализ для отслеживания изменения фракционного состава нефти до и после воздействия бинарным составом. Нефть разделяли согласно ГОСТ 32269–2013 на четыре фракции: насыщенные углеводороды, ароматические соединения, смолы и асфальтены.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Искусственно созданная кольтматация АСПВ сильно снизила проницаемость образца по нефти. В результате реакции ТХС, а именно воздействия продуктами реакции – горячими газами на закольтматированный образец, удалось добиться улучшенных показателей проницаемости, что подтверждает эффективность применения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ИСПЫТАНИЯ

На завершении прокачки нефти 1 на трех скоростях были получены следующие перепады: 1481 мД, 1431 мД и 1420 мД (табл. 3). Средняя проницаемость составила 1444 мД. Изменение перепада давления показано на рисунке 5.

По завершении коьматации перепады давления при оценке фазовой проницаемости увеличились, что говорит об успешной искусственной коьматации поровых каналов и составила 26,16 бар, 19,35 бар и 13,05 бар на скоростях 0,4 мл/мин, 0,3 мл/мин и 0,2 мл/мин соответственно (табл. 4). График изменения перепада давления показан на рисунке 6.

ТХС, помещенный в буферную емкость, в результате реакции смог повысить перепад давления в 492,95 бар, что существенно могло повлиять на устранение коьматации (рис. 7).

На завершающей стадии перепады оказались ниже двух предыдущих измерений и составили 18,06 бар, 13,86 бар и 9,43 бар на скоростях 0,4 мл/мин, 0,3 мл/мин и 0,2 мл/мин соответственно (табл. 5). Профиль изменения перепада давления показан на рис. 8. Снижение перепада давления после термохимической реакции свидетельствует о восстановлении фильтрационных каналов.

Эффект коьматации снизил проницаемость примерно на 15,85%. Термохимическая реакция позволила не только улучшить проницаемость по нефти относительно проницаемости с коьматацией на 40,96%, но и улучшить проницаемость по обычной нефти на 18,56%. Результаты фильтрационного исследования приведены в таблице 6. Стоит отметить, что ТХС показал успешность в устранении коьматаций, вызванных добавлением АСПВ. Однако модель не полностью имитирует пластовые условия. В дальнейшем планируется проведение экспериментов на керновых моделях для верификации результатов.

SARA-АНАЛИЗ

Термохимическая реакция ввиду выделения тепла и генерации газа смогла повлиять на компонентный состав нефти и АСПО. Результат SARA-анализа до и после воздействия приведен на рис. 9.

Таким образом, результаты SARA-анализа до и после применения БС подтверждают ее технологическую эффективность в модификации состава нефти и снижении содержания проблемных компонентов. Это позволяет рекомендовать данный метод для обработки высоковязких нефтей с повышенным содержанием АСПВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам фильтрационных испытаний ТХС для устранения коьматации можно сделать вывод, что данный способ очистки ствола скважины и ПЗП эффективен. Проницаемость по нефти у закоьмати-

В.А. МИЛЮТИНА, А.О. МАЛАХОВ, Н.А. КОЗЫРЕВ, Е.В. МАРАТКАНОВА, А.Ф. ШАГЕЕВ, С.А. ДОЛГИХ
ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОГАЗОХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЫ ПЛАСТА С ЦЕЛЬЮ УДАЛЕНИЯ АСФАЛЬТОСМОЛАПАРИНОВЫХ ОТАЖЕНИЙ ДЛЯ УСЛОВИЙ АШАЛЬЧИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ)

ТАБЛИЦА 3.

Проницаемость по нефти на стадии насыщения нефтью без АСПО

Расход, мл/мин	Средний перепад давления после стабилизации, бар	Средняя проницаемость после стабилизации, мД
0	0	0
0,4	21,34	1481,57
0,3	16,56	1431,77
0,2	11,13	1420,33
Усредненное значение проницаемости для Нефти 1 (без добавления АСПВ)		1444,55

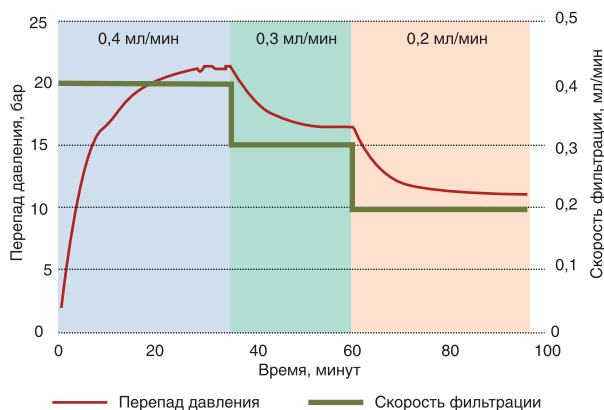


РИС. 5.

Перепад давления на стадии насыщения нефтью без АСПО

ТАБЛИЦА 4.

Изменение перепада давления при закачке нефти с АСПО

Расход, мл/мин	Средний перепад давления после стабилизации, бар	Средняя проницаемость после стабилизации, мД
0	0	0
0,4	26,16	1208,36
0,3	19,35	1225,05
0,2	13,05	1211,71
Усредненное значение проницаемости для Нефти 1 (после коьматации Нефтью 2)		1215,04

рованного образца после термохимической реакции выросла на 40,96%, а у образца без искусственного засорения АСПВ прирост составил 18%.

По результатам SARA-анализа можно сделать вывод, что БС в процессе реакции воздействует на

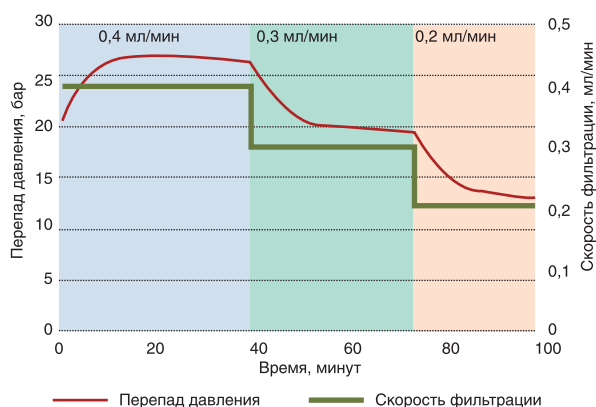


РИС. 6.

Перепад давления на стадии насыщения нефтью с АСПО

ТАБЛИЦА 5.

Изменение перепада давления после реакции ТХС

Расход, мл/мин	Средний перепад давления после стабилизации, бар	Средняя проницаемость после стабилизации, мД
0	0	0
0,4	18,06	1750,76
0,3	13,86	1710,79
0,2	9,43	1676,39
Усредненное значение проницаемости для Нефти 1 (после реакции ТХС)		1712,64

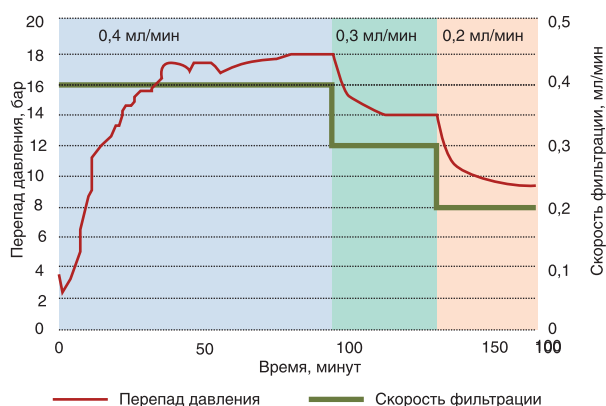


РИС. 8.

Перепад давления после реагирования ТХС

нефть, изменяя ее компонентный состав. Так было зарегистрировано увеличение насыщенных углеводородов на 2,2% и ароматических на 2,6%.

Термохимическая обработка с использованием БС показала удовлетворительный результат по удалению АСПО. Рекомендуется модернизация состава:

В.А. МИЛЮТИНА, А.О. МАЛАХОВ, Н.А. КОЗЫРЕВ, Е.В. МАРАТКАНОВА, А.Ф. ШАГЕЕВ, С.А. ДОЛГИХ
ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОГАЗОХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЫ ПЛАСТА С ЦЕЛЮЮ УДАЛЕНИЯ АСФАЛТОСМОЛОПАРАФИНОВЫХ ОТАЖЕНИЙ ДЛЯ УСЛОВИЙ АШАЛЬЧИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ)

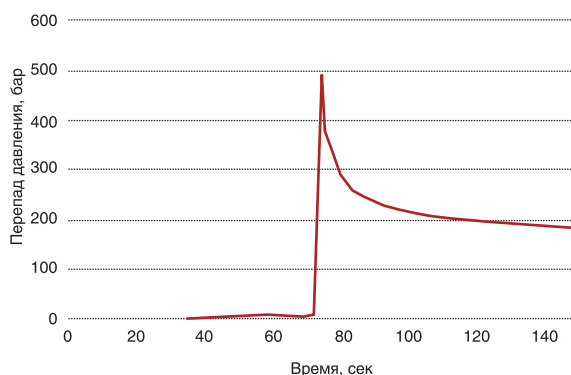


РИС. 7.

Изменение давления в процессе термохимической реакции БС

ТАБЛИЦА 6.

Значения проницаемости на трех стадиях и их сравнение

Расход, мл/мин	ФП1, мД	ФП2, мД	ФП3, мД	ФП2/ФП1, %	ФП3/ФП1, %	ФП3/ФП2, %
0,4	1481,57	1208,36	1750,75	81,55	118,16	144,88
0,3	1431,77	1225,04	1710,79	85,56	119,48	139,65
0,2	1420,33	1211,71	1676,3	85,31	118,02	138,34
Среднее	1444,55	1215,04	1712,64	84,14	118,56	140,96

Где ФП1 – фазовая проницаемость по нефти 1 в исходном состоянии, ФП2 – фазовая проницаемость по нефти 1 после создания кольматации, ФП3 – фазовая проницаемость по нефти 1 после обработки термохимической системой (ТХС), ФП2/ФП1 – отношение фазовой проницаемости после кольматации к исходной проницаемости, ФП3/ФП1 – отношение фазовой проницаемости после воздействия ТХС к исходной проницаемости, ФП3/ФП2 – отношение фазовой проницаемости после воздействия ТХС к проницаемости в кольматированном состоянии.



РИС. 9.

Результаты SARA анализа до и после воздействия ТХС

добавление ПАВ-компонентов и прочих присадок в виде диспергаторов для повышения эффективности.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета (ПРИОРИТЕТ-2030)».

ЛИТЕРАТУРА

1. Аглиуллин М.М., Абдуллин В.М., Абдуллин М.М., Курмаев С.А. Разработка и внедрение термобарохимического метода увеличения продуктивности нефтегазовых скважин // Нефтегазовое дело. 2004. № 2. С. 7–13.
2. Бурко В.А. Компания ООО "НТРС-Коми" о термобарохимическом воздействии на призабойную и удаленную зоны нефтяных скважин // Бурение и нефть. 2018. № 2. С. 46–49.
3. Кокарев М.О., Мирский А.В. Разработка технологии повышения нефтеотдачи пластов на поздней стадии эксплуатации месторождения // Булатовские чтения. 2017. № 2. С. 109–113.
4. Еникеев М.Д., Латыпов Р.С., Камалов Ф.Х. Методы и технологии испытания и воздействия на ПЗП // НТВ «Каротажник». 2000. № 66.
5. Пат. 2812385 (РФ).
6. Хисаметдинов М.Р., Нуриев Д.В., Ризванов Р.З., Федоров А.В., Ганеева З.М. Разработка и испытания модифицированной технологии термохимического воздействия на объектах ПАО «Татнефть» // Сборник научных трудов ТатНИПИнефть. 2020. № 88. С. 119–126.
7. ELKATORY M.R., SOLIMAN E.A., NEMR A.E., HASSAAN M.A., RAGAB S., EL-NEMR M.A., PANTALEO A. Mitigation and Remediation Technologies of Waxy Crude Oils' Deposition within Transportation Pipelines: A Review // Polymers. 2022, Vol. 14, P. 3231.
8. QAMRUZZAMAN M., ROY D. C., RAMAN R. Novel Simulator for Design and Analysis of Wax Removal Treatment from Well Flow Lines Using Thermochemical Fluids // SPE Production & Operations. 2022. Vol. 37. P. 301–318.
9. QAMRUZZAMAN M., ROY D. C., RAMAN R. Novel Simulator for Design and Analysis of Wax Removal Treatment from Well Flow Lines Using Thermochemical Fluids // SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition. 2021.

REFERENCES

1. AGLIULLIN M.M., ABDULLIN V.M., ABDULLIN M.M., KURMAEV S.A. Development and implementation of a thermobarochimical method for increasing the productivity of oil and gas wells. *Neftegazovoe delo*. 2004;(2):7–13. (In Russian).

В.А. МИЛЮТИНА, А.О. МАЛАХОВ, Н.А. КОЗЫРЕВ, Е.В. МАРАТКАНОВА, А.Ф. ШАГЕЕВ, С.А. ДОЛГИХ
ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОГАЗОХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЫ ПЛАСТА С ЦЕЛЮ УДАЛЕНИЯ АСФАЛЬТОСМОЛАПАРИНОВЫХ ОТАЖЕНИЙ ДЛЯ УСЛОВИЙ АШАЛЬЧИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ)

2. BURKO VA. NTRS-Komi LLC on the thermochemical impact on the bottomhole and remote zones of oil wells. *Burenie i nef't*. 2018;(2):46–49. (In Russian).
3. KOKAREV M.O., MIRSKIY A.V. Development of technology to increase oil recovery from reservoirs in the late stage of field operation. *Bulatovskie chteniya*. 2017;(2):109–113. (In Russian).
4. ENIKEEV MD., LATYPOV RS., KAMALOV F.H. Methods and technologies for testing and influencing PZP. *NTV «Karotazhnik»*. 2000;(66). (In Russian).
5. Pat. 2812385 (RF). (In Russian).
6. HISAMETDINOV M.R., NURIEV D.V., RIZVANOV R.Z., FEDOROV A.V., GANEEVA Z.M. Development and testing of modified thermochemical treatment technology at Tatneft facilities. *Sbornik nauchnykh trudov TatNIPIneft'*. 2020;(88):119–126. (In Russian).
7. ELKATORY M.R., SOLIMAN E.A., NEMR A.E., HASSAAN M.A., RAGAB S., EL-NEMR M.A., PANTALEO A. Mitigation and Remediation Technologies of Waxy Crude Oils' Deposition within Transportation Pipelines: A Review. *Polymers*. 2022;(14):3231.
8. QAMRUZZAMAN M., ROY D. C., RAMAN R. Novel Simulator for Design and Analysis of Wax Removal Treatment from Well Flow Lines Using Thermochemical Fluids. *SPE Production & Operations*. 2022;(37):301–318.
9. QAMRUZZAMAN M., ROY D. C., RAMAN R. Novel Simulator for Design and Analysis of Wax Removal Treatment from Well Flow Lines Using Thermochemical Fluids. *SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition*. 2021.

Милютина Валерия Андреевна,
старший преподаватель Казанского (Приволжского) федерального университета
✉ тел.: +7 (906) 122-02-58, e-mail: VAMilyutina@kpfu.ru

Малахов Алексей Олегович,
научный сотрудник Казанского (Приволжского) федерального университета
✉ тел.: +7 (903) 342-05-52 e-mail: AIOMalahov@kpfu.ru

Козырев Никита Алексеевич,
инженер Казанского (Приволжского) федерального университета
✉ тел.: +7 (953) 481-99-09, e-mail: NikAKozyrev@kpfu.ru

Маратканова Екатерина Владимировна,
инженер Казанского (Приволжского) федерального университета
✉ тел.: +7 (982) 996-80-99, e-mail: EkVMaratkanova@kpfu.ru

Шагеев Альберт Фаридович,
старший преподаватель Казанского (Приволжского) федерального университета
✉ тел.: +7 (903) 341-23-99, e-mail: AFShageev@kpfu.ru

Долгих Сергей Александрович,
к.т.н., доцент Казанского (Приволжского) федерального университета
✉ 420111, Респ. Татарстан, г. Казань, ул. Кремлевская, 4/5,
тел: +7 (917) 286-24-13, e-mail: SADolgh@kpfu.ru

УДК 662.276.65

DOI: 10.52531/1682-1696-2025-25-3-67-75

Научная статья

EDN: KVUTPH

ПРИМЕНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ И НАНОЧАСТИЦ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОДУКТИВНОСТИ СКВАЖИН И ГАЗОКОНДЕНСАТООТДАЧИ

**Д.П. АНИКЕЕВ¹,
А.С. УШАКОВА^{1,2}, Э.С. АНИКЕЕВА¹**¹ ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ НЕФТИ И ГАЗА
(ИПНГ) РАН, МОСКВА, РОССИЙСКАЯ
ФЕДЕРАЦИЯ² РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ (МГРИ),
МОСКВА, РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

В работе выполнен обзор теоретических и практических аспектов использования поверхностно-активных веществ (ПАВ) и наночастиц при разработке газовых месторождений. Традиционно композиции ПАВ применяются в высокопроницаемых нефтяных коллекторах при мягких условиях, то есть низкой температуре и низкой минерализации пластовой воды. Но для многих газовых месторождений характерны другие условия: высокая температура и высокая (более нескольких тысяч мг/л) минерализация пластовой воды и низкая проницаемость. Традиционные композиции в таких условиях подвержены деструкции и не выполняют возложенных на них задач.

Для низкопроницаемых коллекторов, где фронт вытеснения в принципе нестабилен, ПАВ становятся не средством выравнивания профиля, а средством повышения проницаемости пород-коллекторов при закачке воды. Эффект уменьшения капиллярных сил наиболее значим для пластовых систем с низкой проницаемостью. Снижение капиллярных сил должно улучшить параметры вытеснения. Но за счет разработки новых химических многокомпонентных систем, в том числе с использованием наночастиц и специально создаваемых объемных конструкций в водной среде, содержащих ПАВ, удастся существенно расширить диапазон применимости известных методов воздействия.

Промысловые испытания на ряде объектов (в основном в Китае) показывают технологическую и экономическую эффективность применения составов ПАВ и наночастиц на газовых объектах для повышения газоотдачи.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ПАВ, газовая залежь, наночастицы, газоконденсат

Original article

USING SURFACTANTS AND NANOPARTICLES TO IMPROVE WELL PRODUCTIVITY AND GAS CONDENSATE RECOVERY

**D.P. ANIKEEV¹, A.S. USHAKOVA^{1,2},
E.S. ANIKEEVA¹**¹ INSTITUTE OF OIL AND GAS PROBLEMS
(IPNG) OF THE RUSSIAN ACADEMY
OF SCIENCES, MOSCOW, RUSSIAN FEDERATION² RUSSIAN STATE GEOLOGICAL EXPLORATION
UNIVERSITY NAMED AFTER S. ORDZHONIKIDZE
(MGRI), MOSCOW RUSSIAN FEDERATION

The paper presents a review of theoretical and practical aspects of using surfactants and nanoparticles in the development of gas fields. Traditionally, surfactant compositions are used in highly permeable oil reservoirs in mild conditions, i.e. low temperature and low mineralization of brine water. However, many gas fields are characterized by other conditions: high temperature and high (more than several thousand mg/l) mineralization of brine and low permeability. Traditional compositions are subject to destruction under such conditions and do not perform the tasks assigned to them.

For low-permeability reservoirs, where the displacement front is unstable in principle, surfactants become not a means of leveling the profile, but a means of increasing the permeability of reservoir rocks during water injection. The effect of reducing capillary forces is most significant for reservoir systems with low permeability. Reducing capillary forces should improve the displacement parameters. But due to the development of new chemical multicomponent systems, including the use of nanoparticles and specially created volumetric structures in aqueous medium containing surfactants, it is possible to significantly expand the range of applicability of known methods of action.

Field tests at a number of sites (mainly in China) demonstrate the technological and economic efficiency of using surfactant and nanoparticle compositions at gas sites to increase gas recovery.

KEY WORDS: surfactant, gas reservoir, nanoparticles, gas condensate

ВВЕДЕНИЕ

Технологии увеличения газоконденсатоотдачи пластов, в основе которых лежат физические процессы взаимодействия нефти и закачиваемых флюидов с породой-коллектором, часто называемые технологиями «доотмыва» или технологиями снижения поверхностного натяжения и изменения смачиваемости породы, все шире применяются как для локальных обработок призабойной зоны пласта, так и для создания оторочек вытеснения при движении фронта вытеснения от нагнетательных скважин к добывающим. Активные вещества, применяемые в таких технологиях, – это водорастворимые соли, поверхностно-активные вещества, полимеры низкой концентрации и, в последнее время, комбинации всех этих веществ с наночастицами. Чем шире применяются наночастицы в виде коллоидных и истинных растворов в различных отраслях и, соответственно, чем дешевле становится их себестоимость, тем более привлекательным становится их применение в нефтедобыче.

Есть существенные различия в терминологии и определении слова наночастица, которые из физики и химии были перенесены в другие области науки, а также в нефтяную промышленность. Так, есть природные объекты, возникающие в процессе разработки, – наноэмульсии и нанодисперсии, иногда называемые наножидкостями, нестабильные смеси нефти с водой, стабилизированные, например, молекулами ПАВ, средний размер капель которых менее 100 нм. Однако чаще всего имеются в виду только специально создаваемые нанообъекты и наночастицы оксидов и металлов и их комбинации с ПАВ и полимерами в разных конфигурациях для создания новых свойств. Рассмотрим основные механизмы воздействия наночастиц в газовых и газоконденсатных пластах и их комбинации с другими технологиями, например, ПАВ-заводнением, для низкопроницаемых коллекторов.

ПОДХОДЫ К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПАВ И НАНОЧАСТИЦ. ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Традиционно композиции ПАВ применяются в высокопроницаемых нефтяных коллекторах в мягких условиях, то есть при низкой температуре и низкой минерализации пластовой воды. Средняя пластовая температура (на основе известных данных о проектах по ПАВ-заводнению) составляет около 75°C, так как большинство ПАВ химически деградируют и теряют свои свойства при высоких температурах [1, 2, 6].

Свойства ПАВ в растворах сильно зависят от их концентрации, начиная с некоторой концентрации, обусловленной структурой молекул ПАВ (например, длиной гидрофобной цепи), давлением, соленостью, pH, температурой, происходит мицеллообразование – соединение молекул ПАВ в агрегаты (сначала сферической, а потом, с увеличением концентрации, вытянутой червеобразной формы, в которых молеку-

лы ПАВ стабилизируют поверхность агрегатов). С началом мицеллообразования межфазное натяжение на границе раздела двух сред перестает меняться. И эта концентрация, называемая критической концентрацией мицеллообразования (ККМ) обычно считается оптимальной для использования раствора ПАВ для снижения межфазного натяжения [2].

Высокая проницаемость – важный фактор для эффективности ПАВ, так как в таком случае можно говорить о существовании фронта вытеснения (а не об отдельных каналах прорыва вытесняющего агента) и поддерживать его стабильность добавками водорастворимых ПАВ. Кроме того, чем ниже проницаемость, тем больше площадь контакта флюидов с породой (на единицу площади) и тем выше потери ПАВ из растворов на адсорбцию на породе [22].

Для низкопроницаемых коллекторов, где фронт вытеснения в принципе нестабилен, ПАВ становится не средством выравнивания профиля, а средством повышения проницаемости пород-коллекторов при закачке воды. Эффект уменьшения капиллярных сил наиболее значим для пластовых систем с низкой проницаемостью, что должно улучшать параметры вытеснения [5, 18, 22].

В этом случае ПАВ не используют совместно с раствором полимера, и схема исследований несколько видоизменяется. Основной эффект действия ПАВ достигается за счёт снижения межфазного натяжения (МФН) и изменения смачиваемости породы от гидрофобной к гидрофильной [8]. Однако эти два параметра могут быть не связаны между собой, то есть снижение МФН не свидетельствует о том, что ПАВ меняют смачиваемость поверхности. В случае нетрадиционных коллекторов именно смачиваемость является ключевым параметром [23], она должна быть высокой при отсутствии эмульсий и пен.

Применение ПАВ для газовых и газоконденсатных месторождений не так распространено, как для нефтяных, хотя именно там особенно важно стабилизировать фронт вытеснения при закачке воды [7]. В случае, когда молекулы ПАВ действуют в водных растворах в газовых и газоконденсатных пластах, они меняют поверхностное натяжение на границе раздела фаз газ-жидкость и могут формировать структуру мицелл. Так, за счет добавления ПАВ, растворимость метана может быть увеличена от 2 до 15 раз [12]. Потребность проведения исследования образования мицелл связана с тем, что одним из способов захоронения метана, с целью вывода его из круговорота, является его растворение в закачиваемой в подземные пласты воде. Но так как природная растворимость метана достаточно низкая, ПАВ используется для ее повышения.

В работе Moradi P. et al. [20] продемонстрировано использование фторированных поверхностно-активных веществ для изменения смачиваемости пород. Фторированные ПАВ эффективно снижают

поверхностное натяжение и изменяют смачиваемость на газофильную. Эти эффекты также продемонстрированы в работе Khajepour M. et al. [14], где относительные фазовые проницаемости (ОФП) для системы газ-вода сняты на керне до и после закачки в него геля (рис. 1).

Одним из главных требований к композиции ПАВ для традиционных коллекторов является способность образовывать микроэмульсию по типу Winsor III [21]. Такая система состоит из трех фаз: водного раствора, нефти и микроэмульсии. При этом микроэмульсионная фаза может быть высоковязкой и малоподвижной, действовать как полимерная оторочка для выравнивания фронта вытеснения [9]. Для того, чтобы образование микроэмульсии было возможно, молекулы ПАВ должны эффективно снижать межфазное натяжение на границе водного раствора и нефти и рекомендованное значение МФН – 10^{-3} мН/м [1]. Такой же механизм применим и для газовых и газоконденсатных пластов с тем дополнением, что система становится еще более сложной из-за возможного образования пены. Пенные системы последнее время часто используются при высокой обводненности газовых скважин [3]. Микроэмульсии иногда также называют “наноэмульсиями” и “наножидкостями” и относят к нанотехнологиям в нефтегазодобыче [10]. Мы не считаем эту классификацию оправданной, так как размеры капель эмульсии определяет химическая структура молекул ПАВ, а не дополнительно вводимые нанообъекты.

При внесении в двухфазную среду наночастиц (например, частиц оксида кремния) как при наличии ПАВ, так и без них могут образовываться эмульсии Пикеринга [30], где роль ПАВ для снижения межфазного натяжения играют наночастицы (рис. 2), осо-

бенно если они имеют одинаковое сродство с водной и нефтяной фазами. Энергия стабилизации эмульсий наночастицами определяется выражением:

$$\Delta E = \pi r^2 \gamma (1 - \cos \theta)^2$$

где r – радиус частицы, γ – межфазное натяжение, θ – краевой угол смачивания частицы с границей раздела фаз.

Если наночастица имеет гидрофильную поверхность (это большинство наночастиц), то стабилизируется нефтяная фаза в воде (эмульсия по типу Winsor II) [15]. Эмульсии Пикеринга могут возникать также на границе газовой фазы и стабилизировать пены [4].

Еще одной альтернативой растворам классических ПАВ может стать использование жидкости со специальными наноконпонентами – “нечеткими шариками” (Fuzzy Ball Fluids) [28]. Это жидкость, в которую добавлены микроскопические “нечеткие шарики”, которые имеют сложную структуру. Каждый шарик состоит из ядра, окруженного слоями полимеров и ПАВ. Внешний слой шариков имеет “пушистую” структуру, что позволяет им адаптироваться к размерам трещин и пор в пласте.

На рисунке 3 представлен внешний вид данной среды и схема слоев отдельного шарика [28]. Когда такая жидкость попадает в пласт, шарики могут блокировать каналы, через которые поступает вода, увеличивая сопротивление потоку воды. Это достигается за счет образования полимерных пленок и накопления шариков в трещинах. В то же время структура шариков позволяет газу свободно проходить через пласт, так как они не блокируют газовые каналы. Это связано с тем, что шарики образуют гидрофобные мембраны,

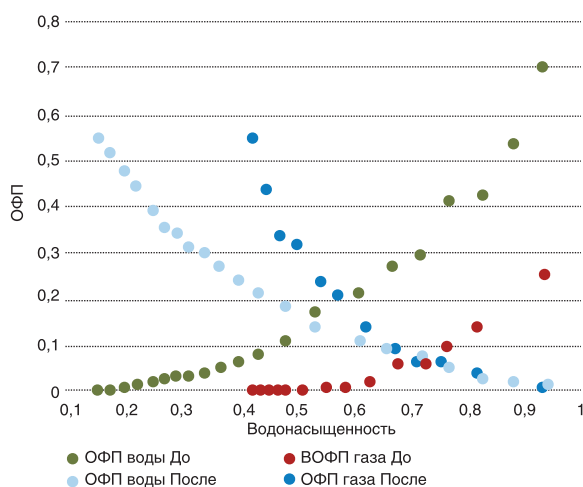


РИС. 1.

ОФП для системы газ-вода до и после закачки в него геля [14]

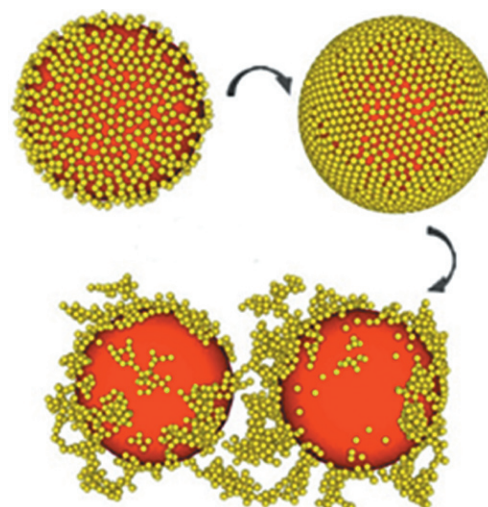


РИС. 2.

Стабилизация эмульсий нефтяной фазы в воде с помощью наночастиц [15]

которые замедляют поток воды, но не препятствуют потоку газа [26].

Если применение ПАВ (или ПАВ с наночастицами) приводит к формированию пены, то пена при разработке месторождений с запасами газа применяется для двух основных целей:

- снижения плотности воды, скопившейся на забое за счет образования пены. Это снижает общую плотность флюида на забое и упрощает вынос жидкости для предотвращения самозадавливания скважины;
- использования пены как агента для поддержания пластового давления вместо воды или совместно с водой.

В работе Wang Y. et al [27] представлены ОФП для системы газ-вода и газ-вода/пена (рис. 4). Как видно переход жидкой фазы из состояния воды к состоянию пены существенно меняет вид зависимостей ОФП.

Говоря о дальнейших исследованиях наночастиц в растворах ПАВ для повышения газоконденсатоотда-

А.П. АНИКЕЕВ, А.С. УШАКОВА, Э.С. АНИКЕЕВА
ПРИМЕНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ
И НАНОЧАСТИЦ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ
ПРОДУКТИВНОСТИ СКВАЖИН И
ГАЗОКОНДЕНСАТООТДАЧИ

чи, можно выделить следующую последовательность исследований:

1. Подбор ПАВ и наночастиц, исследование стабильности их комбинации при данной минерализации и температуре пласта в водной фазе.
2. Подбор оптимальной концентрации ПАВ (исследования МНФ, определение ККМ).
3. Добавление к ПАВ наночастиц, повторное исследование стабильности их растворов в пластовых условиях.
4. Подбор концентрации наночастиц с минимальным МНФ (наночастицы должны существенно снизить МНФ по сравнению с полученным в п. 2).
5. Фильтрационные исследования на реальных кернах месторождения с определением улучшения коэффициента вытеснения, Квыт, по сравнению с вытеснением водой (закачка оторочек раствора ПАВ с наночастицами).
6. Математическое моделирование химического за-

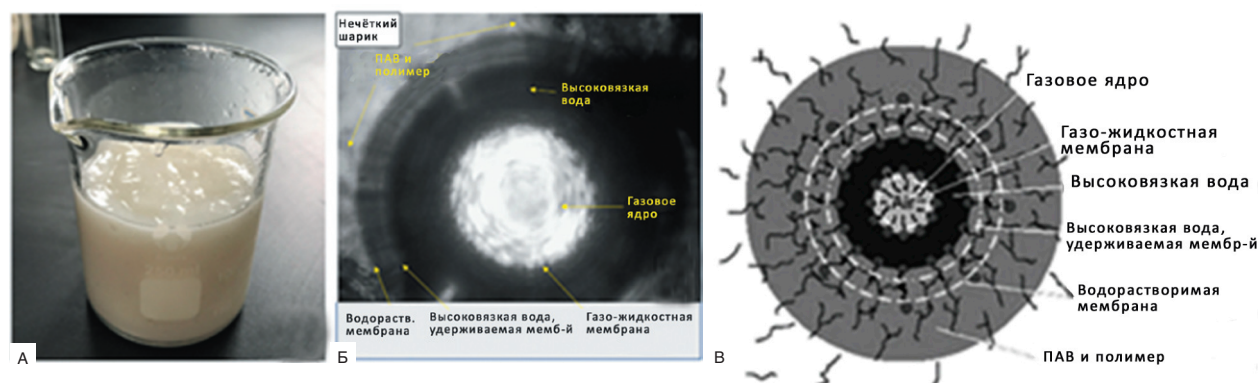


РИС. 3.

А – Образец жидкости с нечеткими шариками (fuzzy-ball fluid); Б – Структура шариков под микроскопом (увеличение 1500X); В – Схематическое изображение структуры [28]

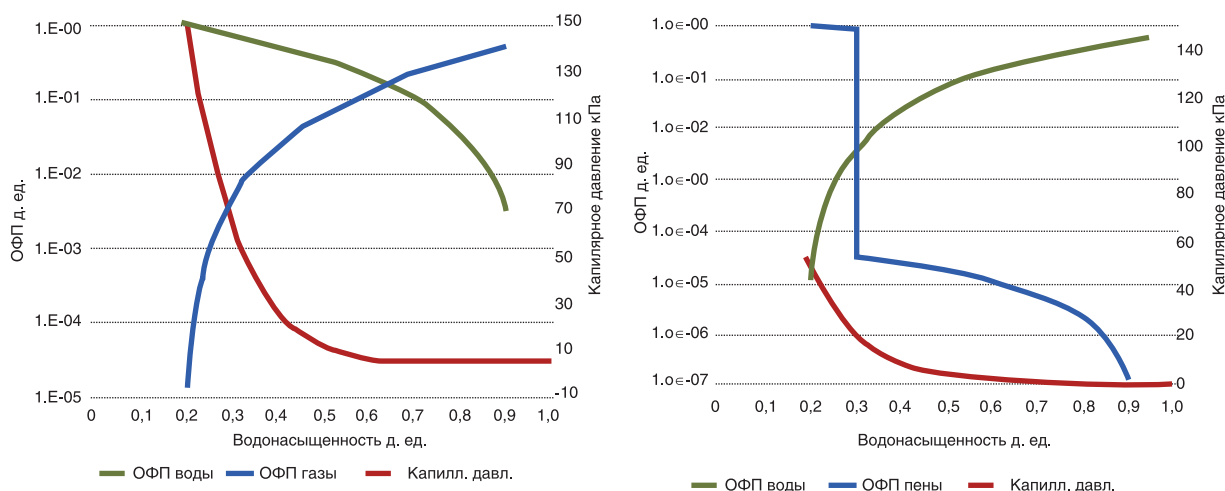


РИС. 4.

ОФП для системы газ-вода и газ-вода/пена [27]

воднения либо обработок скважин (с использованием полученных выше экспериментальных результатов).

7. Экономическая оценка и разработка проекта опытно-промышленных работ.

ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ И ПАВ ДЛЯ ДОБЫЧИ ГАЗА И ГАЗОКОНДЕНСАТА

Наиболее перспективным представляется использование ПАВ с нанокompонентами на газовых месторождениях для выноса воды из добывающих скважин. Так, на объекте в Польше [16] использование ПАВ (коммерческие названия – BioFoam 30 и BioCond Plus 30/380) привело к увеличению добычи газа и снижению обводненности. Для скважины С использование BioCond Plus 30/380 увеличило добычу газа на 79,6%, а объем удаленной воды составил 252 дм³ за 168 часов. Для скважин А и В применение BioFoam 30 привело к увеличению добычи газа на 56,3% и 72,0%, соответственно, а также к удалению значительных объемов воды.

Пенные системы используются при разработке целого ряда газовых месторождений в Китае. Некоторые из них представлены в таблице 1.

В 2016 г. на трех участках газового месторождения Сулиге были проведены полевые сравнительные испытания (в одном блоке и на скважинах одного типа).

Перед началом испытаний скважины имели практически одинаковые показатели базовой добычи, давления в насосно-компрессорных трубах (НКТ) и давления в затрубном пространстве. Продолжительность испытаний составила два месяца. Результаты испытаний показали, что по сравнению с традиционными пенообразователями наночастичные пенообразователи имеют на 15% более высокий коэффициент эффективности. Испытанные скважины показали следующие результаты:

- средний прирост совокупной добычи газа: 125,8%;
- среднее снижение расхода реагента на 10 000 м³ добытого газа: 56%;
- снижение количества операций: 61,3%.

После применения наночастичных пенообразователей были достигнуты следующие результаты:

- увеличение среднего коэффициента эффективности: на 8,5%;
- прирост средней добычи газа: на 39,7%;
- снижение расхода реагента на 10 000 м³ добытого газа: на 32,7%;
- снижение количества операций на 10 000 м³ добытого газа: на 17,9%.

В восьми скважинах на одном из участков в течение двух лет (2015–2016 гг.) сравнивалась эффективность наночастичных и традиционных пенообразователей в одних и тех же скважинах.

ТАБЛИЦА 1.

Температуры пласта и характеристики флюидов типичных газовых месторождений в основных газодобывающих бассейнах Китая [29]

Бассейн	Газовое месторождение	Температура, °С	Содержание CO ₂ , %	Концентрация H ₂ S, г/м ³	Общая соленость, мг/л	Содержание конденсата, %
Сычуань	Лунган/Мокси	140–160	1,67–3,01	6,360–45,700	113500–186000	0
	Чунцинская газовая шахта	90–120	0,50–13,70	0,010–8,000	7 000–30 000	0
	Северо-Восточная Сычуаньская газовая шахта	90–120	0,3–10	0–80,000	50000–150000	0
Тарим	Дабэй/Кэшэн	130–160	0,20–1,67	0	194192–207100	0
	Дина	130–140	0,13–4,86	0	28 330–95 540	0
	Табэй	130–160	0,52–27,80	0–0,015	130200–237000	0
Цайдам	Сэбэй	50–80	0	0	100000–250000	0
	Дунпин	90–120	0	0	100000–250000	15–30
Ордос	Сулиге	90–110	0	0	50000	5–40 (включая южный Сулиге)
Джунгарский	Келамеили	90–114	0	0	9000–15000	20–40
Сунляо	Сюйшэнь	90–120	0,46–1,32	0	1900–22000	0

ТАБЛИЦА 2.

Типы характеристических вспомогательных веществ, необходимых для шести систем наночастичных пенообразователей [27]

Система пенообразователя	Тип характеристических вспомогательных веществ	Химический тип вспомогательных веществ
Высокоолеустойчивая система	Устойчивые к высокой солености	Неионные ПАВ
Высокотемпературная и устойчивая к CO ₂ система	Устойчивые к CO ₂	Лизин
Высокотемпературная, устойчивая к CO ₂ и H ₂ S система	Устойчивые к CO ₂ и H ₂ S	Лизин
Высокотемпературная, высокоолеустойчивая, устойчивая к CO ₂ и H ₂ S система	Устойчивые к высокой солености, CO ₂ и H ₂ S	Лизин + имидазолиновые ПАВ
Высокотемпературная и устойчивая к конденсату система	Устойчивые к конденсату	Фторсодержащие ПАВ
Высокотемпературная, высокоолеустойчивая и устойчивая к конденсату система	Устойчивые к высокой солености и конденсату	Полисиликон + лизин + имидазолиновые ПАВ

Для различных условий используются дополнительные компоненты ПАВ (табл. 2), которые активно разрабатываются, в том числе в Китае: ПАВ [13, 19, 24], полимерное ПАВ [17, 32], анионное ПАВ [11, 25], катионное ПАВ [26].

Многие составы испытаны на газовом месторождении Сулиге (Sulige), которое является крупнейшим газовым месторождением в Китае и характеризуется низкой проницаемостью. Средняя глубина скважин составляет 3000 м, температура пласта – 90–120°C, соленость пластовой воды – 30000–50000 мг/л, а содержание конденсата – 5–20%. К концу 2018 г. скважины с низкими уровнями добычи и низкими давлениями составляли более 60% от общего числа скважин на месторождении. Во многих газовых скважинах происходило накопление жидкости. Пены для удаления жидкости использовались в 70% скважин.

Процесс испытаний состоял из двух фаз:

1. 2015 год (май–сентябрь): в восьми скважинах использовались традиционные пенообразователи.
2. 2016 год (май–сентябрь): в тех же восьми скважинах применялись наночастичные пенообразователи.

Результаты испытаний:

- Снижение расхода реагента: в среднем на 50% при использовании наночастичных пенообразователей по сравнению с традиционными.
- Увеличение добычи газа: среднесуточная добыча газа увеличилась на 8,04%.
- Снижение перепада давления: средний перепад давления между НКТ (насосно-компрессорными трубами) и затрубным пространством уменьшился на 20,83%.

Таким образом, композиции ПАВ с наночастицами убедительно продемонстрировали свое преимущество.

На месторождении LX-Y в районе Линьсин была проведена операция по изоляции воды с использованием жидкости с нечеткими шариками (fuzzy-ball fluid) [26]. До обработки добыча воды составляла 82,97 м³/сут. После операции добыча воды снизилась до 42,96 м³/сут, что соответствует ее снижению на 48%. До обработки добыча газа составляла 300 м³/сут. После обработки добыча газа восстановилась до 394 м³/сут. В течение 17 дней после операции добыча воды стабилизировалась на уровне 42,96 м³/сут, а добыча газа оставалась стабильной. Однако добыча газа оказалась ниже, чем на соседних скважинах, что может быть связано с низкой газонасыщенностью пласта и недостаточной длиной зоны блокировки.

ВЫВОДЫ

При постоянном снижении цены на производство наночастиц во всем мире и их появлении на российском рынке и в отечественном производстве методы их применения для газоконденсатоотдачи будут в ближайшее время развиваться. Это новая область в методах нефте- и газоконденсатоотдачи требует новых методик проведения экспериментальных исследований, некоторым из которых и посвящена данная работа.

Из приведенных материалов можно сделать вывод, что композиции ПАВ с наночастицами, образующие эмульсии Пикеринга, показывают наилучшие свойства как агент вытеснения. Они более стойкие к температуре и более стабильны во времени по сравнению с применением традиционных ПАВ. Их эффект заметен и в снижении межфазного натяжения, и в стабилизации пенных систем. Таким образом, добавление наночастиц к ПАВ является шагом в дальнейшем повышении эффективности поддержания пластового давления за счет изменения вытесняющего агента, который все дальше уходит от применения воды.

БЛАГОДАРНОСТИ

Статья написана в рамках выполнения государственного задания ИПНГ РАН. Тема № 125020501405-1 «Создание новых технологий эффективного экологически чистого извлечения углеводородов в сложных горно-геологических условиях на основе системного подхода к изучению и моделированию полного жизненного цикла нефтегазовых месторождений».

ЛИТЕРАТУРА

1. АЛВАРАДО В., МАНРИК Э. Методы увеличения нефтеотдачи пластов. Планирование и стратегия применения. М.: Премиум Инжиниринг, 2011.
2. БОНДАРЬ М.Ю., ОСИПОВ А.В., ГРОМАН А.А., КОЛЬЦОВ И.Н., ЩЕРБАКОВ. Г.Ю. и др. Температурные условия при проектировании ПАВ-полимерного заводнения // Нефтяное хозяйство. 2022. №12. С. 51–55.
3. ПАНИКАРОВСКИЙ Е.В., ПАНИКАРОВСКИЙ В.В., ВАГАНОВ Ю.В. Повышение эффективности применения пенообразователей для удаления жидкости с забоев газовых скважин // Известия вузов. Нефть и газ. 2019. №3.
4. ПОКИДЬКО Б.В., БОТИН Д.А., ПЛАТНЕВ М.Ю. Эмульсии Пикеринга и их применение при получении полимерных наноструктурированных материалов // Вестник МИТХТ им. М.В. Ломоносова. 2013. Т. 8, № 1. С. 3–14. EDN PVSJVP.
5. ШАХВЕРДИЕВ А.Х., ЗАХАРОВ И.В., СУЛЕЙМАНОВ И.В. Исследование степени информативности параметров, определяющих процесс образования зстойных и слабодренлируемых зон залежей углеводородов // Нефтяное хозяйство. 2004. № 8. С. 64–68.
6. ШАХВЕРДИЕВ А.Х., МАНДРИК И.Э. Влияние технологических особенностей добычи трудноизвлекаемых запасов углеводородов на коэффициент извлечения нефти // Нефтяное хозяйство. 2007. № 5. С. 76–80.
7. ШАХВЕРДИЕВ А.Х., ПАНАХОВ Г.М., АББАСОВ Э.М. Газохимические воздействия для улучшения фильтрационно-емкостных свойств призабойной зоны скважины // Бурение и нефть. 2003. № 5. С. 37–39.
8. ШАХВЕРДИЕВ А.Х., РЕНДЖИ Ц., ПАНАХОВ Г.М., АББАСОВ Э.М. Газощелочное воздействие на пластовую систему с целью извлечения остаточных запасов нефти // Инженер-нефтяник. 2019. № 3. С. 23–30.
9. ВАХТИЯРОВ S.I., ШАХВЕРДИЕВ А.К., ПАНАКHOV G.M., АББАСОВ E.M. Effect of Surfactant on Volume and Pressure of Generated CO₂ Gas. Paper presented at the Production and Operations Symposium, Oklahoma City, Oklahoma, U.S.A., March 2007. doi: <https://doi.org/10.2118/106902-MS>
10. ВРАТОВЦИК A. Application of Nanofluids and Nanocomposites for Enhanced Oil Recovery. SSRG International Journal of Material Science and Engineering. 2023. Vol. 9. N2. P. 7–15.
11. ENGELS T., RYBINSKI W. VON, SCHMIEDEL P. Structure and dynamics of surfactant-based foams // Structure and Dynamics and Properties of Disperse Colloidal Systems, 1998. N 111. P. 117–126.
12. HUANG, Z., ZHANG, Y., SHAO, Z. ET AL. Mechanism of the dissolution of methane in the complex micellar system of NaOA/cyclohexane. Arab J Geosci 12, 555 2019. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4726-0>
13. JING Y. High performance foams for unloading gas well: US7422064. 2007-03-05.
14. КНАЖЕНПОУР М., ЕТМИНАН Ш.С.Р., ВАСМУТХ Ф., БРАЙАНТ С. Nanoparticles as Foam Stabilizer for Steam-Foam Process. SPE EOR Conference at Oil and Gas. 10.2118/179826-MS. 2016.
15. KOROLEVA M.YU., YURTOV E.V. Pickering emulsions: structure, properties and the use as colloidosomes and stimuli-sensitive emulsions // Russ. Chem. Rev., 2022, Vol. 91 (5), RCR5024, DOI: <https://doi.org/10.1070/RCR5024>
16. KLUK D., STELIGA T., BEBEN D., JAKUBOWICZ P. Study on Surfactants for the Removal of Water from Deliquification Natural Gas Wells to Enhance Production. Energies. 2024. 17. 10.3390/en17235924.
17. KOCZO K., TSELINIK O., FALK B. ET AL. Aqueous foaming compositions with high tolerance to hydrocarbons: US8524641. 2013-09-03.
18. LIANG T., ZHAO X., YUAN S., ZHU J., LIANG X., LI X., ZHOU F. Surfactant-EOR in tight oil reservoirs: Current status and a systematic surfactant screening method with field experiments // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2021. Vol. 196. P. 15.
19. LIU Z., XIONG C., LI W. ET AL. Salt-resistant low-temperature foam agent and preparation method: CN201210440003.8. 2013-03-13.
20. MORADI P., CHAHARDOWLI M., SIMJOO M., KHERADMAND B. A Review of Wettability Alteration Methods to a Gas Wet for Underground Natural Gas-Storage. Iranian Chemical Engineering Journal. Vol. 22, N 128. P. 83–96.
21. NEGIN C., ALI S., XIE Q. Most common surfactants employed in chemical enhanced oil recovery. Petroleum. 2017. Vol. 3, N 2. P. 197–211.
22. SHENG J.J. Critical review of field EOR projects in shale and tight reservoirs // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2017. Vol. 159. P. 654–665.
23. SHENG J.J. What type of surfactants should be used to enhance spontaneous imbibition in shale and tight reservoirs? J. Pet. Sci. Eng. 2017. Vol. 159, N July. P. 635–643.
24. STEPHEN D., VAITHILINGAM P. Non-corrosive amphoteric surfactants and method of treatment: EP20030762255. 2005-06-22.
25. PAKULSKI M.K. Method of foaming saturated or

- near saturated brines with synergistic mixtures: US7618926B1. 2009-11-17.
26. TAO X., LIU G., WANG Y., LI P., GAO W., WEI P., ZHENG L. Experimental and EOR Mechanism Study of Water Shutoff Effects on Fractured Tight Sand Gas Reservoirs Using Fuzzy Ball Fluids // Sustainability 2023, 15, 14528. <https://doi.org/10.3390/su151914528>
 27. WANG Y., JIN J., BAI B., WEI M. Study of Displacement Efficiency and Flow Behavior of Foamed Gel in Non-Homogeneous Porous Media. PLoS ONE. 2015. 10(6): e0128414.
 28. WEI P., ZHENG L., YANG M., WANG C., CHANG Q., ZHANG W. Fuzzy-ball fluid self-selective profile control for enhanced oil recovery in heterogeneous reservoirs: The techniques and the mechanisms // Fuel, Vol. 275, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117959>.
 29. XIONG C., CAO G., ZHANG J., LI N., W. XU, WU J., LI J., ZHANG N. Nanoparticle foaming agents for major gas fields in China // Petroleum Exploration and Development, Vol. 46, Is. 5, 2019, P. 1022–1030, [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(19\)60259-4](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(19)60259-4).
 30. YANG Y., FANG Z., CHEN X., ZHANG W., XIE Y., CHEN Y., LIU ZH., YUAN W. An Overview of Pickering Emulsions: Solid-Particle Materials, Classification, Morphology, and Applications // Frontiers in Pharmacology. 2017-05-23. Vol. 8. P. 287. DOI=10.3389/fphar.2017.00287
 31. YANG J., JOVANCICEVIC V., CASKIE M. Process for foaming a wet hydrocarbon composition: US20070079963. 2007-04-12.
 32. ZIKA H.T. Surfactant composition: US3746096. 1973-07-17.
- REFERENCES
1. ALVARADO V., MANRIQUE E. Methods of enhanced oil recovery. Planning and strategy of application. Moscow: Premium Engineering, 2011. (In Russian).
 2. BONDAR M.YU., OSIPOV A.V., GROMAN A.A., KOLTSOV I.N., SHCHERBAKOV. G.YU. ET AL. Temperature conditions in the design of surfactant-polymer flooding. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2022;12:51–55. (In Russian).
 3. PANIKAROVSKY E.V., PANIKAROVSKY V.V., VAGANOV YU.V. Improving the efficiency of using foaming agents to remove liquid from the bottomhole of gas wells. *Izvestiya vuzov. Neft' i gaz*. 2019;3. (In Russian).
 4. POKIDKO B.V., BOTIN D.A., PLETNEV M.YU. Pickering emulsions and their application in obtaining polymer nanostructured materials. *Vestnik MITHT im. M.V. Lomonosova*. 2013;8;(1):3–14. EDN PVSJVP. (In Russian).
 5. SHAKHVERDIEV A.KH., ZAKHAROV I.V., SULEIMANOV I.V. Study of the degree of information content of parameters determining the process of formation of stagnant and poorly drained zones of hydrocarbon deposits. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2004;8:64–68. (In Russian).
 6. SHAKHVERDIEV A.KH., MANDRIK I.E. Influence of technological features of extraction of hard-to-recover hydrocarbon reserves on the oil recovery factor. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2007;5:76–80. (In Russian).
 7. SHAKHVERDIEV A.KH., PANAKHOV G.M., ABBASOV E.M. Gas-chemical effects to improve the filtration-capacitive properties of the wellbore zone. *Burenije i neft'*. 2003;5:37–39. (In Russian).
 8. SHAKHVERDIEV A.KH., RENJI TS., PANAKHOV G.M., ABBASOV E.M. Gas-alkaline impact on the reservoir system in order to extract residual oil reserves. *Inzhener-neftyanik*. 2019;3:23–30. (In Russian).
 9. BAKHTIYAROV S.I., SHAKHVERDIYEV A.K., PANAKHOV G.M., ABBASOV E.M. Effect of Surfactant on Volume and Pressure of Generated CO₂ Gas. Paper presented at the Production and Operations Symposium, Oklahoma City, Oklahoma, U.S.A., March 2007. doi: <https://doi.org/10.2118/106902-MS>
 10. BRATOVIC A. Application of Nanofluids and Nanocomposites for Enhanced Oil Recovery. SSRG International Journal of Material Science and Engineering. 2023;9;(2):7–15.
 11. ENGELS T., RYBINSKI W. VON, SCHMIEDEL P. Structure and dynamics of surfactant-based foams. *Structure and Dynamics and Properties of Disperse Colloidal Systems*, 1998;111:117–126.
 12. HUANG, Z., ZHANG, Y., SHAO, Z. ET AL. Mechanism of the dissolution of methane in the complex micellar system of NaOA/cyclohexane. *Arab J Geosci* 12, 555 2019. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4726-0>
 13. JING Y. High performance foams for unloading gas well: US7422064. 2007-03-05.
 14. KHAJEHPUR M., ETMINAN SH.S.R., WASSMUTH F., BRYANT S. Nanoparticles as Foam Stabilizer for Steam-Foam Process. SPE EOR Conference at Oil and Gas. 10.2118/179826-MS. 2016.
 15. KOROLEVA M.YU., YURTOV E.V. Pickering emulsions: structure, properties and the use as colloidosomes and stimuli-sensitive emulsions. *Russ. Chem. Rev.*, 2022; 91(5), RCR5024, DOI: <https://doi.org/10.1070/RCR5024>
 16. KLUK D., STELIGA T., BEBEN D., JAKUBOWICZ P. Study on Surfactants for the Removal of Water from Deliquification Natural Gas Wells to Enhance Production. *Energies*. 2024;17. 10.3390/en17235924.
 17. KOCZO K., TSELINIK O., FALK B. ET AL. Aqueous foaming compositions with high tolerance to hydrocarbons: US8524641. 2013-09-03.
 18. LIANG T., ZHAO X., YUAN S., ZHU J., LIANG X., LI X., ZHOU F. Surfactant-EOR in tight oil reservoirs: Current status and a systematic surfactant screening method with field experiments. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021;196:15.

