ОБЩЕСТВЕННО-НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ВЕСТНИК РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

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)
Велиев Э.Ф. (Азербайджан)
Гулиев И.С. (Азербайджан)
Жданов М.С. (США)
Закиров Э.С. (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.Л. (РФ)
Чень Цзяньпин (Китай)
Чжао Пенда (Китай)
Шевченко Ю.Л. (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.Л. (РФ)
Золотарев В.А. (РФ)
Мелуа А.И. (РФ)
Новиков В.С. (РФ)
Панин А.Н. (РФ)
Панов Ю.П. (РФ)
Рахманин Ю.А. (РФ)
Степашин С.В. (РФ)
Хайруллин М.Х. (РФ)

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

Руководитель редакции
Иваницкая Л.В.

Ответственный секретарь
Поротникова М.В.

Технический секретарь
Горелкина 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 репродуцирована в какой-либо форме без письменного разрешения издателя. Редакция не несет ответственности за содержание рекламных материалов.
© РАЕН 2026 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 сайте РИНЦ

Содержание

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

ПРИМЕНЕНИЕ ВИБРАЦИОННОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ СООРУЖЕНИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН СКВАЖИННОГО ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА
Ю.А. Арсентьев, А.Г. Иванов, Д.Д. Орехов 4

НОВАЯ НАУЧНАЯ МОДЕЛЬ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННОЙ СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ МЕТАЛЛОВ: ТЕОРИЯ, ПОТЕНЦИАЛ И ОСВОЕНИЕ
М.С. Кунаев, Е.Е. Акбаров, А.Х. Сыздыков, М.Ж. Битимбаев, Р.Н. Шадиев 16

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К КОМПЛЕКСНОМУ ПРОВЕДЕНИЮ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ЦЕЛЬЮ КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ПХГ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ПРОГНОЗА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГАЗА В ОБЪЕКТЕ ХРАНЕНИЯ, В ТОМ ЧИСЛЕ ЗА ПРЕДЕЛАМИ ИСКУССТВЕННОГО КОНТУРА ГАЗОНОСНОСТИ
Е.А. Мельников, В.Н. Первушина 27

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ФАКТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАЗРАБОТКИ С РЕЗУЛЬТАТАМИ МОДЕЛИ БАКЛИ-ЛЕВЕРЕТТА В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОЙ СТЕПЕНИ ВЫРАБОТАННОСТИ ЗАПАСОВ
А.В. Денисов 32

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ И МИНЕРАЛИЗАЦИИ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ НА НАПОРНЫЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИДКОСТНО-ГАЗОВЫХ ЭЖЕКТОРОВ
Е.И. Горелкина 41

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНГИБИТОРОВ КОРРОЗИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНАЛИЗА КРИВЫХ ТАФЕЛЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЯХ ИНГИБИТОРА
Х.В. Верес 53

КОМПЛЕКС ТЕХНОЛОГИЙ КОНТРОЛЯ ПЕСКОПРОЯВЛЕНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ НЕСЦЕМЕНТИРОВАННЫХ КОЛЛЕКТОРОВ НЕФТЯНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ БОХАЙ
Ван Ц., Е.С. Юшин, Ян Ю., Чу Ц., И. Ефенди 58

РЕСУРСНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ АЛЮМИНИЕВОГО СЫРЬЯ РЕСПУБЛИКИ КАМЕРУН
А.А. Рассказов, А.Ф. Георгиевский, Е.В. Карелина, А.А. Назарова, Т.П. Морозова, З. Эиоман 68

ЭКОЛОГИЯ

ФИНАНСОВЫЕ ИСТОЧНИКИ СТИМУЛИРОВАНИЯ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОГЕННЫХ ОТВАЛОВ В РАМКАХ ПОЛИТИКИ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ РЕГИОНОВ
В.Е. Черняков 76

ВАЛЮТА ПРИРОДЫ: КАК РАБОТАЕТ СИСТЕМА НАЦИОНАЛЬНОГО БАЛАНСА ЕДИНИЦ ПРИРОДНОГО КАПИТАЛА (НБЕПК)
Е.В. Кузьмина, Д.И. Тартаковская, К.Э. Чилингаров 92

О НАИБОЛЕЕ ДОСТУПНОЙ ПРИРОДОПОДОБНОЙ ТЕХНОЛОГИИ СОХРАНЕНИЯ, РАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДНЫХ БИОРЕСУРСОВ И УЛУЧШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ПУТЕМ УНИФИКАЦИИ РИФОЗДАНИЯ
А.В. Иванов, П.В. Ратников 98

ЭКОНОМИКА

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В СТРАТЕГИЧЕСКОМ УПРАВЛЕНИИ РЕГИОНОМ
А.Н. Соломатин 107

МОДЕРНИЗАЦИЯ АГРАРНОГО ПРОИЗВОДСТВА РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН
Н.К. Юлдашев, К.В. Некрасов, В.И. Набоков 121

ОБРАЗОВАНИЕ

ИСТОРИЯ СТАНОВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ ШКОЛЫ «КОНФИГУРАТИВНАЯ ДИДАКТИКА ИНЖЕНЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ» КОНЦЕРНА ВКО «АЛМАЗ–АНТЕЙ»
С.Е. Ерошин, С.К. Савельев, А.Г. Сайбель, Д.А. Фёдоров, Д.К. Щеглов 127

ХРОНИКА

ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЛУЖБА – РАБОТА В СЛУЖЕНИИ
А.И. Большаков 138

Академия в лицах: юбиляры года 141

Contents

EARTH SCIENCES

APPLICATION OF VIBRATION METHODS OF CONSTRUCTION AND OPERA-TION OF TECHNOLOGICAL WELLS OF BOREHOLE UNDERGROUND LEACHING
Yu.A. Arsentiev, A.G. Ivanov, D.D. Orekhov 4

A NEW SCIENTIFIC MODEL OF THE NATURAL AND MAN-MADE RAW MATERIAL BASE OF METALS: THEORY, POTENTIAL AND DEVELOPMENT
M.S. Kunaev, E.E. Akbarov, A.Kh. Syzdykov, M.Zh. Bitimbayev, R.N. Shadiev 16

METHODOLOGICAL APPROACHES TO INTEGRATED GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL SURVEYS FOR LEAKAGE CONTROL AT UNDERGROUND GAS STORAGE (UGS) FACILITIES, WHICH IMPROVE THE RELIABILITY OF PREDICTING GAS MIGRATION WITHIN THE STORAGE RESERVOIR, INCLUDING OUTSIDE THE ARTIFICIAL GAS-WATER CONTACT
E.A. Melnikov, V.N. Pervushina 27

COMPARATIVE ASSESSMENT OF ACTUAL DEVELOPMENT PERFORMANCE AGAINST BUCKLEY-LEVERETT MODEL RESULTS UNDER CONDITIONS OF HIGH RESERVOIR DEPLETION
A.V. Denisov 32

INFLUENCE OF OPERATING PARAMETERS AND WORKING FLUID MINERALIZATION ON THE PRESSURE AND ENERGY CHARACTERISTICS OF LIQUID-GAS EJECTORS
E.I. Gorelkina 41

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)
E.F. Veliev (Azerbaijan)
I.S. Guliev (Azerbaijan)
M.S. Zhdanov (USA)
E.S. Zakirov (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)
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)
Yu.A. Rakhmanin (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 2026

ISSN 1682–1696 / 1727-7892

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

ELECTROCHEMICAL EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF CORROSION INHIBITORS USING TAFEL METHOD ANALYSIS AT VARIOUS INHIBITOR CONCENTRATIONS
H.W. Weres 53

TECHNOLOGIES FOR SAND CONTROL IN THE DEVELOPMENT OF UNCONSOLIDATED RESERVOIRS AT THE BOHAI OFFSHORE OIL FIELD
Wang J., E.S. Yushin, Yang Y., Chu J., I. Efendi 58

RESOURCE POTENTIAL OF ALUMINUM RAW MATERIALS OF THE REPUBLIC OF CAMEROON
A.A. Rasskazov, A.F. Georgievskiy, Ye.V. Karelina, A.A. Nazarova, T.P. Morozova, Z. Eioman 68

ECOLOGY

FINANCIAL SOURCES FOR STIMULATING THE DEVELOPMENT OF TECHNOGENIC MINE WASTE DUMPS WITHIN THE FRAMEWORK OF REGIONAL SUSTAINABLE DEVELOPMENT POLICY
V.E. Chernyakov 76

THE CURRENCY OF NATURE: HOW THE NATIONAL BALANCE OF NATURAL CAPITAL UNITS (NBUCU) SYSTEM WORKS
E.V. Kuzmina, D.I. Tartakovskaya, K.E. Chilingarov 92

ABOUT THE MOST ACCESSIBLE NATURE-LIKE TECHNOLOGY CONSERVATION AND RATIONAL USE OF WATER RESOURCES BIORESOURCES AND IMPROVEMENT OF THE ECOLOGICAL CONDITION OF WATER BODIES THROUGH THE UNIFICATION OF REEF CREATION
A.V. Ivanov, P.V. Ratnikov 98

ECONOMY

MATHEMATICAL MODELS IN REGIONAL STRATEGIC MANAGEMENT
A.N. Solomatin 107

MODERNIZATION OF AGRICULTURAL PRODUCTION IN THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN
N.K. Yuldashev, K.V. Nekrasov, V.I. Nabokov 121

EDUCATION

HISTORY OF FORMATION AND DEVELOPMENT OF THE SCIENTIFIC AND PEDAGOGICAL SCHOOL «CONFIGURATIVE DIDACTICS OF ENGINEERING EDUCATION» OF THE ALMAZ–ANTEY VKO CONCERN
S.E. Eroshin, S.K. Savelyev, A.G. Saibel, D.A. Fyodorov, D.K. Shcheglov 127

CHRONICLE

PUBLIC SERVICE – A VOCATION OF SERVICE
A.I. Bolshakov 138

The Academy in Focus: Anniversaries of the Year 141

УДК 622.245.42
DOI: 10.52531/1682-1696-2026-26-3-4-15
Научная статья

EDN: ANOUSA

ПРИМЕНЕНИЕ ВИБРАЦИОННОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ СООРУЖЕНИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН СКВАЖИННОГО ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА

Ю.А. Арсентьев[1], А.Г. Иванов[2], Д.Д. Орехов[1]
[1]Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе – МГРИ (Москва, Россия)
[2] АО «Ведущий проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии» (Москва, Россия)

В статье рассмотрены вопросы применения вибрационных технических средств при сооружении, эксплуатации технологических скважин скважинного подземного выщелачивания урана. Области применения следующие: освоение фильтра и прифильтровой зоны продуктивного горизонта; поддержание производительности скважин; гидроизоляция заколонного пространства скважин одноколонной конструкции; предотвращение разрушения эксплуатационных колонн полимерных обсадных труб в интервале криолитозоны. Приведены рекомендации по технологии выполнения вибрационных обработок на различных стадиях сооружения и эксплуатации технологических скважин.

Ключевые слова: *технологическая скважина, подземное выщелачивание, освоение, виб-рационная обработка*

Original article

APPLICATION OF VIBRATION METHODS OF CONSTRUCTION AND OPERA-TION OF TECHNOLOGICAL WELLS OF BOREHOLE UNDERGROUND LEACHING

Yu.A. Arsentiev[1], A.G. Ivanov[2], D.D. Orekhov[1]
[1]Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Exploration University, MGRI (Moscow, Russia)
[2]JSC "Leading Design and Survey and Scientific Research Institute of Industrial Technology" (Moscow, Russia)

The article discusses the application of vibration methods in the construction and operation of technological wells for borehole underground uranium leaching. The fields of application are as follows: development and maintenance of borehole productivity; waterproofing of the column space of wells of a single-column structure made of polymer pipes; prevention of destruction of polymer production columns in the cryolithozone interval. Recommendations on the technology of performing vibration treatments at various stages of well construction and operation are given.

Key words: *technological well of underground leaching, development*

ВВЕДЕНИЕ

Процесс сооружения и эксплуатации технологических скважин скважинного подземного выщелачивания (СПВ) урана предполагает прохождение следующих этапов: бурение ствола скважины; оборудование его эксплуатационной колонной полимерных обсадных труб, оснащенной фильтром; гидроизоляцию заколонного пространства; освоение фильтра и прифильтровой зоны, а также выполнение сопутствующих (геофизические исследования и пр.) и специальных работ для повышения надежности эксплуатационных колонн в интервале криолитозоны. В настоящей работе обоснованы принципиально новые базирующиеся на применении вибрационных механических систем методы повышения качества технологических скважин.

ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО СПОСОБА ОСВОЕНИЯ ФИЛЬТРА И ПРИФИЛЬТРОВОЙ ЗОНЫ И ПОДДЕРЖАНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН

Продуктивные водоносные горизонты месторождений урана, отрабатываемые методом СПВ, пред-

© 2026, Ю.А. Арсентьев, А.Г. Иванов, Д.Д. Орехов
Поступила в редакцию 30.06.2026

ставлены песками различного гранулометрического состава. Для их вскрытия при массовом сооружении скважин, как правило, используется наиболее дешевый глинистый раствор, содержащий твердую фазу в виде частиц разбуриваемого песка. Содержание механических частиц в глинистом растворе колеблется в широких пределах и зависит от механической скорости бурения по продуктивному горизонту. Вопросы кольматации песков глинистым раствором приведены в различных источниках [4, 5, 12, 13 и др.]. Эти исследования показали, что глубина проникновения глинистого раствора в пески различного гранулометрического состава колеблется в зависимости от содержания в нем механических взвесей и составляет 1–3 мм. Время достижения полной кольматации составляет 1–8 минут. Снижение проницаемости образцов после декольматации составляет 10–50% в зависимости от содержания взвесей в глинистом растворе: чем оно меньше, тем больше снижение проницаемости.

Анализ полученных результатов и методов импульсного воздействия на зону кольматации позволил выделить метод вибрационной поинтервальной обработки прифильтровых зон как самый эффективный для восстановления проницаемости (в сочетании с методом поинтервального освоения прифильтровых зон), многократно превышающий по своим результатам методы эрлифтной прокачки скважин с использованием эксплуатационной колонны в качестве водоподъемной и пневмоимпульсной обработки Разработанная по инициативе авторов конструкция скважинного гидровибратора УРК (устройство разрушения кольматанта) рекомендована для внедрения в практику сооружения и восстановления производительности технологических скважин.

Ниже приведен пример расчета волнового воздействия на прифильтровую зону и продуктивный горизонт при применении УРК.

Рассмотрим технологическую скважину диаметром 254 мм, которая оснащена эксплуатационной колонной обсадных труб НПВХ.

В колонну на бурильных трубах спускают дисковый гидровибратор. Диски диаметром 70 мм представляют собой источник импульсов давления рабочего агента, воздействующего с частотой колебаний f = 43,5 Гц на слой толщиной h = 10 мм глинистого кольматанта, расположенного на поверхности водоносного песчаного горизонта или стенке ствола скважины.

Для определения максимального радиуса r_{max} или расстояния от оси скважины до точки эффективного воздействия энергии ударной волны, достаточной для механического разрушения структуры кольматанта и расширения пор продуктивного горизонта, воспользуемся уравнением интенсивности затухания импульса давления рабочего агента в пористой среде, имеющего вид:

$$P(r) = P_0 \times (R/r)^{1/2} \times e^{-\alpha(r-R)} = P_{min}, \quad (1)$$

где: α – коэффициент затухания энергии ударной волны, $м^{-1}$ (в песке, например, $\alpha = 1,2\ м^{-1}$)

$$P_0 * (R/r)^{1/2} * e^{-1,2(r-R)} = P_{min}. \quad (2)$$

Для удобства расчета возведем левую и правую части выражения (2) в квадрат, получим:

$$P_0^2 \times (R/r) \times e^{-2,4(r-R)} = P^2_{min}. \quad (3)$$

Далее перенесем все постоянные в правую часть, переменные, связанные с r, оставим в левой. Но при этом раскроем экспоненту: $e^{-2,4(r-R)} = e^{-2,4r} \times e^{2,4R}$, тогда имеем:

$$1/r \times e^{-2,4r} = P^2_{min} / P_0^2 \times R \times e^{2,4R}. \quad (4)$$

Затем для удобства расчета инвертируем дробь, тогда выражение (4) принимает вид:

$$r \times e^{2,4r} = P_0^2 \times R \times e^{2,4R} / P^2_{min}. \quad (5)$$

Далее следует воспользоваться функцией Ламберта. Для этого нужно записать выражение (5) в виде: $X \times e^x = Y$, которое имеет решение вида: $X = W(Y)$.

Затем умножим обе части выражения (5) на множитель (2,4). В результате получим:

$$2,4 \times r \times e^{2,4r} = 2,4 \times P_0^2 \times R \times e^{2,4R} / P^2_{min}. \quad (6)$$

Применяя функцию Ламберта, уравнение (6) имеет решение вида:

$$2,4 \times r = W \times (2,4 \times P_0^2 \times R^{2,4R} / P^2_{min}). \quad (7)$$

Далее разделим на множитель (2,4), что эквивалентно умножению на 10/24 = 5/12, получим:

$$r = 5/12 \times W \times (12 \times P_0^2 \times R^{2,4R} / 5 \times P^2_{min}), \quad (8)$$

где: **r – текущее значение радиуса воздействия ударной волны рабочего агента, м;** r_{max} – максимальный радиус воздействия ударной волны рабочего агента, м; R – радиус скважины, м (R = 0,127м); P_{min} – давление прекращения эффективной декольматации поверхности продуктивного горизонта, МПа (P_{min} = 0,1 МПа); P_0 – давление рабочего агента на стенку ствола скважины, МПа; W – главная ветвь W_0 функции Ламберта.

Давление на стенку ствола скважины можно оценить по формуле вида:

$$P_0 = (2 \times \rho \times c \times N \times \eta / S_d)^{1/2}, \quad (9)$$

где: N – полная мощность, Вт (N = 15кВт); S_d – площадь диска – источника колебаний, $м^2$ (при d =70 мм, S_d = 0,0115 $м^2$); $\rho \times c$ – акустический импеданс воды, $кг/м^2 \times с$ ($\rho \times c = 1,5 \times 10^6\ кг/м^2с$); **$\eta$ – коэффициент по-**

лезного действия гидровибратора (без учета потерь мощности).

$$P_0 = (2\times1{,}5\times 10^6 \times 15000\times 1 / 0{,}0115)^{1/2} = 1{,}900 \text{МПа} \quad (10)$$

Для определения $r = r_{max}$ обратимся к выражению (8), которое решаем в следующем порядке:

1.Вычисление аргумента (Y) функции Ламберта (W).

Подставим численные значения входящих в выражение (8) параметров, получим:

$$12 \times 1{,}9^2\times 0{,}127\times e^{2{,}4\times0{,}127} / 5\times 0{,}1^2 .$$

Найдем численное значение множителя:

$$e^{2{,}4\times0{,}127} = e^{0{,}3048} = 1{,}3564 .$$

Вычислим значение аргумента:

$$(Y) = 12 \times 3{,}61\times 0{,}127 \times 1{,}3564 / 0{,}05 = 149{,}24 .$$

2. Нахождение значения функции Ламберта.

Для аргумента Y = 149,24, значение главной ветви функции Ламберта будет равно:

$$W = W_0(149{,}24) = 3{,}6978 .$$

Определение максимального радиуса $r = r_{max}$

$$r = r_{max} = 5/12\times3{,}6978 = 0{,}4167\times3{,}6978 = 1{,}541 \text{ м}$$

$$r_{max} = 1{,}541 \text{ м}$$

Для выполнения проверки правильности решения поставленной задачи подставим полученный результат в исходное уравнение (2), получим:

$$1{,}9\times(0{,}127/1{,}541)^{1/2}\times e^{-1{,}2(1{,}541-0{,}127)} =$$
$$=1{,}9\times0{,}287\times e^{-1{,}6968} = 0{,}545\times0{,}183 = 0{,}1 \text{ МПа}.$$

Вывод: расчет по определению максимального радиуса r_{max} выполнен верно.

Далее определим для конкретных условий значения давления P (r) в зависимости от расстояния r согласно уравнению (2), а результаты расчета приведем в табл. 1.

Для оценки влияния радиуса скважины на характер изменения давления P(r) рассмотрим скважину диаметром 197 мм и определим, используя вышеуказанный методологический подход, при неизменных P_0 = 1,9 МПа и P_{min} = 0,1 МПа, максимальный радиус распространения эффективного действия ударной волны, а полученные результаты приведем в табл. 2.

По результатам расчета, приведенным в табл. 1 и 2, построим графики, показанные на рис. 1.

Далее определим величину давления P(r) и градиента давления (dP/dr), который показывает скорость падения давления рабочего агента на каждом метре в зависимости от расстояния между стенкой скважины и конкретной точкой песчаного горизонта. Расчет выполним для двух вариантов: 1) R = 127 мм и 2) R = 98,5 мм при удалении от стенки скважины на 10, 20, 50 и 100 мм. При этом следует иметь в виду, что для вышеуказанного уравнения (8), формула градиента давления имеет вид:

$$dP/dr = - P(r) \times (1/2r +1{,}2) . \quad (11)$$

При этом результаты расчета будут сведены в табл. 3, с учетом которых будут построены графики, показанные на рис. 2 и 3.

На основании полученных результатов можно сделать следующие основные выводы:

– первые 12 см (от 0,127 до 0,250 м) давление падает почти в 1,6 раза;

– давление падает с увеличением расстояния, в большей степени, из-за экспоненциального затухания $e^{-1{,}2(r-R)}$;

– на расстоянии r = 1,541 м давление становится в 19 раз меньше начального значения P_0 = 1,9 МПа;

– при уменьшении радиуса скважины R со 127 до 98,5мм (на 22%) расстояние, на котором сохраняется давление, превышающее 0,1 МПа, сократилось на 5% с 1,541 до 1,466м;

– на первых 100 мм от стенки скважины давление снижается примерно на 38–43% от начального значения P_0 = 1,9 МПа;

ТАБЛИЦА 1.

Зависимость давления рабочего агента P(r) от радиуса (вариант 1: R=127 мм)

Расстояние от оси скважины r, м	Давление P, МПа	Примечание
0,127	1,900	Начальная точка (r = R)
0,250	1,154	Резкое падение
0,500	0,612	–
0,750	0,358	–
1,000	0,221	–
1,250	0,141	–
1,541	0,100	r = rmax

ТАБЛИЦА 2.

Зависимость давления рабочего агента P (r) от радиуса (вариант 2: R=98,5 мм)

P Расстояние от оси скважины r, м	Давление P, МПа	Примечание
0,0985	1,900	Начальная точка (r = R)
0,200	1,178	Падение в 1,6 раза
0,500	0,517	
0,800	0,273	–
1,100	0,158	
1,1466	0,1	Равное Pmin
1,400	0,098	Близкое к Pmin

– в скважине меньшего диаметра (радиуса) давление падает быстрее;

– максимальная скорость падения давления почти 12 МПа/м происходит прямо на стенке ствола скважины в варианте 2: R = 98,5 мм;

– чем выше модуль градиента давления, тем интенсивнее происходит затухание величины его воздействия;

– основной вклад в затухание на указанных малых дистанциях вносит экспоненциальный показатель $e^{-1,2(r-R)}$;

– на дистанции 100 мм показатель $e^{-1,2(r-R)}$ дает снижение в 0,887 раз.

На рис. 4 представлены графики снижения производительности технологических скважин после пневмоимпульсной обработки (скв. 12-2-15, 12-2-4а) и механической вибрационной обработки (скв. 12-2-13). Результаты были получены при проведении ремонтно-

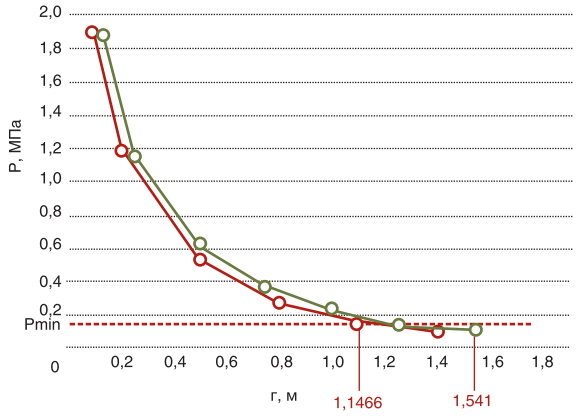


РИС. 1.

Графики зависимости $P(r) = P_0 \times (R/r)^{1/2} \times e^{-1,2(r-R)}$ для двух вариантов: 1) R = 127 мм – синяя линия; и 2) R = 98,5 мм – красная линия

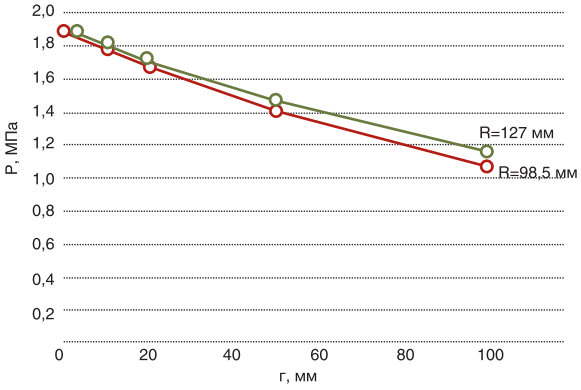


РИС. 2.

Графики зависимости давления рабочего агента P(h) от толщины слоя глинистого кольматанта для двух вариантов: 1) R = 127 мм и 2) R = 98,5 мм

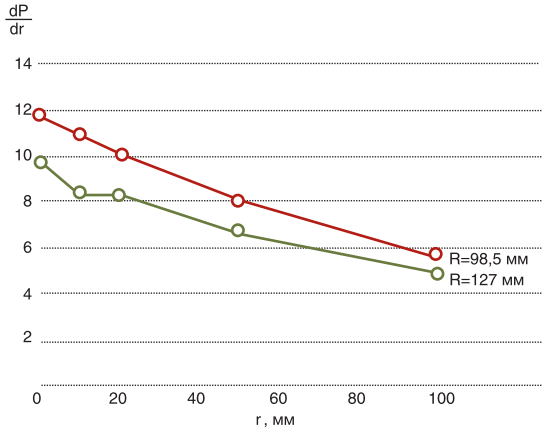


РИС. 3.

Графики зависимости градиента давления рабочего агента dP/dr(h) от толщины слоя глинистого кольматанта для двух вариантов: 1) R = 127 мм и 2) R = 98,5 мм

ТАБЛИЦА 3.

Величина давления P, МПа и градиенты давления dP/dr, МПа/м

Удаление от стенки с скважины (r-R), мм	Параметр P(МПа) и dP/dr (МПа/м)	Вариант 1: R=127 мм	Вариант 2: R=98,5 мм	Разница (P1-P2), МПа
0 мм	P, МПа	1,900	1,900	0
	dP/dr	-9,76	-11,72	2,16
10 мм	P	1,808	1,789	0,019
	dP/dr	-8,37	-10,90	1,93
20 мм	P	1,720	1,684	0,036
	dP/dr	-8,25	-10,03	1,780
50 мм	P	1,480	1,414	0,066
	dP/dr	-6,63	-7,96	1,33
100 мм	P	1,173	1,079	0,094
	dP/dr	-4,93	-5,72	0,79

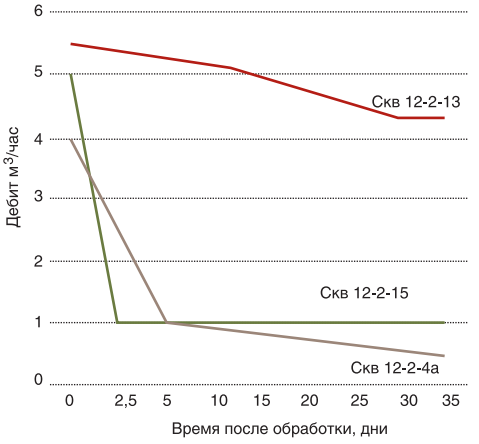


РИС. 4.

Графики снижения производительности откачных скважин после пневмоимпульсной и механической вибрационной обработок фильтров и прифильтровых зон

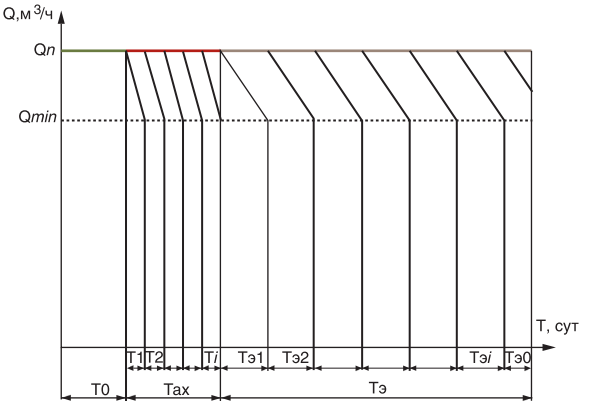


РИС. 5.

Принципиальный график вибрационных обработок фильтров и прифильтровых зон для удаления продуктов химической кольматации

восстановительных работ на одном из месторождений Республики Казахстан.

Как следует из приведенного графика, скорость снижения дебита скважины после пневмоимпулсной обработки составляет от 0,6 до 1,6 м^3/час×сут за период от 2,5 до 5 первых суток после обработок, для механической вибрационной обработки этот показатель составил 0,04 м^3/час×сут за 30 суток наблюдений. По результатам первых обработок изготовленный в единственном экземпляре опытный образец использовался для ремонта сотен скважин, доказав свою эффективность по сравнению с другими методами поддержания дебита. При этом значительно сокращалась продолжительность освоения скважин после обработки за счет высоких входных скоростей пластовой жидкости в фильтр и быстрого удаления продуктов кольматации.

ВИБРАЦИОННЫЙ СПОСОБ УДАЛЕНИЯ ПРОДУКТОВ ХИМИЧЕСКОЙ КОЛЬМАТАЦИИ ИЗ ПРИФИЛЬТРОВЫХ ЗОН

Вибрационная механическая система, применяемая для декольматации пород прифильтровой зоны и первых метров от фильтра пород продуктивного горизонта, может быть также рекомендована для эффективного удаления пленок химических осадков из порового пространства пород продуктивного горизонта. Ею замещают химическую обработку ПФЗ при проведении ремонтно-восстановительных работ для поддержания производительности скважин на проектном уровне. Методологический подход поясняется графиком, приведенным на рис. 5.

$Q_п$, Q_{min} – проектная и минимально допустимая производительности скважин; $T_о$ – период ожидания скважины ввода в режим подачи рабочих растворов после освоения, $T_{ах}$ – период протекания активных процессов химической кольматации в продуктивном горизонте, $T_э$ – основной период эксплуатации скважины с минимальной химической кольматацией в продуктивном горизонте.

Физическая суть процесса разрушения (истирания) химических отложений (пленок) в поровом пространстве продуктивного горизонта изложена в работах авторов [9–11]. Следует иметь ввиду, что величины $Q_п$, Q_{min}, $T_о$, $T_{ах}$. $T_э$ определяются для каждого отдельно взятого месторождения или залежи на основании опытных работ. На этой же стадии рассчитываются эффективные режимы работы вибрационной механической системы: расход воды для выполнения работ, эффективная и достаточная энергия единичного удара, величины межремонтных циклов и т. д. При этом следует иметь в виду, что величина каждого последующего межремонтного цикла по мере удаления продуктов химической кольматации будет больше предыдущего:

$$T_1 < T_2 < \ldots < T_i;\ T_{э1} < T_{э2} < \ldots < T_{эi} \qquad (12)$$

На основании выполненных рассуждений можно сделать следующие основные выводы:

– вибрационный метод позволяет эффективно удалять продукты разрушения химического кольматанта из прифильтровой зоны технологических скважин СПВ урана;

– правильно подготовленная методика для данного вида ремонтно-восстановительных работ по поддержанию производительности скважин в процессе их эксплуатации позволяет заменить длительные, опасные с точки зрения производственной безопасности химические обработки скважин.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИДРОИЗОЛЯЦИИ ЗАКОЛОННОГО ПРОСТРАНСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН СПВ

Гидроизоляция заколонного пространства технологических скважин СПВ урана – один из самых ответственных элементов как технологического процесса сооружения скважин, так и ее конструкции. В качестве материала гидроизоляции в настоящее время применяют различные цементные, глиноцементные, полимерные и другие виды растворов. Анализ обоснованности их применения – тема отдельной работы. В связи с темой настоящей работы важнейшим является вопрос степени замещения промывочной жидкости в заколонном пространстве материалом гидроизоляции. Этим вопросам посвящены многие исследования [4, 6, 7 и др.].