19. LIU Z., XIONG C., LI W. ET AL. Salt-resistant low-temperature foam agent and preparation method: CN201210440003.8. 2013-03-13.
20. MORADI P., CHAHARDOWLI M., SIMJOO M., KHERADMAND B. A Review of Wettability Alteration Methods to a Gas Wet for Underground Natural Gas-Storage. *Iranian Chemical Engineering Journal*. Vol. 22, N 128. P. 83–96.
21. NEGIN C., ALI S., XIE Q. Most common surfactants employed in chemical enhanced oil recovery. *Petroleum*. 2017;3;(2):197–211.
22. SHENG J.J. Critical review of field EOR projects in shale and tight reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2017;159:654–665.
23. SHENG J.J. What type of surfactants should be used to enhance spontaneous imbibition in shale and tight reservoirs? *J. Pet. Sci. Eng.* 2017;159:635–643.
24. STEPHEN D., VAITHILINGAM P. Non-corrosive amphoteric surfactants and method of treatment: EP20030762255. 2005-06-22.
25. PAKULSKI M.K. Method of foaming saturated or near saturated brines with synergistic mixtures: US7618926B1. 2009-11-17.
26. TAO X., LIU G., WANG Y., LI P., GAO W., WEI P., ZHENG L. Experimental and EOR Mechanism Study of Water Shutoff Effects on Fractured Tight Sand Gas Reservoirs Using Fuzzy Ball Fluids // *Sustainability* 2023, 15, 14528. <https://doi.org/10.3390/su151914528>
27. WANG Y., JIN J., BAI B., WEI M. Study of Displacement Efficiency and Flow Behavior of Foamed Gel in Non-Homogeneous Porous Media. *PLoS ONE*. 2015;10;(6): e0128414.
28. WEI P., ZHENG L., YANG M., WANG C., CHANG Q., ZHANG W. Fuzzy-ball fluid self-selective profile control for enhanced oil recovery in heterogeneous reservoirs: The techniques and the mechanisms. *Fuel*, 2020;275. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117959>.
29. XIONG C., CAO G., ZHANG J., LI N., W. XU, WU J., LI J., ZHANG N. Nanoparticle foaming agents for major gas fields in China. *Petroleum Exploration and Development*. 2019;46;(5):1022–1030, [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(19\)60259-4](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(19)60259-4).
30. YANG Y., FANG Z., CHEN X., ZHANG W., XIE Y., CHEN Y., LIU ZH., YUAN W. An Overview of Pickering Emulsions: Solid-Particle Materials, Classification, Morphology, and Applications. *Frontiers in Pharmacology*. 2017-05-23;8:287. DOI=10.3389/fphar.2017.00287
31. YANG J., JOVANCICEVIC V., CASKIE M. Process for foaming a wet hydrocarbon composition: US20070079963. 2007-04-12.
32. ЗИКА Н.Т. Surfactant composition: US3746096. 1973-07-17.

Аникеев Даниил Павлович,
 к.т.н., с.н.с., зав. лабораторией газонефтеконденсатоотдачи
 имени С.Н. Закирова Федерального государственного бюджетного
 учреждения науки Институт проблем нефти и газа
 Российской академии наук

✉ e-mail: anikeev@ogri.ru

Ушакова Александра Сергеевна,
 д.т.н., профессор кафедры «Разработки и эксплуатации нефтяных
 и газовых месторождений» Российского государственного геологоразведочного
 университета имени Серго Орджоникидзе, г.н.с. Федерального государственного
 бюджетного учреждения науки Институт проблем нефти и газа
 Российской академии наук

✉ 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23,
 117997, Moscow, Miklukho-Maklaya st., 23,
 e-mail: ushakova@ipng.ru

Аникеева Эльвира Сергеевна,
 м.н.с. лаборатории газонефтеконденсатоотдачи
 имени С.Н. Закирова ИПНГ РАН Федерального государственного
 бюджетного учреждения науки Институт проблем нефти и газа
 Российской академии наук

✉ 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3,
 119333, Moscow, st. Gubkina, 3,
 e-mail: esanikeeva@ogri.ru

УДК 332.13; 504.06

DOI: 10.52531/1682-1696-2025-25-3-76-85

Научная статья

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО УЩЕРБА И РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ НА ПРИМЕРЕ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ «АСТРА»*

Е.Ф. Шамаева¹,
М.Ш. Саламанова²,
А.А. Асонов³, М.В. Гречитаева¹

¹ Государственный университет управления, Москва, Российская Федерация

² Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова, Грозный, Российская Федерация

³ ООО «Развитие администрирование и эксплуатация», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Современные экологические вызовы и ограниченность ресурсов требуют внедрения инновационных технологий в сфере обращения с отходами. В статье рассмотрены современные технологические решения, включая адаптивную станцию термического разложения «Астра», обеспечивающую переработку углеродсодержащих материалов с получением вторичного сырья и энергии. Рассмотрены технические характеристики установки, её экологические и экономические преимущества, а также перспективы использования в региональных системах управления отходами. Проанализированы ключевые проблемы и возможности внедрения инновационных технологий с учётом современных экологических требований. Показано, что применение представленных технологий способствует снижению негативного воздействия на окружающую среду и созданию новых возможностей для устойчивого развития территорий.

Ключевые слова: переработка отходов, современные технологии, адаптивная станция термического разложения «Астра», экологическая безопасность, устойчивое развитие территорий, экономика замкнутого цикла

Е.Ф. ШАМАЕВА, М.Ш. САЛАМАНОВА,
А.А. АСОНОВ, М.В. ГРЕЧИТАЕВА
СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ
ОТХОДОВ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО
УЩЕРБА И РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ НА ПРИМЕРЕ
АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ «АСТРА»

EDN: MSIOMM

Original article

MODERN WASTE PROCESSING TECHNOLOGIES FOR MINIMIZING ENVIRONMENTAL DAMAGE AND REGIONAL DEVELOPMENT: THE CASE OF THE ADAPTIVE SYSTEM «ASTRA»

E.F. SHAMAEVA¹, M.SH. SALAMANOVA²,
A.A. ASONOV³, M.V. GRECHITAEVA¹

¹ STATE UNIVERSITY OF MANAGEMENT, MOSCOW, RUSSIAN FEDERATION

² GROZNY STATE OIL TECHNOLOGICAL UNIVERSITY NAMED AFTER ACADEMICIAN M.D. MILLIONSHCHIKOV, GROZNY, RUSSIAN FEDERATION

³ ООО "DEVELOPMENT ADMINISTRATION AND OPERATION", ST. PETERSBURG, RUSSIAN FEDERATION

Modern environmental challenges and resource limitations require the introduction of innovative technologies in the field of waste management. The article examines modern technological solutions, including the adaptive thermal decomposition station «Astra», which enables the processing of carbon-containing materials to obtain secondary raw materials and energy. The technical characteristics of the installation, its environmental and economic advantages, as well as prospects for its application in regional waste management systems are considered.

Key problems and opportunities for the implementation of innovative technologies are analyzed, taking into account modern environmental requirements. It is shown that the application of the presented technologies contributes to reducing negative impacts on the environment and creating new opportunities for the sustainable development of territories.

The work was carried out within the framework of the Russian Science Foundation project N 24-69-00043, <https://rscf.ru/project/24-69-00043/>.

KEY WORDS: waste recycling, modern technologies, adaptive thermal decomposition station «Astra», environmental safety, sustainable regional development, circular economy

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

За годы экономического роста, не согласованного с возможностями биосферы, окружающей природной среде нанесен беспрецедентный вред. Масштабы экономической деятельности, опирающиеся на научно-технический прогресс, привели к глобальному экологическому кризису [1, 4, 5]. Регионы мира сталкиваются с деградацией биосферы и природных сред (водной, наземно-воздушной, почвенной, организменной), что ставит под угрозу возможность сохранения благоприятной среды и высокого качества жизни человека. Так, анализ числа природных катастроф и последствий от них показывает, что среднее число жертв только от природных катастроф возросло с 53 в 1994 г. до 260 человек в 2023 г. (рис. 1).

Тревожная ситуация также складывается по итогам анализа техногенных катастроф, их масштаба и последствий [1, 3]. Понимание растущего влияния создаваемых человеком объектов инфраструктуры (техносферы) и роли антропогенного воздействия (антропосферы) требует формирования сбалансированной модели управления взаимодействием биосферы, антропосферы и техносферы.

По данным Минприроды РФ, в России ежегодно образуется около 70 млн т бытовых отходов. Однако, по итогам 2019 г., лишь 5–7% этих отходов направлялось на переработку [7, 9, 10, 13]. Основная причина – слаборазвитая система управления отходами и вторичными ресурсами. Ситуация в производственном секторе еще сложнее: многие предприятия вынуждены самостоятельно утилизировать отходы из-за недостаточного уровня развития перерабатывающей отрасли в стране.

Ситуация со вторичной переработкой в отрасли по обращению с отходами характеризуется необходимостью образователя отходов экономить на утилизации

отходов, сокращая объемы доступными способами. Ввиду отсутствия эффективных и экологических технических решений по утилизации захоронение является наиболее доступным и понятным для мусорообразователей (производителей) способом завершения производственного цикла. Переработка отходов направлена на сокращение количества мусора и получение вторичного сырья (в основном это касается ТКО). Что касается энергетической утилизации, то этот метод обращения с отходами пока находится на стадии оценки его эффективности и целесообразности.

Можно выделить несколько причин сложившейся ситуации в отрасли по обращению с отходами:

1. Технический парк рассчитан на перевозку и накопление отходов от места образования до места накопления.
2. Законодательная и нормативная база практически не допускает иных способов утилизации, кроме захоронения и сжигания (обезвреживания). Отсутствует альтернативный, разрешенный законодательством способ применения мусора как источника сырья, топлива, энергии.
3. Научное и технологическое развитие отрасли ограничено самой отраслью. Например, в территориальных схемах по обращению с отходами не предусмотрена возможность проведения НИОКР по направлению развития переработки сырья, а любое применение технологических решений не интересно для игроков рынка.
4. «Нулевая» привлекательность отрасли для инвесторов, отрасль существует (не развивается) только за счет собственной прибыли, которая в большинстве регионов РФ отрицательная.

При этом обычные подходы к обращению с отходами, включая полигонное захоронение и сжигание, наносят существенный ущерб окружающей среде, здоровью людей и устойчивости экосистем. Данные проблемы делают особенно актуальным поиск оптимальных способов вторичной переработки отходов в соответствии с принципами устойчивого развития [12, 14, 19].

За последние 100 лет эволюция научных подходов к развитию общества и государства прошла несколько этапов: от доминирования чисто экономической модели к социально-экономической (с 1960-х гг.), а затем к эколого-социо-экономической парадигме (с начала 1990-х гг.). Совершенствование механизмов стратегического планирования, основанное на пересмотре рыночных принципов хозяйствования, обусловило необходимость учета баланса социальных, экономических и экологических факторов. Это привело к формированию новой модели устойчивого развития территорий, фундаментальные основы которой заложены в понимании организации и организационных систем. Объективным направлением для исследования уменьшения техногенного воздействия на окружающую среду стало изучение возможности применения в

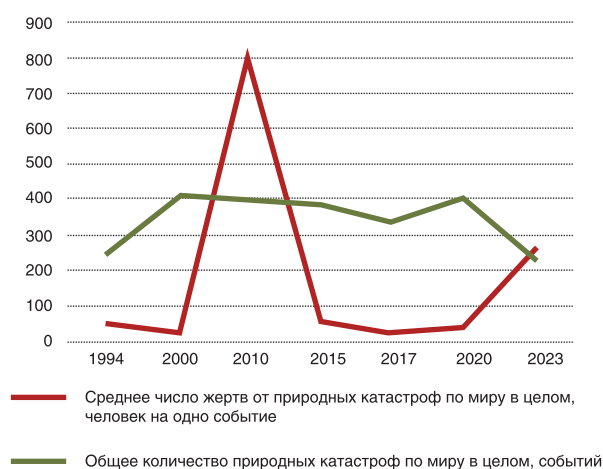


РИС. 1.

Динамика количества природных катастроф и смертности от них по миру в целом

промышленности концепции экономики замкнутого цикла, нулевого воздействия на окружающую среду и переход от классических методов утилизации к принципу энергоутилизации, с применением технологий для уменьшения выбросов углекислого газа и возврата потенциала энергии обратно в процесс производства.

Цель настоящего исследования – разработка подходов к решению проблемы утилизации отходов с минимальным экологическим воздействием.

Задачи исследования: проанализировать применимость фундаментальных основ понимания организационных систем для организации территориальных экономических систем; оценить проблемы утилизации отходов в Российской Федерации; рассмотреть технологические возможности утилизации отходов при минимизации экологического воздействия.

МЕТОДЫ И ПРИНЦИПЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Настоящее исследование выполнено в рамках проекта 24-69-00043 Российского научного фонда «Исследование проблем создания и модификации полифункциональных композитов с применением техногенного сырья и низкоуглеродных технологий в рамках стратегии управления рациональным природопользованием». В рамках работы использованы статистические данные, изучена литература по вопросам классификации организационных систем, разработано технико-экономическое обоснование проекта по утилизации отходов.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К УСТОЙЧИВОМУ РАЗВИТИЮ ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Отечественные работы института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (Д.А. Новиков [8] и другие) заложили фундаментальные основы понимания организации и организационных систем, их классификации (табл. 1).

Региональная организационная система – это часть более крупной системы (надсистемы), обладающая определенными пространственно-временными границами и внутренней структурой (связями между элементами). Она представляет собой сложную систему, объединяющую: природную подсистему, население, осуществляющее хозяйственную деятельность и обмен ресурсами, подсистему управления с внешними и внутренними взаимодействиями. В ее состав входят разнородные компоненты: организационные (люди), социальные (общественные отношения), природные (экосистемы и ресурсы), производственные (техно-экономические структуры), а также механизмы и правила управления. Прикладные задачи управления развитием таких систем включают учет закономерностей функционирования и эволюции природных подсистем, а также согласование их динамики с социально-экономическими процессами.

Е.Ф. ШАМАЕВА, М.Ш. САЛАМАНОВА,
А.А. АСОНОВ, М.В. ГРЕЧИТАЕВА
СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ
ОТХОДОВ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО
УЩЕРБА И РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ НА ПРИМЕРЕ
АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ «АСТРА»

Таким образом, территориальная экономическая система может рассматриваться как организационная система, которая объединяет разнородные процессы взаимодействия подсистем и имеет междисциплинарный характер [8] (рис. 2).

Теоретический анализ основ устойчивого развития территориальных экономических систем создает основу для перехода к практике территориальной организации утилизации отходов. На региональном уровне это проявляется, в том числе, в выборе оптимальных методов переработки: от традиционного захоронения и сжигания до современных технологий рециклинга и энергоутилизации.

Проблема утилизации отходов при этом выходит на первый план, так как такой выбор не может быть универсальным и требует оценки экономических затрат, доступности инфраструктуры, транспортной логистики и ожидаемой экономической результативности. Особое значение приобретает анализ возможных доходов от вторичного использования сырья и генерации энергии, что позволяет оценить не только экологическую, но и экономическую эффективность решений.

Таким образом, развитие территориальных экономических систем напрямую связано с принципами замкнутого цикла, аналогичного природным процессам, и с эффективным решением проблем утилизации отходов как ключевого условия устойчивого развития.

ПРОБЛЕМА УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА И ПОТРЕБЛЕНИЯ¹ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Согласно данным Роспотребнадзора, динамика образования отходов производства и потребления в Российской Федерации показывает устойчивую тенденцию увеличения их объема. Ту же тенденцию демонстрирует и анализ динамики размещения отходов производства и потребления на объектах, принадлежащих предприятию. Параллельно растет и объем отходов производства и потребления, подвергшихся утилизации и обезвреживанию (рис. 3)². При этом источником наибольшего объема отходов в 2023 г. стала добывающая промышленность (Доклад, 2023).

¹ Отходы производства (ФЗ от 24.06.1998 № 89-ФЗ Об отходах производства и потребления (с изм. и доп., вступ. в силу с 14.06.2020)) – остатки сырья, материалов, полуфабрикатов, образовавшиеся при производстве продукции или выполнении работ и утратившие полностью или частично потребительские свойства; вновь образующиеся в процессе производства попутные вещества, не находящие применения. В отходы производства включаются вмещающие и вскрышные породы, образующиеся при добыче полезных ископаемых, побочные и попутные продукты, отходы сельского хозяйства.

² Заметим, что сам объем производства и потребления не уменьшается, что говорит скорее о том, что какую-то часть отхода просто перестали называть отходом, либо произошло сокращение объема (например методом сжигания), но тогда динамика в 9% говорит об очень большом объеме, который либо сожгли, нанеся вред окружающей среде, либо поменяли название отхода и назвали его, допустим, сырьем, – все это по логике должно вызвать кратный скачок в следующем году, так как фактически новых средств и способов утилизации общественности не представлено.

ТАБЛИЦА 1.

Анализ понятия «организационная система»

Определение	Организационная система – объединение людей (участников), которые совместно реализуют программу и действующих на основе согласованных правил. Основными структурными элементами являются люди, которые осуществляют преобразование ресурсов данной системы. Организационная система обладает внутренней иерархией и структурой [21]	Сложная организационная система – сложная система, обладающая свойствами целостности и эмерджентности – взаимосвязь множества элементов, образующих целостность и действующих для достижения глобальной цели организации. Понимается системный комплекс, который включает компоненты: субъектов, информационных средств, человеческих и информационных ресурсов, образующих структуру, находящихся в связях и отношениях, образующих целостность, и обладающих качеством эмерджентности, не присущим отдельным участникам системы [20]
Особенности	Наличие нормативов (стандартов), регулирующих совместную деятельность участников, выступает системообразующим фактором. Совокупность процедур, законодательных актов и нормативных правил, определяющих взаимодействие участников организационной системы, формирует механизм ее функционирования. Этот механизм не является жестко фиксированным и может варьироваться в зависимости от конкретной системы. Факторы, влияющие на модель организационной системы: состав участников (свойства системы зависят от ее элементов); структура (определяется решениями руководства и возможностями участников); ресурсы (человеческие, материальные, интеллектуальные); нормативная база; мотивация участников; внутренние противоречия (между интересами системы, подразделений и отдельных лиц); информационные ресурсы на момент принятия решений; внешние и внутренние связи; субъективная оценка деятельности руководством; социальные отношения между участниками	Сложная организационная система состоит из двух ключевых компонентов — технического и человеческого. В ее структуру входят следующие подсистемы: технические, технологические, информационные, коммуникационные, системы хранения данных. Такие системы обладают свойством постоянного усложнения и масштабирования, что проявляется в их устойчивой тенденции к росту и расширению
Применение	Организационные системы используют для решения задач, у которых отсутствуют типовые схемы решения по причине их новизны и проблематичности. Примерами организационных систем служат различного рода проектные, управленческие и другие организации, а также коллективы людей и даже в некоторых случаях отдельный человек	Управленческие решения принимаются с учетом как экспертного мнения, так и данных, полученных с помощью аналитических методов и цифровых технологий

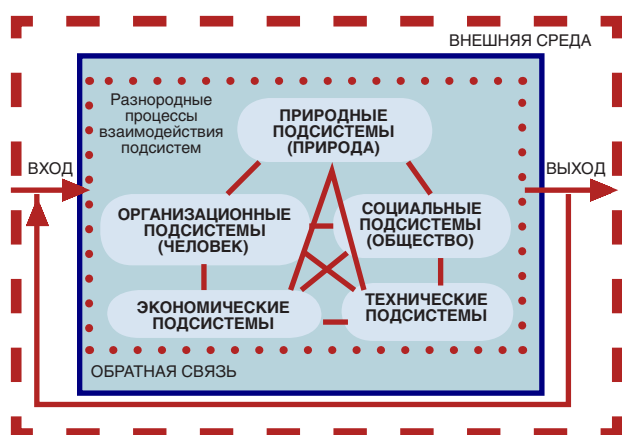


РИС. 2.

Взаимосвязь разнородных процессов подсистем

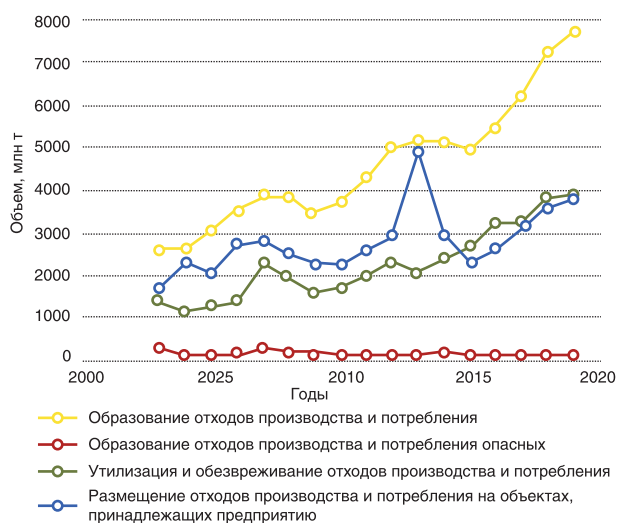


РИС. 3.

Динамика образования и утилизации отходов производства и потребления в Российской Федерации

С развитием промышленности и ростом числа производственных предприятий увеличивается объем отходов и вторичного сырья. Многие компании не могут самостоятельно утилизировать побочную продукцию и вынуждены прибегать к различным способам ее ликвидации: отправка на специализированные фабрики по утилизации или переработке отходов; захоронение отходов и вторичного сырья; экспорт за границу для последующей утилизации или переработки (на платной основе) [1, 6, 7, 9]. Однако последний вариант часто оказывается экономически невыгодным, особенно для предприятий, расположенных в центральных или арктических регионах России, поскольку транспортировка требует значительных затрат.

Сегодня утилизация отходов (их сбор и переработка) рассматривается как ключевой фактор устойчивого развития территориальных экономических систем, а также показатель технологического и культурного прогресса. В странах с развитыми безотходными технологиями акцент смещается не только на переработку, но и на модернизацию производственных процессов, минимизирующую образование загрязняющих веществ и снижающую нагрузку на окружающую среду.

Отходы, не вовлеченные в повторное использование, подлежат утилизации на специальных полигонах, оснащенных инженерными сооружениями для защиты экосистем [7, 9, 10, 11]. Однако этот метод требует изъятия значительных площадей сельскохозяйственных земель. Альтернативой является сжигание отходов на термических заводах, однако данный способ приводит к выбросам вредных веществ (токсичных газов, золы и пепла), что негативно влияет на качество воздуха [9, 10]. Это очень затратное занятие, передовые страны стараются не использовать компоненты или ингредиенты, которые впоследствии не смогут быть переработаны либо повторно использованы.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ ПРИ МИНИМИЗАЦИИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

На сегодняшний день в мире применяются различные методы утилизации отходов: переработка, сжигание с энергетической утилизацией, захоронение и компостирование. Их использование зависит от уровня социально-экономического развития страны, состояния инфраструктуры и экологической политики. По данным за 2020–2022 годы, распределение основных способов утилизации отходов выглядит следующим образом [15–17]:

- переработка (рециркуляция) охватывает около 30–40% отходов;
- сжигание с получением энергии – 20–25%;
- захоронение на полигонах – 30–40%;
- компостирование и биологическая обработка – около 10%.

Е.Ф. ШАМАЕВА, М.Ш. САЛАМАНОВА,
А.А. АСОНОВ, М.В. ГРЕЧИТАЕВА
СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ
ОТХОДОВ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО
УЩЕРБА И РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ НА ПРИМЕРЕ
АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ «АСТРА»

Европа. В 2021–2022 годах ведущими методами здесь стали переработка и сортировка отходов, а также сжигание с энергетической целью. В ряде стран – Германии, Швеции и др. — уровень переработки превышает 50%, а развитие мусоросжигательных заводов поддерживается на государственном уровне (Eurostat, 2022).

США. В 2020–2021 гг. наиболее распространены способами оставались захоронение и переработка. При этом активно внедряются технологии сжигания отходов с целью генерации энергии. Согласно данным ЕРА, около 32% отходов перерабатывается или компостируется, а остальная часть направляется на полигоны (ЕРА, 2022).

Азия. Страны региона демонстрируют значительные различия. В Японии и Южной Корее применяются комбинированные подходы, где переработка сочетается со сжиганием. В Китае постепенно растет доля переработки, однако значительная часть отходов все еще захоранивается в силу ограниченных инфраструктурных возможностей (UNEP, 2021).

Мировая картина. В среднем около 30% отходов перерабатывается или компостируется, примерно 20% сжигается для получения энергии, а оставшаяся часть захоранивается. При этом распределение методов определяется уровнем экономического развития и степенью разработки и внедрения экологически ориентированных технологий.

Современные технологические решения в области утилизации отходов ориентированы на снижение негативного влияния на экологию. Ярким примером служит адаптивная станция термического разложения «Астра»³.

Установка «Астра» предназначена для оптимизации расходов на утилизацию отходов при минимизации экологического воздействия, обеспечивая переработку любых углеродсодержащих отходов. В результате технологического процесса образуется инертная зола, применяемая в качестве вторичного сырья, а также генерируется тепловая энергия.

Установка «Астра» трансформирует проблему утилизации отходов в экономически эффективное решение: при использовании оборудования сокращаются значительные расходы на логистику, снижаются косвенные издержки, связанные с повреждением дорожного покрытия мусоровозами и с экологическими рисками: загрязнением грунтовых вод, деградацией земель на десятилетия и эмиссией вредных газов, вызывающих неприятные запахи вблизи объектов.

«Астра» изначально спроектирована для интеграции с существующими системами сортировки, shredding, очистки выбросов и удаления золы, что позволяет использовать ее на объектах, где применя-

³ ООО «Развитие администрирование и эксплуатация» (Санкт-Петербург, Россия).

ются инсинераторы и иные технологии термической обработки отходов. Основная организационная задача – накопление трехсуточного запаса подготовленных отходов (300–360 тонн) и обеспечение их бесперебойной подачи в объеме 2–5 тонн в час.

Технология является новой и проекты по внедрению начались весной 2025 г., а компания-разработчик находится на этапе вывода продукта на рынок. Так, в декабре 2024 г. прошли испытания опытно-промышленной установки «Астра» с производительностью до 5 т подготовленного сырья в час (коэффициент плотности 0,8). Проверки подтвердили эффективность технологии утилизации отходов, надежность конструктивных решений при критических нагрузках и готовность установки к промышленной эксплуатации. Успешно выполнен запуск на промышленной площадке с переработкой отходов в режиме реального времени, определено фактическое время выхода на рабочий режим.

Адаптивная станция термического разложения «Астра» включает две стадии:

- первоначальная (подготовительная) стадия – это достаточно известный и распространенный метод «пиролиз», при котором из органического сырья (без доступа кислорода) за счет внешнего нагрева образуется «синтез-газ» и сопутствующие органические продукты в газообразном состоянии;
- вторичная (окончательная) стадия – это метод «парциальное окисление», при котором в образовавшуюся смесь газообразных органических продуктов под давлением, дозированно подается окислитель (кислород, озон и т.д.), что приводит к

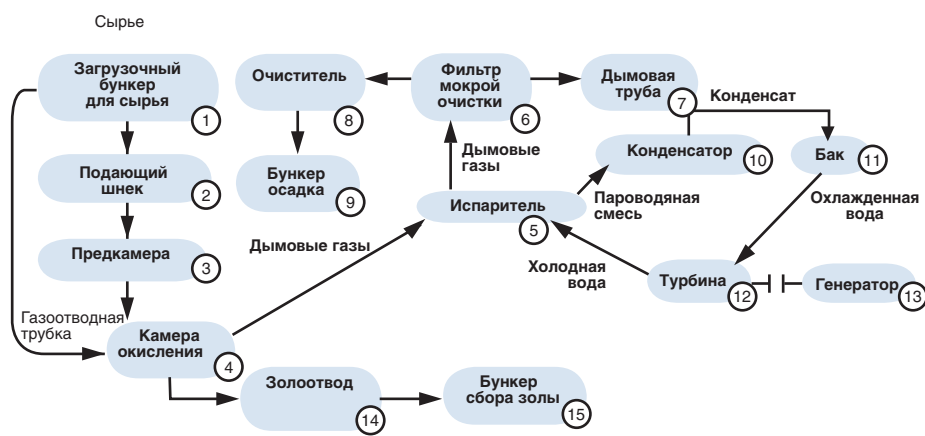
дальнейшему увеличению температуры (изотермический процесс), и имеющиеся после стадии «пиролиз» органические молекулы распадаются на минеральные составляющие, в итоге образующие на выходе процесса CO_2 и H_2O .

В сумме эти два процесса, происходящих последовательно (за счет перемещения шнеком внутри реактора), образуют синергетический эффект, получивший термин «резонансный термофронтальный синтез». После того, как данная реакция стабилизируется (требуется около 12 часов), часть тепловой энергии перегретых газов закольцовывается (поступает) на вход, что даст возможность отключить внешний источник нагрева пиролизной стадии. В конечном итоге получается (условно), что в системе «Астра» сам углеводородсодержащий отход выступает топливом для ее работы, а его калорийность определяет время и температуру протекания процесса (рис. 4–5).

Обратим внимание, что особое значение в утилизации отходов приобретает анализ затрат и доходов, в том числе от вторичного использования сырья и генерации энергии. Экономическая результативность становится ключевым критерием при выборе технологий переработки, обеспечивая формирование устойчивой модели управления отходами, которая учитывает как экологическую безопасность, так и экономическую целесообразность.

Например, в Республике Алтай ежегодно образуется порядка 250–300 тыс. тонн твердых коммунальных отходов, при этом в туристический сезон их объем возрастает почти вдвое. Основная часть отходов по-прежнему направляется на захоронение, а уровень

переработки не превышает 10–12%, что противоречит стратегическим приоритетам устойчивого развития региона. Внедрение адаптивной станции термического разложения «Астра» с производительностью до 5 т в час (до 40 тыс. тонн в год) позволит существенно сократить объем захоронений и обеспечить переработку значительной доли регионального потока отходов.



1. Загрузочный бункер предназначен для загрузки исходного сырья.
2. Подающий шнек предназначен для перемещения сырья в предкамеру.
3. Предкамера предназначена для предварительного прогрева сырья.
4. Камера окисления предназначена для высокотемпературного разложения сырья.
5. Испаритель предназначен для парообразования.
6. Фильтр мокрой очистки предназначен для очистки дымовых газов.
7. Дымовая труба предназначена для отвода дымовых газов.
8. Очиститель предназначен для фильтрации и отвода мелкодисперсных сажистых образований в бункер осадка.

9. Бункер осадка предназначен для сбора мелкодисперсных образований.
10. Конденсатор предназначен для преобразования пара в жидкость.
11. Бак предназначен для сбора конденсата и его последующей подачи в зону высокого давления турбины для вращения генератора.
12. Турбина предназначена для передачи крутящего момента на генератор.
13. Генератор предназначен для выработки электроэнергии.
14. Золоотвод предназначен для отвода зольного остатка.
15. Бункер сбора золы предназначен для сбора зольного остатка.

РИС. 4.

Функциональная схема работы установки «Астра»

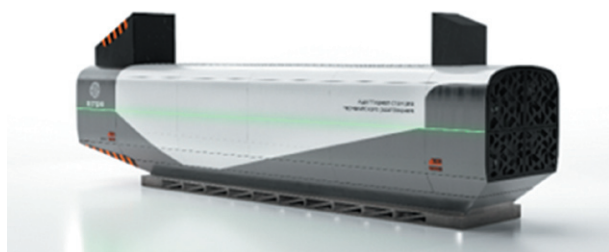


РИС. 5.
Опытно-промышленная установка «Астра»

При этом с точки зрения концепции развития Республики Алтай, ориентированной на модель устойчивого ноосферного развития [2, 18], технология «Астра» может рассматриваться как элемент инновационной инфраструктуры, так как не только минимизирует экологические риски, но и формирует условия для ресурсно-энергетической безопасности региона за счет выработки тепловой и электрической энергии из отходов, создавая предпосылки для роста энергетической независимости и снижения тарифной нагрузки на население.

В этом контексте адаптивная станция термического разложения «Астра» выступает примером технологического решения, способного органично интегрироваться в региональные системы управления отходами и создавать условия для устойчивого

Е.Ф. ШАМАЕВА, М.Ш. САЛАМАНОВА,
А.А. АСОНОВ, М.В. ГРЕЧИТАЕВА
СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ
ОТХОДОВ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО
УЩЕРБА И РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ НА ПРИМЕРЕ
АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ «АСТРА»

развития территорий. Она позволяет перерабатывать углеродсодержащие материалы с минимизацией воздействия на окружающую среду и одновременно формирует экономический эффект для развития.

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЕКТА ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ «АСТРА»

Система «Астра» монтируется непосредственно на полигоне или интегрируется в технологическую линию предприятия, что исключает необходимость транспортировки отходов. Перерабатывает отходы до 5 т в час (при плотности 0,8 тонн/м³), не выделяя вредные вещества в атмосферу. Зольный остаток соответствует 4–5 классу отходов по Федеральному классификационному каталогу отходов (ФККО), если не применять его в качестве сырьевого материала. Выбросы соответствуют СанПиН 2.1.3684–21 и ГН 2.1.6.3492–17. Обработывает все виды отходов с содержанием углерода: органические материалы, древесину, резину, пластик и другие. Не подходят песок, стекло, бетон, металл. Генерирует от 2 Гкал тепла и при подключении дополнительного оборудования от 500 кВт × ч электроэнергии (с помощью блока генерации электрической энергии «Аэрлифт»).

Основные характеристики установки «Астра» представлены в таблице 2.

Рассмотрим рентабельность коммерциализации электроэнергии, получаемой из тепловой энергии как из вторичного продукта при утилизации RDF-топлива с помощью адаптивной станции термического разло-

ТАБЛИЦА 2.

Характеристики адаптивной станции термического разложения «Астра»

№ пп	Показатель	Характеристика	
1	Производительность	перерабатывает отходы плотностью 0,8–5 т/м ³ с производительностью до 5 тонн в час; обрабатывает отходы с содержанием углерода: органику, древесину, резину, пластик и др. (не подходят: песок, стекло, бетон, металл)	
2	Экологичность	зольный остаток соответствует 4–5 классу опасности (ФККО); выбросы соответствуют нормативам: СанПиН 2.1.3684–21 и ГН 2.1.6.3492–17	
3	Энергогенерация	тепловая энергия: от 2 Гкал/час; электрическая энергия (при подключении когенерации): от 500 кВт×ч.	
4	Рентабельность коммерциализации электроэнергии из RDF-топлива (англ. refuse-derived fuel, топливо, полученное из отходов)	Источник сырья	Используется RDF-топливо (refuse-derived fuel), получаемое из отходов, что снижает затраты на закупку сырья
		Экономические преимущества	снижение затрат на утилизацию за счет переработки отходов на месте; дополнительный доход от продажи электроэнергии (500+ кВт·ч/час) и тепла (2+ Гкал/час); возможность работы в рамках зеленого тарифа или продажи энергии промышленным потребителям
		Окупаемость	зависит от тарифов на электроэнергию и объемов переработки; средний срок окупаемости при коммерческой реализации энергии – 3–5 лет
		Экологические льготы	возможность получения субсидий и налоговых преференций за использование возобновляемых источников энергии; улучшение экологического рейтинга предприятия

жения «Астра». Затраты на стороннее оборудование не учитываются. Предполагается, что производственная площадка обладает всей необходимой механизацией для подачи RDF-топлива в переработку. Также не учитывается дополнительный доход от продажи и/или использования побочных продуктов от эксплуатации оборудования, таких как зольный остаток и углекислый газ. Не учитывается доход и за сам процесс утилизации и прием отходов. Исходные данные для расчета представлены в таблицах 3–5.

На основании приведенных данных рассчитаны: чистая приведенная стоимость (NPV), которая составила 272 515 601,83 руб.; внутренняя норма доходности (IRR) – составила 51%; срок окупаемости

(PP) – составил 1,92 года; чистый денежный поток (NCF) – составил 88040640,00 руб. Приведенные расчеты показывают эффективность проекта.

Представленные расчеты проведены по консервативному сценарию – с учетом максимальных затрат и минимальных доходов (утилизация, тепловая и электрическая энергия). Это гарантирует, что при промышленной реализации фактические показатели будут не ниже расчетных.

ТАБЛИЦА 3.

Капитальные затраты на проект внедрения адаптивной станции «Астра»

Параметр	Значение
Стоимость оборудования в базовой комплектации, руб.	160 000 000,00
Доставка по России, руб.	1 200 000,00
Монтаж и пуско-наладочные работы, руб.	8 000 000,00
Обучение персонала, руб.	140 000,00
Расчетный тариф за электричество руб/КВт	8
Общие капитальные затраты, руб.	169 340 000,00

ТАБЛИЦА 4.

Операционные затраты на проект внедрения адаптивной станции «Астра»

Параметр	Значение
Эксплуатационные затраты, руб/год	4 800 000,00
Эксплуатационные затраты (текущий ремонт, непредвиденные ремонтные работы, расходные материалы), руб/год	3 200 000,00
ФОТ операторов (12 чел.), включая взнос ЕНП, руб/год	22 844 160,00
Вывоз (утилизация) зольного остатка, руб/год	2 203 200,00
Расход на покупку RDF, руб/год	19 584 000,00
Годовая амортизация из расчета полезного использования оборудования в 10 лет, руб.	16 000 000,00

ТАБЛИЦА 5.

Производительность адаптивной станции термического разложения «Астра»

Параметр	Значение
Минимальная мощность (тонны в час)	2
Режим работы	Непрерывный
Кол-во рабочих смен в году с учетом остановки оборудования для ТО (дней)	340
Годовая мощность (тонн)	16 320
Расчетный тариф за электричество руб/КВт	8
Стоимость 1 тонны RDF*, руб.	1 200
Коэффициент уплотнения RDF (зольный остаток)	0,05
Зольный остаток в год (тонн)	816
Стоимость утилизации зольного остатка (вывоз на полигон) руб./тонна	2 700,00
Генерация тепла из 1 тонны RDF, ГКал	2,4
Генерация электричества из 1 ГКал тепла, кВт	500
Выработка электроэнергии, кВт в год	19 584 000
Расход на покупку RDF, руб./год	19 584 000
Доход от продажи и/или экономии электричества, руб/год	156 672 000

* Под стоимостью RDF можно так же понимать стоимость подготовки отходов ТКО и производства (сортировка, просеивание, шредирование), так как RDF топливо полностью соответствует техническому регламенту разрешенного к подаче в Астру сырья, и его стоимость полностью покрывает затраты на все процессы подготовки для утилизации. Это означает, что стоимость 1 тонны RDF будет примерно равна стоимости подготовки 1 т мусора (ТКО) для Астры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нарастание проблем с утилизацией отходов, ухудшением экологической ситуации и требования-ми устойчивого развития диктуют необходимость осваивать рециклинг и энергоутилизацию: ресурсы ограничены и утилизация их привычным для страны способом уже не актуальна. При этом опыт других стран показывает, что рециклинговая система может функционировать и сопровождаться не только экологической, но и экономической выгодой как для государства, так и для населения. Целесообразно освоение потенциала энергии из отходов как пути развития промышленности и отраслей энергетики и обращения с отходами. При этом в условиях промышленного развития РФ особое место занимают вопросы утилизации отходов промышленности, а также исполнения государственных программ, направленных на экологическое благополучие.

В ходе настоящего исследования проанализирована применимость фундаментальных основ понимания организационных систем для организации территориальных экономических систем; оценены проблемы утилизации отходов в Российской Федерации; рассмотрены технологические возможности утилизации отходов при минимизации экологического воздействия; предложено технико-экономическое обоснование использования адаптивной станции термического разложения «Астра».

ЛИТЕРАТУРА

1. Вайцзеккер Э., Майкл Х. Смит, Харгроуэ К. Фактор пять. Формула устойчивого роста. Аст-Пресс, 2013. С. 368. ISBN 978-5-462-01288-4.
2. Головин А.А., Шамаева Е.Ф. Методология разработки концепции устойчивого развития горных территорий // Устойчивое развитие горных территорий. 2024. Т. 16. № 4 (62). С. 1743–1755.
3. Государственный реестр объектов размещения отходов. URL: <https://rpn.gov.ru/activity/regulation/kadastr/groro/> Дата обращения: 04.07.2025.
4. Игнатьева А.В., Кнауэ Р.В. Анализ природно-техносферной безопасности субъектов Сибирского федерального округа России с использованием методологии INFORM // Успехи современного естествознания. 2021. № 12. С. 120–126.
5. Кнауэ Р.В., Шамаева Е.Ф., Попов Е.Б. Устойчивое региональное развитие арктических территорий в контексте безопасности // Сетевое научное издание «Устойчивое инновационное развитие: проектирование и управление». 2019. Т. 15. Вып. 3 (44).
6. Любимова А.В., Шамаева Е.Ф., Быков М.А. Картирование объектов обращения с отходами и вторичного сырья на примере Арктической зоны России // Геоинформатика, 2021. №3. DOI: 10.47148/1609-364X-2021-3-48-54.

Е.Ф. ШАМАЕВА, М.Ш. САЛАМАНОВА,
А.А. АСОНОВ, М.В. ГРЕЧИТАЕВА
СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ
ОТХОДОВ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО
УЩЕРБА И РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ НА ПРИМЕРЕ
АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ «АСТРА»

7. Национальное бюро по переработки отходов. URL: <http://www.nbpro.ru>. Дата обращения: 04.07.2025.
8. Новиков Д.А. Методология управления. М.: Ли-брокком. 2012. 126 с. ISBN 978-5-397-02308-5.
9. Обращение с отходами: российский и финский опыт. Коллектив авторов. СПб.: ООО «Политехника Сервис». 2021. 158 с. ISBN 978-5-00182-003-1.
10. Отраслевой портал «Отходы.Ру». URL: <http://waste.ru>. Дата обращения: 04.07.2025.
11. Приказ Минприроды России от 30.09.2011 № 792 «Об утверждении Порядка ведения государственного кадастра отходов».
12. Фаюстов А.А. Утилизация промышленных отходов и ресурсосбережение: основы, концепции, методы. М.: Инфра-Инженерия. 2019. 272 с. ISBN: 978-5-9729-0369-6.
13. Федеральная служба по надзору в сфере природопользования. URL: https://rpn.gov.ru/press/news/rossiya_sokratila_obrazovanie_otkhodov_proizvodstva_i_potrebleniya/. Дата обращения: 04.07.2025.
14. Хорошавин Л.Б. Основные технологии переработки промышленных и твердых коммунальных отходов. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. 2016. ISBN 978-5-7996-1747-9.
15. Электронный ресурс. Eurostat. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/documents/10186/0/Environmental_Waste_Statistics_in_EU.pdf. Дата обращения: 25.08.2025 г.
16. Электронный ресурс. EPA. URL: <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/national-summary-facts-and-figures-waste>. Дата обращения: 25.08.2025 г.
17. Электронный ресурс. UNEP. URL: <https://www.unep.org/resources/report/global-waste-management-outlook>. Дата обращения: 25.08.2025 г.
18. Электронный ресурс. URL: <https://guu.ru/%D1ysclid=mevc6he46q691326794>. Дата обращения: 25.08.2025 г.
19. Troschinetz A.M. Twelve factors influencing sustainable recycling of municipal solid waste in developing countries. URL: <https://digitalcommons.mtu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1276&context=etds>. Дата обращения: 04.07.2025.

REFERENCE

1. WEIZSÄCKER E., SMITH M.H., HARGROVES K. Factor Five. Formula for Sustainable Growth. Ast Press. 2013:368. ISBN 978-5-462-01288-4. (In Russian).
2. GOLOVIN A.A., SHAMAEVA E.F. Development of the Conceptual Framework for Sustainable Mountain Territories. *Ustoichivoye Razvitiye Gornyykh Territoriy*. 2024;16;4 (62): 1743–1755. (In Russian).
3. State Register of Waste Disposal Sites. Available at: <https://rpn.gov.ru/activity/regulation/kadastr/groro/>. Retrieved Jul 4, 2025.

4. IGNATYEVA A.V., KNAU R.V. Environmental Safety Analysis of Subjects of the Siberian Federal District Using the INFORM Methodology. *Uspekhi Sovremennogo Estestvoznaniya*. 2021;(12): 120–126. (In Russian).
5. KNAU R.V., SHAMAEVA E.F., POPOV E.B. Sustainable Regional Development of Arctic Territories within Security Context. *Setevoe Nauchnoe Izdanie "Ustoichivoe Innovatsionnoe Razvitie: Proektirovanie i Upravlenie"*. 2019;15;3;(44). (In Russian).
6. LYUBIMOVA A.V., SHAMAEVA E.F., BYKOV M.A. Mapping Objects of Waste Management and Secondary Raw Materials in Russia's Arctic Zone. *Geoinformatika*. 2021;(3). DOI: 10.47148/1609-364X-2021-3-48-54. (In Russian).
7. National Waste Recycling Bureau. Available at: <http://www.nbpо.ru>. Retrieved Jul 4, 2025.
8. NOVIKOV D.A. Methodology of Management. Librokom. 2012:126. ISBN 978-5-397-02308-5. (In Russian).
9. Obrashchenie s otkhodami: rossijskij i finskij opyt. Kollektiv avtora. SPB: Politehnika Servis; 2021:158. ISBN 978-5-00182-003-1. (In Russian).
10. Industry Portal Waste.Ru. Available at: <http://waste.ru>. Retrieved Jul 4, 2025. (In Russian).
11. Order of Ministry of Natural Resources of Russia N 792 dated Sept. 30, 2011. «On Approval of Procedure for Keeping State Cadaster of Wastes». (In Russian).
12. FAYUSTOV A.A. Utilization of Industrial Waste and Resource Conservation: Foundations, Concepts, Methods. Moscow: Infra-Inzheneriya. 2019:272. ISBN: 978-5-9729-0369-6. (In Russian).
13. Federal Environmental Oversight Agency. Available at: <https://rpn.gov.ru/press/news/rossiya-sokratila-obrazovanie-otkhodov-proizvodstva-i-potrebleniya/>. Retrieved Jul 4, 2025. (In Russian).
14. HOROSHAVIN LB. Key Technologies for Processing Industrial and Municipal Solid Waste. Ekaterinburg: Uralskij Universitet Publ. 2016. ISBN 978-5-7996-1747-9. (In Russian).
15. Electronic resource. Eurostat. Available at: https://ec.europa.eu/eurostat/documents/10186/0/Environmental_Waste_Statistics_in_EU.pdf. Retrieved Aug 25, 2025. (In Russian).
16. Electronic resource. EPA. Available at: <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/national-summary-facts-and-figures-waste>. Retrieved Aug 25, 2025. (In Russian).
17. Electronic resource. UNEP. Available at: <https://www.unep.org/resources/report/global-waste-management-outlook>. Retrieved Aug 25, 2025. (In Russian).
18. Electronic resource. URL: <https://guu.ru/%D1yslclid=mevс6he46q691326794>. Retrieved Aug 25, 2025. (In Russian).
19. TROSHINETZ A.M. Twelve factors influencing sustainable recycling of municipal solid waste in developing countries. URL: <https://digitalcommons.mtu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1276&context=etds>. 04.07.2025.

Шамаева Екатерина Федоровна,
к.т.н., доцент кафедры управления природопользованием
Государственного университета управления
ORCID: 0000-0002-1070-8550

109542, г. Москва, Рязанский пр-т, д. 99,
109542, Moscow, Ryazansky Prospekt, 99,
тел.: +7 (495) 377-89-14, e-mail: ef_shamaeva@guu.ru

Саламанова Мадина Шахидовна,
д.т.н., доцент кафедры «Технология строительного произ-
водства» Грозненского государственного нефтяного техни-
ческого университета имени академика М.Д. Миллионщи-
кова
ORCID: 0000-0002-1293-7090

✉ 364051, Чеченская Респ., г. Грозный,
пр-кт им. Х. А. Исаева, д. 100,
364051, Chechen Republic, Grozny, avenue
named after Kh. A. Isaev, 100
e-mail: Madina_salamanova@mail.ru

Асонов Антон Анатольевич,
генеральный директор ООО «Развитие администрирование
и эксплуатация»
ORCID: 0009-0007-3716-3523

✉ 195426, г. Санкт-Петербург, ул. Хасанская, д. 5, литера А,
офис 13,
195426, St. Petersburg, Khasanskaya st., 5, litera A,
office 13,
e-mail: nm.sol@bk.ru

Гречитаева Марина Вячеславовна,
д.б.н., профессор кафедры управления природопользова-
нием Государственного университета управления
ORCID: 0000-0002-3712-1557

✉ 109542, г. Москва, Рязанский пр-т, д. 99,
109542, Moscow, Ryazansky Prospekt, 99,
тел.: +7 (495) 377-89-14, e-mail: moryana12@mail.ru

УДК622.276.63

DOI: 10.52531/1682-1696-2025-25-3-86-95

Научная статья

EDN: PMVPDT

НОВЫЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ ПРИЗАБОЙНЫХ ЗОН ДОБЫВАЮЩИХ СКВАЖИН С ВНУТРИПЛАСТОВОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ ДВУОКИСИ УГЛЕРОДА

С.В. АРЕФЬЕВ¹,
А.В. БРУСЛОВ², А.В. ДЕНИСОВ²

¹ ПАО «Лукойл», Москва,
Российская Федерация

² Российский государственный
геологоразведочный университет
имени Серго Орджоникидзе" (МГРИ),
Москва, Российская Федерация

Работа посвящена вопросу удаления кольматирующих частиц и отложений после кислотных обработок призабойных зон добывающих скважин с внутрипластовой генерацией двуокиси углерода. Разработан и предложен новый комбинированный метод для более полного удаления кольматирующих асфальтосмолистых осадков и отложений. Новизна метода состоит в том, что после закачки газовыделяющего агента в скважину дополнительно закачивают специально подобранный ароматический углеводородный растворитель или смеси таких растворителей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: обработка призабойных зон, добывающие скважины, метод, внутрипластовая генерация двуокиси углерода, газовыделяющий агент, газообразующий агент, асфальтосмолистые осадки и отложения, ароматический углеводородный растворитель, расчеты, количества, концентрации, реагенты

Широко применяемые кислотные обработки призабойных зон добывающих скважин не всегда обеспечивают заметное увеличение притока нефти. Одна из причин – неполное удаление из нефтеводонасыщенной пористой среды кольматирующих частиц после реакции породы призабойной зоны с кислотой. Кольматанты удаляют различными способами. В числе таких способов – создание условий для удаления кольматантов при их контакте с двуокисью углерода.