Наиболее широко применяемыми для гидроизоляции заколонного пространства являются цементные растворы. Основным показателем качества разобщения пластов является полнота замещения промывочной жидкости в заколонном пространстве цементным раствором, причем полнота замещения выражается через коэффициент замещения (коэффициент вытеснения) $К_в$, 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 СССР, так и за рубежом: М.О. Ашрафьян, А.И. Булатов, М.П. Гулизаде, Д.Я. Крылов, А.Х. Мирзаджаназа-де, В.В. Сутягин, Р.В. Уханов, Г.С. Говард, Д.Б. Кларк, и др.

В результате выполненных работ было установлено, что основными факторами, определяющими величину $К_в$, являются:

– положение обсадной колонны в скважине;

– скорость восходящего потока цементного раствора;

– реологические свойства вытесняющей и вытесняемой жидкости;

– наличие напорных водоносных горизонтов в интервале гидроизоляции;

– толщина и физико-химические свойства глинистой корки в интервале проницаемых пород и т. д.;

– удаление глинистой корки со стенок скважины в интервалах проницаемых пород;

– вращение и расходка обсадных колонн в процессе цементирования;

– применение эксцентриков, установленных на колонне в интервалах кавернозных участков ствола с вращением колонны в процессе цементирования;

– цементирование обсадных колонн с применением подпружиненных центраторов, диаметр которых больше 80% диаметра ствола скважины;

– применение буферных жидкостей для разделения промывочной жидкости и цементного раствора;

– использование разделительных пробок при внутриколонной подаче цементного раствора в скважину.

Несмотря на изученность вопроса применения цементных растворов для крепления стенок 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 [14] отмечают следующее: «Анализ состояния крепления скважин 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».

Анализируя возможность применения цементного раствора для гидроизоляции заколонного пространства технологических скважин, оборудованных эксплуатационными колоннами из полиэтилена, можно отметить дополнительные сложности:

– значительное различие коэффициентов температурного расширения цементного камня и полиэтилена. В работе [10] отмечается, что при перепаде температур рабочих растворов 15–22° С в теле трубы ПНД-110 СТ возникает осевая сила 22–46 кН, что может привести к нарушению целостности колонны, особенно в резьбовых соединениях.

– отсутствие сцепления полимеров с цементным камнем (напряжение на сдвиг составляет 0,01–0,08 МПа, сцепление цементного камня со стальными трубами – 0,21–0,89 МПа).

– практическая невозможность осуществления большинства вышеперечисленных технологических операций и приемов в обеспечивающих достижение высокого коэффициента замещения $К_в$ =1,0.

– 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 не отработана. Кроме того, технология обратного цементирования обладает существенным недостатком: практической невозможностью фиксации времени входа цементного раствора внутрь эксплуатационной колонны.

В связи с изложенным представляется, что совершенствование технологии цементирования заколонного пространства, позволяя ограниченно решить вопрос качества сооружения скважин СПВ, 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 цементов.

Для определения химической стойкости цементного камня к воздействию растворов H_2SO_4, был выполнен следующий опыт.

В магистраль выщелачивающих растворов, в которую растворы и зумпфа подаются 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 с толщиной стенки 3,5 мм. Длина (высота) образца составляла 50 мм. Соединение труб со стаканом осуществлялось через переходные фланцы.

Плотность материала образцов составляла 1,74 г/см^3, ОЗЦ происходило в водной среде в течение 7 суток. Выдержка приготовленных образцов составила 60 суток. Общая продолжительность эксперимента – 250 суток. Подача выщелачивающих растворов производилась в режиме свободного налива, среднее содержание H_2SO_4 в растворе – 10 г/л, контактная площадь цементного камня составляла 50% площади торца образца.

После окончания работ был замерен объем растворенного рабочими растворами цементного камня. Замер проводился объемным методом. Скорость разрушения цементного камня по площади контакта составила 0,012–0,02 мм/сут, что говорит о недостаточной стойкости цементного камня на основе сульфатостойкого цемента к воздействию рабочих растворов кислот.

Отдельно стоит вопрос о величине коэффициента замещения промывочной жидкости (глинистого раствора) в заколонном пространстве цементным раствором при применяемых в настоящее время технологиях цементирования (подача цементного раствора по заливочным трубам, спущенным в заколонное пространство, или при внутриколонной подаче раствора через заливочные муфты, установленные на эксплуатационной колонне). Такие технологии не могут обеспечить полное вытеснение глинистого раствора цементным в интервале цементирования. Авторами были проанализированы результаты определения плотности материала гидроизоляции в заколонном пространстве, полученные методом гамма-гамма каротажа. График плотности по одному из месторождений Республики Казахстан приведен на рис. 6.

Интервал цементирования составлял 20–240 м, плотность цементного раствора, пода-ваемого в скважину, – 1,74 г/см^3, плотность глинистого раствора в скважине – 1,17 г/см^3, статический уровень пластовой жидкости в эксплуатационной колонне – 20 м. Скважины бурились долотом диаметром 190,5 мм, наружный диаметр труб эксплуатационной колонны – 110 мм (трубы ПНД 110×18).

Результаты опытных работ по определению плотности глиноцементного камня в зави-симости от соотношения объемов глинистого и цементного растворов приведены в табл. 4.

Сопоставляя данные графика рис. 6 и табл. 4 можно сделать вывод о том, что материал гидроизоляции в заколонном пространстве технологических скважин представлен глиноцементным камнем с содержанием цемента от 50 до 60%. Кислотостойкость глиноцементного камня приведена в табл. 5.

В числителе приведены данные для концентрации серной кислоты 5 г/л, в знаменателе – для концентрации 20 г/л. Очевидно, что ни по технологическим параметрам, ни по химической стойкости глиноцементный раствор не обеспечивает надежную гидроизоляцию заколонного пространства технологических скважин СПВ урана. Авторами рассмотрен вариант улучшения материала гидроизоляции в заколонном пространстве путем виброобработки интервала гидроизоляции гидровибратором УРК, спущенным

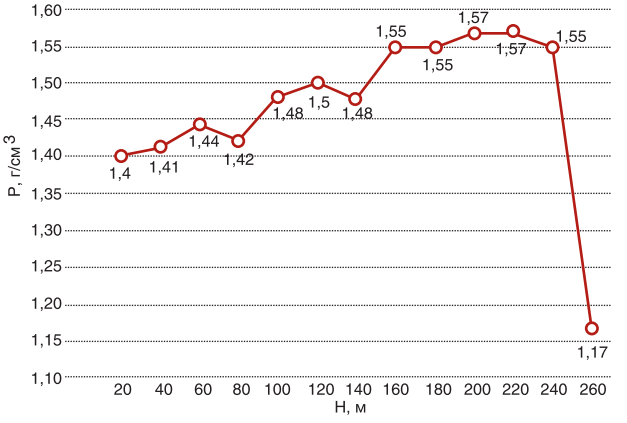


РИС. 6.

График плотности материала в заколонном пространстве при замещении глинистого раствора цементным

ТАБЛИЦА 4.

Плотность глиноцементного раствора

Объем глинистого р-ра, дм³	1,0						
Объем цементного р-ра, дм³	0,25	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0
Плотность глиноцементного р-ра, дм³	1,36	1,42	1,5	1,56	1,6	1,65	1,68

ТАБЛИЦА 5.

Кислотостойкость тампонажных материалов

Вид материла	**Количество выщелаченных окислов, мг**			**Снижение стойкости, р раз**
	CaO	**R_2O**	Σ	
Тампонажный цемент для «холодных» скважин	1188 1224	304 389	1492 1613	1,0 1,0
Глиноцемент (70% цемент 30% глина)	1809 1533	596 890	2405 2423	1,6 1,5
Глиноцемент (50% цемент 50% глина)	1876 1526	829 869	2705 2395	1,8 1,5

внутрь эксплуатационной колонны и перемещаемый в этом интервале непосредственно после подачи в скважину цементного раствора.

При работе гидровибратора с указанными параметрами в заколонном пространстве будут происходить следующие процессы.

1. Виброразжижение: глиноцементный раствор под воздействием вибрации с частотой 43,3 Гц временно теряет статическое напряжение сдвига. Он становится более текучим, что способствует заполнению каверн и пустот, которые могли остаться при первичном цементировании.

2. Разрушение структуры: гидроудары энергией 346,6 Дж создают переменное давление. Это помогает «отлепить» раствор от стенок скважины и внешней поверхности трубы НПВХ, улучшая их сцепление с глиноцементным камнем за счет удаления фильтрационной корки и замещения ее свежим раствором.

3. Уплотнение: вибрация способствует вытеснению защемленного газа и излишков воды из раствора. В результате плотность цементного камня после затвердевания будет выше, а количество пор – меньше.

4. Риск для трубы: учитывая толщину стенки трубы, равную10 мм, энергия удара значительна. При длительном нахождении вибратора в одной точке возможна усталостная деформация НПВХ или нарушение герметичности резьбовых соединений.

В результате вибрационной обработки интервала гидроизоляции раствор в заколонном пространстве становится более однородным, плотнее прилегает к породе и трубе, что значительно повышает качество такого вида работ по сооружению технологических скважин.

Теоретические основы применения способа приведены ниже. Рассмотрен вариант технологической скважины диаметром 254 мм, оборудованной эксплуатационной колонной НПВХ 140х10. Оптимальная скорость вертикального перемещения гидровибратора для таких параметров составляет 1,5–3,0 м/мин. При частоте 43,3 Гц и энергии удара 346,6 Дж общая мощность воздействия превышает 15 кВт. Для трубы НПВХ 140×10 мм такая интенсивность является предельной, поэтому скорость движения должна быть строго регламентирована: минимальная скорость (1,5 м/мин) необходима для предотвращения локального перегрева пластика и усталостного разрушения стенки трубы. Трубы НПВХ чувствительны к длительному динамическому воздействию в одной точке. Максимальная скорость (3,0 м/мин) ограничена временем, необходимым для развития тиксотропного эффекта в глиноцементном растворе. При более быстром движении раствор в заколонном пространстве не успеет перейти в стадию разжижения и эффективно уплотниться.

Рекомендации по режиму работы вибровибратора следующие.

1. Непрерывность: необходимо избегать остановок вибратора во включенном состоянии, остановка более чем на 20–30 сек. в одной точке может привести к микротрещинам в трубе.

2. Направление: движение необходимо производить снизу вверх (на подъем), что способствует естественному выходу вытесняемого воздуха и избыточной жидкости из раствора.

3. Контроль: резкое падение давления в системе гидроудара, что может сигнализировать о начале разрушения целостности заколонного слоя или деформации трубы – в этом случае скорость следует увеличить. Для контроля качества цементирования в случае с трубами НПВХ важно учитывать специфику мате-

риала, так как стандартный АКЦ (акустический каротаж) дает искаженные данные из-за низкой акустической жесткости пластика по сравнению со сталью, и в скважинах, оборудованных полимерными обсадными трубами, неприменим.

В интервалах с кавернами (расширение ствола более 300–350 мм) скорость перемещения вибратора стоит снизить до 1–1,2 м/мин, так как там объем растворов значительно больше и для его смешения требуется больше времени.

Для расчета технологии виброобработки заколонного пространства в интервале гидроизоляции используются три параметра: объем порции раствора, удельная энергия разрушения структуры и мощность гидровибратора УРК.

1. Расчет объема воздействия (V) на 1 метр.

Определяется объем раствора в кольцевом пространстве на 1 погонный метр:

$$V = \pi \times (D_c^2 - D^2) / 4 ,$$

где: $D_c = 0{,}254$ м; $D = 0{,}140$ м.

2. Определение необходимого времени активации (t).

Для того, чтобы раствор перешел в состояние виброразжижения, ему нужно передать определенное количество энергии ($E_{уд}$), обычно составляющее 10–15 кДж/м^3 для стандартных глиноцементных растворов. Требуемая энергия на 1 метр скважины:

$$Q_{req} = V_m \times E .$$

3. Мощность вибратора (W).

Мощность рассчитывается через частоту (f) и энергию единичного удара (E_i):

$$W = f \times E_i .$$

В нашем случае имеем:

$$W = 43{,}3 \times 346{,}6 = 15000 \text{ (Вт)} = 15 \text{ кВт} .$$

4. Итоговая формула скорости (v).

Скорость перемещения определяется как отношение мощности прибора к требуемой энергии на 1 метр:

$$v = (W / Q_{reg}) \times \eta ,$$

где: η – коэффициент полезного действия (передачи энергии через стенку НПВХ), который для пластика принимается равным 0,5–0,6 (из-за высокого демпфирования).

Для скважины глубиной 100 м и цементируемого интервала 30 м (от забоя 100 м до отметки 70 м) расчет параметров будет следующим:

Расчет объема раствора.

Для скважины диаметром 254 мм и обсадной трубы 140 мм ×10 имеем:

Площадь сечения кольцевого пространства:

$$S = \pi \times (0{,}254^2 - 0{,}140^2) / 4 = 0{,}035 \text{ м}^2 .$$

Объем на 30 м интервала (без учета каверн):

$$V = 30 \times 0{,}0353 = 1{,}06 \text{ м}^3 .$$

С учетом коэффициента кавернозности (к =1,2 – 1,3) потребуется примерно 1,3–1,4 м^3 глиноцементного раствора.

2. Технология виброобработки.

При частоте колебаний дискового гидровибратора 43,3 Гц и энергии ударного импульса давления 346,6 Дж общее время «чистой» работы вибратора на этом интервале составит: при скорости 2 м/мин (оптимально для НПВХ) проход 30 м займет 15 мин. За это время система совершит около 39 000 ударов, передав раствору суммарную энергию более 13,5 МДж.

Рекомендуемый регламент работ.

1. Спуск вибратора: гидровибратор УРК опускается на забой (100 м) сразу после закачки глиноцементного раствора и его продавливания.

2. Активация: гидровибратор включается и начинается его плавный подъем.

3. Скорость подъема: в интервале 100–70 м скорость подъема должна находиться в пределах 1,5–2,0 м/мин.

4. В зоне «головы» цемента (75–70 м) рекомендуется замедлить скорость подъема вибратора до 1 м/мин, так как в верхней части интервала часто скапливается наиболее обводненный и слабый раствор («цементное молоко»), который требует более тщательного уплотнения для создания герметичного моста.

5. Окончание работы следует проводить на отметке 65 м (5 метров выше расчетного уровня материала гидроизоляции), вибратор выключается, чтобы не размывать верхнюю границу раствора в промывочной жидкости.

Критический нюанс для труб НПВХ 140×10: на глубине 100 м гидростатическое давление невелико (~1,0–1,2 МПа), но вибрация в замкнутом объеме (если заколонное пространство заполнено шламом) может создать локальные скачки давления. При выполнении работ по описанной технологии важно обеспечить свободный выход вытесняемой жидкости на устье, чтобы не разрушить полимерную трубу.

Далее следует подготовить техническую схему размещения центраторов на колонне, чтобы вибрация распределялась равномерно, и труба не касалась стенок скважины.

Для колонны НПВХ 140×10 в скважине диаметром 254 мм при работе гидровибратора правильная расстановка центраторов – это залог того, что трубу

не «прибьет» вибрацией к стенке, и раствор распределится равномерно. Для приведенного примера рекомендуется следующая схема размещения на интервале 100–70 м.

1. Нижний (базовый) центратор устанавливается на расстоянии 1,5–2 м от башмака (забоя). Он фиксирует нижний участок эксплуатационной колонны, где амплитуда вибрации максимальна.

2. Учитывая гибкость труб НПВХ и диаметр долота (зазор в 57 мм на сторону), оптимальный шаг между центраторами в интервале гидроизоляции – 6 м (итого на 30 м – 5–6 штук).