Технологии, предполагающие применение углекислого газа, зарекомендовали себя как эффективные методы воздействия на остаточные запасы и приза-

Original article

A NEW METHOD OF PRODUCTION WELLS BOTTOM-HOLE ZONE TREATMENT WITH IN-SITU CARBON DIOXIDE GENERATION

S.V. AREFYEV¹,
A.V. BRUSLOV², A.V. DENISOV²

¹ PAO Lukoil, Moscow, Russian
Federation

² Russian State Geological Prospecting
University named after Sergo
Ordzhonikidze (MGRI), Moscow, Russian
Federation

The paper is about better removal of asphaltic resinous sediments and deposits, after production well bottom-hole zone acid treatment, with in-situ CO₂ generation. A new combined treatment method is developed and proposed, for better removal of colmatating asphaltic resinous sediments and deposits. Method novelty is that, after injection of gas releasing agent, especially selected aromatic hydrocarbon solvent, or such solvent mixture, are additionally injected into the well.

KEY WORDS: bottom-hole zone treatment, production wells, method, in-situ carbon dioxide generation, gas releasing agent, gas generation agent, asphaltic resinous sediments and deposits, aromatic hydrocarbon solvent, calculations, concentrations, reagents

бойную зону пласта, что объясняется рядом неоспоримых преимуществ CO₂ [9–16, 21, 22].

Способ получения двуокиси углерода в пластовых условиях описан в работах [10, 11, 15–19, 21]. В [15–19] рассмотрены условия генерации и рассчитаны зависимости объема генерируемого газа от внешних условий. В работах [10, 11, 21] приведены промышленные результаты внедрения технологии генерации CO₂ при разработке нефтяных месторождений. Также технология генерации CO₂ нашла применение при удалении кольматанта из призабойной зоны пласта.

Известен комбинированный метод обработок с кислотами и двуокисью углерода [13]. При реализации данной технологии CO₂ генерируют непосредственно в призабойной зоне путем контакта выделяющего CO₂ (газовыделяющего) и образующего CO₂ (газообра-

зующего) агентов. В качестве газовыделяющего агента применяют водные растворы карбонатов натрия или калия. В качестве газообразующего агента используют водные растворы соляной, плавиковой кислот или их смеси. В результате контакта газовыделяющего и газообразующего агентов в призабойной зоне добывающих скважин генерируется газожидкостный раствор соли, содержащий и насыщенный CO_2 .

В целях разработки технологии обработки призабойной зоны скважины с использованием CO_2 авторами [8] были проведены сравнительные лабораторные исследования процесса очистки пористой среды.

Опыты проводились на модели пласта с проницаемостью $0,5 \text{ мкм}^2$. Модель пористой среды состояла из кварцевого песка (90%) и монтмориллонитовой глины (10%), при этом начальный участок (1/3 объема пор) представлял собой смесь кварцевого песка и кварцевой пыли, моделью нефти служило трансформаторное масло. Термостатирование системы осуществлялось при температуре 304 К.

После обвязки экспериментальной установки и насыщения ее моделью нефти снимались значения кривой восстановления давления (КВД) (на рисунке показано значение выходного манометра), характеризующие фоновое (незагрязненное) состояние среды (рис.1, кривая 1). Затем производилось искусственное загрязнение начального участка пористой среды путем закачки на входе модели асфальтенопарафинистой нефти (30 %), глины и соли (хлористый кальций) в объеме, равном 0,3 объема пор модели, и вновь производилось снятие значений КВД (рис.1, кривая 2). После этого в целях очистки призабойной зоны на входе колонки закачивался 12%-ный водный раствор соляной кислоты и опять производилось снятие значений КВД (рис.1, кривая 3). Затем давление на входе сбрасывалось до атмосферного, и замерялся объем выносимого продукта. Далее снимались значения КВД при перепаде давления $\Delta P = 2 \text{ МПа}$ ($P_{\text{вых}} = 8 \text{ МПа}$; $P_{\text{вх}}$).

Как видно из результатов эксперимента, время восстановления давления на «загрязненной» модели пласта после закачки газообразующих реагентов различно в зависимости от уровня давления, при котором снимаются значения КВД. При этом очевидно, что время восстановления давления после обработки среды соляной кислотой меньше, чем в загрязненной среде, однако значительно больше времени восстановления после обработки модели CO_2 генерирующими растворами. Наилучшие показатели (6) были получены при давлении 8 МПа.

Обработку скважины по известной технологии [13] проводят в последовательности: 1) закачка порции углеводородного раствора поверхностно-активного вещества низкой концентрации; 2) закачка порции газовыделяющего агента; 3) закачка порции разделяющей буферной воды; 4) закачка порции кислотного газообразующего агента; 5) выдержка сгенерированной в призабойной зоне CO_2 на распределение в нефтеводонасыщенной пористой среде призабойной зоны; 6) запуск добывающей скважины в работу.

При этом количества закачиваемых газовыделяющего и кислотного газообразующего агента, а также концентрации их водных растворов определяют расчетным путем. Расчеты производят исходя из оптимального объема конечного продукта реакции (солевого газонасыщенного раствора), пластовых условий и количества двуокиси углерода в солевом газонасыщенном растворе. В расчетах учитывают дополнительное расходование кислотного газовыделяющего агента на реакцию с породой коллектора в призабойной зоне.

Как хорошо известно, двуокись углерода в контакте с системой «нефть-вода-продуктивный пласт», в призабойных зонах скважин, обеспечивает снижение межфазного натяжения, дополнительный отмыв, отрыв нефти и очистку призабойных зон от коагулирующих частиц [8, 20]. Насыщение части нефти CO_2 приводит к снижению ее вязкости, увеличению объема и, как следствие, увеличению подвижности [1]. При контакте двуокиси углерода с пластовой нефтью также происходит экстракция легких углеводородов нефти в фазу двуокиси углерода. При этом оставшаяся нефтяная фаза становится обедненной отэкстрагированными легкими углеводородами и, как результат, перенасыщенной тяжелыми фракциями с асфальтосмолистыми отложениями. Поэтому подвижность отэкстрагированной части нефти будет выше исходной подвижности нефти при вязкости ниже исходной вязкости, а подвижность оставшейся нефти будет ниже исходной подвижности нефти при вязкости выше исходной.

Эти тенденции были подтверждены экспериментально при вытеснении различных нефтей и их аналогов.

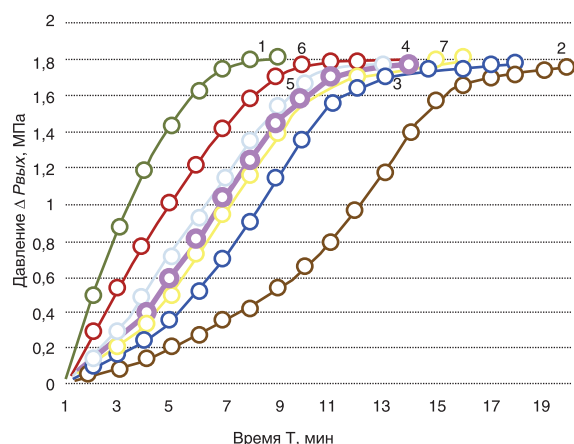


РИС. 1.

Кривые восстановления давления на модели пласта (ΔP — изменение давления на выходном манометре): в незагрязненном состоянии (1); после загрязнения (2); после очистки загрязненной зоны соляной кислотой (3); после очистки CO_2 — генерирующими раствором при давлении выдержки, МПа: 10 (4), 9 (5), 8 (6); 7 (7)

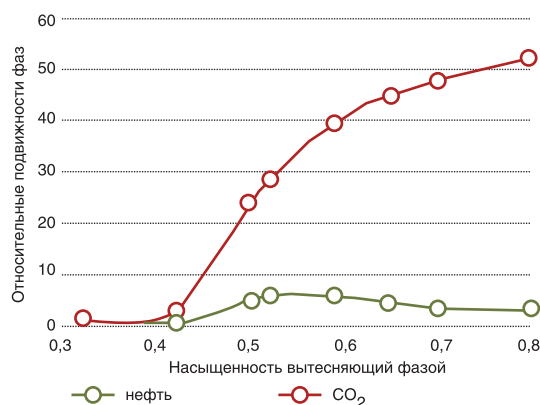


РИС. 2.

Изменение относительных подвижностей Соколкино-Сараполинской нефти и вытесняющей фазы двуокиси углерода

С.В. АРЕФЬЕВ, А.В. БРУСЛОВ, А.В. ДЕНИСОВ
НОВЫЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ ПРИЗАБОЙНЫХ ЗОН
ДОБЫВАЮЩИХ СКВАЖИН С ВНУТРИПЛАСТОВОЙ
ГЕНЕРАЦИЕЙ ДВУОКИСИ УГЛЕРОДА

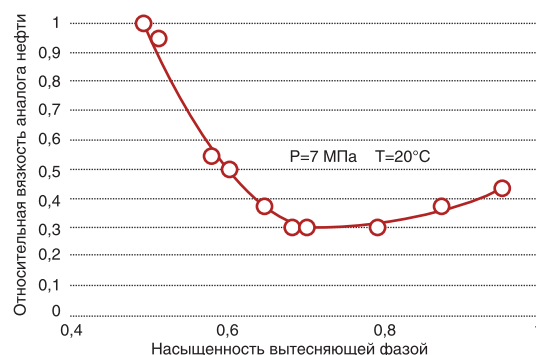


РИС. 3.

Изменение относительной вязкости аналога нефти при вытеснении фазой жидкой двуокиси углерода

гами жидкой двуокисью углерода [1], как на рисунках 2 и 3.

Помимо продуктов реакции кислоты с нефтеводонасыщенной породой призабойной зоны кольматанты включают асфальтосмолистые осадки. Осадки формируются в результате изменения состава нефти в призабойной зоне после реакции. Изменение состава происходит как от окисления нефтей в призабойной зоне, так и от нарушения равновесного состава нефтей после экстракции легких углеводородов нефти в фазу двуокиси углерода. При этом оставшаяся нефтяная фаза становится перенасыщенной асфальтосмолистыми отложениями. Поэтому при обработке призабойных зон с генерацией CO₂, ее контактом и растворении в нефтях, помимо очистки от кольматирующих частиц от кислотной обработки, будет эффект дополнительного выпадения из нефтей асфальтосмолистых осадков и образования их отложений в пористой среде [5, 6].

Поэтому применение известного способа обработки призабойной зоны [13] сопровождается рисками дополнительного образования асфальтосмолистых отложений и снижения эффективности обработки.

С целью минимизации, исключения такого риска был разработан и предложен такой новый комбинированный метод, когда после закачки выделяющих и генерирующих CO₂ агентов в призабойную зону дополнительно закачивают углеводородный растворитель [8].

В предложенном методе обработки призабойной зоны нефтяного пласта, заключающемся в обработке пласта газожидкостным раствором, генерируемым в призабойной зоне после закачки в пласт газовыделяющего и газообразующего растворов и последующей генерации газожидкостного раствора, в добывающую скважину закачивают углеводородный растворитель в виде бензола, толуола, ксилола или их смеси. Для пред-

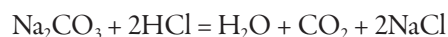
варительно определяют состав растворителя, обеспечивающий наилучшее растворение нефтяного осадка асфальтосмолистых веществ.

Соблюдение правильной последовательности закачки газовыделяющего и газогенерирующего агентов является обязательной, поскольку кислотный раствор (газогенерирующий агент) реагирует как с породой пласта, так и с газовыделяющим раствором. Если сначала закачать кислотный раствор, то в процессе закачки его часть будет расходоваться на реакцию с породой. Поэтому количество активного вещества (кислоты) на реакцию с газовыделяющим раствором станет меньше, чем рассчитано из условий стехиометрии для необходимой реакции части кислотного раствора с газовыделяющим раствором (и дальнейшим насыщением оставшейся части кислотного раствора двуокисью углерода как продукта реакции отреагировавшей части кислотного раствора с газовыделяющим). В случае закачки газовыделяющего раствора в первую очередь, а кислотного во вторую дополнительных потерь кислотного раствора из-за расходования на реакцию с породой не будет, так как кислотный раствор будет сразу контактировать и реагировать с газовыделяющим, закачанным ранее. В одном из вариантов метода перед закачкой кислотного раствора заливают разделяющую буферную жидкость в виде воды, которая исключает образование двуокиси углерода в стволе скважины, предотвращая повышение давления в ней и сохраняя целостность.

В качестве кислотного раствора в предлагаемом способе могут быть использованы водные растворы соляной (при обработке карбонатных коллекторов) или соляной и фтороводородной (при обработке песчано-алевролитовых коллекторов) кислот.

В качестве газовыделяющего раствора могут быть использованы водные растворы карбонатов металлов (Me), например, карбоната натрия (кальцинирован-

ная сода). При этом в результате реакции между соляной (или фтороводородной) кислотой и карбонатом натрия будет генерироваться двуокись углерода (CO_2) и вода:



Поскольку карбонат натрия и соляная кислота в реакции участвуют в форме водных растворов, где концентрации этих компонентов можно создавать в определенных диапазонах, то количество генерируемой двуокиси углерода также можно изменять через количества и концентрации реагирующих агентов в растворах.

В реакции участвуют карбонат натрия с молекулярной массой 106 и две молекулы хлорида натрия с молекулярной массой 73. В числе продуктов реакции находится CO_2 с молекулярной массой 44. При условии полного расходования карбоната натрия и хлористого водорода на образование 1 тонны двуокиси углерода соответствующие стехиометрические коэффициенты для карбоната натрия составят $106/44 = 2,409$ и для хлористого водорода (100% соляной кислоты) как $73/44 = 1,659$. То есть для образования 1 т CO_2 понадобится 2,409 т карбоната натрия и 1,659 т хлористого водорода. Эти численные соотношения и стехиометрические коэффициенты имеют практическое значение для расчетов количеств и концентраций реагентов для обработки призабойных зон.

Хорошо известно, что подбор растворителя асфальтосмолистых осадков и отложений определяется составом этих отложений [5, 6, 8]. Лабораторное определение составов отложений и растворителей технически не представляет затруднений. Количество и состав растворителя можно определить, исходя из количества нефти в обрабатываемой призабойной зоне, содержания асфальтосмолистых осадков в нефти и состава таких осадков.

Как правило, асфальтосмолистые осадки эффективно диспергируются и растворяются в контакте с ароматическими растворителями. В качестве таких растворителей применяют бензол, толуол и ксилол. Можно использовать и смеси таких растворителей. Бензол, толуол и ксилол различаются своими молекулярными массами: 78 для бензола, 92 для толуола и 108 для ксилола. Смешивая эти растворители в разных количествах, можно получать их смеси промежуточных молекулярных масс. При этом будет известна зависимость молекулярной массы смеси от содержания смешиваемых растворителей.

Хорошо известно, что диспергирующая способность поверхностно-активных веществ в отношении асфальтосмолистых осадков и отложений определяется, в том числе, соотношением молекулярных масс поверхностно-активных веществ и контактирующих с ними асфальтосмолистых осадков и отложений. Так

для более эффективного диспергирования и удаления осадков, отложений с большей молекулярной массой необходимы поверхностно-активные вещества также большей молекулярной массой.

Такой же принцип соотношения молекулярных масс асфальтосмолистых осадков, отложений и удаляющих их растворителей использован в отношении молекулярных масс осадков и отложений асфальтосмолистых компонентов нефтей после их контакта с двуокисью углерода и молекулярных ароматических растворителей. Например, для осадка с большим молекулярным весом понадобится большее содержание кислоты в смеси. Для осадка с меньшим молекулярным весом понадобится смесь с большим содержанием бензола.

Определение состава можно проводить опытным путем в лабораторных условиях из условия максимальных диспергирования и растворимости асфальтосмолистых отложений в применяемом растворителе [2, 4, 7].

При таком подходе к выбору ароматического растворителя очевидно, что состав растворителя необходимо определять еще до обработки призабойной зоны добывающей скважины.

Из промышленного опыта известно, что для эффективного удаления асфальто-смолистых отложений из призабойной зоны добывающей скважины достаточно растворителя не более, чем 30% от объема обрабатываемой зоны. При больших количествах есть риск неоправданного удорожания технологических операций.

Обработку призабойных зон по предлагаемому методу проводят в последовательности: 1) закачка порции углеводородного раствора поверхностно-активного вещества низкой концентрации; 2) закачка порции газовыделяющего агента; 3) закачка порции разделяющей буферной воды; 4) закачка порции кислотного газообразующего агента; 5) выдержку сгенерированной в призабойной зоне CO_2 на распределение в нефтеводонасыщенной пористой среде призабойной зоны; 6) запуск добывающей скважины в работу.

Ниже будет показано, как определять необходимые количества и концентрации реагентов для проведения кислотных обработок добывающих скважин, с внутрипластовой генерацией двуокиси углерода и заключительным этапом закачки ароматического растворителя.

Пример 1. В нефтяной скважине с дебитом по нефти $80 \text{ м}^3/\text{сут}$, обводненностью 42%, мощностью пласта 14 м, проницаемостью $0,120 \text{ мкм}^2$, пластовым давлением 10 МПа и пластовой температурой 45°C следует провести обработку призабойной зоны по предлагаемому способу. Объем обрабатываемой зоны 50 м^3 . Общий объем водных растворов газообразующего раствора соляной кислоты и газовыделяющего рас-

творя составляет также 50 м^3 . Концентрация соляной кислоты, необходимая для растворения карбонатов в пласте, составляет 9%.

Предварительными лабораторными опытами было установлено, что осадок асфальтосмолистых веществ от контакта нефти с раствором кислоты, насыщенной двуокисью углерода, быстрее всего растворяется в толуоле.

Для реализации предлагаемого метода в качестве газообразующего раствора выбирают водный раствор карбоната натрия. Определяют необходимые количества карбоната натрия, соляной кислоты и концентрации их водных растворов. Количество карбоната натрия определяют по количеству образующейся двуокиси углерода и стехиометрических соотношений в реакции нейтрализации между карбонатом натрия и соляной кислотой с образованием двуокиси углерода и водного раствора хлористого натрия. Количество образующейся двуокиси углерода определяют, исходя из известных пластовых температуры, давления, коэффициента растворимости двуокиси углерода в водном растворе хлористого натрия и плотности двуокиси углерода в пластовых условиях.

Для полного насыщения 1 м^3 воды, содержащей хлористый натрий, при пластовых температуре 45°C и давлении 10 МПа потребуется около 15 нм^3 двуокиси углерода (из пересчета на атмосферные условия). Тогда для насыщения 50 м^3 водного раствора хлорида натрия (как продукта реакции водного раствора карбоната натрия и соляной кислоты с их общим объемом в 50 м^3) потребуется $15 \times 50 = 750 \text{ нм}^3$. В атмосферных условиях плотность двуокиси углерода составляет $1,97 \text{ кг/м}^3$. Поэтому объему двуокиси углерода в 750 нм^3 будет соответствовать масса в $750 \text{ нм}^3 \times 1,97 \text{ кг/м}^3 = 1478 \text{ кг}$ или 1,5 тонны. Из стехиометрических соотношений реакции нейтрализации 106 тонны карбоната натрия и 73 тонны соляной кислоты будут образовывать 44 тонны двуокиси углерода. С учетом этого, для образования двуокиси углерода в количестве 1,5 тонны понадобится $1,5 \times 106 / 44 = 3,6$ тонн карбоната натрия и, соответственно $1,5 \times 73 / 44 = 2,5$ тонны соляной кислоты. Из условия равенства объемов закачиваемых водных растворов соляной кислоты и карбоната натрия объем водного раствора карбоната натрия составит $50 \text{ м}^3 / 2 = 25 \text{ м}^3$ или примерно 25 тонн. В этом случае концентрация карбоната натрия в таком водном растворе составит $3,6 / 25 = 0,14$ или 14% массовых. Аналогично, для требуемого количества соляной кислоты в 2,5 тонны и объема, массы водного раствора соответственно в 25 тонн, концентрация такого водного раствора будет $2,5 / 25 = 0,1$ или 10% массовых. С учетом того, что для растворения карбонатных компонентов породы необходимая массовая концентрация водного раствора соляной кислоты составляет 9%, общая концентрация раствора соляной кислоты, для

растворения карбонатов породы и реакции с карбонатом натрия, составит $9\% + 10\% = 19\%$.

Таким образом, в скважину следует последовательно закачать 25 м^3 14%-ного водного раствора карбоната натрия и 25 м^3 19%-ного водного раствора соляной кислоты. Для исключения образования двуокиси углерода в стволе скважины после закачки водного раствора карбоната натрия и перед закачкой водного раствора соляной кислоты закачивают 3 м^3 технической воды в качестве разделяющей буферной жидкости.

Перед закачкой водного раствора карбоната натрия в скважину зону закачивают 15 м^3 углеводородной жидкости (в количестве 0,3 от объема 50 м^3), т.к. именно такое количество углеводородной жидкости достаточно для охвата всей обрабатываемой площади без прорыва проталкивающей жидкости) с добавкой катионного ПАВ 0,01 – 1% (0,1–10 кг/т).

После закачки 25 м^3 19%-ного водного раствора соляной кислоты в скважину и призабойную зону закачивают 15 м^3 толуола (в количестве 0,3 от объема 50 м^3 обрабатываемой зоны).

Пример 2. В нефтяной скважине с дебитом по нефти $25 \text{ м}^3/\text{сут}$, обводненностью 71%, мощностью пласта 7,2 м, проницаемостью $0,180 \text{ мкм}^2$, пластовым давлением 24 МПа и пластовой температурой 63°C следует провести обработку призабойной зоны по предлагаемому способу. Объем обрабатываемой зоны 70 м^3 . Общий объем водного газообразующего раствора соляной кислоты и газовыделяющего раствора составляет также 70 м^3 . Концентрация соляной кислоты, необходимая для растворения карбонатов в пласте, составляет 11%.

Предварительными лабораторными опытами было установлено, что осадок асфальтосмолистых веществ от контакта нефти с раствором кислоты, насыщенной двуокисью углерода, быстрее всего растворяется в смеси бензола, толуола и ксилола в объемном соотношении 0,25: 0,15: 0,60.

Для реализации предлагаемого способа в качестве газообразующего раствора выбирают водный раствор карбоната натрия. Определяют необходимые количества карбоната натрия, соляной кислоты и концентрации их водных растворов. Количество карбоната натрия определяют по количеству образующейся двуокиси углерода и стехиометрических соотношений в реакции нейтрализации между карбонатом натрия и соляной кислотой с образованием двуокиси углерода и водного раствора хлористого натрия. Количество образующейся двуокиси углерода определяют, исходя из известных пластовых температуры, давления, коэффициента растворимости двуокиси углерода в водном растворе хлористого натрия и плотности двуокиси углерода в пластовых условиях.

Для полного насыщения 1 м^3 воды, содержащей хлористый натрий как конечный продукт реакции кислотного раствора с породой и раствором карбоната натрия, при пластовых температуре 63°C и давлении

24 МПа потребуется около 26 м^3 двуокиси углерода (из пересчета на атмосферные условия). Тогда для насыщения 70 м^3 водного раствора хлорида натрия (как продукта реакции водного раствора карбоната натрия и соляной кислоты с их общим объемом в 70 м^3) потребуется $26 \times 70 = 1820 \text{ м}^3$. В атмосферных условиях плотность двуокиси углерода составляет $1,97 \text{ кг/м}^3$. Поэтому объему двуокиси углерода в 1820 м^3 будет соответствовать масса в $1820 \text{ м}^3 \times 1,97 \text{ кг/м}^3 = 3585 \text{ кг}$ или 3,6 тонны. Из стехиометрических соотношений реакции нейтрализации 106 тонны карбоната натрия и 73 тонны соляной кислоты будут образовывать 44 тонны двуокиси углерода. С учетом этого для образования двуокиси углерода в количестве 3,6 тонны понадобится $3,6 \times 106 / 44 = 8,9$ тонн карбоната натрия и, соответственно $3,6 \times 73 / 44 = 5,9$ тонны соляной кислоты. Из условия равенства объемов закачиваемых водных растворов соляной кислоты и карбоната натрия объем водного раствора карбоната натрия составит $70 \text{ м}^3 / 2 = 35 \text{ м}^3$ или примерно 35 тонн. В этом случае концентрация карбоната натрия в таком водном растворе составит $8,9 / 35 = 0,25$ или 25% массовых. Аналогично, для требуемого количества соляной кислоты в 5,9 тонны и объема, массы водного раствора соответственно в 35 тонн, концентрация такого водного раствора будет $5,9 / 35 = 0,17$ или 17% массовых. С учетом того, что для растворения карбонатных компонентов породы необходимая массовая концентрация водного раствора соляной кислоты составляет 9%, общая концентрация раствора соляной кислоты для растворения карбонатов породы и реакции с карбонатом натрия составит $17\% + 11\% = 28\%$.

Таким образом, в скважину следует последовательно закачать 35 м^3 25%-ного водного раствора карбоната натрия и 35 м^3 28%-ного водного раствора соляной кислоты. Для исключения образования двуокиси углерода в стволе скважины после закачки водного раствора карбоната натрия и перед закачкой водного раствора соляной кислоты закачивают 5 м^3 технической воды в качестве разделяющей буферной жидкости.

Перед закачкой водного раствора карбоната натрия в скважину зону закачивают 21 м^3 углеводородной жидкости (в количестве 0,3 от объема 70 м^3 обрабатываемой зоны, т.к. именно такое количество углеводородной жидкости достаточно для охвата всей обрабатываемой площади без прорыва проталкивающей жидкости) с добавкой катионного ПАВ 0,01–1% (0,1–10 кг/т).

Готовят смесь из бензола, толуола и ксилола в общем объеме смеси в 21 м^3 (в количестве 0,3 от объема 70 м^3 обрабатываемой зоны) и объемном соотношении бензола, толуола и ксилола в 0,25:0,15:0,60. Для этого смешивают $5,3 \text{ м}^3$ бензола (как 0,25 от общего объема смеси в 21 м^3), $3,1 \text{ м}^3$ толуола (как 0,15 от общего объема смеси в 21 м^3) и $12,6 \text{ м}^3$ ксилола (как 0,6 от общего объема смеси 21 м^3).

После закачки 35 м^3 28%-ного водного раствора соляной кислоты в скважину и призабойную зону закачивают 21 м^3 смеси бензола, толуола и ксилола в объемном соотношении 0,25:0,15:0,60.

Сведения о количествах и концентрациях реагентов приведены в таблице 1.

Таким образом, рассмотрен и предложен новый метод обработки призабойных зон добывающих сква-

ТАБЛИЦА 1.

Количества и концентрации реагентов для кислотных обработок добывающих скважин с внутрипластовой генерацией CO_2 и последующей закачкой углеводородного растворителя

Показатель	Значение показателя, в том числе:	
	Для примера 1	Для примера 2
Объем обрабатываемой призабойной зоны	$50,0 \text{ м}^3$	$70,0 \text{ м}^3$
Выбранный углеводородный раствор поверхностно-активного вещества для предварительной закачки в призабойную зону	0,5% мас. углеводородный раствор катион-активного ПАВ	0,5% мас. углеводородный раствор катион-активного ПАВ
Выбранный газообразующий кислотный реагент	Хлористый водород	Хлористый водород
Газообразующий агент	Соляная кислота (водный раствор хлористого водорода)	Соляная кислота (водный раствор хлористого водорода)
Выбранный реагент для газовыделяющего раствора	Карбонат натрия	Карбонат натрия
Газовыделяющий агент	Водный раствор карбоната натрия	Соляная кислота (водный раствор хлористого водорода)
Общий объем водных растворов соляной кислоты (газообразующего) агента и газовыделяющего раствора для обработки призабойной зоны	$50,0 \text{ м}^3$	$70,0 \text{ м}^3$

ОКОНЧАНИЕ ТАБЛИЦЫ 1.

Показатель	Значение показателя, в том числе:	
	Для примера 1	Для примера 2
Общий объем водного раствора хлорида натрия полученного от реакции объемов газообразующего и газовыделяющего агентов	50,0 м ³	70,0 м ³
Выбранная концентрация соляной кислоты, необходимая для растворения карбонатов в пласте, составляет	9,0% мас.	11% мас.
Состав выбранного ароматического углеводородного растворителя	Толуол, 100% мас.	Смесь бензола, толуола и ксилола в объемном соотношении 0,25:0,15:0,60.
Объем CO ₂ , необходимый для полного насыщения 1 м ³ водного раствора хлорида натрия (продукта реакции между водными растворами карбоната натрия и соляной кислоты)	15,0 нм ³	26,0 нм ³
Объем CO ₂ , необходимый для полного насыщения общего объема водного раствора хлорида натрия (продукта реакции между водными растворами карбоната натрия и соляной кислоты)	750 нм ³	1820 нм ³
Плотность CO ₂ в атмосферных условиях	1,97 кг/м ³	1,97 кг/м ³
Масса CO ₂ , необходимая для полного насыщения водного раствора хлорида натрия полученного от реакции между водными растворами карбоната натрия и соляной кислоты	1,5 т	3,6 т
Стехиометрическая масса карбоната натрия для образования CO ₂ необходимой массы	3, 6т	8,9
Стехиометрическая масса хлористого водорода для образования CO ₂ необходимой массы	2,5 т	5,9
Масса водного раствора карбоната натрия для формирования половины объема сгенерированного водного раствора хлорида натрия, насыщенного CO ₂	25,0 т	35,0 т
Необходимая концентрация карбоната натрия в его водном растворе для реакции с раствором соляной кислоты	14,0% мас.	25,0% мас.
Необходимый объем. водного раствора карбоната натрия для генерации CO ₂	25,0 м ³	35,0 м ³
Необходимая концентрация соляной кислоты её водном растворе для реакции с раствором карбоната натрия	10,0% мас.	17,0% мас
Общая концентрация соляной кислоты для расходования на реакцию с карбонатными составляющими породы и с водным раствором карбоната натрия	19,0% мас.	28% мас
Необходимый объем 19% мас. раствора соляной кислоты для генерации CO ₂	25,0 м ³	35,0 м ³
Выбранный объем углеводородной жидкости с поверхностно-активным веществом для предварительной закачки в призабойную зону	15,0 м ³	21,0м ³
Выбранный объем разделяющей буферной воды	3,0 м ³	
Объем смеси ароматических углеводородных растворителей для закачки, в призабойную зону, после раствора соляной кислоты	15,0 м ³	21,0 м ³
в том числе объемы компонентов смеси:		
объем бензола	0,0 м ³	5,3 м ³
объем толуола	15,0 м ³	3,1 м ³
объем ксилола	0,0 м ³	12,6 м ³

жин с внутрипластовой генерацией двуокиси углерода. Помимо эффективной очистки призабойной зоны от коагулирующих частиц метод направлен на удаление асфальтосмолистых осадков и отложений в пористой среде после контакта двуокиси углерода с нефтями в призабойной зоне. Удаления осадков и отложений достигают дополнительной закачкой ароматического углеводородного растворителя в призабойную зону.

Закачку проводят после внутрипластовой генерации CO₂. Состав ароматического растворителя определяют в лабораторных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бруслов А.Ю. Разработка метода определения фазовых подвижностей и степени извлечения нефтей при вытеснении их из пластов оторочками жидкой

- двуокиси углерода. Дисс. на соиск. уч. ст. к.т.н. М.: МИНГ им И.М. Губкина, 1985. 132 с.
2. **ГЕРАСИМОВА Е.В.** Разработка методики оценки эффективности и подбор растворителей асфальтосмолистых и парафиновых отложений на нефтепромысловом оборудовании. Дисс. на соиск. уч. ст. к.т.н. Уфа: Уфимский государственный технический университет, 2008. 24 с.
 3. **ГОРБУНОВ А.Т., МОСКВИН В.Д., БРУСЛОВ А.Ю., СТАРКОВСКИЙ А.В., РОГОВА Т.С. и др.** Способ обработки призабойной зоны добывающей скважины. Патент RU 2023143 C1, 15.11.1994.
 4. **ДОЛОМАТОВ М.Ю., ТЕЛЕГИН А.Г., ХИСАМУТДИНОВ Н.И., ИСМАГИЛОВ Т.А.** Новый подход к направленному подбору растворителей асфальтосмолистых веществ // Нефтепромысловое дело. 1995. № 8–10. С. 63–67.
 5. Применение угольной кислоты для увеличения нефтеотдачи пластов / Нефтегазовая промышленность. С. 85–86. <http://www.neftelib.ru/neft-book/016/86/index.shtml>
 6. **СТЕПАНОВА Г.С.** Газовые и водогазовые методы воздействия на нефтяные пласты. М.: Газойл пресс, 2006. 65.
 7. **СТРОГАНОВ В.М., ТУРУКАЛОВ М.Б.** Экспресс-методика подбора эффективных углеводородных растворителей асфальтеносмолопарафиновых отложений // Интервал. 2007. № 8. С. 44–48.
 8. **ШАХВЕРДИЕВ А.Х., АРЕФЬЕВ С.В., БРУСЛОВ А.Ю., ДЕНИСОВ А.В.** Способ разработки нефтяной залежи. Патент RU 2814697 C1, 04.03.2024.
 9. **ШАХВЕРДИЕВ А.Х., МАНДРИК И.Э., ПАНАХОВ Г.М., АББАСОВ Э.М.** Способ разработки нефтяной залежи. Патент RU 2349742 C1, 20.03.2009.
 10. **ШАХВЕРДИЕВ А.Х., ПАНАХОВ Г.М., АББАСОВ Э.М., HUIMIN ZENG, YIGANG LIU, SHUNYAO LUO.** Инновационная технология извлечения остаточных запасов углеводородов внутрипластовой генерацией диоксида углерода // Нефтяное хозяйство. 2010. № 6. С. 44–47.
 11. **ШАХВЕРДИЕВ А.Х., ПАНАХОВ Г.М., АББАСОВ Э.М., JIANG R., ВАКХТИЯРОВ С.** Высокоэффективная технология повышения нефтеотдачи и интенсификации добычи нефти на основе внутрипластовой генерации CO₂ // Нефтяное хозяйство. 2014. № 5. С. 90–95.
 12. **ШАХВЕРДИЕВ А.Х., ПАНАХОВ Г.М., СУЛЕЙМАНОВ Б.А., АББАСОВ Э.М., ГАЛЕЕВ Ф.Х., САНАМОВА С.Р.** Способ разработки нефтяной залежи. Патент RU 2119580 C1, 27.09.1998.
 13. **ШАХВЕРДИЕВ А.Х., ПАНАХОВ Г.М., СУЛЕЙМАНОВ Б.А., АББАСОВ Э.М., ИБРАГИМОВ Р.Г., ЧУКЧЕЕВ О.А., САНАМОВА С.Р.** Способ обработки призабойной зоны нефтяного пласта. Патент RU 2114291C1, 27.06.1998.
 14. **ШАХВЕРДИЕВ А.Х.** Системная оптимизация процесса доработки нефтяных месторождений. Дисс. на соиск. уч. ст. д.т.н. М.: Всероссийский нефтегазовый научно-исследовательский институт им. акад. А.П. Крылова. 2001.
 15. **BAKHTIYAROV S., GRIGG R., SERIGHT R., SVEC R., SNEIDER R. ET AL.** Technology on in-situ gas generation to recover residual oil reserves. Отчет о НИР № DE-FC26-05NT15478. 2008.
 16. **BAKHTIYAROV S.I., PANAKHOV G.M., ABBASOV E.M., SHAKHVERDIYEV A.KH.** Oil recovery by in-situ gas generation: volume and pressure measurements / Proceedings of ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting 2006, FEDSM2006. 2006 ASME Joint U.S. European Fluids Engineering Division Summer Meeting. Miami, FL, 2006. FEDSM2006. P. 1487–1492.
 17. **BAKHTIYAROV S.I., PANAKHOV G.M., ABBASOV E.M., SHAKHVERDIYEV A.KH.** Polymer/surfactant effects on generated volume and pressure of CO₂ in EOR technology / 2007 Proceedings of the 5th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Summer Conference, FEDSM 2007. 2007 5th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Summer Conference, FEDSM 2007. sponsors: ASME Fluids Engineering Division, Japanese Society of Mechanical Engineers, JSME. San Diego, CA, 2007. С. 1583–1589.
 18. **BAKHTIYAROV S.I., PANAKHOV G.M., ABBASOV E.M., SHAKHVERDIYEV A.KH., SIGINER D.** In-situ carbon dioxide generation for oil recovery: Experimental study of pressure and temperature variations during stoichiometric reaction / American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division (Publication) FED. Сер. "Proceedings of 2006 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE2006 – Fluids Engineering Division" 2006.
 19. **BAKHTIYAROV S.I., SHAKHVERDIYEV A.K., PANAKHOV G.M., ABBASOV E.M.** Effect of surfactant on volume and pressure of generated CO₂ gas / SPE Production and Operations Symposium, Proceedings. Сер. "SPE Production and Operations Symposium 2007. Boom Times or a New Reality" 2007. С. 478–482.
 20. **CRAWFORD H.R., NEILL G.H., BUCY B.J., CRAWFORD P.B.** Carbon Dioxide – A Multipurpose Additive for Effective Well Stimulation Available to Purchase. J Pet Technol. 1963. V. 15 (03). P. 237–242. SPE-571-PA. <https://doi.org/10.2118/571-PA>
 21. **GORELKINA E.I., MUGISHO J., KOUADIO K.S.** Waterflooding, water-gas method and generation of carbon dioxide in the reservoir – methods of enhanced oil recovery and technology development/ IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2023. P. 012038.
 22. **DROZDOV A., GORELKINA E.** Technology for the development of residual reserves by water-gas methods in

conditions of associated petroleum gas shortage / International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Environmental Technologies (EMMFT-2024). Les Ulis. 2024. P. 04001.

23. SHAKHVERDIEV A.KH., PANAKHOV G.M., JIANG RENQI E.M., ABBASOV E.M.O. High efficiency in-situ CO₂ generation technology: the method for improving oil recovery factor // Petroleum Science and Technology. 2024. P. 2157010.

REFERENCE

1. BRUSLOV A.YU. Development of a Method for Determining Phase Mobility and the Degree of Oil Recovery During Its Displacement from Reservoirs by Liquid Carbon Dioxide Rim(s). Dissertation for the Degree of Candidate of Technical Sciences. Moscow: MING im. I.M. Gubkina, 1985:132.
2. GERASIMOVA E.V. Development of a Methodology for Assessing the Efficiency and Selecting Solvents for Asphalt-Resin and Paraffin Deposits on Oilfield Equipment. Dissertation for the Degree of Candidate of Technical Sciences, Ufa: Ufimskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet, 2008:24.
3. GORBUNOV A.T., MOSKVIN V.D., BRUSLOV A.YU., STARKOVSKY A.V., ROGOVA T.S. ET AL. Method for treating the bottomhole zone of a production well. Patent RU 2023143 C1. 1994.
4. DOLOMATOV M.YU., TELEGIN A.G., KHISAMUTDINOV N.I., ISMAGILOV T.A. New approach to the targeted selection of solvents for asphaltene-resinous substances. *Neftpromyslovoe Delo*. 1995; 8–10: 63–67.
5. Use of carbon dioxide to enhance oil recovery. In the electronic collection "Oil and Gas Industry": 85-86, <http://www.neftelib.ru/neft-book/016/86/index.shtml>
6. STEPANOVA G.S. Gas and water-gas methods of influencing oil reservoirs. Moscow: Gazoyl press, 2006:65.
7. STROGANOV V.M., TURUKALOV M.B. Express method for selecting effective hydrocarbon solvents for asphaltene-resin-paraffin deposits. *Interval*. 2007;8: 44–48.
8. SHAKHVERDIEV A.KH., AREFIEV S.V., BRUSLOV A.YU., DENISOV A.V. Method of developing an oil deposit. Patent RU 2814697 C1, 04.03.2024.
9. SHAKHVERDIEV A.KH., MANDRIK I.E., PANAKHOV G.M., ABBASOV E.M. Method of developing an oil deposit. Patent RU 2349742 C1, 20.03.2009.
10. SHAKHVERDIEV A.KH., PANAKHOV G.M., ABBASOV E.M., HUIMIN ZENG, YIGANG LIU, SHUNYAO LUO. Innovative technology for extracting residual hydrocarbon reserves by in-situ generation of carbon dioxide. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2010;6:44–47.
11. SHAKHVERDIEV A.KH., PANAKHOV G.M., ABBASOV E.M., JIANG R., BAKHTIYAROV S. Highly efficient technology for enhanced oil recovery and intensification of oil production based on in-situ CO₂ generation. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2014;5:90–95.
12. SHAKHVERDIEV A.KH., PANAKHOV G.M., SULEIMANOV B.A., ABBASOV E.M., GALEEV F.KH., SANAMOVA S.R. Method for oil deposit development. Patent RU 2119580 C1, 27.09.1998.
13. SHAKHVERDIEV A.KH., PANAKHOV G.M., SULEIMANOV B.A., ABBASOV E.M., IBRAGIMOV R.G., CHUKCHEEV O.A., SANAMOVA S.R. Method for treating the bottomhole zone of an oil reservoir. Patent RU 2114291C1, June 27, 1998.
14. SHAKHVERDIEV A.KH. System optimization of the process of further development of oil fields. Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. All-Russian Oil and Gas Research Institute named after academician A.P. Krylov. Moscow, 2001.
15. BAKHTIYAROV S., GRIGG R., SERIGHT R., SVEC R., SNEIDER R. ET AL. Technology on in-situ gas generation to recover residual oil reserves. Research report № DE-FC26-05NT15478. 2008.
16. BAKHTIYAROV S.I., PANAKHOV G.M., ABBASOV E.M., SHAKHVERDIYEV A.KH. Oil recovery by in-situ gas generation: volume and pressure measurements. Proceedings of ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting 2006, 2006 ASME Joint U.S. European Fluids Engineering Division Summer Meeting, Miami, FL, 2006. FEDSM2006: 1487-1492.
17. BAKHTIYAROV S.I., PANAKHOV G.M., ABBASOV E.M., SHAKHVERDIYEV A.KH. Polymer/surfactant effects on generated volume and pressure of CO₂ in EOR technology. 2007 Proceedings of the 5th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Summer Conference, FEDSM 2007. 2007 5th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Summer Conference. sponsors: ASME Fluids Engineering Division, Japanese Society of Mechanical Engineers, JSME. San Diego, CA, 2007; FEDSM 2007: 1583-1589.
18. BAKHTIYAROV S.I., PANAKHOV G.M., ABBASOV E.M., SHAKHVERDIEV A.KH., SIGINER D. In-situ carbon dioxide generation for oil recovery: Experimental study of pressure and temperature variations during stoichiometric reaction. American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division (Publication) FED. Cep. "Proceedings of 2006 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE2006 – Fluids Engineering Division. 2006.
19. BAKHTIYAROV S.I., SHAKHVERDIYEV A.K., PANAKHOV G.M., ABBASOV E.M. Effect of surfactant on volume and pressure of generated CO₂ gas. In book: SPE Production and Operations Symposium, Proceedings. Cep. "SPE Production and Operations Symposium 2007. Boom Times or a New Reality". 2007:478–482.
20. CRAWFORD H.R., NEILL G.H., BUCY B.J., CRAWFORD P.B. Carbon Dioxide – A Multipurpose Additive for Effective Well Stimulation Available to Purchase. *J Pet Technol*. 1963; 15(03): 237–242.

- SPE-571-PA. <https://doi.org/10.2118/571-PA>
21. **GORELKINA E.I., MUGISHO J., KOUADIO K.S.** Waterflooding, water-gas method and generation of carbon dioxide in the reservoir – methods of enhanced oil recovery and technology development. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2023: 012038.
 22. **DROZDOV A., GORELKINA E.** Technology for the development of residual reserves by water-gas methods in conditions of associated petroleum gas shortage. International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Environmental Technologies (EMMFT-2024). Les Ulis. 2024: 04001.
 23. **SHAKHVERDIEV A.KH., PANAKHOV G.M., JIANG RENQI E.M., ABBASOV E.M.O.** High efficiency in-situ CO₂ generation technology: the method for improving oil recovery factor. *Petroleum Science and Technology*. 2024: 2157010.

Арефьев Сергей Валерьевич,

к.г.-м.н., начальник Управления разработки нефтяных и газовых месторождений Западно-Сибирского и Пермского регионов ПАО «Лукойл»

☎ 101000, г. Москва, Сретенский бульвар, д. 11,
101000, Moscow, Sretensky Boulevard, 11,
тел.: +7 (495) 627-44-44, e-mail: svarev@mail.ru

Бруслов Андрей Юрьевич,

к.т.н., доцент кафедры Разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений МГРИ

☎ тел.: +7 (905) 757-32-08,
e-mail: hibfi@mail.ru, bruslovay@mgri.ru

Денисов Алексей Владимирович,

Старший преподаватель кафедры Разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений МГРИ

☎ 117485, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23, МГРИ
117485 23, Moscow, Miklukho-Maklaya str,
тел.: +7 (916) 801-95-64, e-mail: denisovav@mgri.ru

УДК 622.245.42

DOI: 10.52531/1682-1696-2025-25-3-96-110

Научная статья

АНАЛИЗ СВОЙСТВ ЗОЛЬНЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ СООРУЖЕНИЯ, РЕМОНТА И ЛИКВИДАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН СКВАЖИННОГО ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА

А.Г. ИВАНОВ¹,
Ю.А. АРСЕНТЬЕВ²,
Н.В. СОЛОВЬЕВ²,
А.А. ВИЛЬМИС², Д.Д. ОРЕХОВ²

¹ Ведущий проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии, Москва, Российская Федерация

² Российский Государственный Геологоразведочный институт имени Серго Орджоникидзе – МГРИ, Москва, Российская Федерация

Добыча урана с использованием метода скважинного подземного выщелачивания (СПВ) предусматривает выполнение следующих действий: сооружение, эксплуатацию и ликвидацию технологических скважин. Каждый этап является сложным процессом, требующим решения отдельных ответственных задач, касающихся выбора материалов для гидроизоляции заколонного пространства с целью устранения перетоков рабочих растворов, а также ликвидации выведенных из эксплуатации скважин с гарантированной изоляцией продуктивного горизонта от возможного контакта с водами вышележащих водоносных горизонтов. В статье приведены результаты лабораторных исследований различных видов растворов, созданных на основе золы-уноса – отходов угольных ТЭЦ, позволивших авторам статьи сформулировать рекомендации по их применению для ремонта и ликвидации скважин СПВ урана.

Ключевые слова: скважинное подземное выщелачивание, технологические скважины, сооружение, эксплуатация, ликвидация, гидроизоляция заколонного пространства, зола-унос с электрофильтров ТЭЦ, кольматация, сорбционные свойства, эффективность

А.Г. ИВАНОВ, Ю.А. АРСЕНТЬЕВ,
Н.В. СОЛОВЬЕВ, А.А. ВИЛЬМИС, Д.Д. ОРЕХОВ
АНАЛИЗ СВОЙСТВ ЗОЛЬНЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ
ДЛЯ СООРУЖЕНИЯ, РЕМОНТА И ЛИКВИДАЦИИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН СКВАЖИННОГО
ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА

EDN: SNQXEO

Original article

ANALYSIS OF THE PROPERTIES OF ASH SOLUTIONS TO DETERMINE THE POSSIBILITY OF THEIR USE FOR THE CONSTRUCTION, REPAIR AND ABANDONMENT OF PROCESS WELLS OF IN-SITU URANIUM LEACHING

A.G. IVANOV¹, YU.A. ARSENTYEV²,
N.V. SOLOVYOV², A.L. WILMIS²,
D.D. OREKHOV²

¹ LEADING DESIGN, SURVEY AND RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY, MOSCOW, RUSSIA, MOSCOW, RUSSIAN FEDERATION

² RUSSIAN STATE GEOLOGICAL PROSPECTING INSTITUTE NAMED AFTER SERGO ORDZHONIKIDZE – MGRI, MOSCOW, RUSSIAN FEDERATION

Uranium mining using the in-situ leaching (ISL) method involves the following steps: construction, operation and liquidation of process wells. Each stage is a complex process requiring the solution of individual critical tasks related to the selection of materials for the waterproofing of the annular space in order to eliminate the flow of working solutions, as well as the liquidation of decommissioned wells with guaranteed isolation of the productive horizon from possible contact with waters of overlying aquifers. The article presents the results of laboratory studies of various types of solutions created on the basis of fly ash - waste from coal-fired thermal power plants, which allowed the authors of the article to formulate recommendations for their use in the repair and liquidation of uranium ISL wells.

KEY WORDS: in-situ leaching, process wells, construction, operation, liquidation, waterproofing of casing space, fly ash from electrostatic precipitators of thermal power plants, colmatation, sorption properties, efficiency

Скважинные системы добычи металлов методом подземного выщелачивания (ПВ) применяются при разработке гидрогенных месторождений, приуроченных к проницаемым водоносным горизонтам. Геологические условия указанных месторождений освещены в ряде работ [3, 10]. Литологический разрез представлен породами осадочного комплекса II–VII категории по буримости механического вращательного бурения [11, 16].

Наиболее сложными с точки зрения предотвращения загрязнения недр технологическими растворами являются месторождения, имеющие в литологическом разрезе проницаемые горизонты, залегающие выше отработываемого продуктивного горизонта. Эти проницаемые горизонты, как правило, представлены песками различной крупности и слабосцементированными песчаниками.

Наличие в литологическом разрезе глинистых пород с большим содержанием карбонатных включений приводит к образованию на стенках скважин в интервалах проницаемых пород глинистой корки, легко разрушаемой при воздействии на нее кислых растворов.

Следует иметь в виду, что при возникновении утечек рабочих растворов в местах нарушения герметичности эксплуатационных колонн, каналы заколонного распространения растворов замыкаются на интервалы проницаемых пород. В связи с этим методика проведения лабораторных исследований растекания предусматривает выбор в качестве объекта исследований механизма кольматации твердой фазой раствора породы водоносных горизонтов, которые можно отнести к классам А 1а и Б 1б по классификации, приведенной в работах [2]. К указанным классам относятся неустойчивости породы с пористым (рыхлым) коллектором и слабоустойчивые породы с пористым проницаемым коллектором. Основными представителями этих пород являются пески различного гранулометрического состава и слабосцементированные песчаники.

В настоящее время наиболее широко распространенными для гидроизоляции заколонного пространства являются: цементный, глиноцементный, гельцементный, отработанный глинистый, некоторые полимерные растворы [6, 7, 8, 11, 14]. В некоторых случаях, при отсутствии по литологическому разрезу проницаемых горизонтов в пластических породах верхнего (над продуктивным горизонтом) водоупора специальных мероприятий по гидроизоляции не производится.

Основным способом подачи материала гидроизоляции является его закачка по заливочным трубкам, опущенным в кольцевое пространство между стенками скважины и эксплуатационной колонной, или по внутриколонному пространству через цементировочные узлы или заливочные муфты, установленные на обсадных трубах.

Центраторы на эксплуатационной колонне, как правило, не устанавливаются.

Приготовление материала гидроизоляции выполняется одним из следующих способов: централизованно с применением различных смесителей; с применением цементировочной техники; вручную в емкостях непосредственно на буровых установках.

Наиболее широко применяемыми для целей гидроизоляции заколонного пространства являются цементные растворы. Основным показателем качества разобшения пластов является полнота замещения промывочной жидкости в заколонном пространстве цементным раствором, причем полнота замещения выражается через коэффициент замещения (коэффициент вытеснения) K_v [1], представляющий собой отношение оставшегося в скважине тампонажного раствора к объему зоны гидроизоляции.

Вопросом цементирования скважин и определения факторов, влияющих на величину коэффициента замещения, занимались многие исследователи как в России, так и за рубежом: М.О. Ашрафьян, А.И. Булатов, М.П. Гулизаде, Д.Я. Крылов, А.Х. Мирзаджанзаде, В.В. Сутягин, Р.В. Уханов, Г.С. Говард, Д.Б. Кларк и др. [1, 2, 5 и др.].

В результате выполненных работ было установлено, что основными факторами, определяющими величину K_v , являются следующие:

1. Положение обсадной колонны в скважине.
2. Скорость восходящего потока цементного раствора.
3. Реологические свойства вытесняющей и вытесняемой жидкости.
4. Наличие напорных водоносных горизонтов в интервале гидроизоляции.
5. Толщина и физико-химические свойства глинистой корки в интервале проницаемых пород.
6. Удаление глинистой горки стенок скважины в интервалах проницаемых пород.
7. Вращение и расходка обсадных колонн в процессе цементирования.
8. Применение эксцентриков, установленных на колонне в интервалах кавернозных участков ствола с вращением колонны в процессе цементирования.
9. Цементирование обсадных колонн с применением центраторов, диаметр которых больше 80% диаметра ствола скважины.
10. Применение буферных жидкостей для разделения промывочной жидкости и цементного раствора.
11. Использование разделительных пробок при внутриколонной подаче цементного раствора в скважину.

Несмотря на достаточно большую изученность вопроса применения цементных растворов для крепления скважин, в технической литературе указывается на сложность достижения надежной гидроизоляции заколонного пространства с использованием этих

растворов. В частности, С.А. Рябоконь и В.В. Гольдштейн в работе [15] отмечают следующее: «Анализ состояния крепления скважин за последние 10–15 лет показывает, что около 10% из них сразу после сдачи в эксплуатацию требуют проведения повторных изоляционных работ; в остальных скважинах указанные работы необходимы или целесообразны уже в первые 2–3 года эксплуатации». И.Я. Серенко, Н.Я. Сидоров и А.Т. Кошелев отмечают: «Первоначальное цементирование обсадных колонн может оказаться некачественным даже при условии использования самой современной технологии, новейших технических средств, соответствующих тампонажных материалов и химических реагентов для регулирования свойств раствора и камня. Это связано с тем, что качество цементировочных работ зависит от множества факторов, воздействие которых на процесс цементирования моделировать не только сложно, но и подчас невозможно» [17].

Анализируя возможность применения цементного раствора для гидроизоляции заколонного пространства технологических скважин, оборудованных эксплуатационными колоннами из полиэтилена, можно отметить дополнительные сложности:

1. Значительное различие коэффициентов температурного расширения цементного камня и полиэтилена. В работе Сергиенко И.А. и др. [16] отмечается, что при перепаде температур рабочих растворов 15–22°C в теле трубы ПНД-110СТ возникают напряжения 22–46 кН, что может привести к нарушению целостности колонны, особенно по резьбовым соединениям.

2. Слабое сцепление полиэтилена с цементным камнем, составляющее (на сдвиг) 0,01–0,8 МПа /13/ (для сравнения: сцепление цементного камня составляет 0,21–0,89 МПа).

3. Практическая невозможность осуществления большинства вышеперечисленных технологических операций и приемов, обеспечивающих достижение высокого коэффициента замещения $K_v=1,0$.

4. Небольшая величина интервала цементирования заколонного пространства (в основном до 200–250 м, реже до 100 м).

По заключению специалистов ВНИИКРнефть, максимально лучшие показатели качества гидроизоляции заколонного пространства технологических скважин могут быть достигнуты при применении обратного цементирования. Однако на сегодняшний день такая технология применительно к скважинам подземного выщелачивания отсутствует. Эта технология обладает существенным недостатком: практической невозможностью фиксации времени входа цементного раствора внутрь эксплуатационной колонны.

В связи с вышеизложенным представляется, что совершенствование технологии цементирования заколонного пространства позволит ограниченно решить вопрос качества сооружения скважин подземного вы-

А.Г. ИВАНОВ, Ю.А. АРСЕНТЬЕВ,
Н.В. СОЛОВЬЕВ, А.А. ВИАЛЬМИС, А.А. ОРЕХОВ
АНАЛИЗ СВОЙСТВ ЗОЛЬНЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ
ДЛЯ СООРУЖЕНИЯ, РЕМОНТА И ЛИКВИДАЦИИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН СКВАЖИННОГО
ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА

щелачивания (ПВ) и не решит проблему в целом.

При анализе возможности использования цементного раствора для гидроизоляции заколонного пространства следует учитывать также дефицит и стойкость цементного камня к воздействию кислых растворов. В частности, вследствие перебоев с поставками для приготовления цементного раствора используются любые марки цемента.

Для определения химической стойкости цементного камня к воздействию растворов H_2SO_4 был выполнен следующий опыт.

В магистраль выщелачивающих растворов, в которую растворы из зумпфа подавались насосом, были врезаны три трубы диаметром 25 мм с включением в магистраль запорных кранов. Длина труб составляла 3 м. На конце труб непосредственно над зумпфом были размещены три образца цементного камня, приготовленные заливкой и твердением в стакане из нержавеющей стали диаметром 57 мм. Длина (высота) образца составляла 50 мм. Соединение труб с стаканом осуществлялось через переходные фланцы.

Плотность материала образцов составляла 1,74 г/см³, ожидание затвердения цементного раствора (ОЗЦ) происходило в водной среде в течение 7 суток. Выдержка образцов после ОЗЦ (до установки в магистраль) составила 60 суток.

Продолжительность эксперимента (контакта поверхности цементного камня с раствором H_2SO_4) составила 250 суток. Давление подачи выщелачивающих растворов – 3,5 ÷ 4,0 кгс/см², среднее содержание кислоты в растворе – 10 г/л.

После окончания работ был замерен объем растворенного рабочими растворами цементного камня. Замер проводился объемным методом. Растворенные образцы соответственно составили 19,5; 19,0 и 17,8 мм³.

Наряду с применением цементных растворов для гидроизоляции заколонного пространства возможно применение глиноцементных растворов, под которыми понимаются растворы, твердеющие с образованием глиноцементного камня. По сравнению с цементным, глиноцементные растворы имеют преимущества: высокую стабильность системы «цемент-глина-вода» и выход тампонажного камня 100%; устойчивость растворов размыву подземными водами; глиноцементный камень пластичен, легко разбушивается, обладает высокой водопроницаемостью.

Реологические свойства глиноцементных растворов в условиях их твердения изучались Б.И. Кравцовым применительно к тампонированию обводненных пород при проходке стволов шахт.

Количество глины в глиноцементных растворах, применяемых при сооружении скважин на нефть и газ, допускается до 30% от сухих компонентов.

Недостатки глиноцементных растворов следующие:

1. В технологии подачи глиноцементных растворов имеются те же сложности, что и при подаче цементного раствора.

2. Сроки схватывания стабильных глиноцементных растворов удлиняются по сравнению с чисто цементными растворами; начало схватывания – в 1,3–2,7 раза, конец схватывания – в 1,6–2,9 в зависимости от В/Т и величины добавки глины, что увеличивает промежуток времени от вскрытия продуктивного горизонта до начала освоения скважины.

3. Глиноцементный камень имеет значительно меньшие прочностные характеристики по сравнению с цементным камнем.

4. По данным Э.А. Бочко [4], при содержании глины более 50% конец схватывания наступает через 26 часов, а при содержании глины более 70% смесь практически не твердеет.

Гельцементный раствор представляет собой не твердеющий высоковязкий материал повышенной плотности, приготовленный с добавлением цемента в глинистый раствор в соотношении 50÷150 кг цемента на 1 м³ раствора. Гельцементный раствор в большинстве случаев обеспечивает создание избыточного гидростатического давления на водоносные горизонты, препятствуя возникновению межпластовых перетоков.

При возникновении утечек рабочих растворов через нарушения герметичности обсадных колонн этот раствор может «прошиваться» каналами, образованными вследствие реакции карбонатной составляющей глинистого раствора с серной кислотой, причем эти каналы могут замыкаться на водоносных горизонтах, загрязняя их.

Аналогичная картина может наблюдаться и при использовании в качестве гидроизоляционного материала отработанного глинистого раствора.

Использование пластических свойств глинистых пород для гидроизоляции заколонного пространства возможно только в определенных условиях, когда этими породами представлена кровля продуктивного горизонта, а по литологическому разрезу отсутствуют проницаемые породы. Однако такие благоприятные геологические условия в практике проведения работ встречаются весьма редко.

Опыт эксплуатации технологических скважин, оборудованных эксплуатационными колоннами из полиэтиленовых труб, показывает, что в процессе эксплуатации этих скважин частичная разгерметизация колонн отдельных скважин и возникновение утечек рабочих растворов [11], что предполагает проведение ремонтных работ по ликвидации каналов утечек растворов в заколонное пространство скважин.

Однако до настоящего момента времени практически неизвестны работы, посвященные решению комплекса проблем по заколонному ремонту скважин ПВ. В то же время существует задача заколонного ремонта

по ликвидации каналов движения рабочих растворов при значительных – в несколько миллиметров – геометрических размерах в поперечине.

Также каналы могут быть ликвидированы подачей зернистого материала до полного заполнения канала несвязными зернами (частицами). После закупоривания канала частицами подается раствор, вызывающий отверждение и схватывание частиц поданного раствора, обеспечивая непроницаемость канала.

До настоящего времени при рассмотрении вопросов цементирования и гидроизоляции заколонного пространства технологических скважин в основном определяются решаемые при этом задачи [16], но, как правило, не рассматриваются физико-химические свойства материалов по взаимосвязи с технологией их применения.

В этой связи, поскольку существующие материалы не могут быть признаны удовлетворительными с точки зрения надежного предотвращения загрязнения недр рабочими растворами, представляется, что основным требованием к такого рода материалам должно быть наличие у них компенсационных свойств, то есть способности улавливать и нейтрализовать попавшие в заколонное пространство растворы кислот с образованием нерастворимых осадков, коагулирующих каналы утечек. Наиболее предпочтительными является использование материалов, для которых кислые растворы являются отвердителем.

Основными компонентами таких материалов должны являться оксиды щелочных металлов, вступающих в реакцию с растворением серной кислоты с образованием металлов, например Al_2O_3 , CaO , MgO , FeO , Fe_2O_3 и т. д.

Таковыми материалами могут быть водозольные или глинозольные растворы на основе ТЭЦ с использованием минимальных реакций золь для обеспечения их максимальной проникающей способности в поры и каналы утечек рабочих растворов по заколонному пространству технологических скважин.

Золы ТЭЦ – крупнотоннажный отход, близкий по гранулометрическому составу к цементу, состоящий преимущественно из оксидов ряда элементов.

По происхождению золы можно разделить на три большие группы: растительные, углей и золы, образующие при сжигании жидкого топлива.

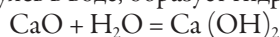
Растительные золы – это минеральный остаток от сжигания растительных веществ (древесины, соломы, кукурузных початков и др.). Растительные золы, как правило, обогащены солями и оксидом калия. Так, зола подсолнечника содержит в растворимой части от 15 до 35% K_2CO_3 , 3,5÷4,1% K_2SO_4 и 3,8÷5,1% KCl и используется для получения поташа – углекислого калия. Древесные золы более обогащены кальцием. Так, зола березы содержит около 50% CaO , 10% K_2O , 6,7% Na_2O , 6,7% MgO , 6,7% P_2O_5 , 3,3% SO_3 , 3,3% SiO_2 [8].

Наиболее распространены как отходы ТЭЦ – золы углей, более чем на 95% состоящие из оксидов. Различают золу легкоплавкую, переходящую в жидкое состояние при температуре 1200°C, плавкую (1200–1350°C) и тугоплавкую (1350–1500°C) [8]. Плавкость золы зависит от соотношения в ней оксидов:

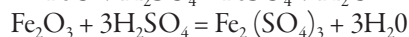
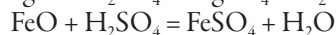
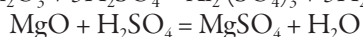
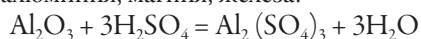
$$\frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO}}$$

Тугоплавкость увеличивается с ростом этого соотношения.

Золы обладают высокой щелочностью: оксид кальция, гидролизуясь в воде, образует гидроксид:



Значительно выше потенциальная щелочность, т. е. нейтрализующая способность при взаимодействии с кислотами. Так, нейтрализаторами кислот являются оксиды алюминия, магния, железа:



Эти свойства зол приобретают важное значение при использовании их в буровой практике для ремонта и сооружения скважин. Обладая высокой щелочностью, золы нейтрализуют кислоту в случае растекания растворов, вследствие чего их часто применяют как добавки в цементные и глиноцементные растворы, применяемые при тампонировании скважин.

Шлаки – гранулированные или комовые отходы металлургических процессов (выплавки, переплавки и др.), образующиеся при плавлении разнородных оксидов. Это многокомпонентные системы, в которых оксидами, определяющими состав, являются CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO, FeO. Кроме того, они содержат оксиды марганца, фосфора, хрома, бария, серы, ванадия, титана и др. Шлаки соответствуют всем современным технологическим процессам производства черных металлов.

В обычных доменных шлаках 90% химического состава составляют оксиды кальция, кремния, алюминия. В зависимости от содержания оксидов шлаки делят на основные, кислые и нейтральные [9], определяемые модулем основности M_0 :

$$M_0 = \frac{(\text{CaO} + \text{MgO})}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}$$

При $M_0 > 1$ шлаки являются основными, при $M_0 < 1$ – кислыми и при $M_0 = 1$ – нейтральными.

В зависимости от повышенного содержания отдельных компонентов шлаки подразделяют на магнезиальные ($\text{MgO} > 10\%$), высокоосновные ($\text{CaO} > 44\%$), титанистые ($\text{TiO}_2 > 5\%$).

Шлаки являются крупнотоннажным отходом. По своему химическому составу приближаются к

А.Г. ИВАНОВ, Ю.А. АРСЕНТЬЕВ,
Н.В. СОЛОВЬЕВ, А.А. ВИЛЬМИС, Д.А. ОРЕХОВ
АНАЛИЗ СВОЙСТВ ЗОЛЬНЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ
ДЛЯ СООРУЖЕНИЯ, РЕМОНТА И ЛИКВИДАЦИИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН СКВАЖИННОГО
ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА

портландцементному клинкеру, отличаясь от него обычно меньшим содержанием CaO. Химико-минералогический состав шлака и способность его охлаждения определяют физико-химические свойства цемента на их основе: сроки схватывания, подвижность, плотность, механическую прочность. Активность шлака возрастает в результате щелочного или сульфатного воздействия.

Шлаки и золы широко применяются при тампонировании геологоразведочных и технологических скважин. Они используются как активные минеральные добавки, вступающие в химическое взаимодействие с основным веществом портландцемента в процессе твердения. Добавки зол облегчают цементный раствор.

Перспективным направлением использования золы-уноса ТЭЦ является возможность приготовления тампонажных растворов с затворением их на технической воде или глинистом растворе. Подобные растворы наряду с их использованием в качестве тампонажных могут применяться для ремонта и ликвидации скважин. Использование золы-уноса в смеси с цементом позволяет сократить расход цемента.

В зависимости от цели использования тампонажных растворов количество добавки к портландцементу может варьироваться. Так, для снижения плотности тампонажного раствора при одновременном увеличении прочности при изгибе цементного камня предложен тампонажный раствор, содержащий портландцемент (32–44%), пыль электрофильтров – золу-уноса (6–8%), отход производства кремния – кремниевую пыль, улавливаемую скрубберами (9–13%) и воду (остальное). В тампонажном растворе данного состава щелочность жидкой фазы повышается не только за счет гидратации портландцемента, но и за счет растворения в ней щелочных оксидов кальция из пыли электрофильтров (золы-уноса). Благодаря воздействию компонентов в растворе и при преобладающей концентрации в нем двуокиси кремния SiO₂ создаются условия для ускоренного образования устойчивых низкоосновных волокнистых гидросиликатов кальция серии CSH(B). Последние высокодисперсны, имеют микрокристаллическую структуру и характеризуются намного более высокой прочностью на сжатие и изгиб, чем высокоосновные гидросиликаты, преобладающие в рядовом тампонажном цементе.

С целью увеличения деформируемости и сцепления цементного камня с обсадной колонной предложен тампонажный раствор, содержащий портландцемент, воду, полиоксиэтилен, хлорид натрия и в качестве армирующей добавки королек, являющийся бросомым отходом производства шлаковаты, получаемые в результате переработки силикатного расплава доменного шлака с базальтовой лавой и представляющие собой микросферы диаметром 0,1–0,7 мм.

С целью снижения плотности при сохранении низкой водоотдачи предложен тампонажный раствор,

содержащий 50÷70% портландцемента; 30÷50% золы; 1,4÷2,0% хлористого кальция; 0,16÷0,21% полиакриламида и 72÷83% воды. Облегченный тампонажный раствор обладает низкой плотностью 1450–1540 кг/м³, хорошей растекаемостью 20,5–21 см, имеет удовлетворительные сроки схватывания. Использование золы-уноса в качестве наполнителя способствует экономии цемента и охране окружающей среды.

Для повышения темпов роста прочности цементного камня при одновременном увеличении подвижности раствора предложен тампонажный раствор, содержащий 10–12% шлакопортландцемента; 10–12% феррохромового шлака; 4,7% жидкого стекла; 50–60% тонкомолотого песка; 6,8% гидрата окиси натрия; 5% комплексной кремниевой органической добавки и остальное воду. Такой раствор обладает высоким темпом нарастания прочности и малой структурной вязкостью с сохранением подвижности.

Таким образом, в существующей практике тампонирующей скважин зола и шлаки, как правило, применяются в качестве облегчающих добавок [9], а также в качестве минеральных добавок.

Шлаки улучшают подвижность, но снижают седиментационную устойчивость при содержании более 10% по массе. Активные минеральные добавки повышают коррозионную стойкость портландцемента в сульфатных средах.

Добавка золы-уноса ТЭЦ к цементу увеличивает пластическую вязкость растворов. Так, при соотношении массы золы-уноса к массе цемента равном 2:3, пластическая вязкость увеличивается в 2–4 раза.

Шлаки для цементирования скважин используются и как чисто шлаковый тампонажный материал. Существенный недостаток шлаковых растворов – их седиментационная неустойчивость и большая водоотдача. Для устранения этих недостатков вводят дополнительные составляющие. С целью повышения темпов роста цементного камня при одновременном увеличении подвижности раствора в качестве вяжущих компонентов используют шлакопортландцемент и феррохромовый шлак, для ускорения схватывания и твердения используют жидкое стекло, а в качестве пластификатора используют кремнийорганическую добавку [30]. Использование шлакопесчаных смесей повышает прочность камня.

Возможность использования зол и шлаков в смеси с цементом для целей гидроизоляции не вызывает сомнений, позволяя при этом сократить расход цемента на гидроизоляцию заколонного пространства. Однако перспективным представляется дальнейшее совершенствование рецептур тампонажных растворов с использованием золы и шлаков и дальнейшим сокращением доли цемента или полным его отсутствием. Для решения этих задач необходимо изучение физико-химических параметров конкретных видов золы и шлаков, а именно определение гранулометри-

ческого состава, изучение реологических свойств растворов на их основе, определение кольматационных свойств и исследование процесса взаимодействия с технологическими растворами.

Для исследования физико-химических параметров зольных растворов были выполнены работы с золой-уносом – отходами ТЭЦ.

Химический состав исследуемых зол приведен в табл. 1.

Определение физических параметров золы и зольных растворов исключало:

- определение гранулометрического состава золы;
- определение насыпной плотности;
- определение реологических свойств зольных растворов: плотности, вязкости, водоотдачи, стабильности.

Методика исследований заключалась в следующем.

При определении гранулометрического состава производили анализ высушенных проб с использованием сит стандартного ряда: 0,25; 0,5; 1; 2; 3; 5; 7; 10 мм. Масса проб составляла около 50 и 1000 г, количество параллельных определений – не менее 5.

Насыпную плотность определяли взвешиванием просушенных проб золы в тиглях известной массы объема (125 см³). Количество параллельных определений – 6.

Определение реологических свойств зольных растворов выполняли с использованием стандартных приборов: ареометра АГ-3, вискозиметра СПВ-5, приборы для определения водоотдачи ВМ-6, отстойника ОМ-10.

Результаты измерений гранулометрического состава ТЭЦ-1 приведены в табл. 2, а ТЭЦ-2 – в табл. 3.

Полученные результаты показывают, что содержание в золе-уноса крупных фракций (более 10 мм) составляет не более 10% для ТЭЦ-2 и не более 0,06% – для ТЭЦ-1, причем в составе золы-уноса преобладают частицы крупностью менее 0,25 мм: 56,1÷61,3% для ТЭЦ-2 и почти 99% – для ТЭЦ-1.

Результаты определения насыпной плотности золы-уноса в ТЭЦ-2 и ТЭЦ-1 приведены в таблицах 4 и 5 соответственно.

Результаты определений показали, что средняя насыпная плотность непросеянной золы-уноса ТЭЦ-2 составила 1,16 г/см³ (т/м³), а ТЭЦ-1 – 1,31 г/см³ (т/м³).

Геологические свойства зольных растворов определялись при концентрации золы в воде 100, 200, 300 и 400 г/л.

Результаты определения реологических параметров ТЭЦ-2 и ТЭЦ-1 зольных растворов приведены в табл. 6 и 7 соответственно.

В приведенных таблицах и далее по тексту приняты следующие единицы измерения реологических параметров: плотность – г/см³; вязкость – секунды С; водоотдача – см³/30 мин.; содержание песка %.

ТАБЛИЦА 1.

Химический состав исследуемых зол

Место отбора пробы	Состав золы-уноса							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂
ТЭЦ-1	38,8	20,2	3,0	2,8	0,7	1,04	1,24	0,30
ТЭЦ-2	38,8	14,7	14,7	6,0	0,5	1,14	0,76	0,72

ТАБЛИЦА 2.

Гранулометрический состав золы-уноса ТЭЦ-1

Наименование	Размер фракций, мм				
	более 1,0	0,5–1,0	0,25–0,5	0,25–0,1	Менее 0,1
Масса фракций, г	38,8	20,2	3,0	2,8	0,7
Содержание фракций	38,8	14,7	14,7	6,0	0,5

ТАБЛИЦА 3.

Гранулометрический состав золы-уноса ТЭЦ-2

Размер фракций, мм	Количество, г/%				
	проба 1	проба 2	проба 3	проба 4	проба 5
более 10	89,57/9,0	97,40/9,8	111,1/10,4	80,2/7,9	62,7/6,3
7–10	21,10/2,1	19,10/1,9	23,4/2,2	40,3/4,9	18,4/1,9
5–7	16,30/1,5	16,40/1,6	14,8/1,4	16,9/1,6	17,2/1,7
3–5	23,30/2,4	23,70/2,4	25,6/2,4	24,4/2,4	25,1/2,5
2–3	22,30/2,3	21,30/2,1	22,30/2,1	20,0/2,0	30,2/3,0
1–2	71,40/7,2	70,20/7,0	72,20/6,7	69,80/6,9	78,9/8,0
0,5–1	39,20/4,0	41,90/4,2	92,9/8,7	35,7/3,5	37,1/3,7
0,25–0,5	118,90/12,0	111,2/11,1	107,3/10,0	105,5/10,4	183,7/10,5
менее 0,25	590,3/59,5	507,9/59,9	01,5/56,1	623,8/61,3	596,9/60,4
Всего	989,07/100	997,4/100	1070,1/100	1015,6/100	990,2/100

ТАБЛИЦА 4.

Насыпная плотность золы-уноса ТЭЦ-2

№ опыта	Вес бюкса, г	Масса непроеянной золы, г	Насыпная плотность непроеянной золы, г/см ³
1	7,500	143,2	1,1466
2	7,520	141,22	1,1298
3	7,525	146,5	1,164
4	7,528	149,1	1,1928
5	7,529	147,5	1,11

ТАБЛИЦА 5.

Насыпная плотность золы-уноса ТЭЦ-1

№ опыта	Вес бюкса, г	Масса непроеянной золы, г	Насыпная плотность непроеянной золы, г/см ³
1	7,525	161,4	1,291
2	7,500	165,1	1,321
3	7,532	163,9	1,311
4	7,534	166,2	1,390
5	7,522	163,1	1,305

ТАБЛИЦА 6.

Реологические параметры водозольных растворов ТЭЦ-2

Концентрация золы-уноса в воде, г/л	Параметры	Результаты замеров	Среднее значение параметров	Примечание
100	плотность	1,03; 1,03; 1,02; 1,03; 1,03	1,03	Корка рыхлая, выпадение золы в осадок интенсивное
—	вязкость	14; 18; 14; 15; 14; 14; 14; 14; 15; 14; 14; 14	14,5	
—	водоотдача	6 опытов – более 40	>40	
—	песок	2; 3; 2; 4; 3; 4; 4; 4; 3; 3; 4; 4; 4	3,4	
200	плотность	1,04; 1,03; 1,04; 1,04; 1,04; 1,04	1,04	Корка рыхлая, 6–7 м, выпадение золы в осадок интенсивное
—	вязкость	14; 15; 15; 14; 15; 15; 18; 14; 17; 15; 14	15,1	
—	водоотдача	6 замеров – более 40	>40	
—	песок	6; 7; 7; 8; 7; 8; 7; 7; 6; 7; 8; 7	7,1	
300	плотность	1,12; 1,11; 1,13; 1,13; 1,13; 1,13; 1,13; 1,13	1,124	Корка рыхлая 6–9 мм, раствор над осадком мутный
—	вязкость	15; 15; 15; 15; 15; 15	15	
—	водоотдача	5 замеров – более 40	>40	
—	песок	6; 7; 10; 10; 7; 9; 10; 10; 10; 10; 10	9	
400	плотность	1,15; 1,15; 1,14; 1,15; 1,15; 1,14; 1,15	1,15	Корка рыхлая 9–10 мм, раствор под осадком мутный
—	вязкость	16; 16; 15; 16; 16; 15; 16; 15; 16	16	
—	водоотдача	5 замеров – более 40	>40	
—	песок	10; 10; 10; 9; 10; 10; 10; 9; 10	10	

ТАБЛИЦА 7.

Реологические параметры водозольных растворов ТЭЦ-1

Концентрация золы-уноса в воде, г/л	Параметры	Среднее значение параметров
100	плотность	1,03
—	вязкость	29,84
—	водоотдача	>40
—	песок	<4
200	плотность	1,04
—	вязкость	28,99
—	водоотдача	>40
—	песок	<4
300	плотность	1,06
—	вязкость	26,18
—	водоотдача	>40
—	песок	<4
400	плотность	1,13
—	вязкость	19,8
—	водоотдача	>40
—	песок	<4

Перед приготовлением зольных растворов зола просушивалась и просеивалась через сито 0,4 мм. При выполнении замеров водоотдачи для данного цикла опытов, а также последующих циклов применяли глинистый и глинозольный растворы и прибор ВМ-6.

Водоотдача 40 см³ для опытов с водозольным раствором 300 г/л достигалась через 8–9 секунд после начала опыта, а для водозольного раствора 400 г/л – через 6–8 секунд, что свидетельствует о полной нестабильности водозольных растворов и невозможности использования их для промывки ствола скважин в процессе бурения.

Для исследования реологических свойств глинозольных растворов используют глинистый раствор, реологические параметры которого приведены в табл. 8.

Для приготовления глинистых растворов использовали бентонитовый глинопорошок. Растворы затворялись за 48 часов до выполнения замеров. Как видно из таблицы 8, глинистый раствор с концентрацией глины 200 г/л обладает высокой вязкостью, практически «не течет» при проведении замеров с использованием прибора СПВ-5.

Реологические свойства глинозольных растворов изучались с использованием золы-уноса Чимкентской ТЭЦ.

Основные изученные характеристики глинозольных растворов приведены в табл. 9.

ТАБЛИЦА 8.

Реологические параметры глинистого раствора

Параметры	Значение параметров		Примечание
	Концентрация глины в воде, г/л		
	100	200	
Плотность	1,07	1,12	по 6 замеров
Вязкость	22	более 1800	по 5 замеров
Водоотдача	15	13	по 5 замеров
Содержание песка	4	2	по 6 замеров

ТАБЛИЦА 9.

Основные характеристики глинозольных растворов

Параметры	Концентрация глины, г/дм³	Средние результаты замеров			Примечание
		Концентрация золы, г/л			
		100	200	300	
Плотность	100	1,1÷1,11	1,13÷1,14	1,16÷1,20	По 6 замеров каждого параметра
Вязкость	–	32	31	28	
Водоотдача	–	23–24	34–35	37–39	
Песок	–	4,6	5,1	6,3	
Плотность	200	1,18÷1,19	1,21÷1,23	1,26÷1,27	–
Вязкость	–	не течет			–
Водоотдача	–	30	19–20	16–18	
Песок	–	9	10	11	

При проведении замеров на приборе ВМ-6 глинистая корка на фильтре для раствора с концентрацией глины 100 г/л составила 3–5 мм, а для раствора с концентрацией 200 г/л – 5–6 мм.

Замер водоотдачи глинозольного раствора с концентрацией глины и золы 100 г/л показал, что на фильтре образуется глинистая корка толщиной 9–10 мм, причем верхняя часть корки (7 мм) является рыхлой, а нижняя, прилегающая к фильтру, – плотная (2–3 мм).

Глинозольная корка практически не прилипает к фильтровальной бумаге, а при высыхании становится весьма твердой, тяжело разрушается ножом.

Глинозольные растворы, приготовленные с добавками золы к высоковязкому глинистому раствору при концентрации глины 200 г/л, представляют собой кремообразную массу серо-черного цвета с вязкостью «не течет» по СПВ-5.

Очевидно, такие растворы при разработке технологии их подачи в скважину и проведение дополнительных исследований по определению стабильности и характера физико-химических процессов взаимодействия с растворами кислот могут быть использованы для гидроизоляции заколонного пространства технологических скважин.

Следует иметь в виду, что перед выполнением заме-

ров эти растворы протирались через сито с размером ячейки 0,3–0,4 мм для предотвращения агрегирования твердой фазы образования глинозольных агрегатов.

Исследование кольматационных скважин свойств растворов проводили на установке по исследованию проницаемости керна (УИПК). По результатам определения реологических характеристик для исследования были выбраны растворы:

1. Водозольный с концентрацией золы 200 г/л.
2. Глинозольный (100 г глины + 1,0 дм³ воды + 100 г золы).
3. Глинозольный (200 г глины + 1,0 дм³ воды + 100 г золы).

Кольматацию образцов выполняли при следующих условиях: высота образцов не менее 45 мм; давление обжима образцов 2,2 МПа; давление подачи растворов при кольматации – 1,0 МПа. Кольматации подвергались образцы, отобранные из монолитов среднезернистых песков с величиной $K_d = 100 \div 150$ мД при давлении подачи воды 1,0 МПа.

Декольматацию образцов выполняли созданием противодавления, в качестве жидкости декольматации использовали техническую воду. При декольматации производилось постепенное увеличение давления подачи воды на закольматированный образец. При

этом фиксировали давление начала декольматации, которое затем повышали до 1,9 МПа. После стабилизации процесса определяли степень восстановления проницаемости образцов.

Характеристика образцов, использованных для исследований кольматационных свойств зольных растворов, приведена в табл. 10.

Характеристика зольных растворов, использовавшихся для кольматации образцов песка, приведена в табл. 11.

Результаты исследований показали следующее.

При подаче водозольного раствора на поверхность образца кольматирующий слой представлен твердой фазой раствора. Проницаемость образца при этом снижается в несколько десятков раз. При создании противодействия технической водой, равного давлению кольматации водозольным раствором, проницаемость образца восстанавливается до исходного значения.

Наличие твердой фазы в глинозольном растворе позволяет значительно снизить кольматацию образцов. При декольматации потеря эффективной проницаемости составляет 30% (образец №3), что значительно меньше по сравнению с аналогичными опытами по кольматации глинистыми растворами. Для последних восстановление эффективной проницаемости в лучшем случае не превышает 50%. Это обстоятельство дает основание использовать указанные растворы как

для вскрытия продуктивных водоносных горизонтов, так и для ликвидации технологических скважин.

С целью исследования возможности предотвращения дренирования рабочих растворов кислот через закольматированные водозольным и глинозольным растворами образцы песчаного керна было выполнено работа по следующей методике.

Глинозольные растворы.

На образцах №7 и 8 замерялась проницаемость на технической воде при создании избыточного давления 1,0 МПа. После этого производилась кольматация образцов песчаного керна глинозольными растворами при создании избыточного давления 1,0 МПа. Глинозольный раствор приготавливали смешиванием 200 г золы-уноса + 100 г глинопорошка + 1000 см³ воды. Параметры раствора были следующие: плотность – 1,14 см³, условная вязкость СПВ-5–31С; водоотдача – 30–35 см³/30 мин.

После достижения полной кольматации образцов глинозольными растворами (через 11–13 минут после начала опыта) на закольматированный участок образца подавался раствор H₂SO₄ концентрации 10 г/л под давлением 1–1,5 МПа.

На следующем этапе к закольматированному образцу прикладывалось противодействие для достижения декольматации технической водой. В образце №6 декольматация начиналась при противодействии 0,5 МПа (33,3% от максимального давления подачи

ТАБЛИЦА 10.

Характеристики песков образцов при проведении исследований

№ образца	Грансостав	Давление обжима, МПа	Проницаемость в воде, ΔP=1,0 МПа, мД	Высота образца, мм
1	Песок среднезернистый	2,2	742,8	48
2	Песок среднезернистый	2,2	714	50
3	Песок среднезернистый	2,2	600	50
4	Песок среднезернистый	2,2	785,7	50
5	Песок среднезернистый	2,2	671,4	48

ТАБЛИЦА 11.

Характеристики зольных растворов

№ образца	Состав вольного раствора			Свойства раствора			
	Вода, дм ³	Глина, г	Зола, г	Плотность, г/см ³	Вязкость, С	Водоотдача, см ³ /30 мин	Содержание песка, %
1	1	–	200	1,04	15	Более 40	7
2	1	–	200	1,04	15	–	7
3	1	100	100	1,11	32	24	5
4	1	200	100	1,14	31	35	5
5	1	200	100	1,14	31	35	5

кислых растворов или 50% от давления кольматации глинозольными растворами). Декольматация продолжалась при противодавлении 1,0 МПа.

В образце №7 декольматация начиналась при противодавлении 0,8 МПа (53,3% от давления кислых растворов или 80% от давления кольматации глинозольными растворами). Декольматация продолжалась при противодавлении 1,0 МПа.

Для водозольных растворов методика проведенных работ была аналогичной.

Сравнительные данные по изменению проницаемости образцов при противодавлении через них различных видов растворов приведены в табл. 12.

При проведении исследований было отмечено, что при пропускании через образцы №8 и 9, закольматированных водозольным раствором технической воды, на выходе вытекал фильтрат от темно-желтого до зеленого цвета при нейтральной реакции (рН=7).

Было также отмечено, что водозольный раствор не обеспечивает полной кольматации песков различного гранулометрического состава. Подача через образец, закольматированный зольными частицами, раствора H_2SO_4 приводит к частичной его декольматации, причем проницаемость по отношению к закольматированному образцу увеличивается в десятки раз, но не превышает 32–53%, в то время как создание противодействия ведет к восстановлению проницаемости 92,2% (образец №8); 69,4% (образец №9); 92,6% (образец №6) 80,7% (образец №7).

Из выполненных исследований также следует, что водозольные растворы в чистом виде не пригодны для целей гидроизоляции, также как и для целей заколонного ремонта технологических скважин, поскольку зольные частицы не обеспечивают полную механическую кольматацию пористых коллекторов и не снижают полностью проницаемость механических экранов.

В то же время глинозольные растворы, обеспечивая удержание зольных частиц во взвешенном состоянии, позволяют создать на границе пористого коллектора непроницаемый экран для растворов кислот,

ТАБЛИЦА 12.

Сравнительные данные по изменению проницаемости образцов

№ образца	Проницаемость, мД			
	K_n	$K_{пр}$	$K_{тк}$	K_n^1
6	385,7	0	0	357,1
7	376,2	0	0	303,5
8	728,5	4,5	385,7	671,4
9	700	4,5	228,5	485,7

K_n – проницаемость образцов по технической воде при $\Delta p = 1,0$ МПа; $K_{тк}$ – проницаемость образцов по раствору H_2SO_4 концентрации 10 г/л при $\Delta p = 1,0$ МПа; K_n^1 – восстановленная проницаемость созданием противодействия $\Delta p = 1,0$ МПа.

А.Г. ИВАНОВ, Ю.А. АРСЕНТЬЕВ,
Н.В. СОЛОВЬЕВ, А.А. ВИАЛЬМИС, А.А. ОРЕХОВ
АНАЛИЗ СВОЙСТВ ЗОЛЬНЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ
ДЛЯ СООРУЖЕНИЯ, РЕМОНТА И ЛИКВИДАЦИИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН СКВАЖИННОГО
ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА

выдержавший избыточное давление подачи кислых растворов в направлении кольматации, превышающее в 1,5 раза давление, при котором образец кольматируется глинозольным раствором.

Опыты, выполненные с образцом №6 и 7, позволяет сделать вывод о возможности применения глинозольных растворов для целей ремонта, гидроизоляции и ликвидации технологических скважин, а также для ликвидации разведочных скважин.

Результаты исследований химических свойств золы-уноса для ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 приведены в табл. 13 и 14 соответственно.

Исследования показали, что при взаимодействии золы с водными растворами кислот проницаемость золы не снижается.

При взаимодействии с маточниками, дополнительно укрепленными кислотой, наблюдается некоторое снижение проницаемости.

Данная нейтрализация кислоты происходит при расходе кислоты более 500 кг/т.

При пропускании через воду маточников сорбции полная нейтрализация кислоты происходит при отношении Ж:Т = 65,0, при пропускании выщелачивающих растворов с концентрацией кислоты 20 г/л – при соотношении Ж : Т = 80,0. Поскольку при подземном выщелачивании руд конкретного месторождения при давлении растворов по рудному телу максимальное отношение Ж:Т не превышает 5,0, при растекании растворов за контуры рудной залежи или заколонное пространство эта величина должна быть значительно меньше, то есть значительно превышает реальную. Возможность нейтрализации золы растворами при растекании.

Помимо нейтрализующей роли, зола-уноса может выступать как компонент осаждения вредных примесей из растворов. Известны методы нейтрализации и очистки промышленных растворов и вод: электрохимические, мембранные, термохимические кондиционирование, химическая нейтрализация и осаждение. Для реализации наиболее доступного, последнего метода применяют известь [12], соли бария, карбонат кальция [13]. Использование первого метода не позволяет достичь высокой степени очистки ввиду достаточно высокой для этих целей растворимости гипса [16], второго – токсичности бариевых солей, дефицитности, высокой стоимости реагента и технологических сложностей (например, выделения H_2S при использовании BaS). Осаждение карбонатом кальция связано с высоким расходом реагентов. Этих недостатков лишен метод нейтрализации с осаждением труднорастворимых сложных солей, например, ГСАК – гидросульфалюмината кальция:

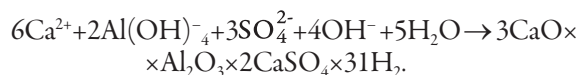


ТАБЛИЦА 13.

Результаты исследования химических свойств золы-уноса ТЭЦ-1

Матрица раствора	Концентрация, г/л	Расход кислоты на взаимодействие, кг/т	Отношение Ж:Т	Примечание
Вода	2	49,2	30:1	Полной нейтрализации золы не достигнуто
	20	181,4	30:1	
	100	426,6	30:1	
Маточник сорбции	2	50,6	30:1	—
	20	199,8	30:1	
	100	513,8	30:1	

ТАБЛИЦА 14.

Результаты исследования химических свойств золы-уноса ТЭЦ-2

Матрица раствора	Концентрация, г/л	Расход кислоты на взаимодействие, кг/т	Отношение Ж : Т	Примечание
Вода	2	20	10:1	Полной нейтрализацию золы не достигнуто
	20	140,2	10:1	
	100	397,8	10:1	
Маточник сорбции	2	19,7	10:1	—
	20	109,6	10:1	
	100	356,1	10:1	

Осадки ГСАК труднорастворимы, их можно хранить, либо использовать для производства строительных изделий, цемента или вяжущего материала.

Тяжелые металлы и токсичные элементы захватываются твердой фазой и вторично не растворяются. В качестве реагентов при этом методе осаждения используется алюминат натрия, оксихлорид и хлорид алюминия, глиноземнистый цемент, алюминий-содержащие шлаки. Использование указанных реагентов требует или их получения, или предварительной специальной подготовки.

В этом плане практический интерес представляет зола-унос. При контакте кислых технологических растворов и вод с золой-уносом одновременно с нейтрализацией этих растворов происходит образование труднорастворимых солей новых образований типа алаунитов и арозитов, а также сульфатаалюминатов кальция типа ГСАК с захватом металлов и загрязненных примесей. Наибольший эффект дает зола-унос, улавливаемая в электрофильтрах ТЭЦ, полученная при различных методах сжигания.

Обладая щелочной реакцией, зола-унос эффективно нейтрализует как сильнокислые высокосолесые растворы (общее содержание анионов до 100 г/л), так и минерализованные воды.

Результаты исследования в лабораторных условиях степени очистки золой-уносом с общей концентрацией анионов 100 г/л в зависимости от соотношения

Ж : Т при полной нейтрализации раствора H_2SO_4 приведены в табл. 15.

По значению Ж : Т = 2,0 остаточное содержание в растворах по железу и сульфату не превышало 100 мг/л. Эффективность нейтрализации и очистки растворов и вод зависит прежде всего от состава растворов и золы, состав последней определяется типом углей. Так, при соотношении раствор : зола-унос = 3,0, практически полностью очищают растворы от сульфатов при их исходном содержании в растворах 100 г/л. Максимальная емкость золы-уноса по сульфату до полной нейтрализации растворов была достигнута при соотношении Ж : Т = 3,0 и исходном содержании кислоты в растворах равном 5 г/л.

ТАБЛИЦА 15.

Результаты исследований очистки золой-уносом кислого раствора H_2SO_4

Ж : Т	Остаточное содержание солей, % от исходного	Примечание
1,0	0,0	С полным захватом всего объема раствора
1,5	3,0	
2,0	12,0	
4,0	34,0	

Данные по очистке сточных вод оксихлоридом алюминия, глиноземным цементом, золой-уноса после улавливания в электрофильтрах и шлаком приведены в табл. 16.

Из таблицы 16 следует, что степень очистки растворов оксихлоридом алюминия составила 79%, глиноземным цементом – 93,6%, золой-уноса – 94,0%, шлаком 93,2%.

Высокоразвитая поверхность золы-уноса позволяет эффективно осуществлять сорбцию (захват) технологических растворов до значения $J : T = 1:1,5$. При наличии в золе железа и алюминия наблюдается отверждение зольной системы. Добавка примерно 5% CaO или Na_2CO_3 ускоряет процесс отверждения и увеличивает прочность камня до 15 МПа и более. Эти характеристики можно регулировать рецептурой смеси.

ВЫВОДЫ

1. Выполнен краткий анализ состояния работ по гидроизоляции заколонного пространства технологических скважин, показавший, что на современном этапе отсутствуют доступные и дешевые материалы, обеспечивающие гарантированное предотвращение распространения рабочих растворов по заколонному пространству.

2. Основным требованием к таким материалам является способность улавливать и нейтрализовывать попавшие в заколонное пространство растворы кислот с образованием нерастворимых осадков, колюматизирующих каналы утечек. Химический состав золы-уноса и шлаков удовлетворяет этому требованию, а их доступность и дешевизна позволяет значительно снизить расходы на ремонт и сооружение скважин.

А.Г. ИВАНОВ, Ю.А. АРСЕНТЬЕВ,
Н.В. СОЛОВЬЕВ, А.А. ВИЛЬМИС, Д.А. ОРЕХОВ
АНАЛИЗ СВОЙСТВ ЗОЛЬНЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ
ДЛЯ СООРУЖЕНИЯ, РЕМОНТА И ЛИКВИДАЦИИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН СКВАЖИННОГО
ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА

3. Проведены исследования физико-химических реологических параметров зольных растворов на основе золы-уноса для ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2, результаты которых показали, что:

– водозольные растворы не обеспечивают полной колюматации песков различного гранулометрического состава;

– глинозольные растворы, обеспечивающие удержание зольных частиц во взвешенном состоянии, позволяет создать на границе пористого коллектора непроницаемый экран для растворов кислот, выдерживающих избыточное давление подачи кислых растворов в направлении колюматации, превышающее в 1,5 раза давление, при котором образец колюматирован глинозольным раствором:

– водозольные растворы обладают значительной кислотоемкостью, превышающей реальную возможность нейтрализации золы растворами при растекании, и могут быть использованы для нейтрализации кислых растворов при проведении работ по заколонному ремонту скважин при условии последующей подачи тампонажного раствора;

– зола-унос эффективно нейтрализует как сильно-кислые высокосолесые растворы (общее содержание анионов до 100 г/л), так и минерализованные и шахтные воды;

– помимо нейтрализующей роли, зола-унос выступает как компонент для осаждения вредных примесей из растворов. Так, степень очистки раствора с исходным содержанием солей 100 г/л составила 94,0%.

4. Проведенные исследования показывают перспективность использования зол при ремонте и сооружении скважин. Особая эффективность может проявляться при задавливании зольных растворов в

ТАБЛИЦА 16.

Качество очистки сточных вод различными реагентами

Компонент	Исходное содержание, мг/л	Содержание после очистки, мг/л, с применением			
		оксихлорида алюминия	глиноземистого цемента	золы с электрофильтров	шлака
Cu^{2+}	5,0	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.
Zn^{2+}	3,0	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.
$Fe_{общ}$	10,0	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.
Ca^{2+}	620,0	165,2	20,0	15,6	24,5
Mg^{2+}	138,0	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.
SO_4^{2-}	1480,0	102,5	98,2	95,5	101,8
Cl^-	30,2	212,8	27,3	25,9	28,6

Примечание: н. о. – не определяется, то есть содержание менее 0,01 мг/л для Cu^{2+} , Zn^{2+} , $Fe_{общ}$ и менее 1 мг – для остальных.

скважины при их ликвидации после отработки эксплуатационного блока подземного выщелачивания. При этом в прифильтровом пространстве скважин будет происходить нейтрализация остаточной кислоты в поровых растворах и содержания вредных примесей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ашрафьян М.О., Луничкин В.А., Динмухамедов Д.Х. Совершенствование технологии цементирования скважин // Обзорная информация. Сер. Бурение. М.: ВНИИОЭНГ. 1986. Вып. 7. 44 с.
2. Башкатов Д.Н., Сулакшин С.С., Драхлис С.А. Справочник по бурению скважин на воду. М.: Недра. 1980. 560 с.
3. Бойцов В.Е. Геология месторождений урана. М.: Недра. 1989. 302 с.
4. Бочко Э.А., Никишин В.А. Упрочнение неустойчивых горных пород при бурении скважин. М.: Недра. 1979.
5. Булатов А.И. Детективная биография герметичности крепи нефтяных и газовых скважин. Краснодар: Просвещение – Юг. 2009. 934 с.
6. Глухов А.В., Ермоленко С.И., Иванов Д.А., Иванов А.Г. Способ гидроизоляции заколонного пространства скважин и состав тампонажной смеси для его осуществления. Патент РФ на изобретение №27226086 от 16.12.1019.
7. Иванов А.Г., Александров С.А., Курашов И.А., Иванов Д.А., Шихов П.Е. и др. О применении бентонита для сооружения технологических скважин скважинного подземного выщелачивания урана // Известия вузов, Геология и разведка. 2019. №6. С. 79–86.
8. Иванов А.Г., Арсентьев Ю.А., Соловьев Н.В., Назаров А.П. Оборудование устьев технологических скважин скважинного подземного выщелачивания урана, сооруженных в криолитозоне // Разведка и охрана недр. 2023. №2. С. 46–53.
9. Ивачев Л.И. Промывка и тампонирующее геологоразведочных скважин. М.: Недра. 1987. 247 с.
10. Мамилев В.А., Петров Р.П., Шушания Г.Р. Добыча урана методом подземного выщелачивания. М.: Атомиздат. 1980. 246 с.
11. Материалы семинары по геотехнологическому бурению и эксплуатации скважин. Навои. 1988. 70 с.
12. Милованов Л.В. Очистка и использование сточных вод предприятий цветной металлургии. М.: Металлургия. 1971. 384 с.
13. Нифадьев А.Ш., Пашкин А.А., Одинцова Т.А., Жданова Л.В. Тампонажные составы для гидроизоляции технологических скважин при подземном выщелачивании // Технический прогресс в атомной промышленности. Сер. Горно-металлургическое производство. 1983. Вып. 1 (278). С. 54–57.

А.Г. ИВАНОВ, Ю.А. АРСЕНТЬЕВ, Н.В. СОЛОВЬЕВ, А.А. ВИАЛЬМИС, Д.А. ОРЕХОВ
АНАЛИЗ СВОЙСТВ ЗОЛЬНЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ
ДЛЯ СООРУЖЕНИЯ, РЕМОНТА И ЛИКВИДАЦИИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН СКВАЖИННОГО
ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА

14. Рысев В.П., Иванов А.Г., Шаталов В.В., Фазлуллин М.И. и др. Способ сооружения эксплуатационных скважин для подземного выщелачивания руд. А.С. СССР №1679821. от 09.11.1989 г.
15. Рябokonь С.А., Гольдштейн В.В. Перспективы развития полимерных тампонажных материалов // Нефтяное хозяйство. 1969/ №5. С. 7–15.
16. Сергиенко И.А., Мосев А.Ф., Бочко Э.А., Пименов М.К. Бурение и оборудование геотехнологических скважин. М.: Недра. 1984. 224 с.
17. Серенко И.А., Сидоров Н.А., Кошелев А.Т. Повторное цементирование при строительстве и эксплуатации скважин. М.: Недра. 1988. 263 с.

REFERENCES

1. ASHRAFYAN M.O., LUNICHKIN V.A., DINMUKHAMMEDOV D.Kh. Improving Well Cementing Technology. *Obzornaya informatsiya. Ser. Burenije*. Moscow: VNIIOENG. 1986;7:44. (In Russian).
2. BASHKATOV D.N., SULAKSHIN S.S., DRAKHLIS S.A. Handbook of Water Well Drilling. Moscow: Nedra. 1980:560. (In Russian).
3. BOYTSOV V.E. Geology of uranium deposits. Moscow: Nedra. 1989:302. (In Russian).
4. BOCHKO E.A., NIKISHIN V.A. Hardening of Unstable Rocks in Borehole Drilling. Moscow: Nedra, 1979. (In Russian).
5. BULATOV A.I. Detective biography of tightness of oil and gas wells. *Prosveshchenie – Yug*. 2009:934. (In Russian).
6. GLUKHOV A.V., ERMOLENKO S.I., IVANOV D.A., IVANOV A.G. Method of waterproofing the casing space of wells and the composition of cement sand mixture for its implementation. Patent of the Russian Federation for invention N 27226086 of 16.12.1019. (In Russian).
7. IVANOV A.G., ALEKSANDROV S.A., KURASHOV I.A., IVANOV D.A., SHIKHOV P.E. ET AL. On the application of bentonite for the construction of technological wells of borehole underground leaching of uranium. *Izvestiya vuzov, Geologiya i razvedka*. 2019;6:79–86. (In Russian).
8. IVANOV A.G., ARSENTYEV YU.A., SOLOVIEV N.V., NAZAROV A.P. Equipment of wellheads of technological wells of borehole in-situ leaching of uranium constructed in the permafrost zone. *Razvedka i okhrana neдр*. 2023;2:46–53. (In Russian).
9. IVACHEV L.I. Flushing and plugging of geological exploration wells. Moscow: Nedra. 1987:247. (In Russian).
10. MAMILOV V.A., PETROV R.P., SHUSHANIYA G.R. Uranium Mining by In-Situ Leaching. Moscow: Atomizdat. 1980:246. (In Russian).
11. Materials: seminars on geotechnological drilling and well operation. Navoi. 1988:70. (In Russian).
12. MILOVANOV L.V. Purification and use of wastewater

- at non-ferrous metallurgy enterprises. 1971:384. (In Russian).
13. NIFADYEV A.SH., PASHKIN A.A., ODINTSOVA T.A., ZHDANOVA L.V. Plugging compounds for waterproofing of technological wells in underground leaching. *Tekhnicheskij progress v atomnoy promyshlennosti. Ser. Gorno-metallurgicheskoye proizvodstvo.* 1983;1;(278):54–57. (In Russian).
 14. RYSEV V.P., IVANOV A.G., SHATALOV V.V., FAZLULLIN M.I. ET AL. Method of Construction of Production Wells for In-Situ Leaching of Ores. A.S. USSR N 1679821. ot 09.11.1989. (In Russian).
 15. RYABOKON S.A., GOLDSTEIN V.V. Prospects for the development of polymer cement materials. *Neftyanoye khozyaystvo* 1969;5:7–15. (In Russian).
 16. SERGIENKO I.A., MOSEV A.F., BOCHKO E.A., PIMENOV M.K. Drilling and equipment of geotechnological wells. Moscow: Nedra. 1984:224. (In Russian).
 17. SERENKO I.A., SIDOROV N.A., KOSHELEV A.T. Repeated cementing in the construction and operation of wells. Moscow: Nedra. 1988:263. (In Russian).