3. Верхний (ограничительный) центратор устанавливается на отметке 65–68 м (выше проектной отметки интервала гидроизоляции), чтобы зафиксировать эксплуатационную колонну в зоне перехода от материала гидроизоляции к промывочной жидкости.

Рекомендации по типу и монтажу центраторов.

1. Тип: лучевые (фонарные) центраторы из полимера или с обрезиненными ребрами.

2. Свободный ход: центратор должен быть «плавающим» между двумя стопорными кольцами. Это позволит трубе совершать микроколебания, необходимые для разжижения раствора, без передачи избыточной нагрузки на центратор.

3. Симметрия: для приведенного примера (кольцевой зазор 57 мм) рекомендуется центратор с внешним диаметром 245–250 мм. Это обеспечит гарантированный проход цементного раствора даже при небольшом изгибе колонны.

4. Результат: такая схема исключит «застойные зоны» (эксцентриситет), где раствор может оставаться неоднородным.

Опыт эксплуатации технологических скважин, оборудованных эксплуатационными колоннами из полимерных труб, показывает, что в процессе их эксплуатации возможна частичная разгерметизация колонн отдельных скважин и возникновение утечек рабочих растворов [10 и др.], что предполагает проведение ремонтных работ по ликвидации каналов утечек в заколонное пространство скважин. Решение этих вопросов, как и решение ликвидации образованных в материале гидроизоляции каналов перетоков рабочих растворов в процессе эксплуатации скважин – тема отдельной работы.

Опыт обработок сотен скважин показал, что вибрации, создаваемые в интервале установки фильтра, не приводят к микротрещинам в цементном камне выше интервала установки фильтра.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОХРАНЕНИЯ ЦЕЛОСТНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ КОЛОННЫ В ИНТЕРВАЛЕ КРИОЛИТОЗОНЫ

Сооружение и эксплуатация технологических скважин СПВ в интервале криолитозоны может сопровождаться попаданием в заколонное пространство воды различного происхождения: деятельного слоя или пластовых вод при высоких пластовых напорах. Следствием является замерзание воды с образованием льда различной структуры: сплошной кристаллической (при спокойном замерзании воды), игольчатой (часто с наличием пузырьков воздуха, образуется в месте соприкосновения воды и льда), слоистой (при периодических замерзаниях отдельных слоев воды или при уплотнении отдельных мокрых слоев снега), фирновой (зернистой, образуется при смерзании снега), мелькоагрегатчатой неправильной (при переменном замерзании с перемешиванием), рыхло-чашуйчатой (в свежевыпавшем снежном покрове и при замерзании воды, конденсирующейся из пара). Для сохранения геометрических параметров полимерных обсадных труб необходимо, чтобы возникающее избыточное внешнее давление на наружную поверхность труб не превышало их прочностные характеристики. Оно формируется из-за увеличения объема замерзшего льда по сравнению с объемом исходной воды на 9%. Расчет величины давления приведен в работе [1]. На рис. 7 приведен пример смятия эксплуатационной колонны из труб НПВХ 140x10 льдом, сформированным при попадании в заколонное пространство воды деятельного слоя.

Следует иметь ввиду, что опасность для целостности полимерных обсадных труб представляет сплошная кристаллическая структура льда при толщине ледяного кольца за колонной более 17–19 мм. Расчеты показали, что при больших значениях этой величины происходит деформация колонны (смятие). Другие из вышеперечисленных структур льда не представляют опасности для целостности полимерных обсадных труб. В работе [2] приведен вариант формирования слоистой структуры льда за пределами эксплуатационной колонны. Такая структура может быть сформирована с использованием греющего кабеля, размещенного внутри эксплуатационной колонны в интервале криолитозоны. Особенность предложенного метода заключается в том, что время прогрева ледяного кольца должно исключать полное растопление льда в заколонном пространстве. В противном случае полностью

РИС. 7.
Смятие эксплуатационной колонны из труб НПВХ 140×10 на глубине 3,8 м

растопленый до состояния воды лед вновь замерзнет в виде сплошной кристаллической структуры.

Более надежным и легко реализуемым является формирование в заколонном пространстве искусственно разрушенной до мелкоагрегатных обломков сплошной кристаллической структуры. Это производится импульсным воздействием на эту структуру с помощью вибратора (УРК). Теория такого воздействия приведена выше. Особенности применения УРК для целей формирования разрушенной сплошной кристаллической структуры льда следующие: вибратор должен запускаться в работу на устье после спуска его внутрь эксплуатационной колонны; скорость спуска в интервале криолитозоны и энергия удара должны соответствовать параметрам, так же приведенным. Важным является то, что способ необходимо и возможно применять на стадии сооружения скважин, когда полимерные обсадные трубы, подверженные старению, обладают максимальной начальной прочностью (максимальной кольцевой жесткостью).

Предлагаемая модель разрушения ледяного стакана требует дальнейшей математической проработки. Одним из вариантов применения модели может быть вибрационная механическая обработка интервала криолитозоны на стадии формирования ледяного стакана, что исключит формирование сплошной кристаллической структуры льда.

ВЫВОД

Предлагаемый авторами вариант внутрискважинного применения вибрационной механической системы в виде унифицированного устройства позволяет решить вопросы качественного освоения ПФЗ на стадии сооружения и выполнения ремонтно-восстановительных работ в скважине, а также исключить химическую обработку фильтров и прифильтровых зон путем ее замены на виброобработку, которая увеличивает продолжительность межремонтного цикла и позволяет значительно улучшить качество гидроизоляции заколонного пространства за счет исключения застойных зон с невытесненными очагами глинистого раствора, и кроме того, способствовать сохранению целостности полимерных эксплуатационных колонн при замерзании воды в заколонном пространстве скважин, сооружаемых в условиях криолитозоны.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Арсентьев Ю.А., Назаров А.П., Забайкин Ю.В., Иванов А.Г.** О расчете эксплуатационных колонн из полимерных материалов для условий многолетнемерзлых горных пород // Актуальные проблемы и перспективы развития экономики: российский и зарубежный опыт. Научное обозрение. 2019. Вып. №21 (март). С. 27–32.
2. **Арсентьев Ю.А., Иванов А.Г., Орехов Д.Д., Гаврилов Р.И.** О некоторых особенностях расчета конструкции технологических скважин для добычи урана, сооруженных в многолетнемерзлых породах / Сб. трудов XI Межд-ой науч.-практич. конференции «Развитие урановой и редкометалльной промышленности». I часть. Алматы. 2024. С. 105–110.
3. **Ашрафьян М.О., Луничкин В.А., Динмухаммедов Д.Х.** Совершенствование технологии цементирования скважин // Обзорная информация. Сер. Бурение. М.: ВНИИОЭНГ. Вып. 7. 1986. 44 с.
4. **Бабкин А.С., Иванов А.Г., Михаайлов А.Н., Гурулев Е.А., Алексеев Н.А., Арсентьев Ю.А. и др.** Восстановление производительности технологических скважин при скважинном подземном выщелачивании урана // Московский экономический журнал. 2019. №2. С. 84–100.
5. **Бабкин А.С., Иванов А.Г., Арсентьев Ю.А., Мешков Е.Ю., Чернобровкин Н.А., Орехов Д.Д., Гаврилов Р.И.** Кольматация фильтров и прифильтровых зон технологических скважин скважинного подземного выщелачивания урана // Вестник РАЕН. 2025. №3. С. 11–23.
6. **Башкатов Д.Н., Сулакшин С.С., Драхлис С.А.** Справочник по бурению скважин на воду. М.: Недра. 1980. 560 с.
7. **Булатов А.И.** Детективная биография герметичности крепи нефтяных и газовых скважин. 3-е издание. Краснодар: Просвещение-Юг. 2009. 934 с.
8. **Докучаев В.И., Федоров Н.Ф., Велли Ю.Я. и др.** Справочник по строительству на вечномерзлых грунтах. Л.: Стройиздат. Ленинградское отделение. 1977. 552 с.
9. **Иванов А.Г., Михайлов А.Н., Алексеев Н.А., Иванов Д.А., Арсентьев Ю.А., Соловьев Н.В., Назаров А.П.** Ремонтно-восстановительные работы для повышения производительности технологических скважин // Разведка и охрана недр. 2020. №6. С. 52–57.
10. **Иванов А.Г., Арсентьев Ю.А., Соловьев Н.В., Гладышев А.В., Солодов И.Н., Иванов Д.А.** Сооружение и эксплуатация технологических скважин подземного выщелачивания в криолитозоне. М.: МГРИ. 2025. 244 с.
11. **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. 97–104.
12. **Касперский Б.В.** Проникновение твердой фазы в пористую среду // Нефтяное хозяйство. 1971. №9. С. 17–26.
13. **Прусова Н.Л.** Исследование процесса закупоривания проницаемых пород дисперсной фазой раз-

личных буровых растворов и разработка очистительных устройств. Автореферат дисс. на соискание уч. ст. к.т.н. ВНИИБТ. 1988. 24 с.

14. **Рябоконь С.А., Гольдштейн В.В.** Перспективы развития полимерных тампонажных материалов // Нефтяное хозяйство. 1989. №5. С. 7–13.

REFERENCES

1. **Arsentiev Yu.A., Nazarov A.P., Zabaikin Yu.V., Ivanov A.G.** On the calculation of operational columns made of polymer materials for permafrost conditions. *Aktual'nyye problemy i perspektivy razvitiya ekonomiki: rossiyskiy i zarubezhnyy opyt. Nauchnoye obozreniye.* 2019;21(March):27–32. (In Russian).
2. **Arsentiev Yu.A., Ivanov A.G., Orekhov D.D., Gavrilov R.I.** On some features of calculating the design of technological wells for uranium extraction constructed in permafrost rocks. Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference "Development of the uranium and Rare Metal industry". Part I. Almaty. 2024:105–110. (In Russian).
3. **Ashrafyan M.O., Lunichkin V.A., Dinmukhammedov D.H.** Improving the technology of well cementing. *Obzornaya informatsiya. Ser. Bureniye.* Moscow: VNIIOENG. 1986; 7:44. (In Russian).
4. **Babkin A.S., Ivanov A.G., Mikhaylov A.N., Gurulev E.A., Alekseev N.A., Arsentiev Yu.A. et. al.** Restoration of the productivity of technological wells during borehole underground leaching of uranium. *Moskovskiy ekonomicheskiy zhurnal.* 2019;2:84–100. (In Russian).
5. **Babkin A.S., Ivanov A.G., Arsentiev Yu.A., Meshkov E.Yu., Chernobrovkin N.A., Orekhov D.D., Gavrilov R.I.** Colmatation of filters and filter zones of technological wells of borehole underground uranium leaching. *Vestnik RAYEN.* 2025;3:11–23. (In Russian).
6. **Bashkatov D.N., Sulakshin S.S., Drakhlis S.A.** Handbook of drilling wells for water. Moscow: Nedra. 1980:560. (In Russian).
7. **Bulatov A.I.** Detective biography of the tightness of the fastener of oil and gas wells. 3rd edition. Krasnodar: Prosveshcheniye-Yug. 2009:934. (In Russian).
8. **Dokuchaev V.I., Fedorov N.F., Velli Yu.Ya. et. al.** Handbook of construction on permafrost soils. Leningrad: Stroyizdat. Leningradskoye otdeleniye. 1977:552. (In Russian).
9. **Ivanov A.G., Mikhailov A.N., Alekseev N.A., Ivanov D.A., Arsentiev Yu.A., Soloviev N.V., Nazarov A.P.** Repair and restoration work to increase the productivity of technological wells. *Razvedka i okhrana nedr.* 2020;6:52–57. (In Russian).
10. **Ivanov A.G., Arsentiev Yu.A., Solovyov N.V., Gladyshev A.V., Solodov I.N., Ivanov D.A.** Construction and operation of technological wells of underground leaching in the cryolithozone. Moscow: MGRI. 2025:244. (In Russian).
11. **Ivanov A.G., Arsentiev Yu.A., Orekhov D.D., Gavrilov R.I.** On some features of mechanical pulse treatment of filters and filter zones of technological wells of underground uranium leaching. I*zvestiya vuzov. Geologiya i razvedka.* 2025;1:97–104. (In Russian).
12. **Kaspersky B.V.** Penetration of the solid phase into a porous medium. *Neftyanoye khozyaystvo.* 1971;9:17–26. (In Russian).
13. **Prusova N.L.** Investigation of the process of plugging permeable rocks with a dispersed phase of various drilling fluids and development of cleaning devices. Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. VNIIBT. 1988:24. (In Russian).
14. **Ryabokon S.A., Goldstein V.V.** Prospects for the development of polymer grouting materials. *Neftyanoye khozyaystvo.* 1989;5:7–13. (In Russian).

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, Moskow, Mikluho-Maklaya st., 23,
тел.: +7 (985) 145-62-07, e-mail: arsentev1956@yandex.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, Moskow, Kashirskoe sh., 33,
e-mail: Ivanov_ag@mail.ru

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

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

УДК 662.013.3
DOI: 10.52531/1682-1696-2026-26-3-16-26
Научная статья

EDN: BEIUZF

НОВАЯ НАУЧНАЯ МОДЕЛЬ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННОЙ СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ МЕТАЛЛОВ: ТЕОРИЯ, ПОТЕНЦИАЛ И ОСВОЕНИЕ

М.С. Кунаев[1], Е.Е. Акбаров[2], А.Х. Сыздыков[3], М.Ж. Битимбаев[3], Р.Н. Шадиев[4]

[1] «Caspian Services Inc. JSC» (г. Алматы Республика Казахстан)
[2] Комитет геологии Министерства промышленности и строительства Республики Казахстан (г. Астана, Республика Казахстан)
[3] Институт геологических наук им. К.И. Сатпаева (г. Алматы Республика Казахстан)
[4] АО «Дарума Капитал» (г. Алматы, Республика Казахстан)

Полное освоение недр и сохранение качественной природной среды – два основных требования, ставшие для будущего развития горного производства фундаментом, на котором строятся современные здания не только горных наук, но и самой материальной основы благополучия цивилизации. Эти два фактора жизнеспособности человечества стали таковыми относительно недавно. Освоение недр в режиме уверенности постоянной обеспеченности сырьевой базой было результатом ошибочной оценки состояния ее, как неиссякаемой. Вопросы охраны окружающей среды также рассматривались не в разряде первостепенной важности, поэтому осознание обязательности осваивать недра технологиями воспроизводящего и сберегающего формата управляемыми техногенными системами сохранения и самовосстановления пространства оруденения стало началом нового этапа развития горных наук. Второе направление реализации принципа «созидательного освоения недр», определившее совокупное управляемое решение задач создания неисчерпаемой в историческом масштабе времени новой сырьевой базы, построено на позитивном взаимодействии двух источников образования металлов.

Ключевые слова: *новая сырьевая база, источники в геологической (природной) среде в недрах, источники в техногенной среде «второй природы» вне недр, взаимодействие природной среды с техногенными процессами*

© 2026, М.С. Кунаев, Е.Е. Акбаров, А.Х. Сыздыков, М.Ж. Битимбаев, Р.Н. Шадиев
Поступила в редакцию 17.06.2026

Original article

A NEW SCIENTIFIC MODEL OF THE NATURAL AND MAN-MADE RAW MATERIAL BASE OF METALS: THEORY, POTENTIAL AND DEVELOPMENT

M.S. Kunaev[1], E.E. Akbarov[2], A.Kh. Syzdykov[3], M.Zh. Bitimbayev[3], R.N. Shadiev[4]

[1] Caspian Services Inc. JSC" (Almaty, Republic of Kazakhstan)
[2] Committee of Geology of the Ministry of Industry and Construction of the Republic of Kazakhstan (Astana, Republic of Kazakhstan)
[3] Institute of Geological Sciences im. K.I. Satpayeva (Almaty, Republic of Kazakhstan)
[4] Daruma Capital JSC (Almaty, Republic of Kazakhstan)

The complete development of the subsoil and the preservation of a high-quality natural environment are two basic requirements that have become the foundation for the future development of mining production, on which modern buildings are built not only for mining sciences, but also for the very material basis of the well-being of civilization. These two factors of humanity's vitality have become such relatively recently. The development of the subsurface in the regime of confidence in the constant availability of the raw material base was the result of an erroneous assessment of its state as inexhaustible. Environmental protection issues were also not considered in the category of primary importance, therefore, the awareness of the need to develop the subsoil with technologies of a reproducing and conservation format, controlled by man-made systems for the conservation and self-restoration of the mining area, marked the beginning of a new stage in the development of mining sciences. The second direction of the implementation of the principle of "creative development of the subsoil", which determined the cumulative controlled solution of the tasks of the set goal of creating a new raw material base inexhaustible in historical time, is based on the positive interaction of two sources of metal formation.