А.Г. ИВАНОВ, Ю.А. АРСЕНТЬЕВ,
Н.В. СОЛОВЬЕВ, А.А. ВИЛЬМИС, Д.А. ОРЕХОВ
АНАЛИЗ СВОЙСТВ ЗОЛЬНЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ
ДЛЯ СООРУЖЕНИЯ, РЕМОНТА И ЛИКВИДАЦИИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН СКВАЖИННОГО
ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА

Иванов Александр Георгиевич,
к.т.н., главный специалист АО «Ведущий проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии»

☎ 115409, Москва, Каширское ш., д. 33,
115409, Moscow, Kashirskoe shosse, 33,
e-mail: ivaov_ag@mail.ru

Арсентьев Юрий Александрович,
к.т.н., доцент кафедры «Механика и инженерная графика» Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе – МГРИ

☎ e-mail: arsentev1956@yandex.ru

Соловьев Николай Владимирович,
д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Современные технологии бурения скважин» Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе – МГРИ

☎ e-mail: solovyevnv@mgri.ru

Вильмис Александр Леонидович,
д.т.н., заведующий кафедрой «Геотехнологические способы и физические процессы горного производства» Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе – МГРИ

☎ e-mail: vilmisal@mgri.ru

Орехов Данила Дмитриевич,
студент Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе – МГРИ

☎ 117497, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23,
117497, Moscow, Miklukho-Maklaya str., 23,
e-mail: danilaohv@yandex.ru

УДК 378.147+629.7.021

DOI: 10.52531/1682-1696-2025-25-3-111-120

Научная статья

EDN: SQGVJK

ИНЖЕНЕРНЫЙ КЕЙС КАК ИНСТРУМЕНТ ФОРМИРОВАНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ КОНЦЕПЦИЙ НА ПРИМЕРЕ ПРОЕКТА ПО СОЗДАНИЮ СТРАТОСФЕРНОГО РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Д.К. ЩЕГЛОВ^{1,2,3}, Д.А. ФЁДОРОВ^{1,2},
С.К. САВЕЛЬЕВ^{3,1}, А.Г. САЙБЕЛЬ^{1,3},
С.Е. ЕРОШИН²

¹ АО «НПО «ОБУХОВСКИЙ ЗАВОД»,
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

² АНО ДПО НОЦ ВКО «АЛМАЗ – АНТЕЙ»
ИМ. АКАД. В.П. ЕФРЕМОВА, МОСКВА,
РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

³ ФГОУ ВО БГТУ «ВОЕНМЕХ»
ИМ. Д.Ф. УСТИНОВА, САНКТ-ПЕТЕРБУРГ,
РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

В статье излагается опыт авторов по использованию метода инженерных кейсов для формирования облика инновационной системы воздушного старта ракет-носителей (РН) с аэростатической стратосферной платформы. Данный инженерный кейс проводился для шести старшеклассников в рамках июльской проектной смены «Большие вызовы» в образовательном центре «Сириус» в 2024 г. За три недели работы было выполнено обоснование технической реализуемости и экономической эффективности создания аэростатической стратосферной платформы для старта РН легкого и среднего классов. Показано, что подобная платформа сможет выполнять задачу первых ступеней системы космического запуска без задействования инфраструктуры космодрома. Запуск можно будет осуществлять с любой географической широты на орбиту необходимого наклонения. Также рассматривается возможность предоставления услуг запуска другим странам. По результатам работы на проектной смене авторы сделали вывод о высокой эффективности применения инженерных кейсов для формирования инновационных концепций развития ракетно-космической промышленности. Исследование выполнено при поддержке секции Международных проблем науки и образования Российской академии естественных наук.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: проектное обучение, инженерный кейс, опыт внедрения, образовательный процесс, ракеты-носители, стратосферный старт, стратостаты, космические программы

© Д.К. Щеглов, Д.А. Фёдоров, С.К. Савельев,
А.Г. Сайбель, С.Е. Ерошин
Поступила в редакцию 17.07.2025

Original article

ENGINEERING CASE AS A TOOL FOR FORMING INNOVATIVE CONCEPTS: THE EXAMPLE OF A PROJECT TO CREATE A STRATOSPHERIC ROCKET-SPACE COMPLEX

D.K. SHCHEGLOV^{1,2,3}, D.A. FYODOROV^{1,2},
S.K. SAVELYEV^{3,1}, A.G. SAIBEL^{1,3},
S.E. EROSHIN²

¹ JSC OBUKHOV PLANT, SAINT PETERSBURG,
RUSSIAN FEDERATION

² ANO DPO NOC VKO «ALMAZ – ANTEY»
NAMED AFTER ACAD. V.P. YEFREMOV,
MOSCOW, RUSSIAN FEDERATION

³ FGOOU VO BSTU «VOENMEKH» NAMED
AFTER D.F. USTINOV SAINT PETERSBURG,
RUSSIAN FEDERATION

This paper presents the authors' experience in application of the engineering case method for development of the concept of an innovative space launch system for rocket carriers (RC) based on stratospheric aerostatic platform. This engineering case was conducted with six high school students during the July project session «Big Challenges» at the Sirius Educational Center in 2024. During the three weeks course, basics of technical feasibility and economic efficiency were developed for creating a stratospheric aerostatic platform for launching light and medium-class rockets. It was demonstrated that such a platform may serve as the first stage of a space launch system while not requiring the creation of spaceport infrastructure. The platform could be used to launch rockets from any latitude into the desired orbital inclination. The possibility of offering launch services to other countries is also considered. Based on the results of the project session, the authors concluded that the engineering case method is highly effective for developing innovative concepts in rocket and space industry. The study was carried out with the support of the Section on International Problems of Science and Education of the Russian Academy of Natural Sciences.

KEYWORDS: project-based learning, engineering case, implementation experience, educational process, rocket carriers, stratospheric launch, stratostats, space programs

ВЕДЕНИЕ

Концепция технологического развития России направлена на модернизацию образовательных программ среднего профессионального, высшего и дополнительного профессионального образования. При этом ее главной целью является приведение их содержания, структуры и результатов обучения в полное соответствие с компетенциями, необходимыми для освоения критически значимых и сквозных технологий, успешное развитие которых во многом зависит от активного формирования инновационных подходов, концепций и решений. Воплощение этих задач требует принципиально нового взгляда на подготовку инженерных кадров, особенно для предприятий высокотехнологичной промышленности, играющих ключевую роль в развитии экономического и научно-технического потенциала страны [2, 3].

Совершенствование образовательных процессов осуществляется на основе системного подхода, который базируется на практико-ориентированных образовательных программах [5]. Особое внимание уделяется обучению управлению проектами полного жизненного цикла – от идеи до коммерциализации, что позволяет готовить специалистов, способных не только разрабатывать инновационные решения, но и внедрять их в реальный сектор экономики.

Формирование кадрового резерва для крупных предприятий высокотехнологичной промышленности осуществляется в настоящее время по модели «школа – вуз – предприятие», направляя старшеклассников и студентов на профильные образовательные траектории, включающие целевое обучение и практику [1]. Одним из наиболее эффективных механизмов такого взаимодействия является проектное обучение в формате инженерных кейсов. Этот метод воспроизводит полный цикл работы над инженерным проектом, моделируя реальные производственные процессы. В отличие от традиционных учебных заданий, участники решают комплексные задачи, требующие глубокого анализа и обоснованных решений, что способствует развитию инженерного мышления и профессиональных компетенций.

С 2016 г. Концерн ВКО «Алмаз – Антей» совместно с БГТУ «ВОЕНМЕХ» ежегодно проводит инженерные кейсы на Всероссийском форуме «ПроеКТОриЯ» и в рамках программы «Большие вызовы» в образовательном центре «Сириус» [8]. Практика показала высокую эффективность этого формата. Наибольшую вовлеченность демонстрируют школьники, работающие с космической тематикой, что объясняется традиционно высоким интересом к освоению космоса и доступностью научно-популярных материалов [2, 4]. При этом длительные инженерные кейсы (от двух недель) позволяют участникам разрабатывать инновационные концепции, сопровождая их инженерными и экономическими исследованиями,

что способствует формированию системного понимания роли передовых технологий в развитии страны.

В качестве одного из примеров применения такого подхода рассмотрим результаты трехнедельной работы шести старшеклассников над инженерным кейсом по формированию облика инновационной системы воздушного старта РН, организованного авторами в рамках июльской проектной смены «Большие вызовы» в 2024 г.

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ПРОБЛЕМА

Современные космические программы предусматривают развертывание спутниковых группировок, орбитальных станций и исследование Луны и Марса, что требует частых запусков РН. Однако создание и эксплуатация сверхтяжелых РН и необходимой инфраструктуры сопряжены с высокими затратами, что делает актуальным поиск альтернативных решений для снижения стоимости запусков. Одним из таких подходов является старт с аэростатической стратосферной платформы (сверхкрупного дирижабля), позволяющий уменьшить массу РН за счет исключения первых ступеней.

В настоящее время ряд стартапов разрабатывает технологии воздушного запуска для ракет легкого и сверхлегкого класса, однако аналогичных проектов для РН среднего и тяжелого классов пока не существует. Инженерный кейс направлен на разработку концепции такой аэростатической платформы, включая техническое и экономическое обоснование ее реализуемости.

Гипотеза исследования заключалась в том, что многоуровневая стратосферная стартовая платформа может заменить первые ступени системы космического запуска, что позволяет уменьшить массу РН на 30–45%, и исключить необходимость в наземной инфраструктуре космодромов. Запуски с такой платформы возможны с любой широты на орбиту заданного наклона, что также открывает перспективы для коммерческих запусков на международном рынке.

Целью работы над инженерным кейсом являлась разработка концептуального облика инновационной аэростатической стартовой платформы с обоснованием ее работоспособности и экономической целесообразности. Итогом работы должна стать оригинальная, конкурентоспособная конструкция, способная существенно снизить затраты на космические запуски.

ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

С середины XX века научно-образовательное сообщество активно внедряет проектное обучение в подготовку инженерных кадров. В этом подходе обучающийся становится активным участником образовательного процесса, а преподаватель выполняет роль наставника и эксперта. Такой подход способствует

развитию у будущих инженеров актуальных профессиональных компетенций, а также интеграции междисциплинарных знаний.

Так, в работе Lavado-Anguera S. et al. [11] выполнен обзор 54 источников, охватывающий 24-летний период, и сделано заключение об эффективности проектного обучения как целостной педагогической модели, ориентированной на практическое применение теоретических знаний. Опыт внедрения данного подхода в учебный процесс образовательных учреждений рассмотрен в работах Lavado-Anguera S. et al. [12] и Steele A.L. [14].

Исследование, проведенное специалистами Берлинского технического университета, также демонстрирует значимость проектного обучения в инженерном образовании, в частности при разработке цифровых двойников [8]. Авторы отмечают, что современная инженерная среда требует все большего уровня междисциплинарности, инноваций и креативности. В исследовании Zhao L. et al. [15] рассматривается эффективность внедрения проектного обучения при изучении физики в школах Китая. Отмечается, что такой подход помогает учащимся открывать ценность основных научных концепций и их связь с технологией, инженерией и обществом, а также развивать ответственность.

Как отмечается в работе Sasson I. et al. [12], проектное обучение способствует формированию критического мышления и исследовательских навыков у старшеклассников и студентов.

Таким образом, проектное обучение является действенным инструментом для разработки инновационных решений, особенно в такой отрасли, как космические технологии. При этом появление новых конструктивных материалов и источников энергоснабжения инициировало активное обсуждение перспектив развития стратосферных пусковых платформ [10, 13].

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использовались методы мозгового штурма, экспертных оценок, математического моделирования, численного интегрирования, конечных элементов, а также системы проектирования (CAD) и инженерного анализа конструкций (CAE).

Проект охватывал полный цикл инженерно-технических задач, включая [6]:

- конструкторскую проработку и оценку технической реализуемости;
- расчет прочности конструкции и грузоподъемности;
- анализ технических решений, оборудования и материалов;
- разработку инфраструктуры обслуживания и старта;
- экономическое обоснование производства, эксплуатации и запусков.

Концепция платформы формировалась коллективным мозговым штурмом, затем работа велась по взаимосвязанным направлениям, требующим координации внутри команды. Помимо разработки конструкции особое внимание уделялось этапам производства, эксплуатации и экономической целесообразности, определяющим выбор оптимального решения [7]. В соответствии с задачами проекта участники кейса распределили роли: главный конструктор (разработка схемно-конструктивных решений, организация работ), инженер-конструктор (разработка 3D-моделей, компоновка), инженер-технолог (вопросы изготовления и эксплуатации), инженер-расчетчик (проведение инженерных расчетов) и экономист (оценка стоимости проекта).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обоснование актуальности исследования.

Стратосферная платформа обеспечивает запуски с любой точки Земли на орбиты любого наклона, а также выбор зон падения отработанных ступеней. Одновременно решается задача транспортировки РН от места сборки к точке старта. Это открывает возможность запусков для стран, способных создавать РН, но не имеющих космодромов – таких в мире около 40.

Несмотря на существование стартапов, таких как SpaceRyde (Канада), B2Space (Великобритания) и Zero 2 Infinity (Испания), они ориентированы только на РН легкого и сверхлегкого класса. Для РН среднего и тяжелого класса аналогов в настоящее время не существует.

Концепция стратосферного старта для ракет легкого класса. Анализ существующих проектных решений показал, что запуск легких РН с аэростата уже занял свою нишу. Типичными конструктивными особенностями таких систем является одноразовый аэростат, мягкая оболочка аэростата, подвес ракеты под углом, наполнение аэростата водородом или гелием.

В рамках инженерного кейса предложена концепция запуска легкой РН с аэростатической платформы (рис. 1). Используется недорогой одноразовый аэростат с полиэтиленовой оболочкой «нулевого давления» (диаметр ~50 м), заполненной водородом. Тросовый подвес РН массой до 12,5 т обеспечивает старт с высоты 20 км. Ориентировочная стоимость водорода для наполнения оболочки – 1,5 млн руб., материала и изготовления оболочки – 600 тыс. руб.

Оценка экономии массы при стратосферном старте для РН среднего класса. Старт с высоты более 20 км технически сложен и требует дорогостоящей аэростатической платформы. Поэтому важно оценить выигрыш в массе РН при старте с 20 км.

Для этого была составлена и численно проинтегрирована система уравнений, описывающая полет РН. Параметры РН, использованные в расчетах, представлены в таблице 1.

Расчеты траектории вывода полезной нагрузки на орбиту 200 км (без учета аэродинамического сопротивления и потерь тяги на поворот) показали, что двухступенчатая РН массой 207 т способна вывести 7 т при старте с высоты 20 км, а для вывода полезной нагрузки с уровня моря требуется трехступенчатая РН типа РН «Союз» массой 312 т.

Таким образом, стратосферный старт позволяет снизить стартовую массу РН на ~ 1/3, что подтверж-

дает целесообразность разработки аэростатической стартовой платформы.

Конструкция оболочки аэростата для старта РН среднего класса. Поскольку для надежного размещения РН на аэростатической платформе требуются жесткие несущие конструкции, а ожидаемые размеры всей конструкции составляют сотни метров, представляется проблематичным использовать мягкие баллоны, наполненные гелием. Кроме того, учитывая, что на высоте 20 км атмосферное давление составляет ~ 0,055 атм, потребный объем гелия, как и его цена окажутся слишком велики. Поэтому целесообразно использовать вакуумные баллоны, однако предварительные расчеты показали, что никакие материалы не обеспечат необходимой жесткости конструкции на схлопывание (потерю устойчивости) при сохранении необходимой подъемной силы.

Альтернативным решением стала двухслойная оболочка (рис. 2), в которой пространство между слоями заполнено гелием под давлением на 100 кПа выше, чем давление воздуха снаружи аэростата. Наддув позволяет обеспечить достаточную жесткость баллона исключительно за счет разницы нагрузок на внутренний и внешний слой оболочки.

Предполагается, что подъемная сила аэростата остается постоянной на высотах от 0 до 20 км, а воздух из оболочки откачивается насосами по мере набора высоты. Для конструктивной надежности используются два баллона, оболочка которых разделена на ячейки 2×2 м. Основной материал – улеткань, для проклейки соединений; может применяться стеклоткань. Материалы выбраны с учетом прочности и плот-

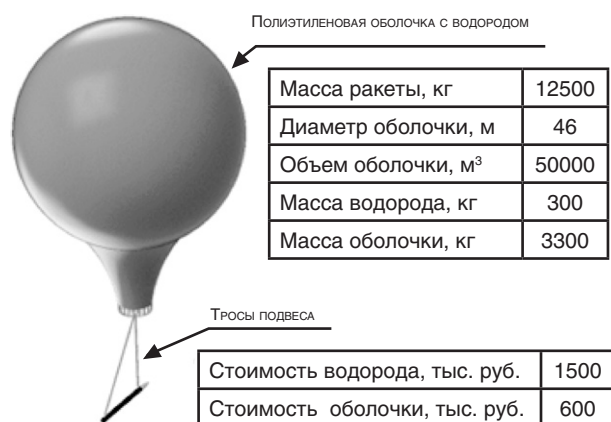


РИС. 1.

Концепция системы стратосферного запуска РН легкого класса

ТАБЛИЦА 1.

Параметры РН

Параметр			3-х ступенчатая («Союз»)	2-х ступенчатая
Первая ступень	Сухая масса	$M_{сух1}, \text{ Т}$	15	–
	Масса топлива	$M_{топ1}, \text{ Т}$	163	–
	Тяга	$F_{тяги1}, \text{ тс}$	342 – 416	–
	Время работы двигателя	$T_1, \text{ с}$	118	–
	Расход	$R_1, \text{ кг/с}$	1377	–
Вторая ступень	Сухая масса	$M_{сух2}, \text{ Т}$	7	13
	Масса топлива	$M_{топ2}, \text{ Т}$	93	159
	Тяга	$F_{тяги2}, \text{ тс}$	80 – 94	302
	Время работы двигателя	$T_2, \text{ с}$	320	181
	Расход	$R_2, \text{ кг/с}$	291	874
Третья ступень	Сухая масса	$M_{сух3}, \text{ Т}$	2	2
	Масса топлива	$M_{топ3}, \text{ Т}$	25	25
	Тяга	$F_{тяги3}, \text{ тс}$	30	30
	Время работы двигателя	$T_3, \text{ с}$	300	300
	Расход	$R_3, \text{ кг/с}$	84	84
Полезная нагрузка			$M_{пн}, \text{ Т}$	7
Общая стартовая масса			$M_{общ}, \text{ Т}$	207
Высота старта			$H_{старта}, \text{ км}$	20

ности (для углеволокна прочность на разрыв достигает 4 ГПа).

Размеры баллонов (L и D) определяются по объему, затем рассчитывается расстояние между оболочками (H) для уравнивания внешнего давления. Прочность и устойчивость конструкции проверялись с помощью МКЭ, которые показали, что вакуумную полость нужно разделить на секции по 50 м, иначе баллон потеряет устойчивость и его сечение изменится с круглого на овальное, что может привести к разрушению.

Модель масс. С целью определения габаритов аэростатической платформы для стратосферного старта РН среднего класса была разработана модель масс (рис. 3).

Масса РН принята равной 200 т. Затем задавались начальные размеры платформы (L, D и H), на основе которых рассчитываются объемы баллонов и сила Архимеда на различных высотах. После этого вычислялась масса углепластиковых оболочек, гелия и воздуха на всех высотах.

На основе габаритов РН и баллонов определялась масса ферменных конструкций, количество винтов, электродвигателей и насосов для движения аэростата по курсу. Из принятых параметров оборудования рассчитывается число аккумуляторов и солнечных панелей. Общая масса конструкции уравнивается архимедовой силой, поэтому описанный процесс повторялся до достижения баланса веса и архимедовой силы.

Облик аэростатической платформы для старта РН среднего класса. Концепция стратосферной платформы для запуска РН среднего класса предполагает использование двух баллонов по 7,5 млн м³ каждый, соединенных ферменной конструкцией. Между баллонами расположена ферменная конструкция с ра-

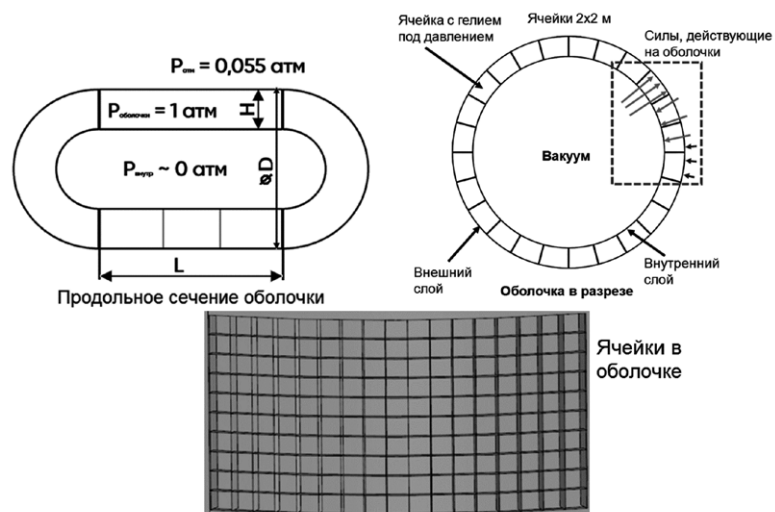


РИС. 2.

Оболочка аэростата для старта РН среднего класса

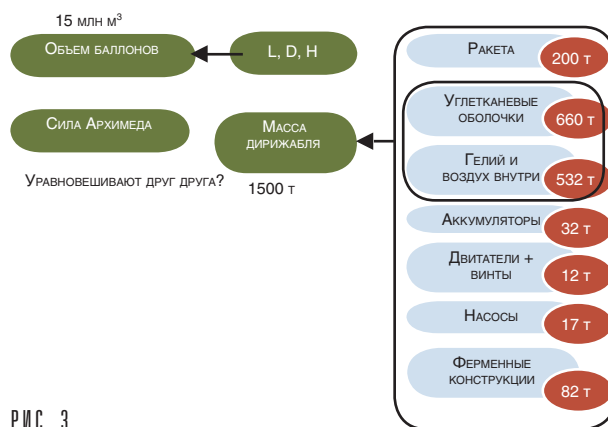


РИС. 3.

Модель масс аэростатической платформы для стратосферного старта РН среднего класса и полученные сбалансированные значения масс элементов конструкции стратосферной платформы

кетой, которая транспортируется вывешенной в горизонтальном положении, а перед запуском переводится лебедками в вертикальное (рис. 4). На платформе установлены три двигателя для движения по курсу, поворотный двигатель с блоком аккумуляторов в передней части, а также солнечные панели на поверхности баллонов. Длина платформы – 990 м, ширина – 220 м, диаметр каждого баллона – 100 м, расстояние между оболочками – 20 м.

Ферменные конструкции. Два баллона аэростатической платформы соединяются между собой ферменной конструкцией (рис. 5), в центре которой вывешивается РН. Для данных конструкций были проведены статические и динамические расчеты прочности, а сечения балок, их расположение и материалы (алюминий, титан, сталь) подбирались с учетом минимизации массы при сохранении запасов прочности и устойчивости от веса РН и аэродинамических сил не ниже ~ 1,5.

После оптимизации конструкции ее масса составила 82 т, при длине самой крупногабаритной части 115 м. Изгиб конструкции при вывешенной массе 200 т не превышает 2 м, а запас устойчивости при максимальной боковой ветровой нагрузке составляет 1,4. Также проверялась прочность конструкции при старте РН.

Служебные системы. Служебные системы аэростата подбирались из существующего и доступного на рынке оборудования и включают в себя:

- 14 вакуумных насосов для регулирования давления (управление высотой) с производительностью 180 000 м³/ч;
- 4 вертолетных винта от МИ-6 с тягой 40 т на уровне моря;

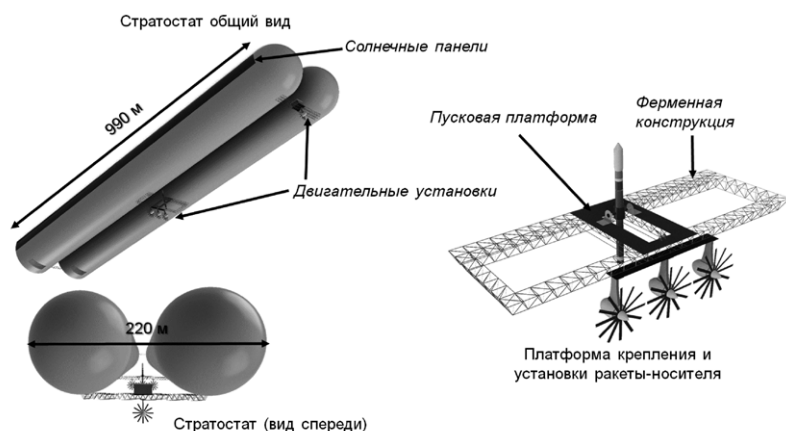


РИС. 4.

Облик аэростатической платформы для старта РН среднего класса

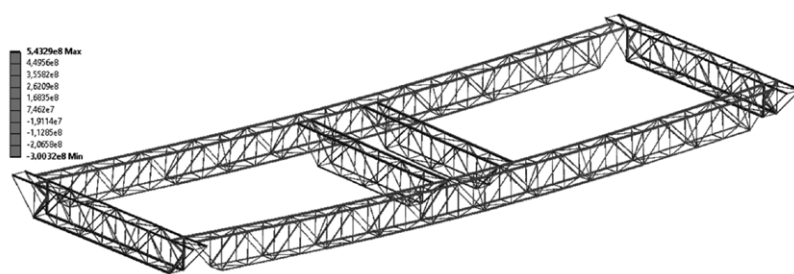


РИС. 5.

Напряжения в ферменной конструкции от веса РН, Па

- 10 электродвигателей мощностью 2 МВт для работы насосов и винтов;
- сверхтонкие солнечные панели (1 кВт/кг), покрывающие верхнюю половину баллонов, для выработки электроэнергии;
- аккумуляторные батареи с емкостью 600 Вт ч/кг для работы ночью.

Все такие системы уже существуют и успешно эксплуатируются.

Согласно расчетам, скорость подъема/спуска составит 1 км/ч, а дневная крейсерская скорость против ветра – 20–30 км/ч. Ночью средняя скорость против ветра будет близка к 0 км/ч, при этом запас электроэнергии в аккумуляторах позволит лишь поддерживать платформу в статичном положении, чтобы избежать ее сноса ветром. Для этого курс будет выстраиваться с учетом минимизации встречного ветра ночью.

Эксплуатация. Эксплуатация стратосферной платформы включает несколько этапов: прибытие платформы на завод-изготовитель РН, погрузка ракеты горизонтально с помощью лебедок, фиксация транспортировочно-пускового кольца на ферменных конструкциях, подъем платформы на заданную высоту, движение к месту запуска, перевод ракеты в вер-

тикальное положение, запуск и возвращение платформы для получения следующей ракеты или перемещения на техобслуживание. Все эти этапы выполняются автономно без участия человека, и ракеты не используют компоненты, требующие низких температур, такие как жидкий кислород.

Особое внимание уделяется безопасности, в частности взаимодействию со струей ракетных двигателей. На рисунке 6 в реальном масштабе показано сравнение стартовой площадки РК «Союз» и стратосферной платформы. Из рисунка видно, что расстояние между баллонами платформы составляет 20 м. Этого достаточно для предотвращения повреждения оболочек. Расчеты показывают, что стартовая тяга обеспечит вертикальное ускорение РН 5 м/с^2 , а для платформы – $1,9 \text{ м/с}^2$, что позволит ракете быстро удалиться от баллонов. На высоте 20 км ширина реактивной струи больше, чем при старте с земли, поэтому баллоны нужно покрыть дополнительным теплозащитным покрытием с учетом запаса массы (~30 т).

Производство стратосферной платформы. В рамках инженерного кейса было проведено исследование возможности производства стратосферной платформы в России. Крупногабаритные конструкции могут быть изготовлены на таких предприятиях, как ПАО «Ижорские заводы» и АО «ТЯЖМАШ», а сборку всей платформы может осуществить строительный холдинг «Титан-2» и другие предприятия.

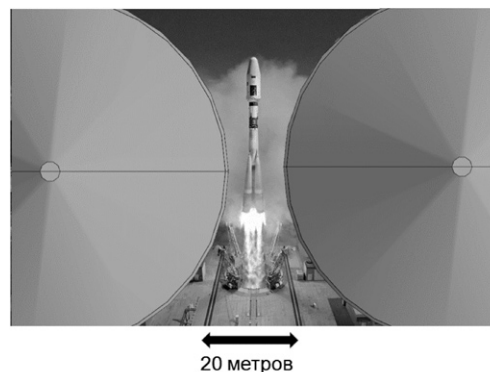


РИС. 6.

Сравнение размеров стратосферной платформы и стартовой площадки РН «Союз»

Для производства баллонов аэростата была предложена следующая технология. Баллоны состоят из секций по 50 м, для которых создаются вертикальные оправки высотой 50 м – одна для внутреннего и одна для внешнего слоя оболочки. Внутренний слой из углеткани проклеивается по внутренней оправке, затем устанавливается внешняя оправка, на которой также проклеивается внешний слой. Между слоями оболочки проклеиваются углетканевые полосы, разделяющие ее на ячейки 2×2 м. Секции закрываются углетканевой переборкой, после чего ячейки надуваются воздухом для сохранения формы. Затем секция извлекается из оправок и переносится на стапель длиной 1 км, где собирается в единый баллон.

Стоимость проекта. Оценочная стоимость производства стратосферной платформы с учетом стоимости материалов, производства и оборудования составила ~ 164 млрд руб. (в ценах 2024 г.) или 1,64 млрд долларов США. Подробная калькуляция ценообразования представлена в таблице 2.

Для сравнения в таблице 3 приведены заявленные стоимости создания различных крупногабаритных объектов и конструкций. Так, стоимость космодрома «Восточный» по оценкам 2015 г. уже составляла порядка 500 млрд руб., а стоимость программы «Морской старт» составила ~ 400 млрд руб. (в пересчете по курсу доллара США на 2024 г.). Стоимость американского авианосца «Джеральд Р. Форд» составляет более 20 млрд долларов США.

Из анализа таблиц 2 и 3 можно сделать заключение о том, что проект по созданию стратосферной платформы для старта РН среднего класса является конкурентоспособным с экономической точки зрения.

КОМПЕТЕНЦИИ, ПРИОБРЕТЕННЫЕ ПРОЕКТНОЙ КОМАНДОЙ

Участие в реализации инженерного кейса, направленного на формирование облика инновационной системы воздушного старта РН с аэростатической стратосферной платформы в рамках проектной смены 2024 г. в Образовательном центре «Сириус», обеспечило старшеклассникам уникальную возможность погружения в широкий спектр инженерных и научно-технических дисциплин. За три недели интенсивной работы участники освоили базовые положения и методы из следующих областей знаний:

- математического анализа (дифференциальное и интегральное исчисление);
- решения и численного интегрирования систем дифференциальных уравнений;
- математического программирования и алгоритмизации инженерных задач;
- теоретической механики и прикладной динамики;
- сопротивления материалов и строительной механики;
- основ газовой динамики и моделирования аэроди-

намических процессов;

- работы в САД- и САЕ-средах (включая проектирование и инженерный анализ конструкций);
- использования систем компьютерной алгебры для аналитических расчетов и визуализации;
- основ проектирования ракетно-космических систем;
- теории полета ракеты, баллистики и небесной механики;
- принципов работы ракетных двигателей и химии ракетных топлив;
- технологии машиностроительного производства;
- материаловедения и подбора конструкционных материалов;
- инженерной экономики и технико-экономического обоснования проектов;
- инженерного и промышленного дизайна, ориентированного на функциональность и производственные ограничения.

Отдельное внимание в проекте уделялось практической компоненте: школьники самостоятельно разрабатывали и изготавливали масштабные модели, а также проводили их испытания. На рисунке 7 представлена подготовка команды к запуску экспериментального макета ракеты с аэростатической платформы, что стало кульминацией практического этапа проекта.

Кроме получения предметных знаний, участники кейса развили целый ряд надпредметных и метапредметных компетенций, включая:

- системное и критическое мышление;
- навыки командной работы и управления проектами;
- исследовательские умения (поиск, обработка и интерпретация научной информации);
- коммуникативные навыки (в том числе защита технических решений);
- устойчивую учебную мотивацию и способность к самообучению.

Высокая эффективность применения метода инженерных кейсов подтверждается не только успешным завершением данного проекта, но и тем, что многие участники продолжили развивать полученные компетенции в рамках других инженерно-технических инициатив, олимпиад и научных конкурсов. Полученный опыт позволил им осознанно связать собственные технические интересы с профильными дисциплинами, что стало важным шагом в профессиональном самоопределении.

ВЫВОДЫ

Практическое применение метода проектного обучения на основе инженерных кейсов подтвердило высокую эффективность его использования в процессе подготовки специалистов для решения сложных междисциплинарных проектных задач, включая разработ-

ТАБЛИЦА 2.

Оценочная стоимость производства стратосферной платформы

Материалы	Цена за кг или м², руб.	Количество материала в м² или в кг	Итог, млн руб.
Углеткань	3750	1500000	5625
Алюминий	1590	44000	70
Титан	1650	35000	58
Гелий	10600	120000	1272
Итого за материалы			7025
Производство	Коэффициент от стоимости материалов		Итог, млн руб.
Проект	2		14 050
Изготовление	10		70 250
Оборудование для цеха (оправки, стапели и т.п.)	10		70 250
Итого за производство			154 550
Оборудование	Цена за штуку,млн руб.	Кол-во	Итог, млн руб.
Насосы	1	16	19
Двигатели	105	3	315
Винты	1	3	3
Солнечные панели	0,013	140 000	910
Аккумуляторы	0,042	20 000	840
Итого за оборудование			2087
ИТОГО, млн руб.			163 682

ТАБЛИЦА 3.

Стоимости создания различных крупногабаритных объектов и конструкций

Объект	Масса, т	Цена, млрд руб.	Цена, млн \$
Восточный (цены на 2015 год)	—	160–500	6000–10000
Морской старт	—	308–397	3500–4500
Новый стартовый комплекс в Куру	—	61	691
Нефтеплатформа	506 000	27–88	300–1000
Авианосец «Джеральд Р. Форд»	112 000	2116	21000



РИС. 7.

Команда инженерного кейса на испытании макета стратосферной платформы

ку и коммерциализацию инновационных решений. В частности, предлагаемый авторами ролевой подход к проведению инженерного кейса позволил команде старшеклассников за три недели реализовать проект по формированию концепции стратосферного запуска РН легкого и среднего классов с высоты до 20 км.

Стратосферный старт РН легкого класса предложено осуществлять при помощи одноразового аэростата с полиэтиленовой оболочкой «нулевого давления», заполненной водородом, и тросового подвеса РН под углом.

Стратосферный старт РН среднего класса предложено осуществлять при помощи многоразовой аэростатической платформы, состоящей из жесткой ферменной конструкции и вакуумных баллонов с

двухслойной оболочкой, в которой пространство между слоями заполнено гелием. В результате решения инженерного кейса было обосновано, что использование такой аэростатической платформы позволяет повысить экономическую эффективность запуска за счет подтверждения гипотезы о снижении массы РН на 30–45% и исключения необходимости создания наземной инфраструктуры. Проведенная экономическая оценка проекта показала, что затраты на создание многоразовой аэростатической платформы (~1,64 млрд долларов США) сопоставима с затратами на традиционных космодромах или системы типа «Морской старт», но при этом предлагаемое техническое решение обеспечивает большую гибкость и перспективы международной коммерциализации.

Таким образом, применение инженерных кейсов в образовательном процессе не только способствует углубленному освоению технических дисциплин, но и позволяет обучающимся разрабатывать проекты, имеющие реальный потенциал внедрения в индустрии.

ЛИТЕРАТУРА

1. ДРОБОТЕНКО Ю.Б. Образовательная модель «Школа – вуз – предприятие» – залог качества образования // Вестник Омского государственного педагогического университета. Гуманитарные исследования. 2015. №3 (7). С. 97–99. EDN UGWC SL.
2. ЕРОШИН С.Е., ШЕГЛОВ Д.К., ФЕДОРОВ Д.А., АКСЕНОВА Д.В., ЮРЧИКОВА Я.В. Инженерные кейсы по космонавтике как эффективный инструмент профориентационной работы среди школьников старших классов // Инновации. 2021. № 10 (276). С. 14–19. DOI 10.26310/2071-3010.2021.276.10.003. EDN BZKCYI.
3. Подвязников М.А., Баушев С.В. Замысел и реализация возрождения научных школ на предприятиях ОПК // Научный вестник оборонно-промышленного комплекса России. 2021. №4. С. 86–95. DOI 10.52135/2410-4124-2021-4-86. EDN WHANPE.
4. Сайбель А.Г., Баушев С.В., Маторина Д.Ю. Инженерный проект как инструмент повышения увлеченности молодежи космонавтикой // Титовские чтения. 2023. С. 54–62. EDN MDDXFF.
5. ШЕГЛОВ Д.К., ЕРОШИН С.Е. Особенности стратегического развития научно-образовательной деятельности на предприятиях высокотехнологичной промышленности // Инновации. 2021. № 9(275). С. 9–13. DOI 10.26310/2071-3010.2021.275.9.002. EDN BSOMLA.
6. ШЕГЛОВ Д.К., ЕРОШИН С.Е., ТИМОФЕЕВ В.И., БУКАРЕВ А.М. Проектная форма обучения как эффективный механизм подготовки инженерных кадров // Инновации. 2024. № 1 (297). С. 37–45. EDN LQSODA.
7. ШЕГЛОВ Д.К., ФЕДОРОВ Д.А., КОНОВАЛЬ-ЧИК А.П. Решение прикладных организационно-технических задач методом инженерных кейсов: учебное пособие / СПб.: БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2019. 63 с. ISBN 978-5-907054-83-7.
8. ШЕГЛОВ Д.К., ФЕДОРОВ Д.А., САЙБЕЛЬ А.Г., ЕРОШИН С.Е., САВЕЛЬЕВ С.К. Анализ опыта внедрения проектной формы обучения на основе метода инженерных кейсов при подготовке инженерных кадров для предприятий оборонно-промышленного комплекса Москвы и Санкт-Петербурга // Вестник РАЕН. 2025. №2. С. 198–209. DOI 10.52531/1682-1696-2025-25-2-198-209. EDN: XXMQTK.
9. HAGEDORN L., RIEDELSHEIMER T., STARK R. Project-based learning in engineering education – developing digital twins in a case study. Proceedings of the Design Society. 2023. Vol. 3. P. 2975–2984. DOI 10.1017/pds.2023.298.
10. KNAP L., GRACZYKOWSKI C., HOLNICKI-SZULC J., WOŁEJSZA Z. Strategies for reduction of energy consumption during ascending and descending process of modern telescopic HAPS aerostats. Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences. 2020. N 68(1). P. 155–168. DOI 10.24425/bpasts.2020.131833.
11. LAVADO-ANGUERA S., VELASCO-QUINTANA P.-J., TERRÓN-LÓPEZ M.-J. Project-Based Learning (PBL) as an Experiential Pedagogical Methodology in Engineering Education: A Review of the Literature. Education Sciences. 2024. N 14 (6). Article number: 617. DOI 10.3390/educsci14060617.
12. SASSON I., YEHUDA I., MALKINSON N. Fostering the skills of critical thinking and question-posing in a project-based learning environment, Thinking Skills and Creativity. 2018. Vol. 29. P. 203–212. DOI 10.1016/j.tsc.2018.08.001.
13. SHOYAMA T. Spin Air-launch of Small Rocket from Balloon. April 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/339127810_Spin_Air-launch_of_Small_Rocket_from_Balloon (дата обращения: 01.03.2025).
14. STEELE A.L. Experiential Learning in Engineering Education (1st ed.). CRC Press. 2023. DOI 10.1201/9781003007159.
15. ZHAO L., ZHAO B., CHUNMI L. Alignment analysis of teaching – learning-assessment within the classroom: how teachers implement project-based learning under the curriculum standards Disciplinary and Interdisciplinary Science Education Research. 2023. Vol. 5, Article number: 13. DOI 10.1186/s43031-023-00078-1.

REFERENCES

1. DROBOTENKO YU.B. Educational model «School – University – Enterprise» – a guarantee of quality education. *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Gumanitarnye*

- issledovaniya*. 2015;3(7):97–99. EDN UGWCSL. (In Russian).
2. EROSHIN S.E., SHCHEGLOV D.K., FEDOROV D.A., AKSENOVA D.V., YURCHIKOVA Ya.V. Engineering cases in astronautics as an effective tool for career guidance among high school students. *Innovacii*. 2021;10(276):14–19. DOI 10.26310/2071-3010.2021.276.10.003. EDN BZKCYI. (In Russian).
 3. PODVYAZNIKOV M.L., BAUSHEV S.V. Realization and concept of restoring scientific schools at the enterprises of the defense-industrial complex. *Nauchnyy vestnik oboronno-promyshlennogo kompleksa Rossii*. 2021;4:86–95. DOI 10.52135/2410-4124_2021_4_86. EDN WHAHPE. (In Russian).
 4. SAIBEL A.G., BAUSHEV S.V., MATORINA D.YU. Engineering project as a tool for increasing youth engagement in astronautics. *Titovskie chteniya*. 2023;54–62. EDN MDDXFF. (In Russian).
 5. SHCHEGLOV D.K., EROSHIN S.E. Specifics of Strategic Development of Scientific and Educational Activities at High-Tech Industry Enterprises. *Innovacii*. 2021;9(275):9–13. DOI 10.26310/2071-3010.2021.275.9.002. EDN BSOMLA. (In Russian).
 6. SHCHEGLOV D.K., EROSHIN S.E., TIMOFEEV V.I., BUKAREV A.M. Project form of training as an effective mechanism of engineering personnel training. *Innovacii*. 2024;1(297):37–45. EDN LQSODA. (In Russian).
 7. SHCHEGLOV D.K., FEDOROV D.A., KONOVALCHIK A.P. Solving applied organizational and technical problems using the engineering case method. Saint Petersburg: BGТУ «ВОЕНМЕХ». 2019:63. ISBN 978-5-907054-83-7. (In Russian).
 8. SHCHEGLOV D.K., FEDOROV D.A., SAIBEL A.G., EROSHIN S.E., SAVELEV S.K. Analysis of the experience of implementing a project-based form of training based on the engineering case method in the training of engineering personnel for enterprises of the military-industrial complex of Moscow and St. Petersburg. *Vestnik RAEN*. 2025;2:198–209. DOI 10.52531/1682-1696-2025-25-2-198-209. EDN: XXMQTK. (In Russian).
 9. HAGEDORN L., RIEDELSHEIMER T., STARK R. Project-based learning in engineering education – developing digital twins in a case study. *Proceedings of the Design Society*. 2023; 3:2975–2984. DOI 10.1017/pds.2023.298.
 10. KNAP L., GRACZYKOWSKI C., HOLNICKI-SZULC J., WOLEJSZA Z. Strategies for reduction of energy consumption during ascending and descending process of modern telescopic HAPS aerostats. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*. 2020;68(1):155–168. DOI 10.24425/bpasts.2020.131833.
 11. LAVADO-ANGUERA S., VELASCO-QUINTANA P-J, TERRÓN-LÓPEZ M-J. Project-Based Learning (PBL) as an Experiential Pedagogical Methodology in Engineering Education: A Review of the Literature. *Education Sciences*. 2024;14 (6). Article number: 617. DOI 10.3390/educsci14060617.
 12. SASSON I., YEHUDA I., MALKINSON N. Fostering the skills of critical thinking and question-posing in a project-based learning environment, *Thinking Skills and Creativity*. 2018; 29:203–212. DOI 10.1016/j.tsc.2018.08.001.
 13. SHOYAMA T. Spin Air-launch of Small Rocket from Balloon. April 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/339127810_Spin_Air-launch_of_Small_Rocket_from_Balloon (access date: 01.03.2025)
 14. STEELE A.L. *Experiential Learning in Engineering Education* (1st ed.). CRC Press. 2023. DOI 10.1201/9781003007159.
 15. ZHAO L., ZHAO B., CHUNMI L. Alignment analysis of teaching – learning-assessment within the classroom: how teachers implement project-based learning under the curriculum standards *Disciplinary and Interdisciplinary Science Education Research*. 2023;5. Article number: 13. DOI 10.1186/s43031-023-00078-1.

Щеглов Дмитрий Константинович,
к.т.н., доцент ФГОУ ВО БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,
доцент АНО ДПО «НОЦ ВКО «Алмаз – Антей» им. акад. В.П. Ефремова,
научный руководитель АО «НПО «Обуховский завод»

Федоров Дмитрий Александрович,
к.т.н., начальник лаборатории АО «Обуховский завод»,
доцент АНО ДПО «НОЦ ВКО «Алмаз – Антей» им. акад. В.П. Ефремова

Сайбель Алексей Геннадиевич,
д.т.н., доцент, профессор НОЦ АО «Обуховский завод»,
профессор ФГОУ ВО БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

© 192012, г. Санкт-Петербург, пр-кт Обуховской Обороны,
д. 120,
192012, St. Petersburg, Obukhovskaya Defense Ave.,
building 120
тел.: +7 (921) 448-59-58, e-mail: _dk@bk.ru

Савельев Сергей Константинович,
к.т.н., доцент ФГОУ ВО БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,
старший научный сотрудник АО «НПО «Обуховский завод»

© 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская,
д. 1,
190005, St. Petersburg, 1st Krasnoarmeyskaya St.,
Bldg. 1,
тел.: +7 (812) 490-05-91, e-mail: bgtu@voenmeh.ru

Ерошин Сергей Евгеньевич,
д.э.н., к.т.н., зам. директора АНО ДПО «НОЦ ВКО «Алмаз – Антей» им. акад. В.П. Ефремова

© 121357, Москва, Верейская ул., 41, с. 2,
121357, Moscow, Vereiskaya st., 41, building 2,
тел.: +7 (495) 231-70-40, e-mail: info@nocvko.ru

УДК 004.896

DOI: 10.52531/1682-1696-2025-25-3-121-127

Научная статья

EDN: TXIRFO

РАСПОЗНАВАНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ ПО РАДИОТЕХНИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ СИГНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Е.В. Вагапов,
А.Н. Никулина, Е.В. Рябикина
АО «ЦНИРТИ им. академика
А.И. Берга», Москва, Российская Федерация

Original article

RECOGNITION OF RADAR STATIONS BY RADIO TECHNICAL SIGNAL PARAMETERS USING MACHINE-LEARNING METHODS

В ходе решения задачи радиоэлектронного наблюдения остро встает вопрос классификации обнаруженных радиосигналов. Классические методы классификации, основанные на сравнении полученных данных об обнаруженных станциях с эталонными априорно-известными параметрами станций, не позволяют получить результат с высокой степенью достоверности, поэтому для решения данного вопроса мы обратились к технологиям машинного обучения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: машинное обучение, распознавание радиолокационных станций, классификация сигналов по радиотехническим параметрам, поиск выбросов

E.V. VAGAPOV,
A.N. NIKULINA, E.V. RYABIKINA
JSC «CENTRAL RADIO-RESEARCH INSTITUTE
NAMED AFTER ACADEMICIAN A.I. BERG»,
MOSCOW, RUSSIAN FEDERATION

In the course of solving the problem of electronic surveillance, the issue of classification of detected radio signals arises. Classical classification methods based on comparison of the obtained data on detected stations with reference a priori known parameters of stations do not allow obtaining a result with a high degree of reliability, therefore, to solve this issue, we turned to machine learning methods, which are currently used everywhere. In this paper, such machine learning methods as random forest, multilayer perceptron, gradient boosting, convolutional NN, local emission level method were considered. In addition, sequential binary classification method for determining emissions was developed in the test sample.

KEY WORDS: machine learning, recognition of radar stations, classification of signals by radio parameters, search for outliers

ВВЕДЕНИЕ

В ходе решения задачи радиоэлектронного наблюдения встает вопрос классификации обнаруженных радиосигналов. Классические методы классификации, основанные на сравнении полученных данных об обнаруженных станциях с эталонными априорно-известными параметрами станций, не позволяют получить результат с высокой степенью достоверности, поэтому для решения данного вопроса мы обратились к методам машинного обучения, которые на сегодняшний день используются повсеместно.

Данные методы имеют серьезное практическое преимущество в сравнении с классическими методами классификации сигналов. На выполнение данной задачи ручным способом без автоматизации с участием нескольких операторов может потребоваться много времени и ресурсов. В то же время рассмотренным методом машинного обучения может понадобиться чуть больше десяти минут, чтобы классифицировать свыше миллиона сигналов. Это делает методы машинного обучения мощным инструментом в руках оператора.

Нами были рассмотрены различные методы машинного обучения и модели нейронных сетей (НС), применяемые в задачах многомерной классификации.

В ходе решения задачи распознавания типа и назначения радиолокационных станций (РЛС) по радиотехническим параметрам сигналов (РТПС) были выполнены следующие этапы:

- 1) подготовка исходных данных (создание математической модели генерации исходных данных с добавлением шума);
- 2) выбор метода стандартизации исходных данных;
- 3) выбор метода классификации, позволяющий определить тип РЛС;
- 4) разработка метода, позволяющего определить выбросы (сигналы от тех типов РЛС, которых не было в обучающей выборке);

5) разработка метода, позволяющего определить значение РАС у сигналов, отмеченных как выбросы.

В данной работе были рассмотрены такие методы машинного обучения, как: случайный лес, многослойный перцептрон, градиентный бустинг, сверточная НС, метод локального уровня выбросов. Кроме того, нами был разработан метод последовательной бинарной классификации для определения выбросов в тестовой выборке.

КЛАССИФИКАЦИЯ СИГНАЛОВ

На основе методов машинного обучения и моделей НС, применяемых в задачах многомерной классификации, был создан классификатор, позволяющий определить принадлежность сигнала к типу РАС с определенной вероятностью. Для его обучения использовался специальный набор размеченных данных – обучающая выборка. Обучающая выборка – совокупность пар «объект классификации, метка класса», где между объектом классификации и меткой класса есть зависимость, которая может быть выявлена в ходе обучения НС.

Чтобы сформировать обучающую выборку, необходимо провести отбор признаков, которые будут в полной мере характеризовать каждый объект в выборке. Также признаки должны быть информативными. Избыточное количество признаков может помешать переобучению, что в свою очередь приведет к менее эффективной работе классификатора. Переобучение – это явление, при котором обучаемая модель хорошо распознает примеры из обучающей выборки, но не распознает или плохо распознает любые другие примеры, которых не было в обучающей выборке. Это происходит из-за того, что параметры модели чрезмерно подгоняются к зависимостям обучающей выборки. Плохо сформированная обучающая выборка может привести к нечеткому разделению классов, из-за чего эффективность классификатора также уменьшится.

Для того, чтобы разработать алгоритм классификации сигналов, необходимо определить, по каким параметрам будет происходить классификация и формат входных данных. Определим, что каждому типу РАС соответствует отдельный класс и диапазоны значений по трем признакам: частоте, периоду и длительности импульса сигнала. Тогда входными данными будет являться массив векторов, содержащих 3 значения по каждой характеристике сигнала (частота, период, длительность импульса сигнала).

Некоторые методы машинного обучения чувствительны к нормализации данных. Она позволяет масштабировать данные и приводить признаки к единому виду, чтобы обучение было более эффективным. Были рассмотрены следующие виды нормализации данных:

1) стандартная нормализация

Для каждого признака x (предполагается, что x

Е.В. ВАГАПОВ,
А.Н. НИКУЛИНА, Е.В. РЯБИКИНА
РАСПОЗНАВАНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ
ПО РАДИОТЕХНИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ СИГНАЛОВ
С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

имеет нормальное распределение) каждое его значение на i -ом объекте преобразуется по формуле:

$$x_i^{new} = \frac{x_i - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

где $\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$ – среднее значение признака x ;

$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}$ – стандартное отклонение признака x ;

N – длина выборки.

После такого преобразования каждый признак имеет среднее значение равное нулю и дисперсию равную единице, то есть осуществляется переход от нормально распределенной величины к величине со стандартным нормальным распределением;

2) линейная нормализация

$$x_i^{new} = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}, \quad (2)$$

где x_{min} , x_{max} – минимальное и максимальное значение признака x соответственно.

После такого преобразования минимальное значение каждого признака будет отображено в ноль, а максимальное в единицу;

3) робастная нормализация

Для нормализации значения каждого признака используется межквартильный диапазон

$$x_i^{new} = \frac{x_i - Q_1(x)}{Q_3(x) - Q_1(x)}, \quad (3)$$

где $Q_1(x)$ и $Q_3(x)$ – первая и третья квартили признака x соответственно.

Перед созданием классификатора используется математическая модель для генерации исходных данных, на основе которых были созданы обучающая и тестовая выборки.

К значениям параметров сигналов в исходных данных добавлены случайные нормально распределенные ошибки, с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением, равным единичному значению ошибки по параметру, умноженному на коэффициент шума (КШ).

Для оценки результатов применения различных методов нормализаций к исходным данным при классификации сигналов воспользуемся метрикой F_1 -мерой, где базовым классификатором является многослойный перцептрон. Метрика рассчитывается следующей формулой:

$$F_1 = \frac{2}{\sum_{i=1}^k w_i} \times \frac{\sum_{i=1}^k (\text{precision}_i \times w_i) \times \sum_{i=1}^k (\text{recall}_i \times w_i)}{\sum_{i=1}^k (\text{precision}_i \times w_i) \times \sum_{i=1}^k (\text{recall}_i \times w_i)} \quad (4)$$

где k – количество классов; i – номер класса; precision – точность; recall – полнота; w_i – весовой ко-

эффект i -го класса, рассчитывается как доля объектов i -го класса в обучающей выборке.

Точность (precision) – это доля данных, действительно принадлежащих классу, относительно всех данных, которые метод отнес к этому классу. Полнота (recall) – это доля найденных классификатором данных, принадлежащих классу, относительно всех данных этого класса в тестовой выборке. Точность и полнота определяются следующим образом:

$$\text{precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (5)$$

$$\text{recall} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (6)$$

где TP – истинно-положительное решение; FP – ложно-положительное решение; FN – ложно-отрицательное решение.

В таблице 1 представлены результаты применения различных методов нормализаций к исходным данным при классификации сигналов посредством метода многослойного персептрона.

По результатам исследования для нормализации данных лучше всего подходит робастная нормализация.

Для классификации сигналов по типам РЛС были рассмотрены следующие методы машинного обучения:

- случайный лес [5];
- многослойный персептрон [3];
- градиентный бустинг [7].

Стоит отметить, что в отличие от многослойного персептрона, случайный лес и градиентный бустинг не чувствительны к нормализации.

Для оценки работы методов воспользуемся метрикой F_1 -мерой, так как она в полной мере представляет собой совместную оценку точности и полноты.

Для проверки качества работы классификатора создается тестовая выборка, которая состоит из объектов классификации и не используется непосредственно в процессе обучения классификатора.

ТАБЛИЦА 1.

Значение F_1 -меры при классификации сигналов РЛС с помощью многослойного персептрона для разных видов нормализации данных с различным уровнем КШ

КШ	Значение F_1 -меры для разных видов нормализации данных		
	линейная	стандартная	робастная
0	0,72	0,75	0,87
1	0,69	0,77	0,83
2	0,7	0,78	0,83
5	0,7	0,77	0,81
10	0,69	0,76	0,77

Подготовив обучающую и тестовую выборки с n -ым количеством наборов формуляров сигналов (ФС) с тремя признаками (частота, период, длительность импульса сигнала), проведем тестирование методов классификации.

На рисунке 1 представлена оценка результатов тестирования методов классификаций на обучающей выборке.

Можно сделать вывод, что классификатор на основе многослойного персептрона недообучен при объеме обучающей выборки $n=100$ и требует большего объема исходных данных для обучения по сравнению с методами случайного леса и бустинга.

На рисунке 2 представлена оценка результатов тестирования методов классификаций на тестовой выборке.

По результатам, приведенным на рисунке 2, видно, что у всех методов машинного обучения при $n>500$ вероятность верного определения типа РЛС больше 95%. При этом лучше всего работают методы случайного леса и бустинга, вне зависимости от объема обучающей выборки.

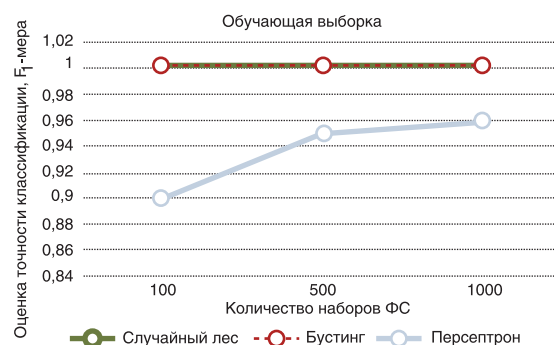


Рис. 1.

Оценка результатов тестирования методов классификаций на обучающей выборке

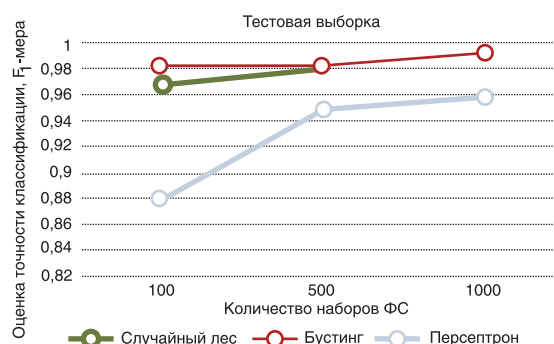


Рис. 2.

Оценка результатов тестирования методов классификаций на тестовой выборке

Проведем эксперимент, где объем обучающей выборки равен $n=500$, и добавим шум к исходным данным. Сначала проведем эксперимент с малым количеством шума, затем с большим.

На рисунке 3 представлены оценки результатов тестирования методов классификаций на тестовой выборке с малыми шумами.

На рисунке 4 представлены оценки результатов тестирования методов классификаций на тестовой выборке с большими шумами.

Согласно представленным оценкам, наилучшие результаты классификации при малых шумах достигаются с помощью случайного леса и многослойного персептрона.

Несмотря на то, что многослойный персептрон превосходит метод случайного леса при $KШ > 0,05$, он имеет серьезные недостатки. Многослойный персептрон может легко переобучиться, качество обучения зависит от объема обучающей выборки (рис. 2), чувствителен к масштабированию и аномалиям исходных данных. Случайный лес, наоборот, имеет устойчивость к переобучению, высокую точность, не чувствителен к аномалиям исходных данных и масштабированию исходных данных, имеет высокую скорость обучения в сравнении с многослойным персептроном. Поэтому, несмотря на не столь сильное снижение качества определения типа РЛС при повышении шума параметров сигналов, метод случайного леса остается наилучшим методом для решения данной задачи.

ПОИСК ВЫБРОСОВ

В тестовую выборку могут попасть выбросы – сигналы тех типов РЛС, которых не было в обучающей выборке. В таком случае классификатор все равно отнесет ФС к тому или иному типу РЛС из обучающей выборки с определенной вероятностью. Для таких ситуаций необходимо разработать метод, который позволит определять выбросы.

Для поиска выбросов был разработан метод последовательной бинарной классификации, основанный на принципе «один против всех», и рассмотрен метод

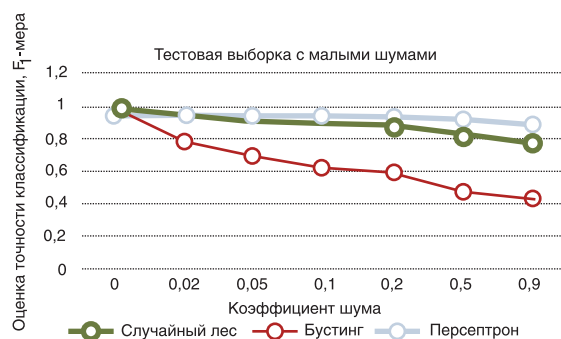


РИС. 3.

Оценка результатов тестирования методов классификаций на тестовой выборке с малыми шумами

локального уровня выбросов [6] с робастной нормализацией.

В методе последовательной бинарной классификации для каждого типа РЛС формируется свой классификатор, который предсказывает, принадлежит ли ФС данному типу или нет. Если классификатор возвращает 1, значит данный ФС принадлежит данному классу и не является выбросом, -1 – не принадлежит данному классу и является выбросом. Получается матрица размерностью (n, m) , где m – количество объектов в одном классе. Если сумма матрицы по некоторому столбцу отличается от значения $-m + 2$, то объект с индексом, равным номеру выбранного столбца, считается выбросом.

Метод локального уровня выбросов относится к методам машинного обучения без учителя. В процессе обучения производится оценка плотности распределения объектов обучающей выборки. На основании полученной в процессе обучения информации делается вывод о том, является ли рассматриваемый объект выбросом.

Для оценки работы методов был рассчитан коэффициент корреляции Мэтьюса (mcc), который определяется следующим образом:

$$mcc = \frac{TP \times TN - FP \times FN}{\sqrt{(TP + FP) \times (TP + FN) \times (TN + FP) \times (TN + FN)}} \quad (7)$$

где TP – истинно-положительное решение; TN – истинно-отрицательное решение; FP – ложноположительное решение; FN – ложноотрицательное решение.

mcc используется как показатель качества бинарной классификации, который изменяется в диапазоне от -1 до 1 . $mcc = 1$ указывает на идеальную классификацию, когда фактический и предсказанный классы полностью совпадают и ложноположительные (FP) и ложноотрицательные (FN) результаты отсутствуют. Значение $mcc = 0$ соответствует случайному предсказанию. $mcc = -1$ указывает на расхождение между фактическим и предсказанным значениями класса (классификатор предсказывает обратное событие),

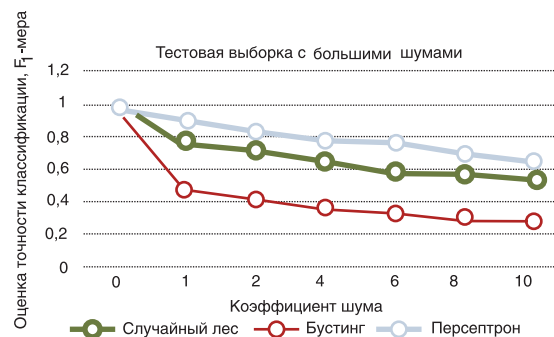


РИС. 4.

Оценка результатов тестирования методов классификаций на тестовой выборке с большими шумами

истинно положительное (TP) и истинно отрицательное (TN) в этом случае отсутствуют.

Оценить качество его работы можно следующим образом:

- создать обучающую и тестовую выборки таким образом, чтобы в тестовой были типы РЛС, которых нет в обучающей выборке;
- обучить классификатор на основе созданной выборки;
- провести тестирование на основе тестовой выборки;
- рассчитать коэффициент корреляции Мэтьюса.

Чтобы провести тестирование, подготовили тестовую выборку, которая состоит из ФС тех типов РЛС, которые были в обучающей выборке во время обучения, и ФС тех типов РЛС, которых не было в обучающей выборке и являются выбросами. Выборка содержит 80 классов. В данном случае под классом понимается тип РЛС. Будем последовательно убирать по одному классу из обучающей выборки, затем обучать метод, проверять его на тестовой выборке и возвращать убранный класс обратно в обучающую выборку до тех пор, пока не пройдем таким образом все классы.

На рисунке 5 отображены результаты тестирования метода определения выбросов.

По результатам тестирования можно сделать вывод, что метод последовательной бинарной классификации справляется с задачей лучше и определяет выбросы в тестовой выборке. Однако при большем количестве классов обучение и хранение множества бинарных классификаторов может потребовать значительных вычислительных ресурсов.

РАСПОЗНАВАНИЕ НЕИЗВЕСТНЫХ РЛС

Для сигналов, отмеченных как выбросы, можно попробовать определить назначение РЛС посредством сравнения общих скрытых черт (паттернов) внутри ФС известных и неизвестных типов РЛС.

Идея метода определения назначения у неизвестных типов РЛС состоит в способности сверточной НС к обобщению и выделению скрытых математических зависимостей между входными и выходными данными, а также в предположении о наличии общих характеристик у различных типов РЛС, принадлежащих одному классу.

Возьмем для сравнения метод случайного леса, так как он устойчив к переобучению и показывает хорошие результаты классификации. Главным недостатком этого метода является то, что при попытке определить класс объекта, которого не было в обучающей выборке, он не учитывает контекст импульса в ФС. Результаты, полученные методом случайного леса, не дадут представление о назначении РЛС, поэтому необходим такой метод, который смог бы находить общие черты (паттерны) в ФС. Для решения данной задачи была рассмотрена сверточная НС.

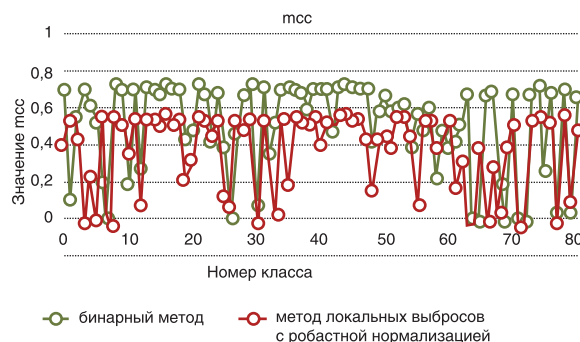


Рис. 5.

Значение коэффициента корреляции Мэтьюса в зависимости от класса

Сверточная НС – специальная архитектура НС, изначально нацеленная на эффективное распознавание изображений. Такая НС основана на процедуре свертки матриц. Свертка – операция над парой матриц A (размера $n_x \times n_y$) и B (размера $m_x \times m_y$), результатом которой является матрица $C = A \times B$ размера $(n_x - m_x + 1) \times (n_y - m_y + 1)$. Каждый элемент результата вычисляется как скалярное произведение матрицы B и некоторой подматрицы матрицы A такого же размера.

На рисунке 6 показано передвижение матрицы B по матрице A и в каждом положении считается скалярное произведение матрицы B и той части матрицы A , на которую она сейчас наложена, результат записывается в соответствующий элемент результата C .

Логический смысл свертки – чем больше величина элемента свертки, тем больше эта часть матрицы A была похожа на матрицу B (похожа в смысле скалярного произведения). Поэтому матрицу A называют изображением, а матрицу B – фильтром или образцом.

Рассмотрев сверточные НС, можно выделить ее преимущества и недостатки. Сверточная НС обладает возможностью выявить скрытые паттерны между параметрами сигналов внутри одного ФС, но для этого необходимо большое изображение, а малый размер обрабатываемого изображения не позволяет воспользоваться всеми преимуществами этого метода.

Входными данными являются двумерный массив 3×8 , в котором находятся 8 импульсов с 3 параметрами сигналов (частота, период, длительность импульса). Для оптимизации обучающей выборки проведем коррекцию кратных периодов и удаление импульсов с нулевыми периодами (предобработка).

Проведем тестирование, посредством создания тестовой выборки. Для оценки результатов работы будем рассчитывать следующие значения: TP – процент верно определившихся классов у ФС, принадлежащих к неизвестным РЛС, TN – процент верно определившихся классов у ФС известных РЛС. Будут тестироваться одномерные и двумерные сверточные

НС. Также вновь воспользуемся коэффициентом корреляции Мэтьюса.

В таблице 2 представлена итоговая таблица результатов работы алгоритмов определения назначения у РЛС с неизвестными типами РЛС различными методами с предобработкой и без.

По результатам тестирования видно, что предобработка оказала положительное влияние на работу методов распознавания назначения неизвестных РЛС. Метод случайного леса показал самый высокий уровень точности определения класса РЛС сигнала, но делает он это без учета контекста сигнала в ФС, в отличие от сверточных НС, которые учитывают контекст входных данных и позволяют находить скрытые математические зависимости. Согласно результатам, отраженным в таблице 2, двумерная сверточная НС показывает лучшие результаты распознавания назначения неизвестных РЛС в сравнении с одномерной сверточной НС.

Чтобы проверить работоспособность сверточной НС, необходимо большое количество верно размеченных данных в виде двумерных массивов 3×8 , в которых находятся 8 импульсов с 3 параметрами сигналов (частота, период, длительность импульса). Тем не менее, использование сверточных НС остается перспективной технологией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках решения задач классификации сигналов были рассмотрены следующие модели НС и методы машинного обучения:

- случайный лес;
- градиентный бустинг;
- многослойный перцептрон.

Было проведено моделирование обучающей выборки, которая представляет из себя набор сигналов с тремя параметрами (частота, период, длительность импульса сигнала).

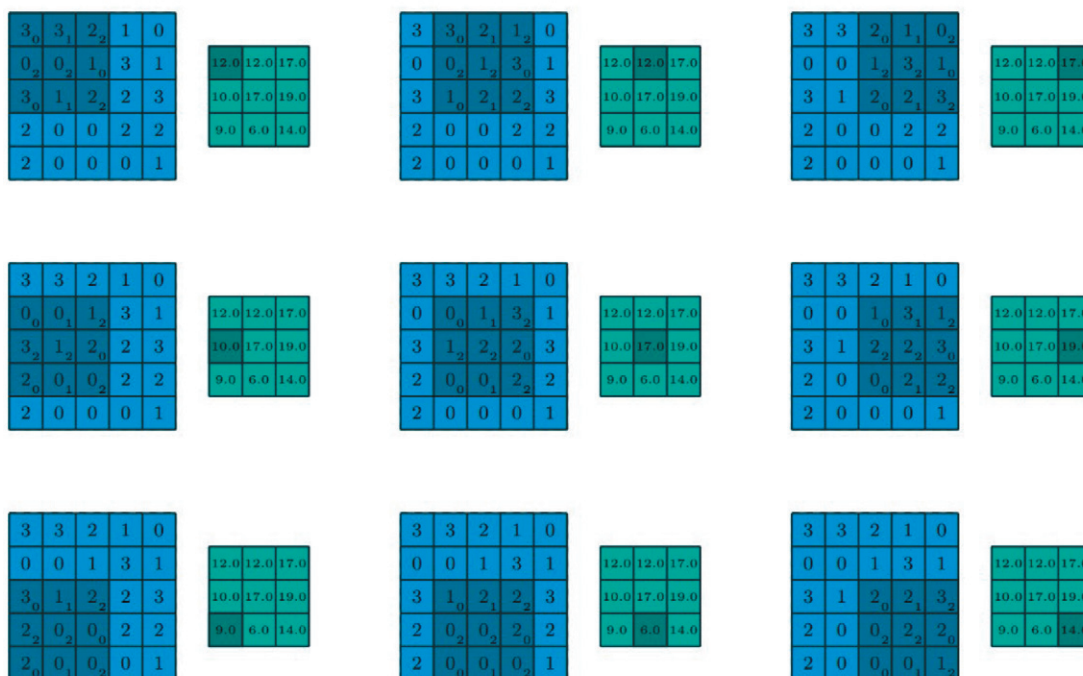


РИС. 6.

Работа свертки

ТАБЛИЦА 2.

Результатов работы алгоритмов определения назначения у РЛС с неизвестным типом

Вид предобработки	С предобработкой			Без предобработки		
	TP (%)	TN (%)	мсс	TP (%)	TN (%)	мсс
Метод МО						
Случайный лес	46,58	98,87	0,3095	44,63	98,51	0,2939
Одномерная сверточная НС	30	88,16	0,0083	33	87,26	0,00542
Двумерная сверточная НС	43,88	94,45	0,2429	43,02	90,68	0,1963

Были исследованы различные виды нормализаций данных:

- стандартная нормализация;
- линейная нормализация;
- робастная нормализация.

Для решения задачи поиска выбросов были рассмотрены следующие методы машинного обучения:

- последовательная бинарная классификация;
- метод локального уровня выбросов.

Для решения задачи распознавания неизвестных РЛС была рассмотрена сверточная НС.

Также для повышения эффективности обучения и работы НС была применена предобработка коррекции кратных периодов и удаления импульсов с нулевым периодом (предобработка 1).

Проведено тестирование моделей НС и методов машинного обучения с использованием робастной нормализации и предобработок для достижения наилучших результатов классификации. После тестирования методов была проведена оценка работы каждого из методов машинного обучения. Для оценки была рассмотрена средневзвешенная метрика F1-мера, коэффициент корреляции Мэтьюса.

По результатам оценки можно сделать следующие выводы. Для классификации сигналов по параметрам радиотехнических сигналов (частота, период, длительность импульса) лучше всего подходит метод случайного леса.

При решении задачи поиска выбросов лучшие результаты достигаются с помощью метода последовательной бинарной классификации. Использование этого метода позволяет эффективно выделять объекты, принадлежащие к типам РЛС, которые отсутствовали в обучающей выборке.

Для распознавания неизвестных РЛС была применена двумерная сверточная НС с предварительной предобработкой данных. Это дало возможность определить назначение РЛС, ФС которых были отмечены как выбросы, с помощью выявления общих скрытых черт (паттернов). Сверточная НС позволяет находить паттерны внутри ФС неизвестных типов РЛС и определять их назначение, поэтому она остается перспективным методом анализа радиотехнических сигналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика и основы эконометрики, М.: Юнити, 1998. 1022 с.
2. Воронцов В. Математические методы обучения по прецедентам (теория обучения машин). М., 2011.
3. Головкин В.А. Нейронные сети: обучение, организация и применение: учеб. пособие. Под общ. ред. А.И. Галушкина. М., 2001. 256 с.
4. Николенко Б.Б., Кузнецов Д.И., Подковкин В.А., Попов П.Б., Никулина А.Н. Использование методов искусственного интеллекта

для распознавания радиолокационных станций по радиотехническим параметрам сигналов с фильтрацией сигналов неучтенных в обучающей выборке радиолокационных станций // Радиотехника. 2024. № 5. 15–27 с.

5. BREIMAN L. Random forests. Machine learning, 2001. V. 45. №. 1. P. 5–32.
6. BREUNIG M.M., KRIEGLER H.-P., NG R. T., SANDER J.R. LOF: Identifying Density-based Local Outliers. Proceedings of the 2000 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, 2000. 12 с.
7. CHEN T., GUESTRIN C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. <https://arxiv.org/abs/1603.02754>. DOI: 10.1145/2939672.2939785, 2016, 13 с.
8. HASTIE T., TIBSHIRANI R., FRIEDMAN J. The Elements of Statistical Learning. Springer, 2009. 764 с.

REFERENCES

1. AYVAZYAN S.A., MKHITARYAN V.S. Applied Statistics and Foundations of Econometrics. Moscow: Unity, 1998:1022. (In Russian).
2. VORONTSOV V. Mathematical Methods of Precedents-Based Learning (Machine Learning Theory). Moscow, 2011. (In Russian).
3. GOLOVKO V.A. Neural Networks: Training, Organization, and Application: A Textbook. General Editor A.I. Galushkin. Moscow, 2001:256. (In Russian).
4. NIKOLENKO B.B., KUZNETSOV D.I., PODKOVKIN V.A., POPOV P.B., NIKULINA A.N. Using Artificial Intelligence Methods for Recognizing Radar Stations Based on Signal Radiotechnical Parameters with Filtering Out Signals Not Accounted for in the Training Set of Radar Stations. Radiotekhnika. 2024;5:15–27. (In Russian).
5. BREIMAN L. Random Forests. Machine Learning, 2001;45;1:5–32.
6. BREUNIG M.M., KRIEGLER H.-P., NG R.T., SANDER J.R. LOF: Identifying Density-Based Local Outliers, Proceedings of the 2000 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, 2000:12.
7. CHEN T., GUESTRIN C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. <https://arxiv.org/abs/1603.02754>. DOI: 10.1145/2939672.2939785, 2016:13.
8. HASTIE T., TIBSHIRANI R., FRIEDMAN J. The Elements of Statistical Learning. Springer, 2009:764.

Вагапов Егор Владиславович, техник 1 категории АО «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга»

✉ e-mail: vevagapov@mail.ru

Никулина Александра Николаевна, ведущий специалист АО «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга»

✉ e-mail: alex.post-x@yandex.ru

Рябикова Елена Владимировна, инженер-программист 1 категории АО «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга»

✉ 107078, г. Москва, ул. Новая Басманная, д. 20, стр. 9, 107078, Moscow, Novaya Basmannaya St., 20, building 9, тел.: +7 (968) 723-81-32, e-mail: essarabia@yandex.ru

УДК 621.396.67(621.37)

DOI: 10.52531/1682-1696-2025-25-3-128-131

Научная статья

EDN: ZMNIZU

СЕМИЭЛЕМЕНТНАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА ДЛЯ ПРИЕМА СИГНАЛОВ ГЛОНАСС И GPS В ДИАПАЗОНАХ ЧАСТОТ L1, L2

**В.В. Дорошенко,
Д.С. Аносов, Д.А. Орлов**
АО «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга»,
Москва, Российская Федерация

Original article

**SEVEN-ELEMENT ANTENNA ARRAY
FOR RECEPTION GLONASS AND GPS
SIGNALS IN FREQUENCY BANDS L1, L2**

В глобальной навигационной системе ГЛОНАСС реализовано частотное разделение двух фазоманипулированных сигналов (FDMA), излучаемых каждым из спутников. В этой работе представлен материал по разработке антенной решетки для приема сигналов на частотах, предназначенных для военных целей – 1,25 ГГц (L1) и общего пользования – 1,6 ГГц (L2), и обеспечивающей работу в секторе горизонтальной плоскости на 360°.

В ходе электродинамического моделирования в системе автоматизированного проектирования были разработаны модель патч-антенны, обеспечивающей работу GPS и ГЛОНАСС в частотных диапазонах L1, L2 C/A и модель антенной решетки, обеспечивающей работу GPS в частотных диапазонах L1, L2 C/A и ГЛОНАСС в частотных диапазонах L1, L2 ST.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ГЛОНАСС, широкополосная антенна, диэлектрическая проницаемость, линейная и круговая поляризация, антенная решетка, патч-антенна

**V.V. Doroshenko,
D.S. Anosov, D.A. Orlov**
JSC «CENTRAL RADIO-RESEARCH INSTITUTE
NAMED AFTER ACADEMICIAN A.I. BERG»,
MOSCOW, RUSSIAN FEDERATION

The GLONASS global navigation system implements frequency division multiplexing (FDMA) of two phase-shift keyed signals emitted by each satellite. This paper presents the development of an antenna array for receiving signals at frequencies intended for military purposes – 1.25 GHz (L1) and general use – 1.6 GHz (L2), and providing operation in a 360-degree horizontal plane sector.

In the course of electrodynamic modeling in the computer-aided design system, a patch antenna model was developed that ensures the operation of GPS and GLONASS in the L1, L2 C/A frequency ranges and an antenna array model that ensures the operation of GPS in the L1, L2 C/A frequency ranges and GLONASS in the L1OF, L2OF frequency ranges.

KEY WORDS: GLONASS, broadband antenna, permittivity, linear and circular polarization, antenna array, patch antenna.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение работоспособности системы в диапазонах рабочих частот, обеспечение приема и передачи волн с круговой правой поляризацией и близкие к идеальному виду диаграммы направленности в верхней полуплоскости. Все эти требования предъявляются к характеристикам антенн, предназначенных для навигационных систем GPS и ГЛОНАСС. За счет своих хороших показателей, относительно малой стоимости, простоты изготовления и возможности модификации и усовершенствования, в этой области хорошо закрепились микрополосковые патч-антенны. К тому же стремительное развитие антенных устройств

приема и передачи спутниковых навигационных сигналов заставляют использовать широкую полосу пропускания для лучшего приема. Один из способов расширить полосу пропускания – это использовать двухдиапазонные патч-антенны, которые реализованы в виде наложенных друг на друга однодиапазонных патчей [5, 6].

Патч-антенны с возможностью работы на двух различных частотах обладают рядом преимуществ, позволяющих упростить интеграцию антенн в огромный ряд систем. Двухдиапазонная реализация антенны позволяет уменьшить размеры излучающей поверхности, не проигрывая по усилению излучения радиоволны, а также расширить полосу пропускания на центральных частотах. Но при этом геометрия антенны усложняется по сравнению с однодиапазонным аналогом [5, 6].

© В.В. Дорошенко, Д.С. Аносов, Д.А. Орлов
Научный руководитель: В.А. Ходунов
Поступила в редакцию 01.08.2025

Для лучшей помехозащищенности и более широкой полосы приема сигналов систем спутниковой навигации все чаще используются антенные решетки, позволяющие уменьшить габариты антенной системы, не проигрывая по усилению. Создание антенных решеток с круговой поляризацией позволяет отсекал большую часть шумового воздействия и спокойно принимать спутниковые сигналы навигационного назначения без значимых искажений. Это направление антенной техники актуально как для гражданского применения, так и для объектов военного назначения [4, 3].

Основная цель этой работы – разработать и оценить сложную антенную систему для приема сигналов ГЛОНАСС и GPS в диапазонах частот L1 и L2 с использованием технологии фазированной решетки. Фазированные решетки улучшают показатели направленности и усиления, позволяя точно наводить луч диаграммы направленности антенны на конкретные интересные места. К тому же формирование луча фазированной антенной решеткой позволит уменьшить помехи за счет поворота диаграммы направленности. Полусферическая форма антенной решетки позволит принимать навигационные сигналы с любой стороны прихода радиосигнала. Зона приема по азимуту составляет 360° , а по углу места 180° .

В этой работе мы представляем компактную фазированную антенную решетку на основе двухдиапазонных патч-антенн, состоящую из семи идентичных элементов с коаксиальным питанием. Разработанная антенная решетка охватывает широкий диапазон частот (1205 МГц – 1282 МГц) и (1572 МГц – 1645 МГц), сохраняя при этом наилучшие характеристики.

ПРОЦЕСС ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Для создания элемента антенной решетки было решено реализовать патч-антенну без использования диэлектрической подложки, чтобы избежать потерь сигнала, вносимых диэлектриком, и тем самым сохранить наивысший коэффициент усиления. Для покрытия интересующего диапазона частот (1250 МГц и 1600 МГц) толщина излучающих поверхностей и нижнего рефлектора была взята равной 0,53 мм. Сам же патч имеет квадратную форму со срезанными углами для достижения правой круговой поляризации, как показано на рисунке 1.

Размеры нижнего патча, настроенного на частоту L1 (1250 МГц), составляют 114,5 мм на 111 мм. Размеры верхнего патча, настроенного на частоту L2 (1600 МГц), составляют 88,5 мм на 87,8 мм. Размеры рефлектора составляют 137 мм на 137 мм. Срезы на параллельных углах рассчитывались по формуле $0,05\lambda$, а срез для третьего угла – $0,05\lambda/2$, где λ – длина волны.

Антенны с круговой поляризацией используются для приема навигационных сигналов из-за устойчивости к вращению Фарадея и малых потерь на много-

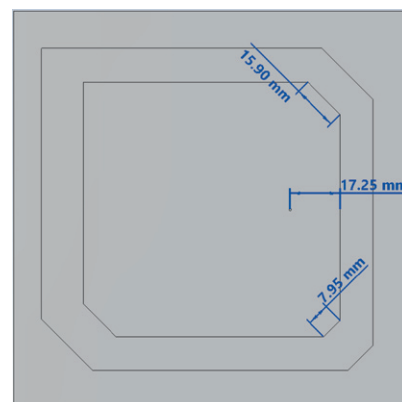


Рис. 1.

Геометрия одного элемента антенной решетки

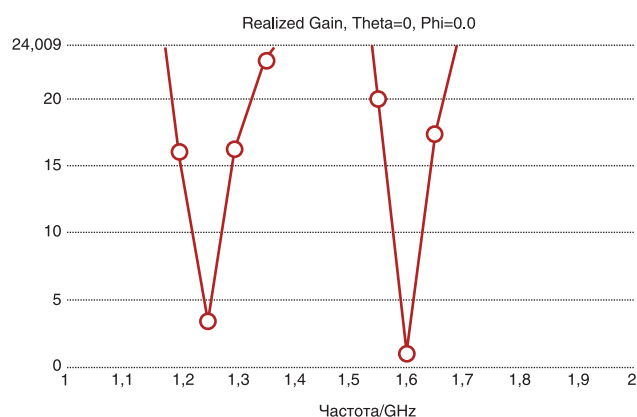


Рис. 2.

Осевое отношение двухдиапазонной патч-антенны

лучевое распространение. Для обеспечения круговой поляризации в антенне электрическое поле должно иметь две составляющие, равные друг другу по величине и имеющие сдвиг фаз 90° относительно друг друга. Есть много методов получения круговой поляризации, таких как использование цепей с двойной подачей мощности, делителями напряжения и фазовращателями. К сожалению, эти методы многократно увеличивают сложность конечной конструкции [1, 2]. Наиболее простым способом реализации круговой поляризации в антенне является возбуждение ортогональных мод из-за нерегулярности размеров излучающей поверхности патч-антенны. Поэтому противоположные углы и нижний угол двухдиапазонной патч-антенны были усечены и оптимизированы для сдвига фаз в 90° . На рисунке 2 показано осевое отношение патча.

Разработанная двухдиапазонная патч-антенна обладает высоким усилением равным 8,37 дБ на частоте L1 (1250 МГц) и 8,61 дБ на частоте L2 (1600 МГц). Результаты моделирования представлены на рисунках 3–5.

ПРОТОТИП СЕМИЭЛЕМЕНТНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

В отличие от планарных аналогов, антенная решетка, выполненная в виде полусферы, позволит принимать сигналы в требуемых секторах работы (360° по азимуту и 180° по углу места). Разработанный, в программе CST Studio Suite, прототип антенной решетки представлен на рисунке 6–7. Рабочие сектора приема сигналов перекрываются полностью благодаря семи элементам антенной решетки, реализованных в виде двухдиапазонных патч-антенн, имеющих ширину диаграммы направленности более 60° .



Рис. 3.
КСВН элемента антенной решетки

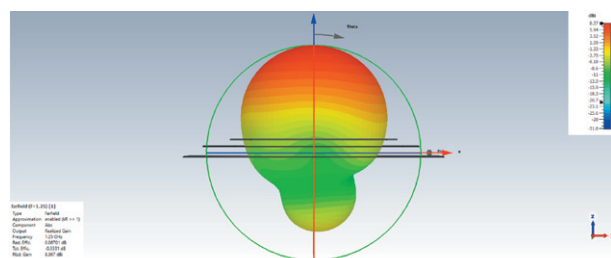


Рис. 4.
Диаграмма направленности и коэффициент усиления элемента на частоте 1,25 ГГц

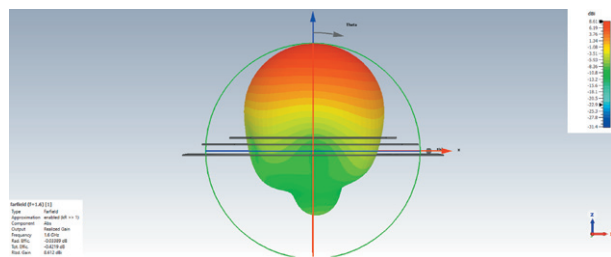


Рис. 5.
Диаграмма направленности и коэффициент усиления элемента на частоте 1,6 ГГц

В.В. ДОРОШЕНКО,
А.С. АНОСОВ, А.А. ОРАЛОВ
СЕМИЭЛЕМЕНТНАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА
ДЛЯ ПРИЕМА СИГНАЛОВ ГЛОНАСС И GPS
В ДИАПАЗОНАХ ЧАСТОТ L1, L2

Для корпуса прототипа антенной решетки был выбран фторопласт, не ухудшающий работу всей системы. Конечные размеры прототипа составляют 560 мм на 539,2 мм. Разработанный прототип антенной решетки и его рассчитанные диаграммы направленности на частотах L1 и L2 представлены на рисунках 6–9.

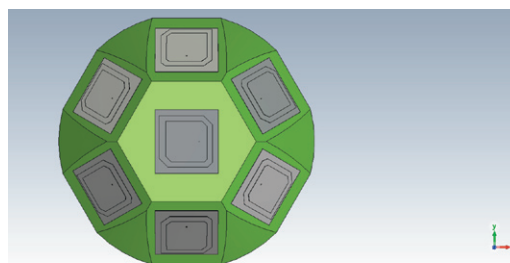


Рис. 6.
Антенная решетка вид сверху

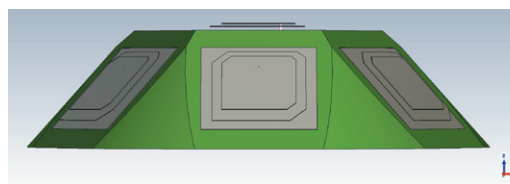


Рис. 7.
Антенная решетка вид спереди

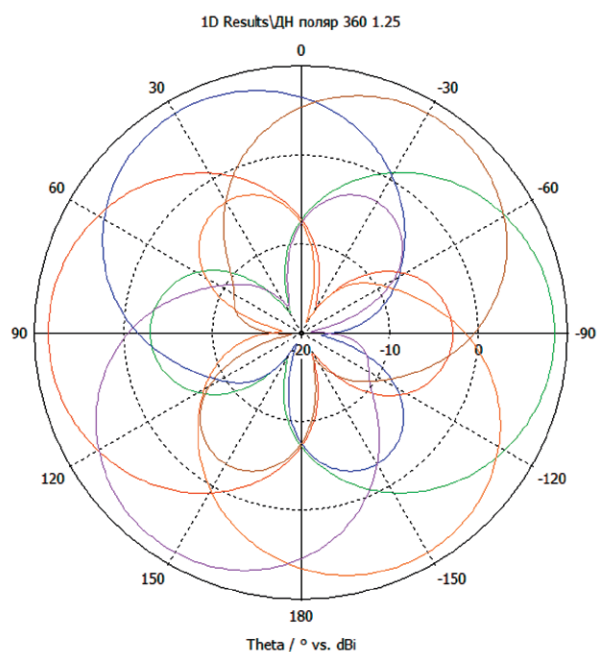


Рис. 8.
Диаграмма направленности антенной решетки на частоте 1,25 ГГц

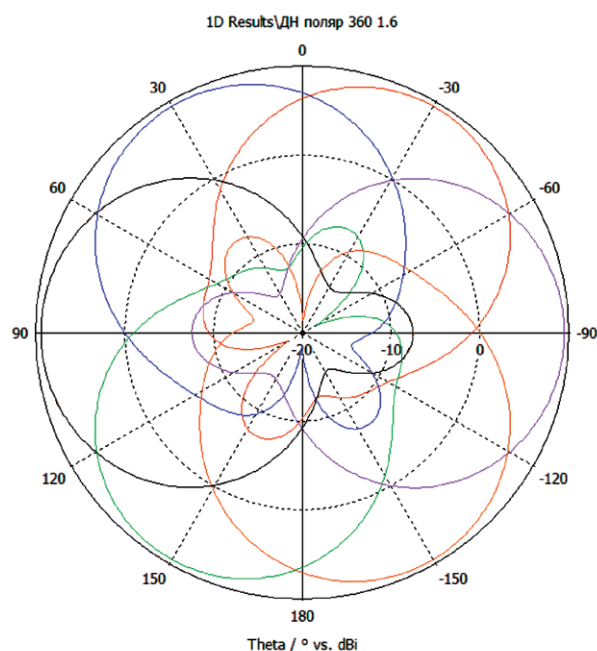


Рис. 9.

Диаграмма направленности антенной решетки на частоте 1,6 ГГц

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный прототип антенной решетки обеспечивает стабильный и наиболее эффективный прием навигационных сигналов ГЛОНАСС и GPS в диапазонах частот L1 и L2 в секторе горизонтальной плоскости на 360° и вертикальной (угол места) на 180°. Антенная решетка обладает высоким коэффициентом усиления, не ниже 8 дБ, в каждой полосе частот, правой круговой поляризацией и низким КСВН в требуемых частотных диапазонах. А также антенная решетка обладает хорошим отношением излучений вперед-назад и хорошим осевым отношением с большой шириной луча для лучшего покрытия спутника.

ЛИТЕРАТУРА

1. Артемова Т.К., Фомичев Н.И. Антенны. Учебное пособие. Ярославль: Ярославский государственный университет, 2007. 128 с.
2. Воскресенский Д.И., Гостюхин В.А., Максимов В.М., Пономарев Л.И. Устройства СВЧ и антенны. Под ред. Воскресенского Д.И.. Изд. 2-е, доп. и перераб. М.: Радиотехника, 2006. 376 с.
3. Диаграммы направленности фазированной антенной решетки // Элтех. URL: https://www.eltech.spb.ru/analog_kharakteristiki_lucha_i_lineinoi_reshetki
4. Antenna Arrays // Antenna Theory. URL: <https://www.antenna-theory.com/arrays/main.php>.
5. Microstrip (Patch) Antennas. URL: <https://www.antenna-theory.com/antennas/patches/antenna.php>.

6. Padmasree Ramineni Design and Analysis of a Dual-Band Microstrip Patch Antenna for Sub-6 GHz Applications // Journal of Engineering Research and Reports. 2024. №26. С. 210–221.

REFERENCES

1. ARTEMOVA T.K., FOMICHEV N.I. Antennas. Study Guide. Yaroslavl: Yaroslavl State University, 2007:128. (In Russian).
2. VOSKRESENSKY D.I., GOSTYUKHIN V.L., MAKSIMOV V.M., PONOMAREV L.I. Microwave Devices and Antennas. Ed. by Voskresensky D.I. 2nd ed., supplemented and revised. Moscow: Radio Engineering, 2006:376. (In Russian).
3. Radiation Patterns of a Phased Antenna Array. *Eltech*. URL: https://www.eltech.spb.ru/analog_kharakteristiki_lucha_i_lineinoi_reshetki (In Russian).
4. Antenna Arrays // *Antenna Theory*. URL: <https://www.antenna-theory.com/arrays/main.php>.
5. Microstrip (Patch) Antennas. URL: <https://www.antenna-theory.com/antennas/patches/antenna.php>.
6. Padmasree Ramineni Design and Analysis of a Dual-Band Microstrip Patch Antenna for Sub-6 GHz Applications. *Journal of Engineering Research and Reports*. 2024;26:210–221.

Дорошенко Владислав Витальевич, инженер 3 категории, АО «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга»

☎ тел.: +7 (916) 276-96-37, e-mail: kosmos.smirnov.99@mail.ru

Аносов Денис Сергеевич, инженер 3 категории АО «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга»

☎ тел.: +7 (977) 180-05-44, e-mail: denis.anosoff2015@ya.ru

Орлов Данила Александрович, техник, АО «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга»

☎ 107078, г. Москва, ул. Новая Басманная, 20/9, 107078, Moscow, Novaya Basmannaya st., 20/9, тел.: +7 (915) 177-53-93, e-mail: dpd1735@mail.ru

УДК 623.09

DOI: 10.52531/1682-1696-2025-25-3-132-142

Научная статья

EDN: ZQGRYK

КОМПЛЕКС РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ПОДАВЛЕНИЯ БПЛА

**Д.Ш. Исмятов,
А.С. Кудрявцев, А.А. Морозов**
АО «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга»,
Москва, Российская Федерация

Статья рассматривает радиоэлектронное средство для защиты от БПЛА методом постановки активной прицельной шумовой помехи сигналам видеопередачи и каналам управления с помощью модуля цифровой радиочастотной памяти.

Ключевые слова: радиоэлектронный комплекс, беспилотные летательные аппараты, цифровая радиочастотная память, радиоэлектронное подавление, защита

Original article

UAVS ELECTRONIC COUNTERMEASURE COMPLEX

**D.S. ISMYATOV,
A.S. KUDRYAVTSEV, A.A. MOROZOV**
JSC «CENTRAL RADIO-RESEARCH INSTITUTE
NAMED AFTER ACADEMICIAN A.I. BERG»,
MOSCOW, RUSSIAN FEDERATION

The article considers the electronic means of protection against UAVs by setting up active targeted noise interference to video transmission signals and control channels using a digital radio frequency memory.

KEYWORDS: radio-electronic complex, unmanned aerial vehicles, digital radio frequency memory, electronic countermeasure, protection

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время происходит активное развитие и повсеместное внедрение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в хозяйственных, бытовых, террористических и военных целях. Если первые две цели представляют развлечение и автоматизацию хозяйственной работы, то последние представляют опасность для важных государственных, военных и гражданских объектов, а также объектов топливно-экономического комплекса (ТЭК).

Повышение доступности и функциональных возможностей БПЛА облегчает их применение в противоправных целях, таких как несанкционированный сбор информации, причинение ущерба объектам ТЭК, создания угрозы жизни и здоровью людей, координации действий при незаконных проникновениях на охраняемые объекты и т.д.

Современные БПЛА способны не только нести полезную нагрузку или вести оптическую разведку, но и сопровождать конкретный объект в течение длительного времени, а также доставлять опасные грузы или взрывчатые вещества.

Противодействие подобной угрозе современными комплексами противовоздушной обороны (ПВО) является весьма сложной технической задачей, поскольку требует, с одной стороны, обнаружения сла-

боконтрастных низколетящих целей на больших дальностях, а с другой – наличия большого количества дорогостоящих комплексов ПВО.

В сложившейся ситуации обеспечить эффективную, массовую и дешевую, относительно цены комплекса ПВО, защиту способен комплекс радиоэлектронного противодействия (РЭП).

1. АНАЛИЗ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БПЛА

1.1 Радиотехнические характеристики составных частей БПЛА

Для проведения анализа радиотехнических характеристик различных БПЛА изначально необходимо рассмотреть типовые составные части БПЛА с целью проведения подробного анализа по каждой радиоэлектронной составной части в отдельности. Типовой состав компонентов БПЛА, отвечающий за взаимодействие БПЛА с оператором, приведен в таблице 1.

Подробно рассмотрим каждую составную часть, приведем примеры из существующих и применяемых на сегодняшний день изделий, проанализируем их радиотехнические характеристики.

Составные части канала управления БПЛА:

1. Приемник радиосигнала управления БПЛА располагается на борту БПЛА, отвечает за прием и обработку радиосигналов управления, преобразовывает сигналы управления в данные, необходимые полетному контроллеру (рис. 1).

2. Передатчик радиосигнала управления БПЛА преобразовывает сигналы от пульта управления в информационные импульсы для приемника БПЛА (рис. 2).

3. Приемная антенна канала управления отвечает за прием радиосигналов управления и их усиление для передачи на приемник управления (рис. 3).

4. Передающая антенна канала управления необходима для усиления радиосигналов управления от передатчика и излучение их в пространство (рис. 4).

Основными радиотехническими характеристиками каналов управления БПЛА являются:

- рабочий диапазон частот (0,3–6 ГГц);
- вид модуляции (FSK2, PSK2, OFDM);
- мощность передатчика управления (0,25–2 Вт);
- чувствительность приемника управления (от – 80 дБмВт до – 120 дБмВт);
- наличие/отсутствие режима ППРЧ (FHSS);
- ширина полосы сетки ППРЧ (60–80 МГц);
- количество каналов в сетке ППРЧ (20–40 шт);
- быстродействие ППРЧ (350–500 ск/сек);

– коэффициент усиления приемной/передающей антенны (1–3 dBi);

– поляризация приемной/передающей антенны (горизонтальная, вертикальная).

Составные части канала видеопередачи БПЛА:

1. Приемник видеосигнала БПЛА отвечает за прием и обработку цифровых или аналоговых видеосигналов от БПЛА, а также преобразование видеосигнала в информационный для системы видеотображения (FPV-очки, FPV-мониторы) (рис. 5).

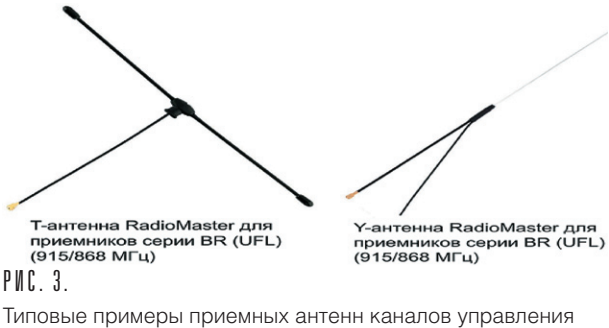
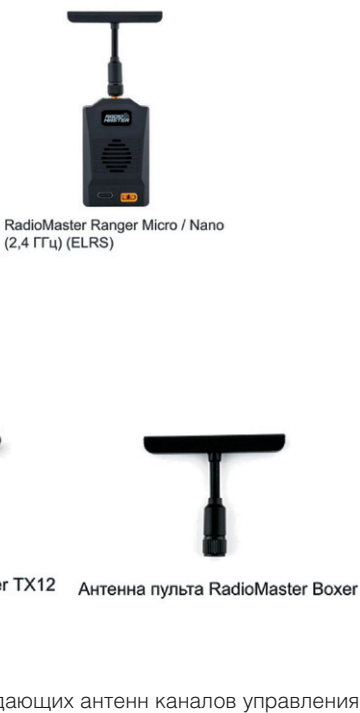
2. Передатчик видеосигнала БПЛА располагается на борту БПЛА, предназначен для передачи цифровых или аналоговых видеосигналов, преобразовывает и усиливает сигнал от FPV-камеры БПЛА (рис. 6).

3. Приемная антенна канала видеопередачи необходима для приема видеосигналов от БПЛА и их усиления для передачи на приемник видеосигналов оператора (рис. 7).

4. Передающая антенна канала видеопередачи необходима для усиления видеосигнала от видеопередатчика и его излучения в пространство (рис. 8).

ТАБЛИЦА 1.
Канал управления БПЛАКанал видеопередачи БПЛА

Канал управления БПЛА		Канал видеопередачи БПЛА	
Приемная часть (БПЛА)	Передающая часть (оператор)	Приемная часть (оператор)	Передающая часть (БПЛА)
Бортовой приемник сигналов управления	Передатчик сигналов управления (пульт)	Приемник видеосигнала (очки, монитор)	Передатчик видеосигнала
Приемная антенна канала управления	Передающая антенна канала управления	Приемная антенна канала видеопередачи	Передающая антенна канала видеопередачи



Основными радиотехническими характеристиками каналов видеопередачи БПЛА являются:

- рабочий диапазон частот (1–6 ГГц);
- группа частот (1,2 ГГц, 1,5 ГГц, 2,4 ГГц, 3,3 ГГц, 5,2 ГГц, 5,8 ГГц);
- количество каналов в группе (от 8 до 48 шт);
- стандарт видеосигнала (PAL, NTSC);
- мощность видеопередатчика (0,025–4 Вт);
- чувствительность видеоприемника (от – 80 дБмВт до – 95 дБмВт);
- коэффициент усиления приемной/передающей антенны (1–3 дБи);
- поляризация приемной/передающей антенны (горизонтальная, вертикальная).

Исходя из указанной информации, в таблице 2 изложены основные радиотехнические характеристики составных частей БПЛА.

1.2 Спектральные характеристики передающих устройств БПЛА

Фоно-целесвая обстановка в обобщенном диапазоне работы излучаемых средств БПЛА насыщена различными сигналами. На рисунке 9 приведена спектрограмма радиоэлектронной обстановки в момент большой активности БПЛА.

Исходя из спектрограммы видно, что на различных частотах присутствует множество сигналов управления, передачи видеoinформации и сотовой связи. Амплитуда сигналов указывает на различные типы передатчиков сигналов (различные уровни выходной мощности) и/или на различные дальности нахождения от анализатора сигналов.

На рисунке 10 приведена спектрограмма в диапазоне частот от 600 до 6000 МГц при полете FPV-дрона.

По нижней части представленной спектрограммы можно установить, что сигналы имеют различную ширину спектра и интенсивность перестройки. Сигнал управления работает в режиме ППРЧ. На спектрограмме видно, что амплитуда сигнала управления БПЛА имеет наивысшее значение, что свидетельствует о малой дальности БПЛА от анализатора спектра.

В настоящее время более 80% БПЛА, выпускаемых иностранными производителями, используют режимы ППРЧ в каналах управления. Несмотря на значительное разнообразие типов, моделей и производи-



Дiversity приёмник Skyzone 1,2 ГГц

Приёмник Skyzone SteadyView 5,8

Приёмник GEPRC MATEN 3,3 ГГц

Рис. 5.

Типовые примеры приемников видеосигнала



Видеопередатчик RUSHFPV TANK II ULTIMATE 5,8 ГГц со SmartAudio



Видеопередатчик GEPRC MATEN 3,3 ГГц 3 Вт VTX PRO



Видеопередатчик GEPRC MATEN 1,2 ГГц 2 Вт VTX

Рис. 6.

Типовые примеры передатчиков видеосигнала



Патч-антенна GEPRC Triple Feed Patch-1 5,8 ГГц



Антенна RadioMaster Bandit Moxon (915/868 МГц) (RP-SMA) (линейная)

Рис. 7.

Типовые примеры приемных антенн каналов видеопередачи



Антенна диполь Flywoo 1,2-1,3 ГГц (SMA) (линейная)



Антенна Foxeer Lollipop 4 Plus 5,8 ГГц (RHCP / LHCP)

Рис. 8.

Типовые примеры передающих антенн каналов видеопередачи

ТАБЛИЦА 2.