Key words: *New raw material base, sources in the geological (natural) environment in the subsurface, sources in the man-made environment of the "second nature" outside the subsurface, interaction of the natural environment with man-made processes*

ВВЕДЕНИЕ

Сущность и значение идеи развития материальной основы цивилизации в XXI веке. Постановка задачи

Возникновение идеи необходимости и возможности создания действующего управляемого принципа созидательного освоения недр является естественным продолжением и следствием отражения объективной реальности развития материального мира металлов для взаимодействия природы и человека в целях полного и бесконечного в историческом масштабе времени обеспечения потребностей в них цивилизации в условиях сохранения качественной природной среды.

Идея и научное обеспечение ее реализации основаны на создании новых знаний о природе, обобщении геологических экспериментальных данных с учетом объективных закономерностей, существующих, действующих, но ненаблюдаемых и неустановленных на опыте явлений и свойств материального мира природы и металлов в ней, неизвестных, но неизбежных явлений во взаимодействии природы и техногенных процессов.

Таков путь развития самой идеи от первоначальных задач, решение которых начинается с научного предвидения. Оно должно закончиться коренными качественными изменениями, которые, будучи реализованы, создадут развитие геологии и горных наук, определяющих в совместном движении новые формы материи.

В этом контексте предложенное для употребления в фундаментально-прикладных исследованиях и в производственном обиходе сочетание «созидательное освоение недр» несет в себе смысловую нагрузку в соответствии с обязательными условиями формирования природно-техногенных систем для создания материальной основы существования общности людей.

Созидательное освоение недр – это обобщение систем знаний и их совокупное развитие для совместной не противоречащей друг другу реализации в природной и в созданной однажды техногенной средах технологий, действующих в условиях ресурсовоспроизводства, ресурсосбережения и сохранения качественной природной среды.

Ресурсовоспроизводство – это создание новых георесурсов в ходе освоения недр и в ходе целенаправленной деятельности человека с однажды уже использованным георесурсом в виде готового продукта, его возвратом в состояние нового георесурса (возвратный, теоретически бесконечный, цикл циркулярной экономики).

Этот процесс также дополняется увеличением запасов недр за счет вовлечения в производство металлов, неизвлекавшихся до сих пор (из геохимических ореолов, вмещающих пород, забалансовых запасов), обеспечивая их рентабельность созданными технологиями.

Ресурсосбережение – это результат снижения вплоть до полного исключения потерь металлов и достижения их полного извлечения, а также исключения разубоживания и доизвлечения в дополнительном цикле переработки товарного продукта из ранее заскладированных отходов производства (отвальные руды, хвосты обогащения, кеки, шлаки, шламы, клинкеры и т.д.).

Сохранение качественной природной среды - это комплекс позитивных результатов взаимодействия техногенных процессов с геологической средой. Сохранение природных характеристик массива недр в условиях нарушения его целостности должно быть проектно превентивно решено техногенными мерами, которые одновременно направлены на сохранение флоры и фауны, атмосферы и водных потоков, местности и плодородной почвы.

Реализация научно-производственных задач развития производства металлов в XXI веке, исходя из определенных трех направлений создаваемой системы знаний, должна основываться на междисциплинарном взаимодействии, которое создается проектированием освоения недр. При этом проектная тематика, предопределяющая принципы решения в полном комплексе, соответствующая требованиям развития, должна сосредоточиться на отдельных типах задач, состоящих из эвристических, исследовательских, технических и технико-экономических [8].

Наиболее сложной в этом перечислении являются эвристические, которые определяют направления, неизвестные до настоящего времени или не включенные в перечень имеющих решающее значение предпринимаемых мер, исключающих простои производственной деятельности одного из источников и экономические потери из-за несвоевременного воздействия на обнаруженное противоречие. Эвристические задачи, решаемые в системе определения источников скоплений металлов, подразделяются на изначально независящие друг от друга запасы по генетике своего происхождения. Речь идет о запасах в геологической среде, где рудообразование происходит в природных условиях без участия человека (техногенного вмешательства), и о запасах, создаваемых техногенно. Техногенные запасы образуются в недрах и на поверхности (рис. 1).

Обзор состояния освоения недр и методы исследования

Жизнь сообщества людей определяется уровнем развития науки в своей стране и приобщенностью к научным достижениям в других странах. Статистика, используя поток информации, диктует, что традиционные технологии в горном деле, применяемые в современном облачении, создали опасную перспективу полного истощения запасов минерального сырья и существования человечества в условиях разрушенного экологического равновесия [1, 2]. Поэтому следует ис-

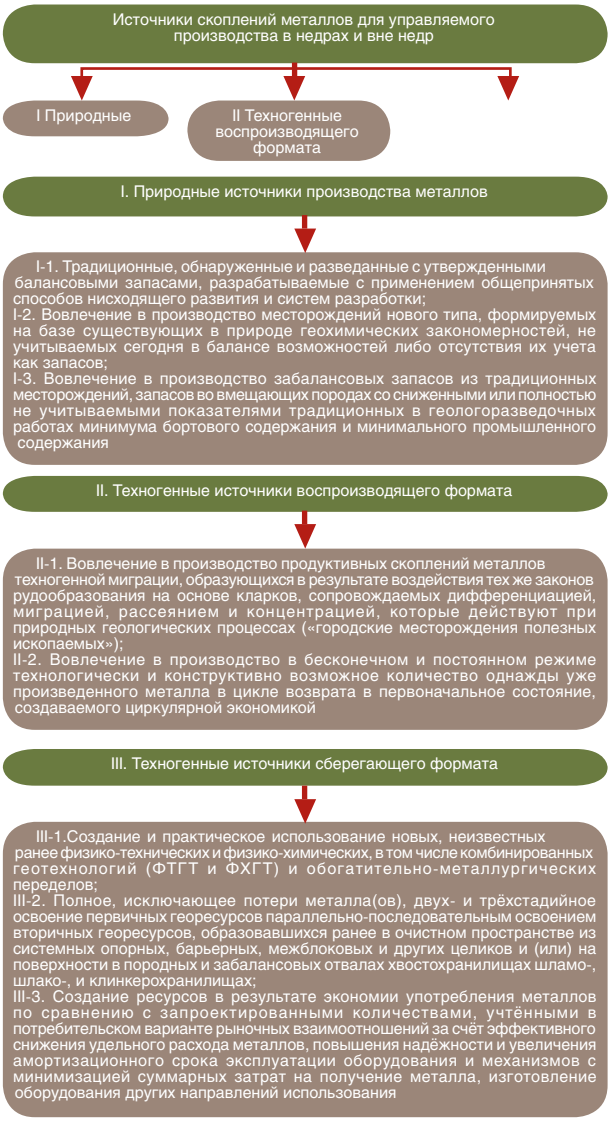


РИС.1.

Природные и техногенные источники производства металлов в недрах и вне недр

кать и находить в существующих, но неиспользуемых и неизвестных свойствах и ассимиляционных способностях взаимодействия между природной геологической средой и техногенными системами ее освоения.

Обнаруженные свойства природной геологической среды, ранее не участвовавшие в выборе техногенной системы освоения недр, являются на самом деле первоначальным условием применения технологических решений по добыче полезных компонентов. Их участие в выборе геотехнологий ускоряет и определяет выбор способов и систем развития горных работ. Старт возможностей качественного освоения недр путем создания новых физико-технических и физико-химических геотехнологий (ФТГТ и ФХГТ), был дан развитием новых разделов геологической науки, именуемых «горно-промышленная геология» и «технологическая минералогия» [3, 4].

Очевидно, что эти разделы науки должны сыграть исключительную роль в предварительном определении применения предлагаемых нами вариантов ФТГТ и ФХГТ на открытых и подземных горных работах. Использование информации о строении, физико-технических и физико-химических свойствах минеральных агрегатов геологической среды позволяет создать новый прогностический индикатор превентивных возможностей создания в геологической среде условий освоения недр в ресурсовоспроизводящем и ресурсосберегающем режиме сохранения качественной природной среды.

Научно-методические основы такого прогноза, исключающего вероятность оставления в рудном массиве неучтенных и потому неизвлеченных скоплений металлов, будут всегда заложены в минералотехнологическом картировании и геологической оценке минерализации с точки зрения экономически окупаемых пределов оптимальной минимизации содержания металлов.

Достижение позитивного взаимодействия влияния друг на друга форм существования материи в виде металлов путем управляемого движения их в объединении двух источников вновь в первоначальное состояние объективно определяется функциональной зависимостью, существующей независимо от объектов и явлений.

Созидательное освоение недр характеризуется использованием вещества и энергии природы в условиях, когда в процессе общественного производства естественная геологическая среда рудообразования в недрах дополняется искусственной, представляющей «вторую природу», созданную техногенными процессами вне недр.

Ресурсовоспроизведение новых, ранее не учитываемых запасов металлов осуществляется искусственным созданием путем возврата в первоначальное состояние ранее произведенного и уже однажды (теоретически бесконечно) использованного металла. Такая возможность существует, но до сих пор никем в области освоения недр не предлагалась и не использовалась в качестве сырья, и является методологическим принципом развития науки, называемым «принципом соответствия». Согласно этому принципу, как закона явлений, смена одной естественно-научной теории другой обнаруживает не только различие, но связь и преемственность между ними, которая может быть выражена с математической точностью. Принцип соответствия, в свою очередь, является проявлением взаимопроникновения материальных объектов-источников производства металлов под действием всеобщего закона «единства и борьбы противоположностей», являющегося конкретным процессом разви-

тия бесконечного творчества природы в объединении с техногенной деятельностью человека.

Научно-практическая реализация этих сутей познания человеком единства форм существования и движения материи является важнейшим методологическим достижением в создании управляемой, неисчерпаемой в историческом масштабе времени новой сырьевой базы. Она создается непрерывно из совокупности двух взаимозависимых источников производства металлов, один из которых сосредоточен в природной среде недр, второй создан техногенно и по этой причине расположен частично в очистном пространстве в недрах и отходах и отвалах на поверхности, но его основной объем в ежегодном учете, практически равный объему производства истекшего года, находится в балансе использования как товарный продукт.

Из этого ранжированного перечня реальных источников производства металлов, образование которых, кроме природного, зависит от техногенного вмешательства человека, следует определить оптимальную синергетику становления устойчивых структур производства через распределение произведенного продукта.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Управляющая идея «созидательного освоения недр» исходит из необходимости организовать производство металлов, находящихся в каждом определенном геологическими изысканиями месторождении, в полном объеме в формате «ресурсовоспроизводства, ресурсосбережения и сохранения качественной природной среды».

Одновременно в совокупности как равноправный источник производства металлов и основу руководящего начала принципа «созидательного освоения недр» следует рассматривать и учитывать вторичные георесурсы, образовавшиеся из ранее добытого переработанного в товарный продукт в виде металла и изделий из него после его полного использования до установленного срока амортизации или выхода из строя. Организационно-техническим решением применения этого свойства бесконечного возврата в первоначальное состояние однажды произведенного металла и является создание циркулярной экономики в ресурсном обеспечении металлами.

Обнаруженная синергетика позволяет создать коллективное упорядоченное движение в философском смысле научного понятия двух открытых систем, являющихся взаимосвязанными и взаиморазвивающимися источниками производства металлов. Их возможности определяют неисчерпаемую в историческом масштабе времени сырьевую базу производства металлов, которая в равной мере состоит из двух равноправных и взаимозависимых источников.

Исследования организации бесконечного возврата в первоначальное состояние однажды уже произведенного металла показывают в соответствии с действием всеобщего закона «единства и борьбы противоположностей» и достижимую результативность взаимодействия систем создания накопления ресурсов металлов в ресурсовоспроизводящем режиме в недрах, и объективные проблемы, исходящие из этого же взаимодействия.

Анализ накопленного опыта горнообогатительных предприятий, научных исследований для изучения и познания источников нахождения металлов, причин и закономерностей их накопления в этих источниках, возможностей извлечения металлов из них определили направления, по которым следует развивать производство металлов. Источники металлов, создающие эти направления, представляют собой взаимосвязанные и взаимозависимые природно-техногенные системы, каждая из которых занимает свое место в общем формате научно обоснованного принципа «созидательного освоения недр».

Впервые в мировой практике техногенное преобразование недр предложено в доказательной форме функциональных зависимостей организовать в ресурсовоспроизводящем и ресурсосберегающем формате с сохранением качественной природной среды. Такая категория возможностей развития материального мира, отображающая наиболее общие существенные свойства и законы природы, становится действительностью для реализации в зависимости от сознательной целенаправленной необходимости.

Нахождение и использование причинной связи качественного изменения систем техногенного преобразования недр могут включать в себя, в зависимости от достигаемой экономической эффективности и при совокупном обеспечении трудовой и экологической безопасности, не только руды традиционных месторождений. С их применением следует рассматривать и возможности производства металлов из забалансовых запасов, из вмещающих пород, первичных и вторичных геохимических ореолов и барьеров. Эти возможности и критерии практического применения рассмотрены и доказаны в научных открытиях, на которые получены дипломы подтверждений, обосновавших сущность принципа «созидательного освоения недр».

Происхождение источников производства металлов из природной и техногенной сырьевой баз, во-первых, определяется материальностью, во-вторых, окружающая нас действительность существует в виде объектов, подчиняющихся всеобщему закону «единства и борьбы противоположностей». В нашем случае относительно источников производства металлов противоположность проистекает из единства цели по достижению неисчерпаемой в историческом масштабе обеспеченности потребности цивилизации в металлах. Но достигаемое циркулярной экономикой состояние

постоянной обеспеченности металлами за счет двух источников их производства таит в себе и постепенно создаваемую проблему, которая должна научно обоснованно и управляемо на основе государственно-частного партнерства устраняться в обязательном порядке. Проблема заключается в том, что вследствие налаженного снабжения экономики более дешевым металлом из фонда циркулярного возврата ранее произведенного металла, первичная добыча из недр постепенно начнет уменьшаться. Но тогда с определенным отставанием по времени возврат употребленного металла из-за снижения первичной добычи тоже начнет снижаться вплоть до его «обнуления». С учетом такого негативного результата взаимодействия природного и техногенного источников металлов технологические и организационные аспекты его должны иметь управляемую способность регулироваться без создания аварийных ситуаций, связанных как с отсутствием сырья, так и с его экономически неэффективным перепроизводством из одного или обоих источников.

Определив формулу исчисления эффективно оптимального разделения объемов производства металлов из источников их существования, одновременно необходимо рассмотреть существующую функциональную зависимость количества металлов, находящихся в недрах и вне недр. Она, с одной стороны, как совокупно учитываемые ресурсы, подчиняется закону постоянства материи в природе, каким бы способом она ни была создана:

$$Q_м = Q_{мп} + Q_{мт} = const.,$$

где: $Q_м$ – количество металлов в земной коре (континентальной и океанической), в недрах и вне недр, т.е. добытое из недр; $Q_{мп}$ – количество металлов, находящихся в недрах, в известном и неизвестном состоянии, в нетронутом массиве недр в виде, предназначенном для добычи и уже добываемых в результате решения эксплуатировать месторождение; $Q_{мт}$ – количество металлов, находящихся в движении вне недр природной (геологической) среды, то есть добытое, перерабатываемое, использованное, возвращаемое в процесс постоянного, теоретически бесконечного воспроизводства или оставленное навсегда, или на исторически длительное время в использованном, либо используемом состоянии и возобновляемое по действующим законам и закономерностям, в том числе в виде «городских месторождений», возникающих в результате техногенеза.