Основные радиотехнические характеристики составных частей БПЛА

БПЛА		Пульт оператора	
Параметр	Единица измерения	Параметр	Единица измерения
Рабочий диапазон приемника канала управления	МГц (ГГц)	Рабочий диапазон передатчика канала управления	МГц (ГГц)
Рабочий диапазон передатчика видеосигналов	МГц (ГГц)	Рабочий диапазон приемника видеосигналов	МГц (ГГц)
БПЛА		Пульт оператора	
Чувствительность приемника канала управления	dBm	Мощность передатчика канала управления	Вт
Мощность передатчика видеосигналов	Вт	Чувствительность приемника видеосигналов	dBm
Коэффициент усиления приемной антенны канала управления	dBi	Коэффициент усиления передающей антенны канала управления	dBi
Коэффициент усиления передающей антенны канала видеосигналов	dBi	Коэффициент усиления приемной антенны канала видеосигналов	dBi

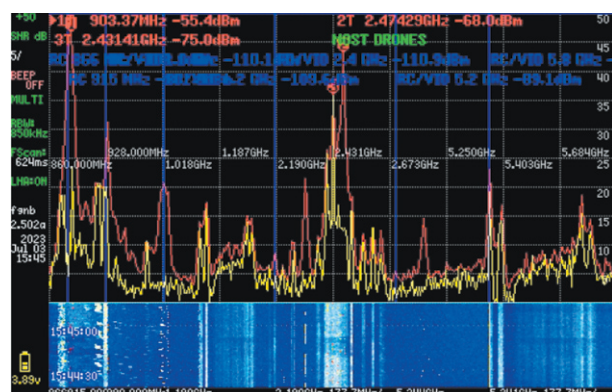


Рис. 9.

Радиоэлектронная обстановка в момент большой активности БПЛА

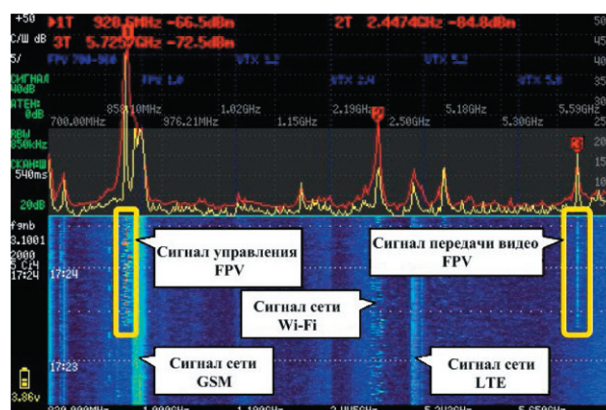


Рис. 10.

Спектрограмма при полете FPV – дрона

телей БПЛА (использующих ГППРЧ в каналах управления), можно выделить обобщенные параметры и характеристики, типичные для изделий большинства иностранных производителей:

- максимальная «легальная» мощность излучаемого сигнала (в канале управления) – 100 мВт;
- приоритетные диапазоны частот – 2,4 и 5,8 ГГц;
- быстродействие режима ГППРЧ – от 350–500 ск/сек (макс. 2 900 ск/сек);
- вид модуляции – FSK2 (реже – PSK2 (A/B) и OFDM);
- длительность импульса – 500 мкс – 2,5 мс;
- частота повторения импульсов – 300 кГц – 2 МГц;
- символьная скорость передачи данных – 1 000–2 000 кбод;
- полоса «сетки ГППРЧ» – около 80 МГц;
- количество каналов «сетки ГППРЧ» – до 40.

На рисунке 11 приведена полихромная диаграмма

спектра (полученная в режиме накопления данных) канала управления ГППРЧ типичного БПЛА.

Из спектрограммы видно, что в одну единицу времени активен (используется для передачи данных) только один из 40 каналов сетки ГППРЧ. Длительность одного сеанса передачи данных (для данного изделия) составляет около 2 мс на одном канале.

Из спектрограммы, снятой в условиях реальной РЭО, видно, что в полосе сетки ГППРЧ (канала управления) присутствуют сигналы иных РЭС (в том числе сигналов Wi-Fi, сигналов канала передачи видеоданных самого БПЛА и т.д.).

На рисунке 12 приведена стандартная спектрограмма канала управления ГППРЧ типичного БПЛА. Как правило, стандартная спектрограмма не отображает наличие сигналов канала управления «быстрого ГППРЧ» на экране прибора. Спектрограмма получена в условиях реальной РЭО, в диапазоне действующего

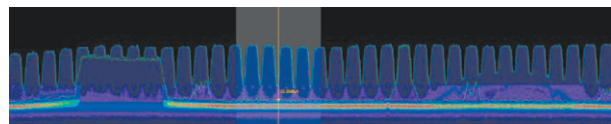


Рис. 11.

Полихромная диаграмма спектра канала управления ППРЧ

канала управления БПЛА (идентичного представленному на рис. 11). Признаки наличия сигналов канала управления (ППРЧ) на спектрограмме отсутствуют. Наблюдается отметка сигнала канала передачи видеоданных с борта БПЛА.

1.3 Частотные диапазоны работы БПЛА

В таблице 3 приведен перечень наиболее распространенных БПЛА, которые применяются в настоящее время вероятным противником и их частотные диапазоны сигналов управления и передачи видеоизображения.

2. КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ КОМПЛЕКСА

В целях определения концепции построения комплекса подавления БПЛА необходимо рассмотреть основные радиоканалы обмена информацией, которые функционируют между оператором и БПЛА. На рисунке 13 изображены направления обмена информацией.

Исходя из информации, представленной выше, можно сделать вывод о том, что со стороны БПЛА в сторону оператора передаются данные двух видов:

1. Сигналы видеопередачи с камеры БПЛА.
2. Сигналы телеметрии (канала управления), передающиеся от полетного контроллера БПЛА в сторону пульта управления оператора БПЛА.

Учитывая излучаемые радиосигналы БПЛА на частоте управления и видеопередачи, оптимальным вариантом обнаружения и подавления подобных БПЛА представляется вариант с применением комплекса, задачами которого являются обнаружение и радиоэлектронное подавление каналов управления и каналов передачи видеоизображения БПЛА.

2.1 Обнаружения сигналов БПЛА

Одним из основных и эффективных способов обнаружения БПЛА является метод пассивной радиотехнической разведки воздушного пространства.

Рассмотрим основные плюсы данного метода обнаружения БПЛА:

- скрытность проведения анализа воздушного пространства на наличие сигналов БПЛА;
- упрощенная реализация кругового обзора пространства на наличие сигналов БПЛА;
- определение типа радиосигналов и их характеристик и, следовательно, определение их принадлежности к определенным радиоизлучающим бортовым системам БПЛА (управление, видеопередача, телеметрия);



Рис. 12.

Стандартная спектрограмма канала управления ППРЧ

ТАБЛИЦА 3.

Перечень наиболее распространенных БПЛА

Модель БПЛА	Управление, МГц	Видео, МГц
Лелека-100	410–480 2304–2390	2304–2390
Фурия	433–447 902–928	1200–1350
Poseidon	433 860	1240–1290
Heavy Shot	470–700 1200–1800 5200–5800	–
Баба-яга	1300–1500	1050–1950
FPV	315 433 700–915 840–845 868–916 900–928 2400–2483	910–1360 980 1405–1655 2300–2510 3300–3500 5330–5945
Shark		2200–2500
Dji		2300–2600 5650–5850
Autel 4T		832–860 904–926 1420–1450 2400–2485 5150–5250 5728–5847

– точная идентификация БПЛА на фоне окружающего пространства.

Недостатком данного метода обнаружения БПЛА необходимо выделить сложность реализации точного пеленгования направления полета БПЛА.

2.2 Подавление каналов управления и видеопередачи БПЛА

К эффективным методам подавления БПЛА является применение радиоэлектронного воздействия различными видами помех на каналы управления и передачи видеоизображений БПЛА.

Рассмотрим основные плюсы данного метода подавления:

- возможность полного блокирования линии связи между оператором и БПЛА, что приводит к неконтролируемому полету БПЛА или его падению;
- возможность полного искажения видеокadra в устройстве видеоприемника оператора БПЛА, что приводит к невозможности объективной оценки оператором БПЛА расположения атакуемой им цели;



РИС. 13.

Направления обмена информацией

- достаточно низкие энергетические и финансовые затраты при использовании прицельного типа помех;
- возможность одновременного подавления нескольких БПЛА.

Из минусов данного метода подавления БПЛА необходимо выделить невозможность подавления БПЛА, находящихся в режиме радиомолчания.

2.3 Уточнение концепции построения комплекса

Рассмотрев основные необходимые функции, возложенные на комплекс подавления БПЛА, возможно перейти к более подробному анализу концепции построения комплекса. Для реализации функции обнаружения сигналов БПЛА в составе комплекса необходимы следующие составные части:

- 1) приемная антенная система для обнаружения сигналов БПЛА;
- 2) приемный СВЧ тракт;
- 3) блок анализа сигналов и формирования помех в части приема и анализа сигналов.

Для реализации функции подавления каналов управления и передачи видеоизображений необходимы следующие составные части:

- 1) передающая антенная система для излучения помеховых сигналов;
- 2) передающий СВЧ тракт;
- 3) блок анализа сигналов и формирования помех в части формирования помеховых сигналов.

Дополнительной составной частью комплекса является система электропитания и входящие в нее модули преобразования электропитания. Исходя из обобщенной структуры обнаружения и подавления БПЛА, можно сформировать функциональную схему комплекса, представленную на рис. 14.

3. ОПИСАНИЕ СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ КОМПЛЕКСА

3.1 Антенная система комплекса

Антенная система комплекса представляет собой телескопическую вышку (рис. 15) из алюминиевого сплава на треноге из высокопрочной стали высотой 8 м, к которой крепятся приемные и передающие антенны. Вес мачты не превышает 18 кг, в сложенном со-

стоянии длина не превышает 1,7 м, поднимаемый вес не более 7,5 кг. Конструкция антенной мачты предусматривает тросовые растяжки и колья ветроустойчивости, с данными составными частями параметр ветроустойчивости достигает 20 м/с. На разворачивание мачты в рабочее положение уходит не более 5 мин.

К верхней части антенной мачты крепятся приемная и передающая антенны верхнего диапазона 1–6 ГГц, к поперечной балке крепятся приемная и передающая антенны нижнего диапазона 0,3–1 ГГц. Антенны соединяются с блоком обработки сигнала и формирования помех СВЧ кабелями.

3.2.2 Приемная антенна диапазона частот 0,3–1 ГГц

Для обеспечения приема и передачи сигналов в диапазоне частот 0,3–1 ГГц было принято решение об использовании биконической антенны с неравными размерами конусов (рис. 16). Для уменьшения массы прибора, упрощения изготовления и повышения ветроустойчивости было принято решение низкочастотную часть антенны изготавливать в виде сетки. На рисунке 17 представлен расчетный график значения КСВ по диапазону частота прибора БК-Д.

3.2.3 Приемная антенна диапазона частот 1–6 ГГц

Для приема сигналов в диапазоне частот 1–6 ГГц и в заданном секторе углов была разработана и изготовлена биконусная антенна (рис. 18). На рисунке 19 представлен расчетный график значения КСВ по диапазону частота прибора ДК1-Д.

3.2.4 Передающая антенна диапазона частот 0,3–1 ГГц

Для работы передатчика в диапазоне 0,3–1 ГГц была разработана антенная решетка из четырех биконических антенн (рис. 20). Антенна изготавливается в ветроустойчивом варианте, точки запитки защищены радиопрозрачным материалом. Все четыре излучателя в решетке запитываются равноамплитудно и синфазно от одного делителя. Данное решение имеет гибкую настройку в плане увеличения энергопотенциала передатчика при равенстве коэффициента усиления

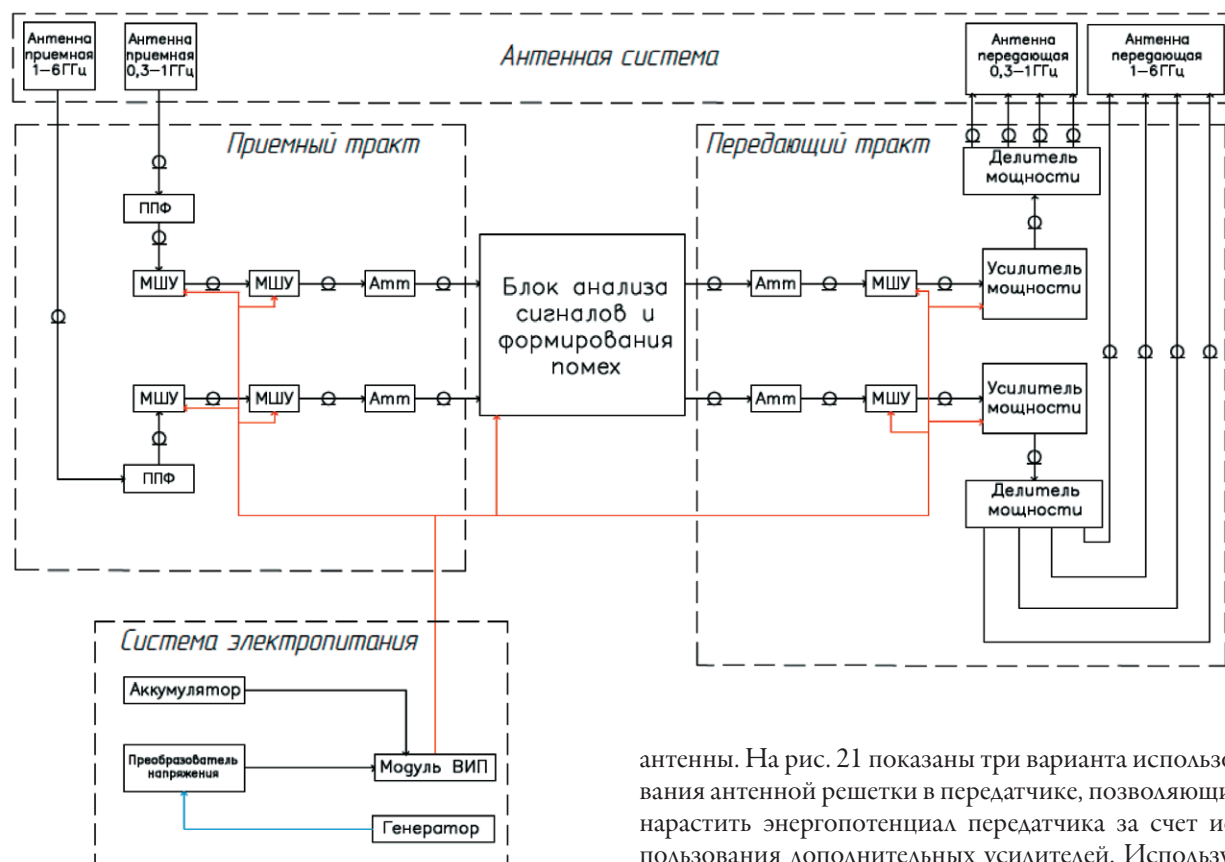


Рис. 14.

Функциональная схема комплекса



Рис. 15.

Антенная мачта

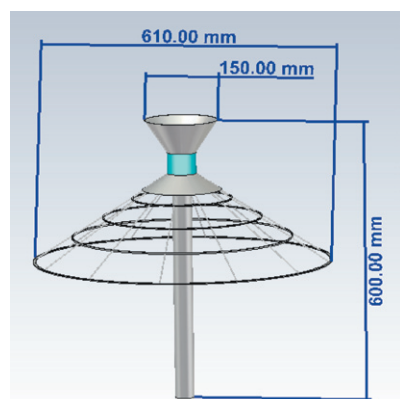


Рис. 16.

Прибор БК-Д

антенны. На рис. 21 показаны три варианта использования антенной решетки в передатчике, позволяющие нарастить энергопотенциал передатчика за счет использования дополнительных усилителей. Используя разные варианты, можно увеличить энергопотенциал до 4-х раз.

На рисунке 22 показаны расчетные коэффициенты обратного отражения каждого входа прибора БК4-Д по диапазону частот. Значение $-7,5$ дБ соответствует $KCB = 2,2$.

3.2.5 Передающая антенна диапазона частот 1–6 ГГц

Для работы передатчика в диапазоне 1–6 ГГц была разработана и изготовлена антенная решетка из четырех биконических антенн (рис. 23). Все четыре излучателя в решетке запитываются равноамплитудно и синфазно от одного делителя. Данное решение также имеет возможность увеличения энергопотенциала за счет использования дополнительных усилителей, как показано на рисунке 20. На рисунке 24 показаны расчетные коэффициенты обратного отражения каждого входа прибора ДК4-Д по диапазону частот. Значение -7 дБ соответствует $KCB = 2,5$. На рисунке 25 представлен график KCB прибора ДК4-Д при запитке его через делитель.

3.2 Блок анализа сигналов и формирования помех

Блок анализа сигналов и формирования помех представляет собой два восьмиканальных модуля ЦППМ-К. Разрабатываемый модуль SDR представляет собой многоуровневую высокочастотную печатную плату, ориентированную на профессиональное использование в условиях интенсивного радиочастот-

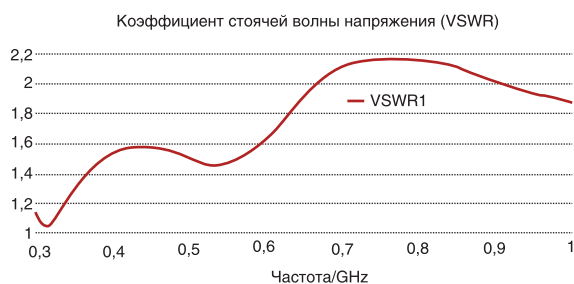


Рис. 17.
Расчетный график КСВ прибора БК-Д по диапазону частот

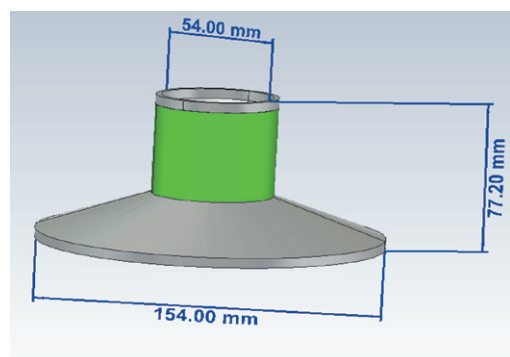


Рис. 18.
Прибор ДК1-Д

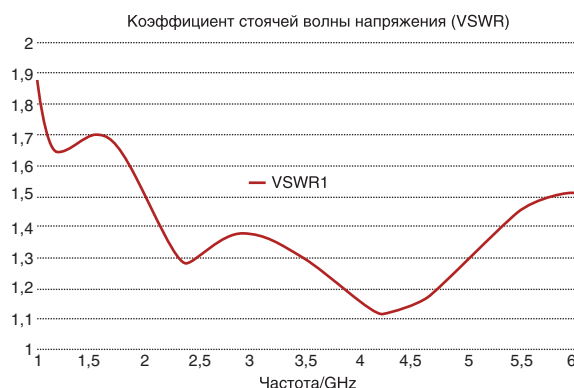


Рис. 19.
Расчетный график КСВ прибора ДК1-Д по диапазону частот

ного излучения, задачах радиомониторинга, анализа сигналов и постановки помех. При проектировании учтены особенности ВЧ-сигнальной целостности, минимизации перекрестных наводок, термостабильности и электромагнитной совместимости.

Ниже приведены ключевые конструктивные и схемотехнические особенности устройства.

Многоканальная архитектура: четыре полностью изолированных ВЧ канала (Rx/Tx), каждый реализован с независимым трактом от антенны до АЦП/ЦАП с минимальной связностью.

Когерентная синхронизация всех каналов через общий высокостабильный опорный генера-

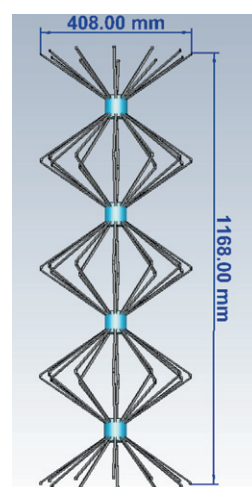


Рис. 20.
Прибор БК4-Д

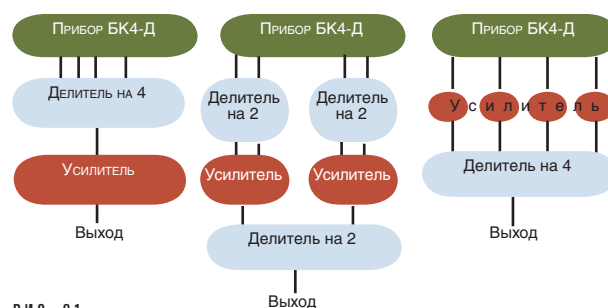


Рис. 21.
Варианты подключения усилителей к антенной решетке

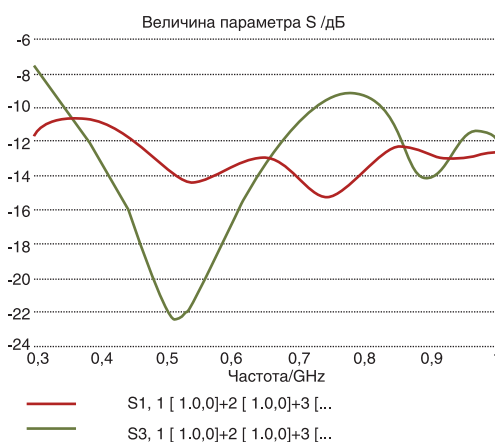
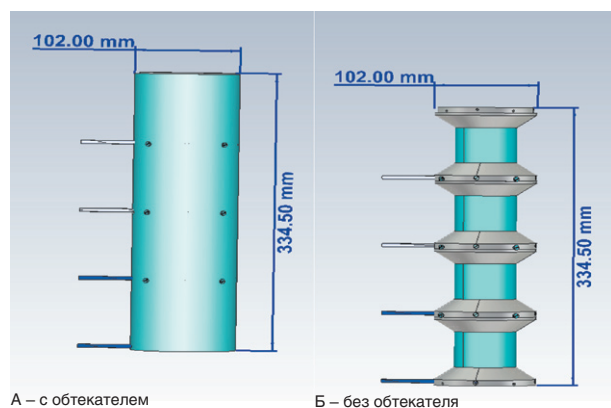


Рис. 22.
Расчетные графики обратного отражения входов прибора БК4-Д по диапазону частот

тор (ОСХО/ТСХО) с возможностью внешней GPSDO-подвязки.

Используются дискретные ВЧ-компоненты (усилители, фильтры, смесители), а не интегрированные «все-в-одном» решения, что повышает управляемость тракта и его адаптивность.

Разделение аналоговой и цифровой части на уровне материалов: аналог – RF-материал, цифровая



А – с обтекателем

Б – без обтекателя

РИС. 23.

Прибор ДК4-Д

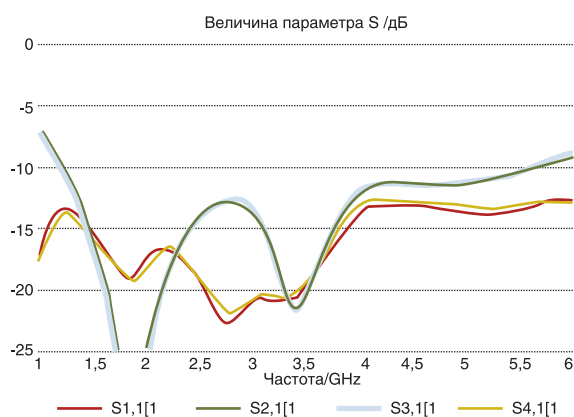


РИС. 24 .

Расчетные графики обратного отражения входов прибора ДК4-Д по диапазону частот

часть – FR-4. Импедансные трассы реализованы по микрополосковой или стриплайновой архитектуре с контролем отражений. Полностью раздельные «земли»: аналоговая, цифровая, силовая. Соединяются в одной точке через сеть развязки и дросселей. Вывод всех ВЧ-каналов через SMA разъемы с защитой от ЭМИ. Внешний вид модуля ЦППМ-К представлен на рисунке 26.

3.4 Система электропитания

Система электропитания комплекса и входящие в нее модули преобразования электропитания необходимы для формирования первичного электропитания (24 В) и вторичных напряжений электропитания, необходимых для функционирования составных частей комплекса.

Состав системы электропитания указан на рисунке 27:

- аккумуляторная батарея 24 В с зарядным устройством;
- преобразователь электропитания AC/DC (220/24);
- модуль вторичных источников питания (модуль ВИП);
- дизель-генератор 220 В, 50 Гц.

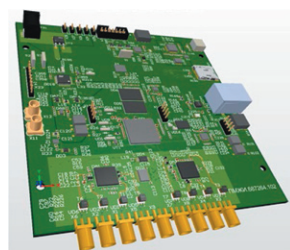


РИС. 26.

Внешний вид модуля ЦППМ-К

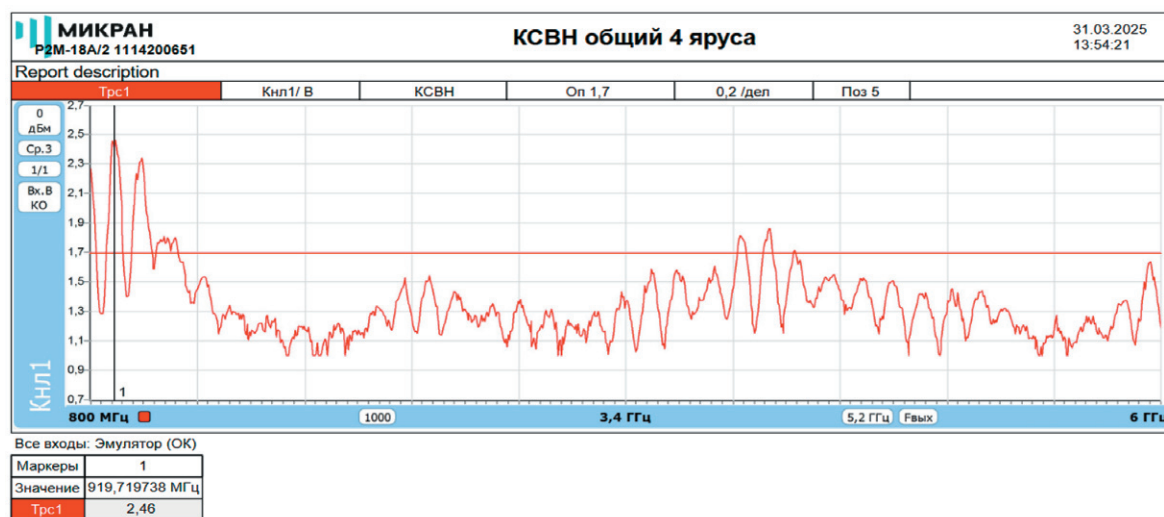


РИС. 25.

Измеренный график КСВ прибора ДК4-Д

4. ТАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСА

Развертывание комплекса выполняется вблизи защищаемого объекта. При необходимости длительно-го нахождения на позиции электропитание комплекса осуществляется от дизельного генератора, при постоянной смене позиций – от внутренней аккумуляторной батареи. При размещении комплекса основными параметрами, которые необходимо учитывать, являются сектора приема и излучения сигналов, указанные на рисунке 28.

Развертывание комплекса осуществляется в следующей последовательности:

1. Подготовка мачты.

2. Крепление антенной системы на мачту.
3. Развертывание мачты и ее установка.
4. Подключение антенной системы к блоку обработки сигналов и формирования помех.
5. Подключение электропитания (аккумуляторной батареи или дизельного генератора).

Время развертывания комплекса не превышает 10 минут.

В целях наиболее эффективного применения, развертывание комплекса необходимо выполнить на возвышенности, тем самым увеличив дальность воздействия на приемник видеосинформации (очки оператора).

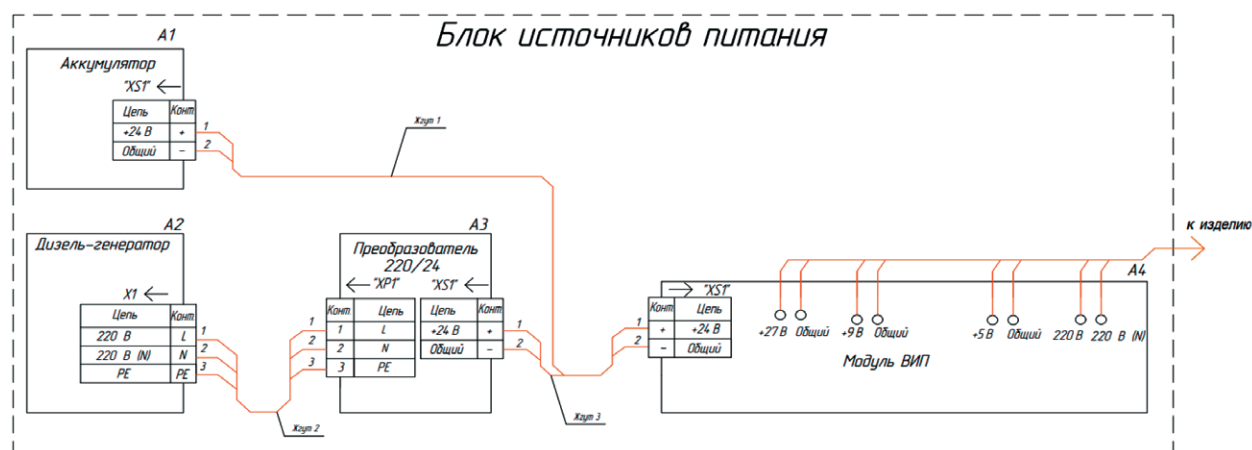


РИС. 27.

Структурная схема электропитания комплекса

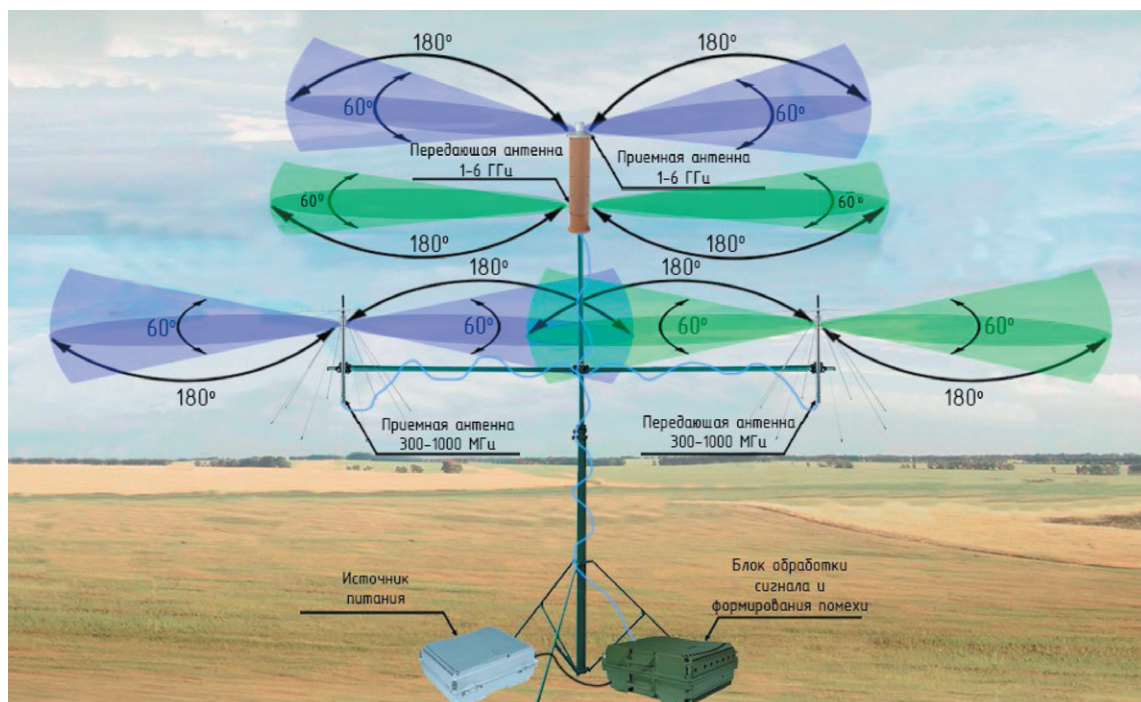


РИС. 28.

Сектора приема и излучения сигналов комплексом

Комплекс полностью автоматизирован, требует участия личного состава только в части транспортирования, разворачивания, включения электропитания и осуществления дозаправки дизельного генератора, а также зарядки встроенного аккумулятора.

Включение комплекса осуществляется сразу после подачи электропитания.

На корпусе блока обработки сигнала и формирования помех размещен индикатор исправности комплекса.

На аккумуляторной батарее имеется индикатор уровня заряда.

Схема применения комплекса указана на рис. 29.

При обнаружении сигналов управления и передачи видеoinформации, излучаемых атакующими БПЛА, комплекс излучает помеховые сигналы. Помеховый сигнал, предназначенный для подавления каналов управления, излучается в направлении атакующего БПЛА и приводит к потере управления. Помеховый сигнал, предназначенный для подавления каналов передачи видеoinформации, излучается в направлении оператора атакующего БПЛА и приводит к невозможности воспроизведения изображения на экране или в очках оператора. Результатом воздействия комплекса по БПЛА является невозможность выполнения боевой задачи и, соответственно, потере БПЛА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На сегодняшний день проблема массового использования БПЛА является очень актуальной, поэтому необходимо иметь инструмент для их подавления.

В настоящей статье приведено обоснование путей построения комплекса радиоэлектронного подавления БПЛА. В результате проработки исходных данных предложена концепция построения аппаратуры комплекса, предложен вариант, реализующий современную цифровую технологию формирования помеховых сигналов БПЛА.

Главными преимуществами предлагаемого комплекса являются: автономность, широкий диапазон обслуживаемых рабочих частот, всеракурсность приема сигналов и излучения помех, формирование помех прицельных по частоте, малое время разворачивания и готовности к работе, а также высокая мобильность.

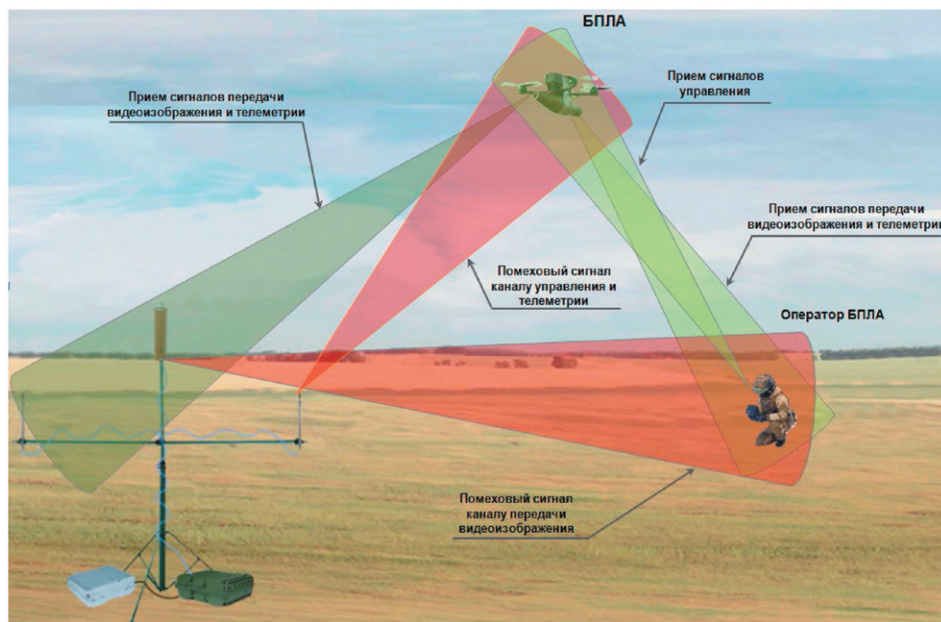


РИС. 29.

Схема применения комплекса

Результатом воздействия комплекса на БПЛА является потеря управления и/или невозможность воспроизведения изображения на экране (или очках) у оператора на большой дистанции, что, соответственно, приводит к невозможности выполнения боевой задачи и потере БПЛА.

Данный комплекс сможет обеспечить надежную защиту наземных объектов от БПЛА в радиусе 1 км.

Разработанный комплекс имеет открытую архитектуру построения, что позволяет расширять его состав (при необходимости) без значительных технических проблем.

Исмятов Д.Ш.,
инженер АО «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга»

☎ тел. +7 (499) 263-91-55, e-mail: id359@mail.ru

Кудрявцев А.С.,
инженер АО «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга»

☎ тел.: +7 (499) 263-98-04,
e-mail: sashakudryavtsew@mail.ru;

Морозов А.А.,
инженер АО «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга»

☎ 107078, г. Москва, ул. Новая Басманная, д. 20, стр. 9,
107078, Russia, Moscow, st. Novaya Basmanная, 20, 9
тел.: +7 (499) 263-98-04,
e-mail: alexandermorozof@gmail.com

УДК 001.891:331.556.4

DOI: 10.52531/1682-1696-2025-25-3-143-151

Научная статья

EDN: ZYPWIL

УТЕЧКА УМОВ ИЛИ ЭКСПОРТ БУДУЩЕГО? РОССИЯ ПЕРЕД ВЫБОРОМ

И.А. ТруновСоюза адвокатов России, Москва,
Российская Федерация

Автор поднимает вопрос о том, что массовый отток российских ученых и специалистов означает не только кадровые потери, но и фактический «экспорт будущего» — идей, открытий и технологий. В статье показаны масштабы интеллектуальной миграции и ее последствия для национальной экономики и безопасности. На основе анализа международных практик предложены пути решения — от гибких контрактов до программ двойной аффилиации. Подчеркивается, что возвращение талантов должно стать нормой для страны, стремящейся сохранить лидерство и научную школу, а не исключением.

Ключевые слова: инновационное развитие, «утечка умов», высококвалифицированные специалисты, кадровый дефицит, демографическая воронка, искусственный интеллект, огосударствление науки, национальная программа интеллектуальной репатриации, государственный комитет по науке и технике, научно-техническая политика, взаимодействие бизнеса и науки

Современные общества — это общества знаний и технологий, которые являются набором индикаторов уровня цивилизации, они являются языком, на котором цивилизация пишет свою историю. Когда лучшие умы покидают страну, нарушается непрерывность технологического развития, образуются пробелы инновационной системы государств. «Утечка умов», или интеллектуальная миграция, является серьезной проблемой мирового масштаба, угрожающая культурно-цивилизационному разнообразию в технологическом развитии человечества. Постоянный приток высококвалифицированных кадров в страны с развитой экономикой положительно сказывается на безопасности принимающих стран, поэтому в данных странах действует специальная нормативная

Original article

BRAIN DRAIN OR EXPORT OF THE FUTURE? RUSSIA AT A CROSSROADS

I.L. TRUNOVRUSSIAN BAR ASSOCIATION, MOSCOW,
RUSSIAN FEDERATION

The author argue that the mass exodus of Russian scientists and specialists represents not only a loss of personnel but also the actual “export of the future” – ideas, discoveries, and technologies. The article reveals the scale of intellectual migration and its consequences for the national economy and security. Based on an analysis of international practices, the authors propose possible solutions – from flexible contracts to dual affiliation programs. It is emphasized that the return of talent should become the norm for a country seeking to preserve its scientific schools and leadership, rather than an exception.

KEY WORDS: innovative development, “brain drain”, highly qualified specialists, personnel shortage, demographic funnel, artificial intelligence, nationalization of science, national program of intellectual repatriation, state committee on science and technology, scientific and technical policy, interaction between business and science

база, стимулирующая приток интеллектуальных мигрантов из-за рубежа. В это же самое время в странах-донорах тормозится развитие науки, военной промышленности, снижается уровень безопасности и экономические показатели. Индустриальные страны привлекают иностранных специалистов в количестве, намного превышающем реальные потребности. Многие мигранты (врачи, ученые) не могут устроиться по специальности и работают таксистами, сторожами, официантами, хотя часто даже неквалифицированная работа в стране с развитой инновационной системой оплачивается выше, чем труд физика-ядерщика, врача, инженера, профессора у него на родине.

Государства конкурируют за талантливых людей, США — лидер в «погоне за умами» — за последние десятилетия привлекли из развивающихся стран 250 000 высококвалифицированных специалистов [12]. Активную роль в этом процессе играют правоохранительные и контрразведывательные органы. К приме-

ру, Центральное разведывательное управление США (ЦРУ). Агенты спецслужбы следят за предстоящими научными конференциями по всему миру и выявляют те, которые их наиболее интересуют. Затем они вступают в контакт с талантливыми учеными и проводят их вербовку, предлагают сразу решить вопросы гражданства, проживания, финансирования и т.п. В последующем они же препятствуют возвращению ученых-эмигрантов на родину [2]. Многие российские ученые сталкиваются с серьезным противодействием «людей в штатском» в тех странах, где они проживают. Некоторых попросту отказываются выпускать, на других давят психологически, есть факты убийств при невыясненных обстоятельствах ученых, громко заявивших о желании вернуться. На поверку оказывается, что США, Англия, Канада и Германия не горят желанием расставаться с талантливыми российскими учеными [13].

За последние 25 лет Россия в целом понесла чистые кадровые потери в большинстве дисциплин, в особенности в пяти дисциплинах: нейронауках, науках принятия решений, математике, биохимии и фармакологии. Россия проигрывает в международном обмене высококвалифицированными специалистами.

Рисунок 1 показывает, что в первую пятерку стран переезда ученых вошли США, Германия, Великобритания, Франция, и Швеция, хотя их порядок варьировался в зависимости от основной области науки. США неизменно были наиболее распространенным местом назначения. Для физических и медицинских наук вторым и пятым по распространенности местом назначения были Германия, Франция и Великобрита-

ния. В сфере социальных наук второе-пятое места по популярности заняли Великобритания, Германия. В области естественных наук второе-пятое места по популярности заняли Германия, Великобритания, Франция и Швеция [32].

Россия развивает весь мир за свой счет. Это утечка мозгов, идей и разработок, с последующим приобретением наукоемкой продукции. За рубежом хотят работать половина российских ученых. Мы «доноры идей» для чужих экономик и проблема не столько в том, что многие специалисты уезжают от нас (из Англии тоже едут), проблема в том, что на много меньше едут к нам. Россия сталкивается с многослойным и системным оттоком человеческого капитала, который напрямую влияет на ее суверенитет, технологическое развитие и устойчивость как государства. Речь идет о кадровом голоде в высокотехнологичных, научных и образовательных сферах, вызванном сразу несколькими взаимосвязанными факторами: утечкой умов за рубеж, старением профессионального ядра, недостаточной подготовкой молодых кадров внутри страны и ухудшением демографической ситуации.

В России за 2010–2019 гг. было более 440 000 опубликованных исследователей (сравнимо с Австралией и Италией), которые выпустили почти 700 000 научных публикаций (сравнимо с Южной Кореей) [6].

Согласно заявлению статс-секретаря министерства образования и науки РФ Дмитрия Ливанова, в Европе работают по специальности более 25 тысяч ученых, эмигрировавших из России, а 30 тысяч работают за рубежом по временным контрактам [27]. Президент РАН А.М. Сергеев заявил, что в 1990-х и

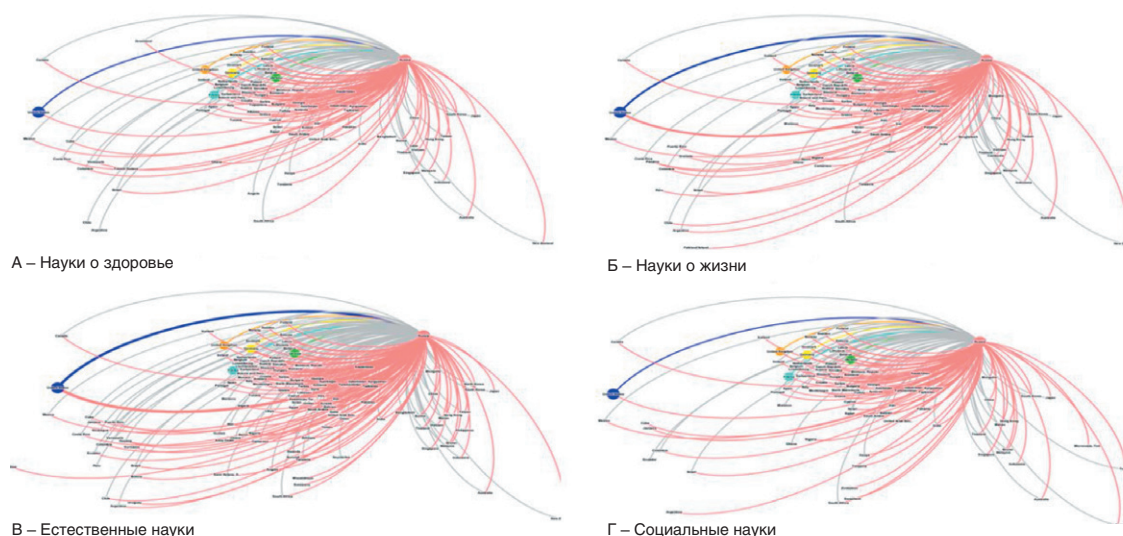


РИС 1.

Анализ международной миграции ученых по дисциплинам с использованием библиометрических данных Scopus за 1996–2020 гг.

начале 2000-х годов из России выехали 40 тысяч профессоров [9].

За последние 30 лет Россию покинули десятки тысяч высококвалифицированных специалистов – от математиков и физиков до врачей, айтишников и биоинженеров. По оценкам научных организаций и университетов, ежегодно уезжают до 70 000 человек с высоким уровнем образования, многие – навсегда. Отъезд сопровождается утратой научных школ, ослаблением прикладной науки, разрушением преемственности, дефицитом исследовательских групп. Особенно острая нехватка ощущается в таких направлениях, как искусственный интеллект, квантовые технологии, молекулярная биология, инженерия, нейронауки и стратегическая медицина.

По данным «Глобального инновационного индекса» (Global Innovation Index) 2024 г., Россия заняла 59-е место из 133 стран. Инновационный индекс за 2024 год составляет 29,7 балла, что ниже среднемирового показателя, составляющего 31,57 балла на основе данных из 132 стран [30]. Объясняется это недостаточной эффективностью национальной инновационной системы, которая имеет тенденцию к нарастанию, связанному с оттоком талантов и высококвалифицированных кадров за рубеж, уменьшающий возможности научного и технологического развития страны и конкурентоспособности российской экономики. "Утечка умов" – это глобальная проблема, с которой сталкивалась и продолжает сталкиваться на разных фазах своей экономической активности Российская Федерация, в потоке свободной трудовой миграции возрастает доля высококвалифицированных специалистов с высоким интеллектуальным потенциалом, которые становятся участниками уже не национального, а глобального рынка труда [28]. Причинами оттока исследователей становятся несоответствие уровня оплаты труда ожиданиям соискателей, устаревание научной инфраструктуры, дефицит источников и объемов финансирования исследований. Реализация целей технологического развития потребует большого количества высококвалифицированных специалистов. У ведущих ученых и специалистов должны расширяться возможности для самореализации, а также возможности роста благосостояния. Государство при этом должно предусмотреть соответствующие механизмы, которые позволят эти возможности реализовать, говорится в Концепции технологического развития России [22].

Вот как нам видится один из примеров недалеконovidных решений. В российском праве закреплена бронь от мобилизации для студентов и аспирантов. Российские же преподаватели, ученые, кандидаты и доктора наук, трудящиеся в вузах и НИИ, не могут рассчитывать на бронь от мобилизации. Правовое управление Госдумы не поддержало законопроект, который регламентировал такую льготу, Минобороны

также не поддержало версию законопроекта [16]. По данным пограничной службы ФСБ, число выехавших россиян с июля по сентябрь 2022 г. только в Казахстан, Армению, Киргизию, Таджикистан, Монголию и Абхазию стало рекордным за пять лет и составило 9,7 млн, многие рассматривали эти страны как временные с целью переезда в более развитые страны: США, Германию, Францию, Великобританию и Японию. Среди уехавших 14% составили сотрудники научного сектора [11], в основном представляющие молодые возрастные группы, и также большое количество высококвалифицированных специалистов. Только IT-специалистов уехало из России 100 000 в 2022 г. и не вернулись, сообщил глава Минцифры Максуд Шадаев [31].

Не лучшее воздействие оказали Государственные программы в сфере помощи возвращению на родину иностранных студентов, находящихся в России, действовавшие более 11 лет в рамках сотрудничества с Международной организацией по миграции [16].

В Глобальном индексе конкурентоспособности талантов Международной бизнес-школы INSEAD Россия вошла в топ-10 стран в разделе «Эмиграция изобретателей» [15], где изобретатель – это не просто человек, это «ходячий актив» с мультипликатором и одно открытие может рождать отрасли. Когда они уезжают, государство фактически безвозмездно экспортирует будущее.

Сегодня кадровый дефицит в научно-образовательной и высокотехнологичной сферах стал системной проблемой России. Он затрагивает ключевые институты: университеты, исследовательские центры, инжиниринговые компании, здравоохранение и стратегические производства. При этом ситуация имеет не локальный, а структурный характер – с нарастающим эффектом в течение ближайших 10–15 лет. Средний возраст профессоров и ведущих исследователей в университетах превышает 55 лет, а в некоторых научных институтах – 60 лет и выше [8]. Одновременно наблюдается дефицит среднего звена – тех, кто должен был бы прийти на смену: младших научных сотрудников, кандидатов и докторов наук в возрасте 30–45 лет. Именно это поколение массово уезжает за рубеж или уходит в бизнес. Система «академических династий» (учитель → ученик → ученик ученика) разрывается, школы прекращают свое существование, уникальные компетенции исчезают. Уход одного «носителя» знаний может быть равен исчезновению целой исследовательской ниши.

Сегодняшняя подготовка кадров в вузах количественно удовлетворительна, но с качеством сложности. Формально ежегодно выпускается достаточное число специалистов, но далеко не все из них остаются в профессии, а тем более в ВУЗах. Трудоустройство выпускников не по специальности стало массовым явлением в России. Более 50% молодых специалистов выбирают

профессии, не связанные с их дипломом, а еще 30% – даже не по профилю [23]. Эта ситуация кардинально отличается от практики в Германии, Японии или США [18]. Причины: ВУЗы России ежегодно выпускают сотни тысяч специалистов по экономике, юриспруденции и менеджменту, хотя рынок труда перенасыщен этими профессиями, но сохраняется дефицит технических специалистов. Вузовские программы не соответствуют реальным требованиям работодателей и отстают от современных трендов. Низок престиж научной карьеры. Недостаточны стартовые зарплаты и отсутствуют карьерные перспективы и т.п.

Отдельная проблема – рождаемость и демографическая воронка. Кадровый голод в науке и технологиях будет только усиливаться в связи с демографическим спадом. Уже сейчас в вузы поступают поколения, численно вдвое уступающие тем, кто учился в начале 2000-х. Дефицит кадров в России достиг критической отметки в 5 млн человек и может увеличиться в 4–5 раз до 20 млн к 2030 г. [10], к 2028 г. число школьников снизится с 18 млн в 2024 г. до 16,3 млн [3]. Это означает объективное сужение воронки отбора в науку, снижение конкуренции и качества, дальнейшее давление на «усыхание» исследовательской среды. Без внешнего вливания новых научных кадров (в том числе из числа уехавших специалистов) внутренние резервы страны могут быть исчерпаны. Россия вступает в фазу структурного кадрового дефицита, который невозможно преодолеть за счет только внутренних ресурсов. Подготовка новых специалистов требует времени, денег и инфраструктуры, а уезжают как раз те, кто уже обладает компетенциями.

Основные причины эмиграции специалистов носят комплексный характер: зарплаты исследователей, преподавателей и инженеров в России значительно уступают зарубежным аналогам. Владимир Путин во время встречи с участниками IV Конгресса молодых ученых выступил с заявлением, что уровень зарплаты является одним из важнейших показателей для привлечения молодых специалистов в науку и образование [20]. Во многих российских НИИ и вузах отсутствуют современное оборудование, экспериментальная база, а также условия для самостоятельной работы. Молодой ученый сталкивается с необходимостью либо подстраиваться под старые научные школы, либо покидать профессию. Научная среда забюрократизирована, грантовая отчетность, конкурсы, согласования часто преобладают над исследовательской деятельностью. Во многих институтах слабо развито внешнее партнерство, не поощряется участие в международных проектах, отсутствуют программы академической мобильности.

Отдельная нарастающая проблема – это Искусственный Интеллект – «троянский конь», который не случайно при огромных затратах на его создание предлагается бесплатно, потому что служит сборником

новых идей и открытий, черновиков научных работ, патентных замыслов. Вся информация, попадающая в приложения ИИ, не пропадает, а сортируется, анализируется и сохраняется. США под видом бесплатного предложения ведут системный сбор знаний по всему миру. Это опасно для национальной безопасности, в особенности, когда ученые используют в работе иностранный ИИ в исследованиях, связанных с ВПК, технологиями двойного назначения, интеллектуальной собственностью и прорывными научными исследованиями. Ученый или инженер сам добровольно выкладывает в «виртуального ассистента» то, что требует многомиллионных затрат на научную инфраструктуру, годы работы научных коллективов. Этот продвинутый инструмент используется одновременно и в помощь промышленному шпионажу, агентурной работе, хакерам, либо миграционному привлечению иностранных ученых. Это «бездонный сундук идей», из которого хозяева модели ИИ берут все ценное. Как нам видится, законодательство о защите данных при использовании ИИ находится на стадии умышленно медленной разработки.

Рассмотрим мировой опыт интеллектуальной репатриации. Различные страны с разным уровнем экономического и научного развития осознали важность обратной интеллектуальной миграции как инструмента укрепления своих исследовательских систем. Опыт стран, которые добились успехов в этой сфере, демонстрирует, что возврат уехавших специалистов требует системного, гибкого и мотивирующего подхода. Рассмотрим несколько примеров.

Китай. Самая известная программа репатриации ученых запущенная 2008 г., Thousand Talents Plan (ТТР) "План тысячи талантов" [33]. В Китай вернулись порядка 200 тыс. ученых, которые работали в основном в Америке, Японии и Австралии. Возвращенцев дополнительно стимулировало то, что каждый год государственные расходы на науку в Китае увеличивались на 20%, и в один прекрасный момент оказалось, что китайцам просто нет смысла уезжать в поисках более высокого материального уровня. Зарплата ученого в Китае превысила среднюю австралийскую и приблизилась к американской. Китайские университеты в среднем платят первым авторам более 43,000 долларов США за публикацию в журналах Science или Nature, с максимальными выплатами до 165,000 долларов США [29]. В Америке столько получают только успешные, хорошо известные в своей среде научные работники. Воспрепятствованию осуществления программы выступили правоохранительные органы и контрразведывательные органы США, Австралии, Канады. США расценили программу «План тысячи талантов» как представляющую угрозу национальной безопасности, заявила ФБР. В результате прессинга со стороны США и других стран Китай в 2019 г. программу сократил и переименовал в «План

привлечения высококлассных иностранных экспертов» (National High-end Foreign Experts Recruitment Plan), но запустил еще ряд общенациональных программ, включая: Qiming («Просвещение»), Huojia («Факел»), Chang Jiang Scholars Award Program (Программа стипендий имени Чан Цзяна) и т.п.

Южная Корея. Программы возвращения корейских ученых «Brain Return 500» («Возврат мозгов 500») начаты с конца 1990-х годов, в рамках которых привлекаются вузы, государственные фонды, частные компании. Институт фундаментальных наук (IBS Institute for Basic Science) с 2011 г. – центральный элемент стратегии привлечения талантов. Он объединяет 30 исследовательских центров с более чем 60 исследовательскими группами по всей стране со штаб-квартирой в Тэджоне. Но отток продолжается, и 9,2% южнокорейских академических работников переехали за границу между 2021 и 2024 гг., что на 2% больше, чем в 2017–2020 гг., что указывает на продолжающиеся проблемы с удержанием талантов.

Бразилия. Государственная программа возврата ученых через «Conhecimento Brasil» (2024–2029). В 2024 году Бразилия запустила национальную стратегию стимулирования научной репатриации через Национальный совет по научному развитию (CNPq). В рамках стратегии выделено 190 млн долларов на пятилетний цикл. Более 2500 бразильских исследователей и исследовательниц, базирующихся в 56 странах, проявили интерес к возвращению в Бразилию или сотрудничеству с национальными учреждениями и компаниями. Большинство приедет из США, Германии, Франции, Португалии и Англии, но возвращающиеся исследователи не имеют гарантий трудоустройства и после окончания стимулирующих стипендий могут запросто вернуться обратно за границу. Размеры стипендий репатриантам больше зарплат адъюнкт-профессоров и доцентов университетов и намного превышают федеральные стипендии на тех же уровнях, что привело к забастовке не уезжавших ученых.

Результаты и методы программ возвращения и удержания на родине ученых в разных странах различны. Так, Польша – Программа «Polish Returns от NAWA»; Испания – «Программа Ramón y Cajal»; Аргентина – Программа «Raíces»; Колумбия – Сеть «Red Caldas» (с 1991); Мексика – «Red Global MX», ранее «Red de Talento Mexicano»; Индия – «Ramalingaswami Re-entry Fellowship» и т.д. Опыт ошибок и успехов, достигнутый в рамках реализации программ репатриации, особенно интересен для России.

В России действует Государственная программа по оказанию содействия добровольному переселению в РФ соотечественников, проживающих за рубежом [26]. Программа имеет гуманитарно-благотворительный характер оказания помощи в добровольном возвращении в Россию. Направлена на поддержку этнических русских и русскоговорящих

и не ставит специальных задач по технологическому развитию или созданию стимулов для переселения высококвалифицированных специалистов и ученых. Российская программа переселения и возврата соотечественников бьет, что называется, по площадям. Возвращаются наименее востребованные в научном и экономическом плане специалисты. Часто это малоимущие и возрастные группы переселенцев. Страна же нуждается в специалистах, научных кадрах, обучившихся и работавших за границей, а также в привлечении иностранных ученых в стратегически важные отрасли. В России отсутствует широкая и системная программа привлечения именно научных и профессиональных кадров. Это создает значительный пробел в подходах к решению проблемы «утечки мозгов».

Попытка сформировать программу репатриации именно ученых была. 24.09.2015 г. на заседании Правительства РФ Константин Ромодановский, на тот момент директор Федеральной миграционной службы РФ, анонсировал старт проекта по переселению ученых и научных работников. «К сентябрю 2015 г. 44 ученых, которые имеют степени докторов и кандидатов технических, экономических и медицинских наук, уже переселились в Россию, а 21 человек находится в стадии оформления». При этом Российская Академия Наук (РАН) в 2015 г. доложила о возвращении 420 инженеров и ученых, занимающихся наиболее актуальными научными и технологическими проблемами [7]. По поручению правительства эта работа велась Федеральной миграционной службой совместно с Федеральным агентством научных организаций (ФАНО) и РАН. Позднее представители ФАНО, отвечая на вопросы журналистов, не знали, что именно ему Правительство поручало разрабатывать предложения по развитию проекта по переселению ученых в Россию. РАН ничего не смогла объяснить по поводу цифр и не имеет никаких возможностей для разработки такой программы. Найти переселившихся ученых не удалось. Запуск программы по возвращению ученых оказался пустыми, но красивыми словами.

В 2010 г. запустили Федеральную программу «Mega Grant» (Постановление Правительства РФ №220 [17]). Цель программы – создание в российских университетах и научных организациях исследовательских лабораторий мирового уровня под руководством ведущих российских и зарубежных ученых [19]. Программа действует уже более 10 лет, за это время в 150 организациях было создано 345 лабораторий в 37 субъектах РФ. В этой программе участвуют 186 ученых из 135 стран, представляющих зарубежные лаборатории [4]. В 2024 г. прошел 10-й конкурс с выделением до 500 млн руб. для проектов опытных ученых (5 лет), до 30 млн руб. для молодых исследователей (2 года). В 10-м конкурсе «Mega Grant» (2024) поступило 102 заявки на проекты опытных ученых – победителями стали 8 проектов, которые будут реализовываться

в российских вузах и научных организациях под руководством ведущих ученых из Беларуси, Великобритании, Италии, Нидерландов, Франции, Швеции и Японии. Зарубежные ученые, получившие грант, должны будут работать в России минимум 3 месяца в 2024 г., минимум 6 месяцев в 2025 г. Ставка сделана как на ученых, проживающих в России, так и на иностранных заявителей, программа не имеет целью репатриацию отечественных ученых. Проблемой является стратегическая краткосрочность данной программы: гранты выделяются, но при отсутствии системных изменений удержать ученых надолго не получится. За 14 лет программа привлекала около 100 ученых ежегодно и часть из них репатрианты, но только за 2022–2024 гг. потери уехавших составили десятки тысяч исследователей, в особенности активно уезжают молодые ученые, что критично для воспроизводства научных кадров.

Сегодня России необходима не просто программа, а государственная политика в сфере международной миграции специалистов и ученых, которая учитывала бы опыт зарубежных стран. России необходимо включиться в развернутую конкурентную борьбу, в которой активно участвуют США, Китай, Канада, Великобритания, Германия и др. Правительства этих государств принимают комплекс мер из арсенала миграционной политики для стимулирования возврата выехавших за рубеж студентов, эмигрировавших высококвалифицированных специалистов, создавая привлекательные условия для их проживания и перспективы профессионального роста. К таким мерам относятся: гибкая система квот для временной иммиграции специалистов; специальные программы, стимулирующие приток дефицитных категорий специалистов; упрощение процедуры и условий найма для высококвалифицированных специалистов; возможность работы на своей территории после окончания учебы для иностранных студентов.

В тесной связи с миграционными мерами должны осуществляться специальные мероприятия, относящиеся к области политики в сфере образования и инноваций, призванные не только содействовать возвращению высококвалифицированных специалистов, обучавшихся и работавших за границей, а также заинтересовывать проживающих в стране специалистов и студентов не уезжать, а работать на родине. К таким мерам можно отнести финансовую поддержку – наличие системы грантов, налоговые стимулы, программы содействия переселению ученых-эмигрантов. Возможно возрождение отдельного государственного органа, Государственного комитета по науке и технике, который бы занимался формированием научно-технической политики, в том числе, разработкой и реализацией программ по переселению ученых и научных работников, налаживанием взаимодействия бизнеса и науки и оценкой научных институтов через критерий внедрения в производство, открытий, изо-

бретений и результатов поисковых исследований. На начальном этапе целью может быть даже не возврат уехавших, а снижение или остановка оттока.

Возможная Национальная программа интеллектуальной репатриации должна быть оформлена как межведомственный проект при участии Министерства науки и высшего образования, Службы внешней разведки, Минцифры, Минэкономразвития, крупных университетов, госкорпораций и институтов развития (РВК, Сколково, ВЭБ.РФ). Целевое управление следует возложить на отдельный Комитет по науке с возможностью прямого взаимодействия с Правительством. Ключевые цели программы: возвращение в Россию квалифицированных специалистов и ученых; восстановление научных школ и исследовательских команд; ликвидация кадровых провалов в стратегических отраслях; развитие научно-инновационного интегрирования бизнеса и науки.

Нужно понимать, кого возвращать и зачем возвращать. Возвращать полностью или частично, регламентируя в том числе международные контакты и работу «научными посланниками». Полноценная репатриация не всегда возможна или необходима, подход должен быть гибким. Для ряда категорий (профессора, предприниматели, ученые с зарубежной аффилиацией) целесообразно предлагать механизмы: проектная репатриация – работа в России по контракту 3–6 месяцев в год; дистанционная репатриация – работа над российскими научными и технологическими проектами с сохранением зарубежной локации; двойная аффилиация – признание трудового стажа и научных результатов, полученных в сотрудничестве с российскими учреждениями.

Работа по созданию благоприятного климата для деятельности российских ученых идет, в том числе и над созданием современной исследовательской инфраструктуры. Так, Стратегией научно-технологического развития РФ [24] к 2030 г. запланировано увеличение в два раза финансирования науки и НИОКР за счет частного сектора. Для этого необходимо налаживать отраслевое взаимодействие между НИИ, ВУЗами и профильными союзами предпринимателей как инструмента открытости и коммерциализации научных разработок. В России науку финансирует государство, а не бизнес, в пропорции 70% против 30% [1, 5]. Это один из самых высоких уровней огосударствления науки. В западных странах пропорция противоположная – в среднем 75% на 25% в пользу предпринимателей. Как следствие, ученые работают в государственных учреждениях, где зарплаты значительно ниже, чем в бизнес-ориентированной науке. Необходимо совершенствование нормативно-правового регулирования процесса научно-инновационного интегрирования бизнеса и науки, рабочих схем финансирования бизнесом научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, поэтапное увеличение

частных инвестиций на научные исследования, с привлечением денег массового бизнеса в науку, развитие частно-государственного партнерства [25].

Россия богата талантами, но бедна механизмами их удержания, развития и возврата. Сегодня, когда границы стали не столько географическими, сколько технологическими, страна уже не может позволить себе терять тех, кто способен создавать новое знание, проектировать будущее и защищать ее интеллектуальный суверенитет. Утечка умов – это не просто статистика отъезда, это потеря научных школ, исследовательского инстинкта, менторства, прорывных идей, живой связи поколений, того, что строится десятилетиями и может быть утрачено за одно поколение.

Те, кто уехал, должны вернуться – не в прежнюю Россию, а в страну, которая осознает их ценность, признает их вклад и создает для них условия не просто выживания, а развития. Чтобы это стало возможным, требуется политическая воля, межведомственная координация, нормативная база и финансовые инструменты. Возвращение лучших должно быть не исключением, а нормой. Нормой для сильной, разумной и живой страны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ведущие эксперты предложили изменить систему управления российской наукой // РБК 23.04.2024. URL: <https://www.rbc.ru/newspaper/2024/04/23/662622be9a79471728714a8e>
2. Возвращению ученых-эмигрантов в Россию противодействуют западные спецслужбы и отечественные чиновники // РАН 2025. URL: <http://www.ras.ru/digest/shownews.aspx?id=fd0273df-2a40-49cb-804d-aae0c68cad3f>
3. В России к 2028 году ожидают снижение числа школьников до 16,3 млн // ИТАР-ТАСС 21.05.2024. URL: <https://tass.ru/obschestvo/24012261>
4. Встреча Президента РФ с получателями мегагрантов и ведущими учеными / Сайт Президента РФ. 13.06.2024. URL: <http://en.kremlin.ru/events/president/news/74274>
5. Глава Минцифры сообщил о 100 000 уехавших из России айтишников // РБК 20.12.2022. URL: <https://www.forbes.ru/tekhnologii/482755-glava-mincifry-soobshil-o-100-000-uehavsih-iz-rossii-ajtisnikov>
6. Данные за 2010–2019 годы / SciVal (Elsevier) URL: <https://www.scival.com> (дата обращения: 05.09.2025)
7. Доклад Константина Ромодановского о реализации госпрограммы по переселению соотечественников / Официальный сайт Правительства РФ. URL: <http://government.ru/news/19785/>
8. Еще раз о возрасте преподавателей в российских вузах: старые проблемы и новые тенденции // Высшее образование в России. 2023. Т. 32. № 3. URL: <https://vovr.elpub.ru/jour/article/view/4270>
9. Звучание научного оркестра // Санкт-Петербургские ведомости 22.01.2020. URL: <https://spbvedomosti.ru/people/artem-totolyan/>
10. Кадровый голод в России: дефицит может вырасти до 20 миллионов к 2030 году // Издание Правительства Санкт-Петербурга 29.07.2025. URL: <https://spbdeevnik.ru/news/2025-07-29/kadrovyy-golod-v-rossii-defitsit-mozhet-vyrasti-do-20-millionov-k-2030-godu>
11. Международная миграция российских исследователей социальных и гуманитарных наук / Магистерская диссертация. М.: НИУ ВШЭ, 2024. URL: <https://www.hse.ru/ba/epa/students/diplomas/926676246>
12. Митин Д.Н. Интеллектуальная миграция: сущность, последствия и пути решения // Вестник РУДН, серия Политология, 2021. № 1.
13. Мозги выносят! // Газета «Наша версия», 21.12.2009. URL: <https://versia.ru/vozvrashheniyu-uchyonyx-yemigrantov-v-rossiyu-protivodejstvuyut-zapadnye-specsluzhby-i-otechestvennye-chinovniki>
14. Мотрович И.Д., Васильева Н.Л. Правовые и организационные основы сотрудничества РФ с Международной организацией по миграции. Административное право и процесс // КонсультантПлюс. 2023. № 11.
15. Наука возвращать // РБК 20.12.2017. URL: <https://plus.rbc.ru/news/5a383fb57a8aa911715b48e9>
16. Отсрочку не возводят в степень // Коммерсант 17.01.2023. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/5773599>
17. Постановление Правительства РФ от 09.04.2010 № 220. «О мерах по привлечению ведущих ученых».
18. Почему все больше выпускников в России идут работать не по специальности // Газета России 17.05.2025. URL: <https://gor.press/articles/society/pochemu-vse-bolshe-vypusknikov-v-rossii-idut-rabotat-ne-po-speczialnosti/>
19. Присоединиться к программе мегагрантов // Национальные проекты РФ. URL: <https://национальныепроекты.рф/opportunities/prisoedinitysya-k-programme-megagrantov/>
20. Путин назвал зарплату важным стимулом для привлечения молодежи в науку // Аргументы и факты 02.12.2024. URL: <https://aif.ru/politics/putin-nazval-zarplatu-vazhnym-stimulom-dlya-privlecheniya-molodezhi-v-nauku>
21. Путин заявил о хорошей тенденции с возвращенцами // РБК 12.09.2023. URL: <https://www.rbc.ru/politics/12/09/2023/64fff94b9a79473e364bcd6f6>
22. Распоряжение Правительства РФ от 20.05.2023 № 1315-р (ред. от 21.10.2024). «Об утверждении Концепции технологического развития на период до 2030 года».
23. Стало известно, сколько выпускников вузов в РФ работают не по специальности // Газета Gazeta.

- ru 15.05.2025.. URL: <https://www.gazeta.ru/social/news/2025/05/15/25789844.shtml>
24. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации. Утверждена Указом Президента РФ от 28.02.2024 № 145.
 25. ТРУНОВ И.А. О концепции инновационной интеграции науки и бизнеса // Вестник образования и развития науки РАН. 2024. № 4. С. 39–46.
 26. Указ Президента РФ от 22.06.2006 № 637 (ред. от 18.09.2024). «О мерах по оказанию содействия добровольному переселению в РФ соотечественников, проживающих за рубежом».
 27. Утечка мозгов // Wikipedia. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Утечка_мозгов
 28. ШАХВЕРДИЕВ А.Х. Судьба инноваций и инноваторов // Нефтяное Хозяйство. 2000. № 6.
 29. Cash bonuses for peer-reviewed papers go global / Science. 10/08/2017. URL: <https://www.science.org/content/article/cash-bonuses-peer-reviewed-papers-go-global>
 30. Global Innovation Index data / GlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/russia/gii_index/
 31. Russian Minister of Digital Development reported 100,000 IT specialists left Russia // Forbes 20.12.2022. URL: <https://www.forbes.ru/tekhnologii/482755-glava-minicfry-soobsil-o-100-000-uehavsih-iz-rossii-ajtisnikov>
 32. Springer Nature. 2021. Vol. 126. P. 7875–7900, URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11192-021-04091-x>
 33. Thousand Talents Plan / Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Thousand_Talents_Plan
 - ajtisnikov
 6. Data for 2010–2019. SciVal (Elsevier) URL: <https://www.scival.com> (accessed: 09/05/2025)
 7. Report by Konstantin Romodanovsky on the implementation of the state program for the resettlement of compatriots. Official website of the Government of the Russian Federation. URL: <http://government.ru/news/19785/>
 8. Once again about the age of teachers in Russian universities: old problems and new trends. *Higher education in Russia*. 2023;32;(3). URL: <https://vovr.elpub.ru/jour/article/view/4270>
 9. The Sound of a Scientific Orchestra. *Sankt-Peterburgskie Vedomosti*. 01.22.2020. URL: <https://spbvedomosti.ru/people/artem-totolyan/>
 10. Personnel Shortage in Russia: The Deficit Could Grow to 20 Million by 2030. Publication of the Government of St. Petersburg 07/29/2025. URL: <https://spbndnevnik.ru/news/2025-07-29/kadrovyy-golod-v-rossii-defitsit-mozhet-vyrasti-do-20-millionov-k-2030-godu>
 11. International migration of Russian researchers in social sciences and humanities. Master's thesis. Moscow: NIU VSHE. 2024. URL: <https://www.hse.ru/ba/epa/students/diplomas/926676246>
 12. MITIN D.N. Intellectual migration: essence, consequences and solutions. *Vestnik RUDN, seriya Politologiya*, 2021;1.
 13. They're driving you crazy! *Nasha Versiya*. 12.21.2009. URL: <https://versia.ru/vozvrashheniyu-uchyonnyemigrantov-v-rossiyu-protivodejstvuyut-zapadnyespecsluzhby-i-otechestvennye-chinovniki>
 14. MOTROVICH I.D., VASILYEVA N.L. Legal and organizational foundations of cooperation between the Russian Federation and the International Organization for Migration. Administrative law and process. *ConsultantPlus*. 2023;11.
 15. Thescienceofreturning. *RBC*. 20.12.2017. URL: <https://plus.rbc.ru/news/5a383fb57a8aa911715b48e9>
 16. Deferment is not raised to a power. *Kommersant* 01.17.2023. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/5773599>
 17. Resolution of the Government of the Russian Federation of 09.04.2010 N 220. "On measures to attract leading scientists."
 18. Why more and more graduates in Russia are going to work outside their fields. *Gazeta Rossii*, May 17, 2025. URL: <https://gor.press/articles/society/pochemu-vse-bolshe-vypusknikov-v-rossii-idut-rabotat-ne-po-speczialnosti/>
 19. Join the mega-grant program. National Projects of the Russian Federation. URL: <https://национальныепроекты.рф/opportunities/prisoediniysya-k-programme-megagrantov/>
 20. Putin called salaries an important incentive for attracting young people to science. *Argumenty i facty*, December 2, 2024. URL: <https://aif.ru/politics/>

REFERENCES

1. Leading experts proposed changing the Russian science governance system. *RBC*. 04.23.2024. URL: <https://www.rbc.ru/newspaper/2024/04/23/662622be9a79471728714a8e>
2. Western intelligence agencies and domestic officials are resisting the return of émigré scientists to Russia. *RAN* 2025. URL: <http://www.ras.ru/digest/shownews.aspx?id=fd0273df-2a40-49cb-804d-aae0c68cad3f>
3. The number of schoolchildren in Russia is expected to decrease to 16.3 million by 2028. *ITAR-TASS* 05.21.2024. URL: <https://tass.ru/obschestvo/24012261>
4. Meeting of the President of the Russian Federation with mega-grant recipients and leading scientists. Website of the President of the Russian Federation. June 13, 2024. URL: <http://en.kremlin.ru/events/president/news/74274>
5. The head of the Ministry of Digital Development, Communications and Mass Media reported on 100,000 IT specialists leaving Russia. *RBC* December 20, 2022. URL: <https://www.forbes.ru/tekhnologii/482755-glava-minicfry-soobsil-o-100-000-uehavsih-iz-rossii-ajtisnikov>

- putin-nazval-zarplatu-vazhnym-stimulom-dlya-privlecheniya-molodezhi-v-nauku
21. Putin announced a good trend with returnees. *RBC* 09.12.2023. URL: <https://www.rbc.ru/politics/12/09/2023/64fff94b9a79473e364bcd6f6>
 22. Order of the Government of the Russian Federation of 05.20.2023 N1315-r (as amended on 10.21.2024). "On approval of the Concept of Technological Development for the period up to 2030."
 23. It has become known how many university graduates in the Russian Federation work outside their specialty. *Gazeta.ru*. 15.05.2025. URL: <https://www.gazeta.ru/social/news/2025/05/15/25789844.shtml>
 24. Strategy for Scientific and Technological Development of the Russian Federation. Approved by Decree of the President of the Russian Federation of 28.02.2024 N 145.
 25. TRUNOV I.L. On the concept of innovative integration of science and business. *Vestnik obrazovaniya i razvitiya nauki RAYEN*. 2024;4:39–46.
 26. Decree of the President of the Russian Federation of 22.06.2006 N 637 (as amended on 18.09.2024). "On measures to assist the voluntary resettlement of compatriots living abroad to the Russian Federation."
 27. Brain drain. Wikipedia. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Утечка_мозгов
 28. SHAKHVERDIEV A.KH. The fate of innovations and innovators. *Neftyanoye Khozyaystvo* 2000;6.
 29. Cash bonuses for peer-reviewed papers go global / Science. 10.08.2017. URL: <https://www.science.org/content/article/cash-bonuses-peer-reviewed-papers-go-global>
 30. Global Innovation Index data. GlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/russia/gii_index/
 31. Russian Minister of Digital Development reported 100,000 IT specialists left Russia. *Forbes*. 20.12.2022. URL: <https://www.forbes.ru/tekhnologii/482755-glava-mincifry-soobsil-o-100-000-uchavsih-iz-rossii-ajtisnikov>
 32. Springer Nature. 2021;126:7875–7900, URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11192-021-04091-x>
 33. Thousand Talents Plan. *Wikipedia*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Thousand_Talents_Plan

Трунов Игорь Леонидович,
к.э.н., д.ю.н., профессор, президент Союза адвокатов Рос-
сии, председатель комитета по науке МКПП

✉ 125080 г. Москва, Волоколамское ш., д. 15/22,
125080, Moscow, Volokolamsk Highway, 5/22,
тел.: +7(499) 158-85-81, e-mail: trunov08@yandex.ru

МЕСТО ФИЛОСОФИИ В РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМ ГОРНОГО ДЕЛА

В.Ж. АРЕНС

В современном разделении научных знаний горного дела для решения насущных проблем производства, экономики, экологии и общественной жизни предложено использовать философское осмысление горного дела (ФГД).

Начнем издалека. Сегодня полезные ископаемые являются источником получения большинства необходимых человечеству предметов потребления. Знания для поиска, разведки, добычи и передела полезных ископаемых в товары и услуги с годами необходимы все в больших масштабах не только для совершенствования известных технологий, но, главное, для поиска новых решений, связанных с исчерпанием запасов многих полезных ископаемых, которых для существующих технологий хватит едва ли на два–три десятка лет. Вполне возможно, что придется осуществлять процесс создания месторождений в глубинах недр земли. А это потребует глубоких размышлений и опытных работ, основанных на знаниях многих наук, в том числе и философии.

Что такое философия? С греческого – это любознательность, любовь к истине. Ее определение многопланово. В философии речь идет об истине, о путях ее достижения, о целостности бытия. Согласно Платону, философия занимается познанием сущего, по Аристотелю она исследует причины и принципы вещей. Для И. Канта философия – это понимание ею мира, наука об отношении всего познания к целям человеческого разума. Все эти вопросы – ведущие философские темы. То есть философия – это стремление к теоретической и практической обстоятельности, формирование мировоззрения, достижение результата посредством своего разума, уяснение себе мира и самого себя.

Философия как система под-

деляется обычно на теорию познания, метафизику (учение о сущем, о сущности мира, о человеке), логику, этику, философию истории, культуры, экономики, социологии, морали, права, жизни и т. д. В последние десятилетия активно развивается философия химии, физики, техники, знакомство с которыми помогут нам продвинуться в формулировании вопросов философии горного дела.

Горное дело (ГД) – древнейшая область деятельности человека. Само становление человека во многом произошло в результате использования различных предметов, добытых из недр Земли. Именно деятельность человека в природе позволила ему преобразовать себя и общество. Горное производство насчитывает по меньшей мере четыре тысячи лет технологической эволюции. Ф. Энгельс в работе «Происхождение семьи, частной собственности и государства» указывал на огромную роль минерального сырья в развитии человеческого общества. Можно утверждать, что через ГД человечество вышло к современной цивилизации. Более того, и сегодня оно от него зависит, а жизнь России и в будущем напрямую связана с успехами горного производства.

В античную эпоху проблемы ГД обсуждались в работах древних греков (Платон, Аристотель, Демокрит, Теофраст, Геродот) и мыслителей Римской империи (Тит Ливий, Ветрувий, Эпиктет, Плиний Старший). В средние века сфера деятельности ГД сильно расширилась. Г. Агрикола в своих

работах, изданных в 1554 г., обобщил опыт разведки, добычи и металлургической переработки руд. Он указал, что «горняку нельзя быть несведущим во многих других науках и искусствах, прежде всего в философии, дабы он мог знать происхождение подземного мира, ибо, благодаря этому, сможет находить более легкий путь к недрам Земли и получать из них обильные плоды». Значительные работы по ГД в XVIII веке выполнил М.В. Ломоносов, связав их с фундаментальными исследованиями. (Труды по минералогии, металлургии и горному делу. 1741–1763 гг. «Первые основания горной науки». Это рукопись 1741 г. положила начало книге «Первые основания металлургии и рудных дел»).

В начале XX века известный русский ученый и инженер П.К. Энгельмаер предложил рассматривать философию техники как самостоятельный раздел философии, имеющий собственный предмет исследований. Он анализирует роль техники в культуре, показывая ее роль в развитии во всех областях знаний от хозяйственной деятельности до искусства, права и многих других наук. Продолжая мысли автора, можно утверждать, что философия в ГД должна изучать совокупность деятельности инженера как фактор культуры от технических приемов отдельных операций до технологических процессов выемки и передела горной массы, исследуя принципы действий человека во всех сферах его деятельности.

В ГД человек осмысливает природу и изменяет ее соглас-

но своим намерениям и целям. Встреча человека с природой для сознательного ее изменения с философской точки зрения рождает немало проблем, связанных с развитием новых технологий, качеством жизни людей, экономики производства. Именно философия ищет пути и способы направления технического прогресса в разумное русло. В ГД результаты работы предприятий дают желательные и нежелательные последствия, а философия должна сделать свой вклад в динамику рационального развития горного производства.

По существу, философия горного (металлургического, нефтяного, газового, бурового и т.д.) дела (ФГД) – это встреча природы с человеком для сознательного ее изменения соответственно поставленным задачам. С философской точки зрения есть немало проблем, связанных с развитием новых технологий, качества жизни людей, экономики, производства, и именно ФГД ищет пути, способы, направления технического прогресса ГД в разумное русло.

Будущее нашей цивилизации зависит от способности отвечать на вызовы времени адекватными научно-техническими решениями, основанными на философском понимании складывающейся ситуации, ибо жизнь общества требует соблюдать политическую и моральную культуру.

Для того, чтобы осуществить прорыв вперед, необходима перестройка мышления, а исследования в ГД – вести на уровне молекулы и атома на всем пути: от разведки и оценки месторождения через добычу полезных ископаемых, вплоть до глубокой технологической переработки сырья с получением конечных товаров потребления.

Многомерный характер ФГД обусловлен сложностью феномена ГД. Кризисные явления в мире продолжают углубляться. Во многом они будут мотивироваться недостатком минеральных ресурсов как базы функционирования эко-

номической и социальной сферы жизни. Необходимость соблюдения баланса «экономика – ГД – экология» требует выработки стратегии решения геоэкономических проблем ресурсного обеспечения страны. Именно в этой связи ФГД должна способствовать разработке комплексного и экологически безопасного использования доступных (в каждое конкретное время) сырьевых ресурсов.

Обычно принятое определение ГД – совокупность всей гаммы деятельности людей, связанной с разведкой, добычей и переработкой полезных ископаемых и строительством самых разнообразных сооружений.

Роль ГД в получении природных ресурсов, в создании новых эффективных технологий на основе использования накопленных знаний, обобщенных в современной науке, огромна. Она стоит на острие конфликта человек – природа, а это не только экологическая проблема, но и проблемы обеспечения человечества сырьем и энергетическими ресурсами. М.В. Ломоносов определил горную науку как «науку, которая учит минералы знать, приискивать и приводить в такое состояние, чтобы они в обществе человеческом были угодны». Такая трактовка позволяет считать ее наукой синтетической, которая использует достижения как фундаментальных, так и многих технических и общественных наук. Фактически – это комплекс наук об освоении недр. Это науки о методах и средствах воплощения в технологии новых решений. Именно технологии производства и являются основой всей тяжелой промышленности.

В последние годы всему циклу горных наук дано название «геотехнология», поскольку именно технология является определяющим моментом производства. Одна из главных ее задач – разработка выгоднейших, безопасных и экологических технологий с обеспечением их оборудованием, приборами и

устройствами контроля.

Перед современным производством возникают разнообразные задачи в области использования новых физических, химических и микробиологических средств на среду воздействия. Вот поэтому современные исследования необходимо вести совместно специалистам разных областей науки и техники. Это особо актуально при разработке технологий комплексного использования добытого сырья, обезвреживания и утилизации отходов. Специфика исследований в ГД состоит в необходимости проведения опытно-промышленных работ, (это, к сожалению, в настоящее время просто игнорируется, нет денег), что совершенно необходимо для того, чтобы «допустить ошибки в малом и получить прибыль в большом».

ФГД должна сделать свой вклад в динамику рационального развития производства, поскольку философия играет огромную роль во всех сферах жизни общества. Попробуем предложить его дефиницию, которая должна быть всеохватывающей и абстрактной.

Для того, чтобы иметь ясное представление о предмете философии горного дела надо дать четкое его определение и связанных с ним понятий. В каком-то смысле предмет ФГД можно определить как совокупность рационально выбранных способов производства, обладающих безусловной эффективностью. Она вскрывает взаимозависимость между инженерным и социальным аспектами производства.

Методология исследований обеспечивает получение ожидаемых результатов, но самое ценное в исследовании – получение результатов неожиданных, открывающих новый путь в поиске неведомого.

Исторически происходящая замена эмпирических правил на научные знания – путь рационального развития ГД. Современные науки – это постоянно развивающиеся

системы знаний, которые нужно непрерывно учитывать для того, чтобы успешно управлять производством. Поэтому человеческий творческий капитал определяет успех дела.

Будущее нашей цивилизации зависит от способности отвечать на вызовы времени адекватными научно-техническими решениями, основанными на философском понимании складывающейся ситуации. Причем «на многих борцов за свое личное будущее следует надевать смиренную рубашку», ибо жизнь общества требует соблюдать политическую и моральную культуру, избегать идеологической услужливости.

Подводя итог сказанному, можно утверждать, что в фокусе ФГД стоит феномен и суть ГД, необходимые для осмысления процессов производства, уяснения его природы и сущности.

В горном деле результаты работы предприятий дают желательные и нежелательные последствия, а философия горного дела должна сделать свой вклад в динамику рационального развития производства. Сегодня ФГД должна дать общую картину современной гор-

ной промышленности, охватывая различные отрасли производства, создавая основы технологического мировоззрения, содействуя творческому мышлению в решении актуальных задач производства и жизни общества.

К сфере философии горного дела относятся прикладные проблемы разработки политики, методологии, прогнозирования и научно-технического прогресса. ФГД – это внедрение морали, этики и грамотности в производство, это поиски пути в будущее горного дела. Примеры успешного использования основ ФГД – проведение опытно-промышленных исследований по подземной выплавке серы, скважинного выщелачивания металлов и многие другие внедренные новшества.

Литература

1. Таранов П.С. Анатомия мудрости. 106 философов. Жизнь, судьба, учение, В 2-х т. Симферополь: Таврия. 1995. 1000 с. Философский словарь: Сокр. пер. с нем. / Ред. М.М. Розенталь. М.: Изд-во иностранной литературы, 1961. 717 с. Философский словарь. Изд. иностранной литературе 1961 г.

717с. Досократики. Мн.: Харвест. 1999. 787 с. Античная цивилизация /В. Д. Блаватский и др.; АН СССР. Ин-т археологии. М.: Наука, 1973. 270 с.

2. Шахпаронов М.И. Очерки философских проблем химии. М.: Изд. МГУ, 1957. 267 с. Бунге Марио. Философия физики. М.: Прогресс, 1975. 345 с. Философия техники в ФРГ. М.: Прогресс, 1989. 525 с. Ацюковский В.А. Философия и методология современного естествознания. М.: изд. РАЕН, 2005. 135 с.

3. Аренс В.Ж. Горное дело и его влияние на развитие цивилизаций. Вестник РАЕН, 2016. 16 с.

4. Агрикола Г. О месторождениях и рудниках в старое и новое время. М.: Недра, 1979. 82 с. Агрикола Г. О горном деле и металлургии. В двенадцати книгах. М.: Изд-во АН СССР, 1962.

5. Ломоносов Михаил Васильевич. ПСС, Т. 5. М.-Л.: Издательство Академии наук СССР, 1954. 747 с.

6. Энгельмейер П.К. Философия техники Вып. 1-3 / Инж.-мех. Петр Климентич Энгельмейер.... М.: Т-во скоропеч. А.А. Левенсон, 191–191. 3 т. 22.

НЕКОТОРЫЕ МЫСЛИ В СЛУХ (ТОЛЬКО ДЛЯ ЧИТАТЕЛЕЙ ЭТОЙ РУКОПИСИ)

Акад. Н.Н. Моисеев (см. «Заслон средневековью», М. 2003г.) сказал, что 95% людей не думают о том, как решать поставленные перед обществом проблемы. Надеюсь, что среди специалистов, обязанных решать проблемы будущего горного дела, будут люди из 5%, способные к творческому подвигу.

Опыт показал, что Россия может выжить только при сильной власти, которая должна: обеспечить производство всех потребительских товаров, оплачивать труд по размеру труда, управлять жизнью населения, учить его и воспитывать, кормить и оборонять от внешних и

внутренних врагов. Причем надо помнить, что только на основе появляющихся инициатив общество и человек живет и развивается.

Только ли личная инициатива, энергия, мотивы двигают прогресс? Насилие во благо общества – так действовали в Сингапуре для достижения «Сингапурского чуда», так действовали многие люди, обладающие властью в Риме, России, да и вообще руководители, имеющие неограниченную власть. Многие хотели создать «земной рай». Помните, что люди, живя в обществе, должны работать на него, а оно должно оплачивать им их вклад в общее дело.

«Когда добыча в руках – кончается удовольствие от охоты».

Линкольн.

«Не будите в человеке зверя, если не имеете средств и слов его остановить».

Робеспьер

Всеобщая тенденция сильных: воевать, побеждая чужими руками.

Конфуций.

«Каждый может вести корабль, когда в море спокойно».

Публий Лир.

«Способность и необходимость живут по соседству друг с другом».

Пифагор.

Сегодня российская демократия должна быть подчинена целям развития государства. В жизни человек постоянно ищет смысл своего существования. Это могут быть деньги, власть, духовные ценности или нечто иное. Так достижение цели дает иллюзию счастья, но главное –

каждый должен накопить свой человеческий капитал: освоенные человеком знания, которые он способен использовать на практике. Граждане должны жить по формуле «Государство ответственно перед гражданами, но и они ответственны перед государством».

Подумайте, в чем главные вызовы и возможности, о которых Вы можете что-то сказать? Попробуйте это сделать.

Жду критики, а это новые мысли.

Искренне Ваш В.Ж. Аренс

БЕТАЛУ АМИНОВИЧУ ШОГЕНОВУ – 75 ЛЕТ



14 сентября исполнилось 75 лет д. чл. РАЕН, одному из ведущих российских ученых-экономистов, д.э.н., профессору Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В.М. Кокова, заслуженному деятелю науки Кабардино-Балкарской Республики Беталу Аминовичу Шогенову. Он широко известен в научном сообществе, его монографии и учебные пособия являются настольными книгами для преподавателей и студентов.

Бетал Аминович родился в Кемеровской области. После окончания средней школы работал на заводе «СКЭП» электрослесарем-ремонтником, затем проходил армейскую службу. В 1975 г. окончил КБГУ, был направлен в г. Баксан в отделение Государственного банка. С 1978 г. – преподаватель кафедры бухгалтерского учета в КБГУ. В 1982–1985 гг. проходил обучение в аспирантуре в Ленинградском финансово-экономическом институте им. Н.А. Вознесенского. В

1985 г. защитил кандидатскую диссертацию, в 2002 г. стал доктором экономических наук.

С 1981 г. Бетал Аминович работает в Кабардино-Балкарском государственном аграрном университете им. В.М. Кокова, 25 лет заведовал кафедрой «Бухгалтерский учет, анализ и аудит», 10 лет был деканом факультета. Проявил себя как талантливый организатор и ученый, много внимания и сил уделяющий научной подготовке кадров, выявлению и поддержке перспективной молодежи. Он осуществляет руководство научно-исследовательской работой, курирует подготовку докторантов и аспирантов. Под его руководством успешно защищены 3 докторских и 30 кандидатских диссертаций.

Масштабная научная и педагогическая деятельность юбиляра принесла свои весомые плоды. Бетал Аминович является автором более 300 научных трудов, в их числе 10 монографий, 25 учебников и учебно-методических пособий. Под его руководством выполнен ряд важных разработок в областях стратегического и индикативного планирования; повышения качества продукции, конкурентоспособности и эффективности АПК; бухгалтерского учета, анализа и аудита; региональной экономики; рейтинговой оценки хозяйственно-финансовой деятельности предприятий АПК; финансов предприятий и инвестиций.

Долгое и плодотворное сотрудничество связывает Бетала Аминовича с Издательским домом

«Финансы и кредит». Информационный центр Издательского дома, созданный им при КБГАУ им. В.М. Кокова, уверенно занял лидирующие позиции в стране. Статьи, подготовленные ученым, отличаются глубиной постановки проблем и тщательная их проработка, умение своевременно перейти от теоретического анализа к практическим рекомендациям.

Не случайно эти статьи пользуются неизменным успехом у читателей, имеют высокий индекс цитируемости. Бетал Аминович всегда активно привлекает к сотрудничеству аспирантов и докторантов, помогает успешному становлению молодых ученых.

Достижения юбиляра на научной и педагогической ниве получили широкое общественное признание. Бетал Аминович – заслуженный деятель науки КБР. Награжден почетной грамотой Минсельхоза России за многолетнюю плодотворную педагогическую деятельность, почетной грамотой за подготовку высококвалифицированных специалистов для Республики РСО-Алания. Удостоен орденов «За вклад в науку» и «Рыцарь науки и искусств», памятной медали к 100-летию образования Кабардино-Балкарской Республики. В городском округе Баксан на Доске Почета помещен его портрет.

Президиум РАЕН поздравляет Бетала Аминовича с юбилеем и желает крепкого здоровья, новых творческих поисков и побед, неиссякаемой энергии и оптимизма!

ШАХВЕРДИЕВ Азизага Ханбаба оглы — вице-президент РАЕН, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений» Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе, заслуженный изобретатель РФ, почетный нефтяник РФ (РФ)

РОСТАНЕЦ Виктор Григорьевич — д. чл. РАЕН, д.э.н., профессор, зам. директора АО «Институт региональных экономических исследований» (РФ)

АЛЕКСЕЕВ Александр Сергеевич — д. чл. РАЕН, д.г.-м. н., профессор кафедры палеонтологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, зав. лабораторией протистологии Палеонтологического института им. А.А. Борисяка РАН, почетный работник сферы образования РФ (РФ)

БАШКИРЦЕВА Наталья Юрьевна — д. чл. РАЕН, д.т.н., профессор, директор Института нефти, химии и нанотехнологий, заведующий кафедрой «Химической технологии переработки нефти и газа», Директор Научно-производственного центра «Панхимтех» Казанского национального исследовательского технологического университета, Заслуженный деятель науки Республики Татарстан (РФ)

БОБРОВ Андрей Викторович — д. чл. РАЕН, профессор РАН, д.г.-м.н., доцент, профессор кафедры петрологии и вулканологии, заместитель декана геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (РФ)

ГУЛИЕВ Ибрагим Саид оглы — ин. чл. РАЕН, д.г.-м.н., профессор, академик, вице-президент Национальной Академии Наук Азербайджана, Лауреат Государственной премии АР, главный редактор журнала Азербайджанское Нефтяное Хозяйство (Азербайджан)

Жданов Михаил Семенович — д. чл. РАЕН, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории электромагнитных методов геофизических исследований Института геоэлектроманнитных исследований Объединенного института физики Земли РАН им. О.Ю. Шмидта РАН, профессор университета Солт-Лейк-Сити, США (РФ)

ЗАКИРОВ Эрнест Сумбатович — д.т.н., профессор РАН, директор Института проблем нефти и газа РАН (РФ)

КАПАУНОВ Давид Родионович — д. чл. РАЕН, д.т.н., профессор, чл.-корр. РАН, зав. лабораторией теории проектирования освоения недр Института проблем комплексного освоения недр (ИПКОН) РАН, Заслуженный деятель науки и техники России (РФ)

КЕРВАЛИШВИЛИ Паата Джамалетович — ин. чл. РАЕН, д.ф.-м.н., профессор Института прикладной физики Грузинского технического университета, президент Грузинской АЕН (Грузия)

МАНДРИК Илья Эммануилович — д. чл. РАЕН, д.т.н., к.г.-м.н., вице-президент по геологоразведке и разработке ПАО «ЛУКОЙЛ», Заслуженный Геолог РФ (РФ)

МИХАЙЛОВ Николай Нилович — д. чл. РАЕН, д.т.н., профессор, профессор Российского государственного университета нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, почетный нефтяник (РФ)

МОЖАЕВ Евгений Евгеньевич — д.э.н., профессор, первый проректор Института повышения квалификации руководящих кадров и специалистов, Почетный работник науки и техники РФ (РФ)

МЫМРИН Всеволод Анатольевич — д. чл. РАЕН, д.г.-м.н., профессор, Федеральный Технологический Университет штата Парана (UTFPR) (Бразилия)

ПЕТРОСЯН Валерий Самсонович — вице-президент РАЕН, д.х.н., профессор, зав. лаб. физической органической химии химического ф-та МГУ имени М.В. Ломоносова, эксперт ООН по химической безопасности, автор научного открытия, Заслуженный работник высшей школы РФ (РФ)

ПЕТРОВ Вадим Леонидович — д. чл. РАЕН, д.т.н., профессор, проректор по учебной работе Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», гл. редактор журнала Горные науки и технологии (РФ)

СУЛЕЙМАНОВ Багир Алекпер оглы — д.т.н., профессор, чл.-корр. НАН Азербайджана, зам. директора НИИГИПРОМОРНЕФТЬ, гл. редактор журнала Scientific Petroleum, зам. гл. редактора журнала SOCAR Proceedings, зам. гл. редактора журнала «ANAS Transactions. Earth Sciences» (Азербайджан)

ЧЕНЬ Цзяньпин — ин. чл. РАЕН, д.т.н., профессор, директор Научно-исследовательского центра «Земли, ресурсов и высоких технологий» Китайского геологического университета (г. Пекин), начальник головной лаборатории и профессионального комитета математической геологии и геоинформации Китайского геологического общества. Лауреат пяти премий научно-технологического прогресса министерства геологии и минеральных ресурсов (Китай)

ЧЖАО Пенда — ин. чл. РАЕН, д.т.н., профессор Китайского геологического университета (г. Пекин), д. чл. Китайской академии наук, председатель международного комитета по геологическим данным от азиатского региона (Китай)

ШЕВЧЕНКО Юрий Леонидович — д. чл. РАЕН, академик РАН, д.м.н., профессор, президент Национального медико-хирургического Центра им. Н.И. Пирогова, Заслуженный врач РФ, Заслуженный деятель науки РФ (РФ)

ШЕСТОПАЛОВ Юрий Викторович — д. чл. РАЕН, д.ф.-м.н., профессор кафедры прикладной математики Российского технологического университета МИРЭА (РФ)

ШОГЕНОВ Беслан Аминович — д. чл. РАЕН, д.э.н., профессор кафедры Экономики Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета, Заслуженный деятель науки КБР (РФ)

ЯННАКОПУЛОС Панайотис — ин. чл. РАЕН, профессор кафедры компьютерных систем, член управляющего совета Пирейского университета прикладных наук, Вице-президент Европейских программ ПУПИ, член совета Национального греческого информационного центра (Греция)

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Аренс Виктор Жанович — почетный вице-президент РАЕН, д.т.н., профессор, почетный профессор НИТУ «МИСиС», член ученого совета ФГБОУ ВО «РГГУ им. Серго Орджоникидзе» (МГРИ), Заслуженный деятель науки и техники РСФСР, Лауреат Государственной премии СССР (РФ)

БУРАК Петр Иосифович — президент РАЕН, д.э.н., профессор, директор Института региональных экономических исследований (РФ)

ВОЛОВИК Александр Михайлович — вице-президент РАЕН, д.э.н., профессор Российской экономической академии им. Плеханова, Лауреат государственной премии РФ в области культуры, Заслуженный нефтегазостроитель (РФ)

ГЕЙХМАН Исаак Львович — вице-президент РАЕН, д.т.н., профессор, Заслуженный деятель науки РФ, президент Ассоциации строительных компаний «Росзарубежстрой» (РФ)

ЗОЛОТАРЕВ Владимир Антонович — вице-президент РАЕН, д.ю.н., д.и.н., профессор, действительный государственный советник РФ I класса (РФ)

МЕЛУА Аркадий Иванович — д. чл. РАЕН, д.филос.н., профессор, генеральный директор научного издательства «Гуманистика» (РФ)

НОВИКОВ Василий Семенович — вице-президент РАЕН, д.м.н., профессор, лауреат Государственной премии РФ, Заслуженный деятель науки РФ (РФ)

ПАНИН Александр Николаевич — д. чл. РАЕН, академик РАН, д.вет.н., профессор, директор Всероссийского государственного центра качества и стандартизации лекарственных средств для животных и кормов (РФ)

ПАНОВ Юрий Петрович — д. чл. РАЕН, к.т.н., ректор Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе (МГРИ) (РФ)

СТЕПАШИН Сергей Вадимович — д. чл. РАЕН, д.ю.н., профессор, государственный советник юстиции РФ, председатель наблюдательного совета государственной корпорации «Фонд содействия реформированию жилищно-коммунального хозяйства» (РФ)

ХАЙРУЛЛИН Мухамед Хильмиевич — д. чл. РАЕН, д.т.н., профессор Института управления, автоматизации и информационных технологий, Заслуженный деятель Республики Татарстан (РФ)

правила для авторов

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ. Издание «Вестника РАЕН» имеет своей целью регулярно знакомить российскую научную общественность с наиболее важными научными и научно-практическими достижениями членов РАЕН, с новыми разработками и новыми концепциями в различных областях знаний, с текущими событиями в секциях и отделениях РАЕН как в России, так и за рубежом. Представляемые в редакцию материалы должны отличаться четкой и ясной формой изложения, доступной для широкого круга специалистов различных отраслей науки. На страницах журнала публикуются также краткие научные сообщения, дискуссии, письма читателей, персоналии, а также информационные и рекламные объявления.

ТРЕБОВАНИЯ К РУКОПИСИ. В статье указывается название на русском и английском языках, имя, отчество и фамилия автора (авторов), его (их) ученая степень, ученое звание, место работы на русском и английском языках, должность. Статья должна содержать почтовый индекс, адрес работы на русском и английском языках, адрес электронной почты и телефон автора (соавтора). Отдельно указывается автор, с которым редакция сможет вести переписку.

К статье прилагается резюме на русском и английском языках объемом не более 8–10 строк, ключевые слова на русском и английском языках, УДК, тип статьи (научная статья, обзорная статья, редакционная статья, дискуссионная статья, персоналии, рецензия на книгу, рецензия на статью и т.п.) Текст статьи 12 пунктов объемом от 20 страниц через 1,5 интервала в формате MS WORD.

ИЛЛЮСТРАЦИИ. Иллюстрации (графики, схемы, диаграммы, рисунки, фотографии) в виде отдельных файлов с указанием позиции для размещения в тексте. Растровые изображения в формате TIFF с разрешением 350 dpi. Векторные изображения в формате EPS. При необходимости в журнале могут быть опубликованы цветные иллюстрации при условии оплаты автором.

ФОРМУЛЫ. Количество формул в статье не должно превышать 10.

Список источников нумеруется и составляется в алфавитном порядке. В тексте статьи дается в квадратных скобках ссылка на порядковый номер упомянутой работы, которая в списке приводится в следующем виде: фамилия и инициалы автора (авторов), полное название работы, сокращенное название журнала, год, том, номер, интервал страниц. Ссылки на монографии (книги) включают полное название книги, фамилию и инициалы автора (авторов), город, издательство, год, полное количество страниц.

Дополнительно приводится перечень затекстовых библиографических ссылок на латинице ("References"). Нумерация записей в дополнительном перечне затекстовых библиографических ссылок должна совпадать с нумерацией записей в основном перечне затекстовых библиографических ссылок.

Редакция оставляет за собой право сокращать и редактировать материалы статьи.

Утверждено на совместном заседании
редакционной коллегии и редакционного совета
7 февраля 2002 г.

Журнал входит в перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук по следующим группам специальностей:

- ♦ 1.6.9. Геофизика (технические науки),
- ♦ 1.6.10. Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения (технические науки),
- ♦ 2.8.2. Технология бурения и освоения скважин (технические науки),
- ♦ 2.8.4. Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений (технические науки),

- ♦ 2.8.5. Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ (технические науки),
- ♦ 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика (технические науки),
- ♦ 2.8.3. Горнопромышленная и нефтегазопромышленная геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр (технические науки),
- ♦ 5.2.3. Региональная и отраслевая экономика (экономические науки),
- ♦ 5.2.6. Менеджмент (экономические науки),
- ♦ 5.2.7. Государственное и муниципальное управление (экономические науки).