Эта функциональная зависимость со своей постоянной суммой количества подтверждает два всемирных природных закона:

– материя, в том числе в данном случае в виде металлов, несотворима и неуничтожима и всегда постоянна в количестве;

– закон кларков, действующий и для совокупности месторождений, и для отдельных территорий - континента, крупного государства, рудной провинции, даже в пределах отдельной рудной формации, раскрывается как зависимость накопления металлов в глобальном масштабе.

Неисчерпаемость сырьевой базы металлов является объективной реальностью, которая существует и проявляется, отражая категории возможности и действительности. Возможность становится действительностью, когда создается или возникает полный набор условий существования определенного явления. Взаимодействие понятий категорий $Q_{мп}$ и $Q_{мт}$ в технологическом и организационном направлениях в позитивном содержании является целью, определяющей реализацию принципа созидательного освоения недр.

Комбинируя в ходе практической деятельности определенные материалы и силы природы, человек способен вызвать к жизни явления, которые ему желательны, создав комплекс условий возникновения такого явления.

Одновременно он может и устранить условия возникновения нежелательных явлений, ликвидируя их причины. Такая деятельность ограничена рамками объективных законов мироздания и должна осуществляться в соответствии с ними.

Производственно – созидательная схема ресурсовоспроизводящего освоения недр в бесконечном потребительско – восстановительном возвратном цикле строится на основе содержания (количества) металлов:

– в источнике металлов $Q_{гс}$ (геологической среде недр), образуемом природой;

– в искусственной техногенной среде $Q_{итс}$ «второй природы» вне недр, создаваемой в процессе общественного производства из изъятых $Q_{гс}$, превращенных в используемый товарный продукт, оставленных в недрах как потери и заскладированных на поверхности.

$Q_{гс} + Q_{итс} \rightarrow const$. Слагаемые этой всемирной формулы вечности и жизнеспособности цивилизации могут взаимодействовать благодаря созданным человечеством производственным отношениям для постоянного удовлетворения потребительских нужд.

Являясь основой всевозможных свойств форм движения, материя в виде металлов, находясь в двух источниках производства, становится реально существующей вне нашего сознания и отражаемая им, как упорядоченная системная организация. Эта системность и является основой самоорганизующегося управляемого показателя единства существования и сущности становления совокупных двух источников, на которые разделена масса металлов на Земле. Эта масса металлов определяется для земной коры кларковым содержанием.

В итоге, оценивая постоянство количества метал-

лов в земной коре, из двух позиции его определения следует принимать в расчетах, что:

$Q_{гс} + Q_{итс} = Q_{мп} + Q_{мт} = Q_м \rightarrow const.$ для любого металла.

Схема преобразования и самоорганизованного управляемого вечного и бесконечного перехода металлов из одного источника в другой зависит от воздействия на них производственных отношений и производительных сил.

Сотворение самоорганизующейся управляемой системы, способной объединить естественные (реальные) как позитивные, так и негативные возможности развития согласованных открытых систем двух источников производства металлов в единые производственные отношения, является исключительно важной задачей науки и производства.

Она еще более может отягощаться воздействием и многообразием производственных отношений. Вполне обьективно существование субъективного многообразия ограничения человеческой свободы, помимо окружающей природы (в нашем случае-геологической и техногенной среды), еще и господствующими общественными силами в виде конкуренции политических, экономических, враждебных, вплоть до военных, условий.

Становление устойчивых структур в открытых системах, каковыми являются источники производства металлов в недрах и вне недр (неживой геологической и второй техногенной), может быть организовано посредством синергетики, то есть выявлением общих закономерностей самоорганизации и совместного целостного (или кооперативного) эффекта взаимодействия множества подсистем.

Позитивность и упорядоченность, вскрываемые системным подходом на основе механизмов категорий необходимости и случайности, должны наиболее эффективно обеспечиваться искусственным интеллектом (ИИ), действующим в условиях государственно-частного партнерства.

Любой процесс, рассматриваемый как закономерное и последовательное изменение явления, переход в результате развития в другое явление (в т.ч. в нашем случае процесс взаимодействия совокупности двух источников производства металлов), нуждается в управлении, даже если он случаен. Ему следует противопоставлять новый процесс, разрешая исходящее противоречие в пространстве и времени.

Методология гомеостатического регулирования природно-техногенных систем, одновременно действующих в позитивной совокупности, должна выражаться через цели, достигаемые с соблюдением паритета требований и ограничений каждой ее составной части (рис. 2). Необходимость постановки задачи развития такой методологии объясняется определяющей ролью гомеостазиса в создании области знания, изучающего средства, предпосылки и принципы организации познавательной и практически преобразующей деятельности. Гомеостазис как тип динамического равновесия, характерный для сложных саморегулирующихся систем, основывает свою деятельность в области поддержания существенно важных для сохранения системы параметров в допустимых пределах. Требования и условия, создающие рабочую обстановку позитивного взаимодействия двух источников суммарной сырьевой базы, при их обязательном исполнении восстанавливает нарушенное равновесие и соблюдение паритета интересов.

РИС. 2.

Достижение цели по созидательному освоению недр с соблюдением паритета требований и ограничений каждой ее составной части

Условные обозначения: Мдгс – металл в системе «добытых ресурсов геологической среды»; Мвтс – металл, возвращаемый техногенной средой; Кво – коэффициент взаимовлияния обеспеченности двух источников.

$$М_{дгс} = М_{втс} + М_{нтс};\ М_{дгс} = q \times V_{зк} \times K \times M_{зк},$$

где: $M_{зк}$ – общее количество остающегося в земной коре металла в соответствии со степенью его распространенности (кларком); q – средний объемный вес массива недр в земной коре; $V_{зк}$ – объемы земной коры (можно расчитывать объем только континентальной, только океанической или совместной, как того требует поставленная задача); K – среднее содержание металла в земной коре (кларк) по А.П. Виноградову.

$$M_{зк} + М_{дгс} = M_{зк} + М_{втс} + М_{нтс} = const.$$

Эта формула повторяет в третьем варианте постулат постоянства мироздания как состоящего из несотворимой и неуничтожимой, вечной во времени и бесконечной в пространстве материи в ее бесконечном множестве в виде металлов.

Варианты зависимостей определяют сущность неисчерпаемости сырьевой базы в масштабе времени, и их содержание позволяет формировать политику производства металлов из определенного полного перечня теоретически возможных источников в соответствии с принятыми в каждый определенный исторический промежуток времени индикаторами оптимальности развития в глобальном масштабе или в отдельном государстве. Из этого вывода следует понимание исключительной важности коэффициента Кво, влияющего на своевременное определение ее величины, которая не является постоянной.

Управляемость и позитивное взаимодействие двух основных определяющих при освоении недр источников скопления металлов позволяют утверждать, что создана новая научная модель природно-техногенной сырьевой базы металлов.

В данной задаче функциональная зависимость должна характеризовать связь между:

1) свойствами и состояниями материальных объектов и явлений;

2) объективными количественными законами, находящимися в отношении субординации, в зависимости от их общности и среды действия.

Следует понять, во-первых, какими должны быть, изменяясь с течением времени, взаимоотношения, учитывая меры по устранению раздвоения единой сущности и содержания между двумя главными источниками производства металлов (из недр и вне недр), во-вторых, объективные количественные законы, которые зависят от постулата взаимодействия: «чем больше металла используется из готового, однажды произведенного и бесконечно возвращаемого в первоначальный вид нового источника готовой металлической продукции, тем меньше становится минимальное промышленное содержание данного металла, экономически эффективно извлекаемого из недр». Жизнеспособность этого постулата одновременно будет поддерживаться полнотой освоения содержимого недр применяемыми ФТГТ и ФХГТ.

Изложенный вывод представляет собой пример использования в глобальном масштабе в полном существенном состоянии или в аргументированном варианте в усеченном виде всеобщего закона развития объективного мира. Он констатирует, что качественные и количественные изменения относительны. Одни и те же изменения по отношению к одним свойствам (менее общим) являются качественными, по отношению к другим (более общим) – количественными. Любой процесс развития одновременно и прерывен, и непрерывен. При этом прерывность выступает в форме качественного скачка, а непрерывность в форме количественного изменения.

Мы имеем дело именно с переходом качественных изменений, связанных с привлечением к производству чистого готового в химическом отношении металла из «второй природы» техногенной среды, в количественные, развивающие снижение минимального промышленного содержания в запасах недр.

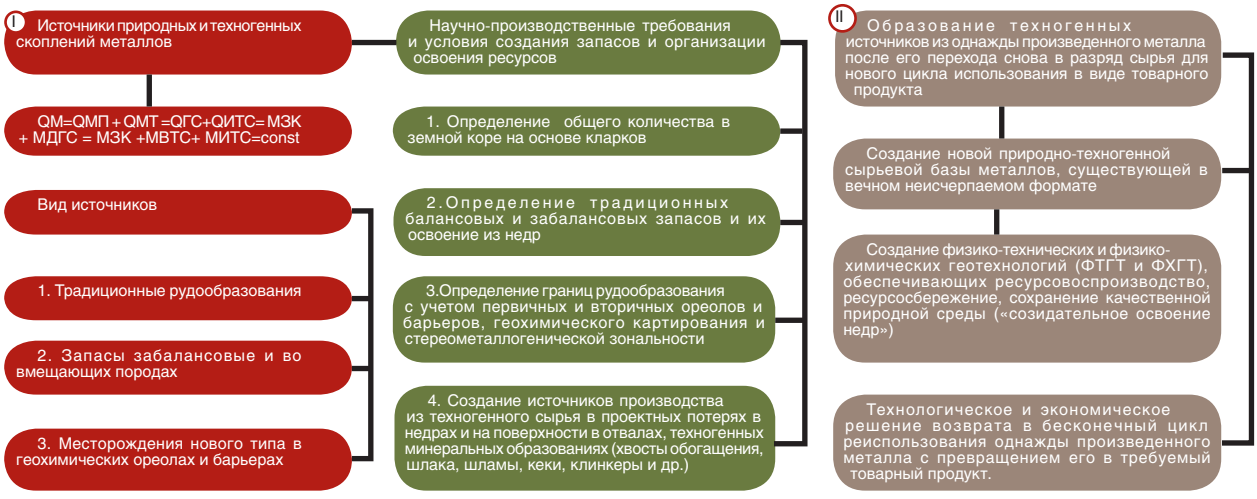
Воздействие такого вывода на производство металлов является положительным, конкретно увеличивая возможность привлечения все более бедных запасов из недр с одновременным увеличением производства металлов из техногенной среды однажды произведенного металла. Балансировка в таком сочетании действует совместно с программой, которая с применениями теории множеств и стратегии оптимизации ресурсных затрат Л.В. Канторовича и Т.Ч. Купманса позволяет управлять и организовывать на различных уровнях разумно оптимальное взаимодействие источников металлов без вынужденных простоев одного из источников или даже остановки обоих [5, 7].

Сущность и содержание новой модели природно-техногенной сырьевой базы металлов, определяющей тенденции развития материальной системы (в нашем случае представленной металлами) и способ существования и выражения содержания, определяемый через форму в ее модификациях, в своих взаимоотношениях с формой способствуют созданию источников производства металлов. В материальном мире, осуществляя переход металлов из геологической (природной) среды недр в техногенную среду «второй природы» вне недр, науки и через нее производство оказываются в состоянии предвидеть и создавать будущие изменения формы, оставляя неизменным содержание.

Это антропогенное воздействие на движение материи в природе сотворяет непрерывный бесконечный цикл производства металлов, управляемого через функциональные зависимости, производя научно-техническую революцию в создании новой модели «созидательного освоения недр».

Описание схемы деятельности принципа «созидательного освоения недр» в комплексе природно-

А. Природно-техногенные возможности создания новой неисчерпаемой сырьевой базы металлов.



Б. Рабочая схема взаимодействия общества с природой при освоении недр через гомеостатическое регулирование функциональными зависимостями, создающими позитивное функционирование системы благополучия цивилизации

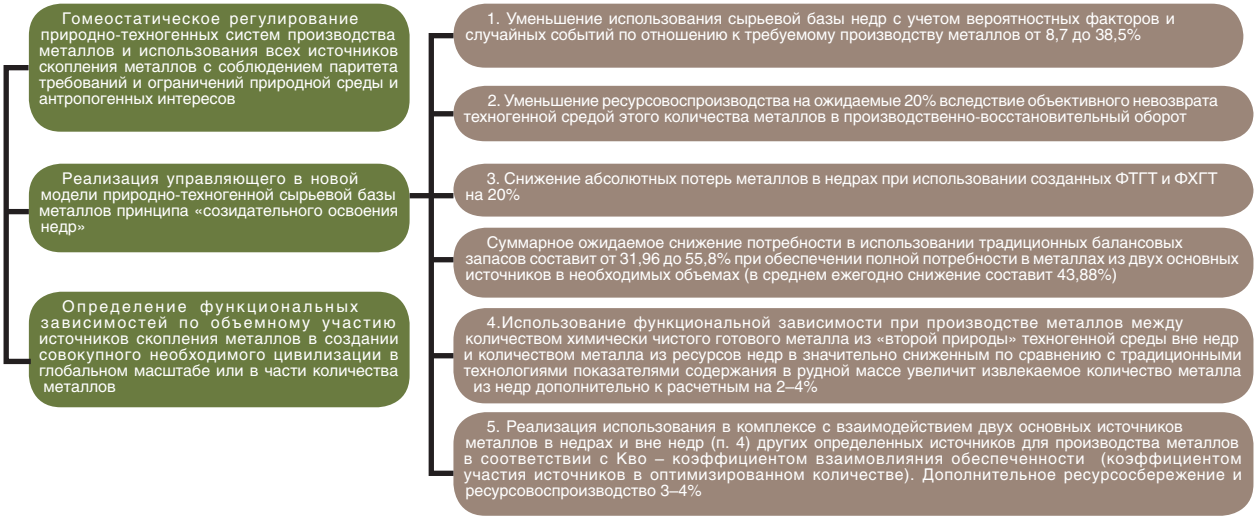


РИС. 3.
Рабочая схема создания и реализации принципа «созидательного освоения недр»

техногенных производственных процессов приводится на рис. 3.

Создавая новый, по сути, экономический уклад, все заинтересованные стороны (в первую очередь государства и лидеры бизнеса, включая производителей и банки) должны работать согласованно на основе обязательных взаимных обязательств и контроля над всеми действиями. Это реальная возможность, наряду с созданием согласуемого по количественному участию в производстве общего необходимого объема металлов, одинаково развивать производственные отношения между источниками в недрах и вне недр без простоев и без перепроизводства.

Обнаруженная функциональная зависимость, обеспечивающая позитивное взаимодействие между двумя основными источниками, содержащими одинаковый вид материи в виде конкретного металла, характеризуется определенными параметрами и причинной связью.

Если N_1 и N_2 – это количество металлов, производимых для потребностей человечества из каждого источника природно-техногенной сырьевой базы, где N_1 – металл из геологической среды недр природы, N_2 – металл из техногенной среды вне недр, а N_3 – ежегодная потребность рынка в конкретном металле (расчет производится в зависимости от принятых условий учета), то $N_1 + N_2 = N_3$. (рис. 4).

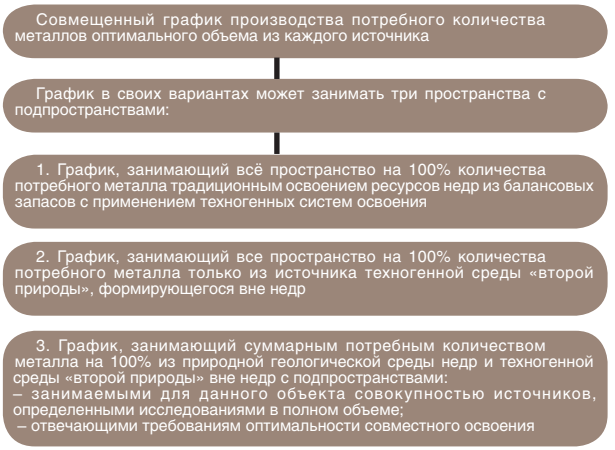


РИС. 4.

Рабочая схема освоения недр и техногенных источников раздельно и в совокупности

Функциональная зависимость должна управляемо соответствовать максимальной эффективности совокупности $N_1 + N_2$, учитывающей устранение вероятности простоев в каждом производственном процессе, потерь времени и финансовых ресурсов из-за длительного хранения промпродукта или готового продукта, логистических затрат, капитального строительства и ремонтов. Экономические расчеты, создающие производство, построенное на суммарной эффективности, включающей финансовые затраты, себестоимость и производительность труда, безопасность, сохранение качественной природной среды, технологическую исполнимость и управляемость, в т.ч. с применением ИИ и робототехники, должны основываться на теории множеств [6].

Исходной формулой расчетного механизма является равенство $\alpha_1=(100N_1)/(Q_1) \rightarrow \alpha э$, где $\alpha э$ – экономически возможное (достигаемое благодаря созданным физико-техническим и физико-химическим геотехнологиям и способам минералургии) минимальное промышленное содержание металла в среднем суммарно с учетом извлекаемых из традиционных балансовых и забалансовых запасов, из вмещающих пород, окаймляющих рудное пространство, из первичных и вторичных геохимических ореолов.

$$N_2 = (Q_2)/100 \times \alpha_2,$$

где α_2 – содержание металла в товарном продукте из возвращаемого техногенного металла вне недр.

Возвращая чистый металл (так оно и есть в абсолютном большинстве случаев, если речь не идет о сплавах) в повторный цикл использования, мы имеем:

$$dbn < \alpha_2 \leq 100\%,$$

т.е. масса возвращаемого продукта $Q_2 = (100 \times N_2)/(\alpha_2)$. Здесь dbn – содержание металла в возвращенном в бесконечный цикл создания нового товарного продукта из однажды произведенного металла. Учитываемое количество горной массы, равное добытой руде при применении ФТГТ, или примерно металлу в горной массе при применении ФХГТ, обозначено знаком Q_1, возвращаемый в цикл производства заново однажды произведенный металл обозначен знаком Q_2.

Практическая реализация новой модели природно-техногенной сырьевой базы металлов, учитывая создаваемый теоретически потенциал источников производства металлов и основанную на нем рабочую схему действия принципа «созидательного освоения недр», будет соответствовать совмещенному графику производства, описание которого приведено на рис. 4.

Функциональная зависимость позитивного взаимодействия двух основных источников производства металлов с учетом влияния коэффициента взаимовлияния обеспеченности (коэффициента участия источников в освоении оптимизированного количества) Кво будет управлять движением металлов из источников, обеспечивая потребности глобального и/или регионального характера (в зависимости от заинтересованных участников).

Оптимальное количество означает многовариантный набор количества металлов из имеющихся в наличии в работоспособном для освоения состояний из всех выявленных источников накопления металлов, отвечающий требованиям совокупной безопасности, экологической чистоты, технологической и конструктивной исполнимости освоения, экономической эффективности, которая должна быть суммарно рентабельной и одновременно для какого-то источника может быть нерентабельной.

Предварительные расчеты, выполненные с учетом возможностей ресурсовоспроизводства и ресурсосбережения и соблюдения условия и требований сохранения окружающей среды в недрах и вне недр, создают фактор неисчерпаемости, позволяющий в каждые 5 лет производства металлов в количестве, равном статистике 2025 г., воспроизводить потребность 3 лет и сберегать металла на 2,5 года полной потребности.

Эти данные выполнены по схеме, в которой для исключения негативного влияния закона «единства и борьбы противоположностей» циркулярная экономика задерживает в качестве сырья будущего примерно 35–40% возвратного металла, т.е. в каждые 5 лет 2-х годичную потребность. В итоге можно уверенно говорить о продлении срока потребления металлов за 5 лет на дополнительные 12,5 лет, что в сумме составит 17,5 лет, или в 3,5 раза.

Следует при этом учитывать, что производство металлов непрерывно растет, поэтому и образование техногенных источников будет увеличиваться. Положительным фактором, влияние которого с каждым годом усиливается, является и снижение удельного расхода металлов, увеличение срока службы метал-

лических изделий, замена металлов искусственными материалами и др.

Предложенная как основа расчета рабочего плана ресурсовоспроизводящего производства функциональная зависимость между увеличением в количественном измерении непрерывного и бесконечного (вероятно, с какими-то объяснимыми объективными перерывами) возврата в первоначальное состояние однажды произведенного металла из техногенной «второй природы» вне недр и снижением минимального промышленного содержания металлов из руды, состоящей из всех видов оруденения в геологической среде недр, представляет собой научно-техническую революцию неожиданного характера и величайшей исторической сущности.

Металл, добытый (произведенный) из руды, представленной традиционными балансовыми запасами в совокупности с забалансовыми, включая все потери, которые обычно предусматривались при применении ФТГТ стандартного содержания, с металлами, содержащимися во вмещающих породах в первичных и вторичных геохимических ореолах и барьерах, увеличит производство из недр, хотя среднее его содержание в руде новой формации будет значительно меньше, чем в традиционных балансовых запасах.

Но общее количество произведенного металла будет соответствовать мировому спросу за счет увеличения его производства из этого обедненного сырья, которое никогда до этого не считалось таковым, с добавлением к нему требуемого количества металлов из техногенной среды «второй природы» вне недр.

Эго добавление состоит из 100% чистого металла или из высококачественного сплава двух или нескольких металлов, т.е. его роль в общем балансе сырья для производства металла как равноправного участника процесса ресурсовоспроизводства недр неизмеримо возрастает.

Но одновременно следует, постоянно используя установленную функциональную зависимость взаимодействия двух источников производства, контролировать и управлять совокупным процессом, чтобы не допускать вмешательства негативных противоположностей.

Следует помнить, что действие функциональной зависимости будет устойчивым до тех пор, пока техногенные решения будут своевременными и мобильными.

Человеческий разум, таким образом, сумел преодолеть надвигающуюся угрозу полного истощения минерально-сырьевой базы металлов в континентальной земной коре, получив возможность приступить к поискам следующей ступени проникновения в тайны природы благодаря пониманию существования бесконечного множества форм существования материи в виде металлов и творческому стремлению создавать научные основы результативного взаимодействия с этим множеством.

Можно уверенно говорить, что заботам тех, кто занимается обеспечением человечества металлами в нужном количестве, всегда будет сопутствовать помощь науки, находящейся в руках тех, кто эвристику и возможности привык превращать в действительность.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Битимбаев М.Ж., Кунаев М.С., Абен Е.Х., Ахметханов Д.К.** Комплексное освоение недр и сохранение качественной природной среды – основа устойчивого социального развития. Монография. Алматы: Satpayev University. 2023. 335 с.
2. Горные науки. Освоение и сохранение недр Земли / Под ред. акад. К.А. Трубецкого. М.: Изд-во Академии горных наук, 1997. 476 с.
3. **Ершов В.В.** Основы горно-промышленной геологии. М.: Недра, 1988. 326 с.
4. **Изоитко В.М.** Технологическая минералогия и оценка руд. СПб.: Наука, 1997. 532 с.
5. **Канторович Л.В.** Математико-экономические работы. Избранные труды. Новосибирск: Наука, 2011. 756 с.
6. **Кузнецов С.Д.** Анализ баз данных. 2-е изд. М.: Интернет Университет Информационных технологий, БИНОМ, Лаборатория знаний, 2007. 484 с.
7. Теория равновесия Купманса: Экономическая основа современного интеллекта принятия решений. Nair Koroth. Othor AI. 18.04.2025.
8. Эвристические методы оптимизации. Учебное пособие / Под ред. А.А. Митцеля. Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. 2022. 73 с.

REFERENCES

1. **Bitimbayev M.Zh., Kunaev M.S., Aben E.Kh., Akhmetkhanov D.K.** Integrated development of mineral resources and preservation of high–quality natural environment – the basis of sustainable social development. Monograph. Almaty: Satpayev University. 2023:335. (In Russian).
2. Mining sciences. Exploration and conservation of the Earth's interior. Edited by Academician K.A. Trubetskoy. Moscow: Publishing House of the Academy of Mining Sciences, 1997:476. (In Russian).
3. **Yershov V.V.** Fundamentals of mining and industrial geology. Moscow: Nedra, 1988:326. (In Russian).
4. **Izoitko V.M.** Technological mineralogy and ore assessment. Saint Petersburg: Nauka Publ. 1997:532. (In Russian).
5. **Kantorovich L.V.** Mathematical and economic works. Selected works. Novosibirsk: Nauka Publ. 2011: 756. (In Russian).
6. **Kuznetsov S.D.** Database analysis. 2nd ed. Moscow: Internet University of Information Technologies, BINOM, Laboratory of Knowledge, 2007:484.

(In Russian).
7. Koopmans equilibrium theory: The economic basis of modern decision-making intelligence. Nair Koroth. Othor AI. 18.04.2025. (In Russian).
8. Heuristic optimization methods. Training manual. Edited by A.A. Mitzel. Tomsk: Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics. 2022:73. (In Russian).

Кунаев Миргали Сапаргалиевич,
д.г.-м.н., председатель Совета директоров «Caspian Services Inc. JSC»

050020, Респ. Казахстан, г. Алматы,
ул. Керей-Жанибек хандар, д. 135,
050020, Rep. Kazakhstan, Almaty,
st. Kerey-Zhanibek khandar,
тел.:+7 (701) 745-07-71, e-mail: k.mirgali@gmail.com

Акбаров Ерлан Есеналиевич, председатель Комитета геологии Министерства промышленности и строительства Республики Казахстан

010000, Респ. Казахстан, г. Астана, ул. А. Мамбетова, д. 32,
010000, Rep. Kazakhstan, Astana, st. A. Mambetova, 32,
тел.: +7 (717) 227-97-01, e-mail: e.e.akbarov@gmail.com

Сыздыков Аскар Хамзаевич, к.т.н., директор Института геологических наук им. К.И. Сатпаева

050010, Респ. Казахстан, г. Алматы, ул. Кабанбай батыра, 69,
050010, Rep. Kazakhstan, Almaty, st. Kabanbai batyr, 69
тел.: +7 (727) 291-56-08, e-mail: Info@ign.kz

Битимбаев Марат Жакупович,
д.т.н., профессор, г.н.с. Института геологических наук им. К.И. Сатпаева

050010, Респ. Казахстан, г. Алматы, ул. Кабанбай батыра, 69,
050010, Rep. Kazakhstan, Almaty, st. Kabanbai batyr, 69
тел.: +7 (701) 744-95-08, e-mail: mbitimbayev@mail.ru

Шадиев Р.Н.,
к.э.н., председатель Наблюдательного совета АО «Дарума Капитал»

050010, Респ. Казахстан, г. Алматы, проспект Аль-Фараби, 77/2,
050010, Rep. Kazakhstan, Almaty, Al-Farabi Avenue, 77/2, офис 7В,
тел.: +7 (777) 009-77-77, e-mail: coalminco@gmai.com

УДК 550.8.05
DOI: 10.52531/1682-1696-2026-26-3-27-31
Научная статья

EDN: FDJYFX

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К КОМПЛЕКСНОМУ ПРОВЕДЕНИЮ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ЦЕЛЬЮ КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ПХГ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ПРОГНОЗА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГАЗА В ОБЪЕКТЕ ХРАНЕНИЯ, В ТОМ ЧИСЛЕ ЗА ПРЕДЕЛАМИ ИСКУССТВЕННОГО КОНТУРА ГАЗОНОСНОСТИ

Е.А. Мельников[1], В.Н. Первушина[2]
[1] ООО «Научно-производственное предприятие «РусНефтеГазТехнологии» (г. Калининград, Россия)
[2] Научно-производственный филиал «Оренбурггазгеофизика» ООО «Газпром недра» (Москва, Россия)

В статье представлен методический подход к повышению достоверности прогноза распределения закачиваемого газа в подземных хранилищах газа, созданных в водоносных пластах. Обоснована необходимость комплексной интерпретации данных геофизических исследований скважин и гидрогеохимических исследований. Предложена оригинальная методика гидрогеохимического оконтуривания искусственной газовой залежи, позволяющая выявлять зоны влияния хранилища за пределами газоводяного контакта, не фиксируемые стандартными нейтронными методами. На примере ПХГ-А показана эффективность подхода для ранней диагностики латеральной миграции газа и оценки герметичности ловушки.

Ключевые слова: *подземное хранилище газа, гидрогеохимические исследования, нейтронный гамма-каротаж, газоводяной контакт, водорастворенный газ, оконтуривание залежи, комплексная интерпретация*

Original article

METHODOLOGICAL APPROACHES TO INTEGRATED GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL SURVEYS FOR LEAKAGE CONTROL AT UNDERGROUND GAS STORAGE (UGS) FACILITIES, WHICH IMPROVE THE RELIABILITY OF PREDICTING GAS MIGRATION WITHIN THE STORAGE RESERVOIR, INCLUDING OUTSIDE THE ARTIFICIAL GAS-WATER CONTACT

E.A. Melnikov[1], V.N. Pervushina[2]
[1] Limited Liability Company «Scientific and production enterprise «RusOil&GasTechnology» (Kaliningrad, Russia)
[2] Scientific and Production Branch "Orenburggazgeofizika", Gazprom Nedra LLC (Moscow, Russia)

The paper presents a methodological approach to improving the reliability of injected gas distribution forecasting in underground gas storage facilities situated in water-bearing formations. The necessity of integrated interpretation of well logging and hydrogeochemical survey data is substantiated. An original technique for hydrogeochemical delineation of an artificial gas accumulation is proposed, which makes it possible to identify zones of storage influence beyond the gas–water contact that are not detectable by standard neutron logging methods. Using UGS-A as a case study, the effectiveness of the approach for early diagnostics of lateral gas migration and seal integrity assessment is demonstrated.

Key words: *underground gas storage, hydrogeochemical surveys, neutron gamma logging, gas–water contact, dissolved gas, reservoir delineation, integrated interpretation*

© 2026, Е.А. Мельников, В.Н. Первушина
Поступила в редакцию 04.09.2026

Обеспечение герметичности подземных хранилищ газа (ПХГ) является приоритетной задачей при их эксплуатации, особенно для объектов, созданных в водоносных пластах. Циклический режим закачки и отбора газа сопровождается перераспределением пластовых флюидов, изменением термобарических условий и, в ряде случаев, миграцией газа за пределы проектного контура газоносности. Традиционный геофизический мониторинг, основанный преимущественно на нейтронных методах (НГК, ННК), позволяет надежно определять положение газоводяного контакта (ГВК) и количественно оценивать газонасыщенность в интервале пласта-коллектора [3, 6, 7]. Однако его чувствительность резко снижается в приконтурных зонах, где концентрация свободного газа недостаточна для формирования устойчивого геофизического отклика [5].

В настоящей работе обосновывается комплексный подход, в котором геофизические методы дополняются гидрогеохимическими исследованиями (ГГХ), обладающими более высокой опережающей чувствительностью к диффузионно-конвективным процессам на периферии залежи. Цель исследования – разработка и апробация методики совместной интерпретации данных ГИС и ГГХ, позволяющей повысить достоверность прогноза распространения закачиваемого газа, включая выявление ранних признаков его миграции за пределы установленного контура.

Гидрогеохимические исследования на ПХГ базируются на анализе компонентного состава водорастворенных газов и химического состава пластовых вод. Основными индикаторами нарушения герметичности служат:

– повышение общей газонасыщенности пластовых вод;

– изменение компонентного состава водорастворенного газа (увеличение доли метана, появление тяжелых углеводородов);

– трансформация ионного состава вод (минерализация, pH, соотношение основных ионов);

– появление характерных геохимических коэффициентов, свидетельствующих о миграционной природе газов.

Регулярный отбор проб [1] из наблюдательных скважин, расположенных за контуром ГВК, позволяет решать следующие задачи:

– контроль герметичности продуктивного горизонта;

– прогнозирование латерального растекания газа;

– оценка коррозионной активности пластовых вод и рисков солеотложений.

Лабораторные исследования выполняются в соответствии с требованиями ГОСТ ИСО/МЭК 17025 [2]. Хроматографический анализ является основным методом определения компонентного состава водорастворенного газа [7], а физико-химический анализ пластовой воды включает определение концентраций хлоридов, гидрокарбонатов, сульфатов, кальция, магния, натрия и калия, а также pH, плотности и общей минерализации. Расчет генетического типа вод по классификации Сулина [8] и контроль солевого баланса обеспечивают надежность интерпретации.

Для формализации процесса выявления зон влияния ПХГ за пределами ГВК предложена методика гидрогеохимического оконтуривания, включающая следующие этапы:

1. Установление фоновых значений: для каждой наблюдательной скважины по данным периода до начала активной эксплуатации или по наиболее удаленным фоновым скважинам рассчитываются средние значения (M) и стандартные отклонения (σ) для газонасыщенности и концентрации метана. Фоновый диапазон принимается как $M \pm 2\sigma$.

2. Определение критериев аномалии: на основе анализа многолетних данных устанавливаются пороговые значения: для исследованных объектов (ПХГ – А) превышение газонасыщенности > 140 см^3/л и содержание метана > 10 об. % являются признаками техногенного влияния.

3. Классификация скважин по типу отклика:

тип I (аномальный) – устойчивое превышение обоих критериев;

тип II (переходный) – периодическое превышение одного из критериев;

тип III (фоновый) – параметры в пределах природного фона.

4. Пространственная интерполяция и построение контуров: на структурную карту наносятся скважины с присвоенными типами, после чего методами триангуляции или изолиний строятся внутренний условный контур (зона выраженного влияния) и внешний условный контур (зона регионального влияния).

5. Синтез с геофизическими данными: совместное отображение контура ГВК по данным ГИС и гидрогеохимических контуров позволяет выделить буферную зону активного газоводяного взаимодействия и диффузионно-конвективную периферийную зону. Расхождение контуров указывает на направления преимущественной латеральной миграции и анизотропию фильтрационных свойств коллектора.

Предложенная методика была апробирована на двух ПХГ, созданных в водоносных терригенных пластах с длительной историей эксплуатации (более 15–30 лет). В качестве детального примера рассмотрено ПХГ-А.

ПХГ-А создано в водоносном пласте в начале 1960-х гг. В структурном плане представляет собой асимметричную складку размером 6,0×3,0 км по замыкающей изогипсе –745 м, расположенную на юго-западном склоне Московской синеклизы. Объект хранения – верхняя часть песчаной толщи щигровского горизонта (D_3sc), характеризующаяся значительной

фациальной изменчивостью. Средняя пористость коллектора – 28%, проницаемость варьируется от 20 мД до 9 Д (в среднем 1–2 Д). Мощность песчаной пачки – от 8 до 45 м. Природная газонасыщенность пластовых вод составляет 50–140 см^3/л, преобладающие газы – азот (60–90 об. %), углекислый газ (0–4 об. %), метан (0–5 об. %) и водород (1–40 об. %).

Геофизический контроль выполняется в 22 скважинах дважды в год (весной и осенью), ГГХ – с 2016 г. один раз в год после закачки. За контуром ГВК расположены 7 наблюдательных скважин (№№ 1–7), в которых проводятся оба вида исследований.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В скважине № 5 (северо-восточное направление, вблизи контура ГВК) газонасыщенность пластовой воды изменяется в диапазоне 120–940 см^3/л, состав водорастворенного газа – метановый и метано-азотный с содержанием CH_4 43–86 об. %. Динамика показателей коррелирует с циклами закачка-отбор, что подтверждает техногенную природу аномалий. При этом показания нейтронного гамма-каротажа (НГК) в этой скважине за весь период наблюдений не фиксируют значимых изменений, свидетельствуя о низкой чувствительности геофизического метода при малых концентрациях газа в поровом пространстве.

В скважине № 6 (юго-восточное направление) газонасыщенность варьируется в пределах 70–270 см^3/л, содержание CH_4 – 27,7–59,8 об. %, при этом отклик на циклы ПХГ наблюдается с временной задержкой. Показания НГК также остаются неизменными.

В скважинах № 1, 2, 3, 4 и 7, расположенных на западном, южном и юго-западном направлениях, газонасыщенность (30–150 см^3/л) и содержание метана (0,07–7,2 об. %) находятся в пределах фоновых значений, что свидетельствует об отсутствии влияния закачиваемого газа на данных участках.

Дополнительный анализ скважин № 8–10 (исследования до 2017 г.) показал, что в скважине № 8 (западное направление) газонасыщенность достигала 1200 см^3/л при содержании метана до 95 об. %, причем в отдельные годы (2006, 2008, 2010, 2016) скважина переходила в режим свободного газа, что подтверждалось и геофизическими данными. В скважинах № 9 и 10 параметры оставались фоновыми.

На основе этих данных построен контур ГВК по результатам ГИС и, дополнительно, условный контур распространения водорастворенного газа метанового и метано-азотного состава (содержание CH_4 > 10 об. %, газонасыщенность > 140 см^3/л). Сопоставление контуров показало, что зона гидрогеохимического влияния выходит за пределы геофизического ГВК в северо-восточном и восточном направлениях, что указывает на незначительное латеральное растекание газа в этих направлениях. В южном, юго-западном и западном направлениях растекания не выявлено (рис. 1).

Выполненные исследования позволяют сформулировать следующие методические выводы:

1. ГИС обеспечивает надежное определение ГВК и количественную оценку газонасыщенности в зоне свободного газа, тогда как ГГХ выступает чувствительным индикатором диффузионно-конвективных процессов на периферии залежи. Совместное применение методов существенно повышает достоверность прогноза распространения газа.

2. На объекте ПХГ-А гидрогеохимические аномалии в скважинах №№ 5 и 6 фиксируются при отсутствии отклика по НГК, что позволяет выявлять начальные стадии миграции газа до формирования устойчивого вторичного газонасыщения.

3. Предложенная методика гидрогеохимического оконтуривания позволяет формализовать процесс перевода точечных данных о составе пластовых вод в картографическую модель зоны влияния залежи. Полученные контуры могут служить основой для корректировки геометрической модели хранилища, обоснования бурения дополнительных наблюдательных скважин и планирования мероприятий по управлению формой залежи (профилирование закачки, циклирование).

4. Метод требует достаточной густоты сети наблюдательных скважин для надежной интерполяции. Кроме того, гидрогеохимический отклик может иметь временную задержку относительно технологических циклов, что необходимо учитывать при интерпретации. Также требуется исключение влияния альтернативных факторов (биохимические процессы, наложенные посторонние загрязнения).

На основе проведенных исследований разработана и апробирована методика комплексного контроля герметичности ПХГ, объединяющая данные геофизических и гидрогеохимических исследований. Показано, что гидрогеохимические методы обладают более высокой опережающей чувствительностью к миграционным процессам в приконтурной зоне по сравнению с традиционным нейтронным каротажем. Предложенная методика гидрогеохимического оконтуривания позволяет выявлять направления латерального растекания газа, не фиксируемые стандартными геофизическими методами, и служит количественной основой для принятия оперативных решений по управлению залежью.

Результаты апробации на ПХГ-А подтвердили эффективность подхода: установлено растекание закачиваемого газа в северо-восточном и восточном направлениях за пределами контура ГВК, при этом в южном, юго-западном и западном направлениях влияние газа не выявлено. Применение системного гидрогеохимического мониторинга в комплексе с ГИС рекомендуется в качестве стандартной процедуры для объектов ПХГ с длительной историей эксплуатации, особенно в условиях неоднородных коллекторов и при наличии подозрений на нарушение герметичности.

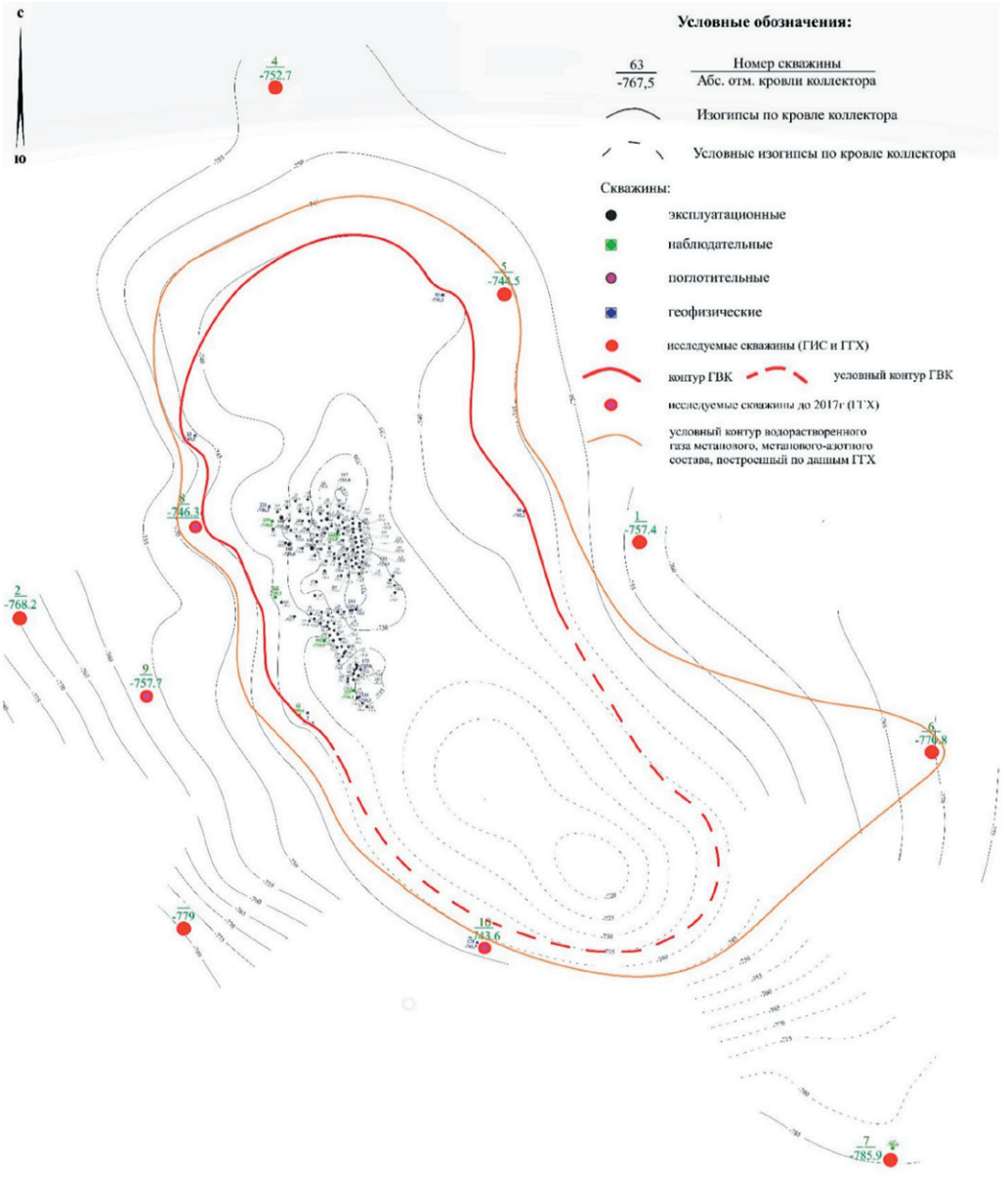


РИС. 1.
Контур ГВК по площади и условный внутренний контур ВРГ метанового, метано-азотного состава

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ванюнин В.А., Завьялова Л.М., Коробейников Г.С., Мурогова Р.Н. и др.** Отбор проб и анализ природных газов нефтегазоносных бассейнов. Под ред. И.С. Старобинца, М.К. Калинко. М.: Недра, 1985. 239 с.
2. ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий.
3. **Зубарев А.П., Шулейкин В.Н.** Комплексный геофизический и геохимический контроль при эксплуатации подземных газохранилищ. М.: ООО «Газпром ПХГ». 2009. 264 с.
4. Методика измерений объемной доли углеводородных и неуглеводородных компонентов в природных газовых смесях методом газовой хроматографии» ВНИИЯГГ. ФР.1.31.2011.10361.
5. **Первушина В.Н., Мельников Е.А.** Повышение эффективности геолого-геофизического контроля за формированием искусственной газовой залежи в подземных хранилищах газа, созданных в водоносных структурах // Каротажник. 2025. №336. С. 26–38.
6. РД-153-39.0-072-01 Техническая инструкция по проведению геофизических исследований и работ приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах, введена в действие приказом Минэнерго от 07.05.2001г. №134.

7. **Рубан Г.Н.** Повышение эффективности системы геолого-геофизического контроля за эксплуатацией подземных хранилищ газа. Дис-ая на соискание уч. зв. к.т.н.М., 2009. 181 с.
8. **Сулин В.А.** Гидрогеология нефтяных месторождений. М.: Гостоптехиздат, 1948. 382 с.

REFERENCES

1. **Vanyunin V.A., Zavyalova L.M., Korobeynikov G.S., Murogova R.N. et al.** Sampling and Analysis of Natural Gases from Oil and Gas-Bearing Basins. Eds. I.S. Starobinets, M.K. Kalinko. Moscow: Nedra, 1985: 239. (In Russian).
2. GOST ISO/IEC 17025-2019. General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories. (In Russian).
3. **Zubarev A.P., Shuleykin V.N.** Integrated Geophysical and Geochemical Monitoring During the Operation of Underground Gas Storage Facilities. Moscow: Gazprom UGS LLC, 2009:264. (In Russian).
4. Methodology for Measuring the Volume Fraction of Hydrocarbon and Non-Hydrocarbon Components in Natural Gas Mixtures by Gas Chromatography (VNIIYaGG). FR.1.31.2011.10361. (In Russian).
5. **Pervushina V.N., Melnikov E.A.** Improving the Efficiency of Geological and Geophysical Monitoring of Artificial Gas Pool Formation in Underground Gas Storage Facilities Created in Aquifer Structures. *Karotazhnik*. 2025;336:26–38. (In Russian).
6. RD-153-39.0-072-01. Technical Instruction for Conducting Geophysical Surveys and Operations Using Wireline Tools in Oil and Gas Wells. Enacted by Order of the Ministry of Energy N 134 dated May 7, 2001. (In Russian).
7. **Ruban G.N.** Improving the Efficiency of the Geological and Geophysical Monitoring System for Underground Gas Storage Facility Operations. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Moscow, 2009:181. (In Russian).
8. **Sulin V.A.** Hydrogeology of Oil Fields. Moscow: Gostoptekhizdat, 1948:382. (In Russian).

Мельников Евгений Александрович,
генеральный директор ООО «НПП «РНГТ»

238460, Калининградская обл., г. Калининград,
ул. Ленинский проспект, д. 131, офис 601,
238460 Kaliningrad Region, Leninsky Prospekt, 131,
Office 601,
тел.: +7 (800) 770-71-05

Первушина Валентина Николаевна,
начальник центра Научно-производственного филиала «Оренбурггазгеофизика» ООО «Газпром недра»

140100, Московская обл. г. Раменское,
ул. Москворецкая, д. 64,
140100, Moscow region. Ramenskoye,
st. Moskvoretskaya, 64,
тел.: +7 (925) 071-95-38, e-mail: vn.pervushina@yandex.ru

УДК 622.276
DOI: 10.52531/1682-1696-2026-26-3-32-40
Научная статья
EDN: DUOORG

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ФАКТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАЗРАБОТКИ С РЕЗУЛЬТАТАМИ МОДЕЛИ БАКЛИ-ЛЕВЕРЕТТА В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОЙ СТЕПЕНИ ВЫРАБОТАННОСТИ ЗАПАСОВ

А.В. Денисов
Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе (Москва, Россия)

Статья посвящена актуальной теме поиска путей улучшения технологических и экономических показателей процесса заводнения, ключевой технологии разработки и доразработки основной категории трудноизвлекаемых запасов нефти – высоковыработанных нефтяных месторождений Западной Сибири, что позволит продлить их эффективную эксплуатацию. На примерах промысловых показателей разработки реальных скважин проведена оценка их соответствия результатам физического и математического моделирования в рамках теории Бакли–Леверетта. В результате получен алгоритм оценки значений площадей контуров питания скважин, обеспечивающих накопленный отбор нефти и соответствие фильтрации нефти и воды модели Бакли–Леверетта, что необходимо для анализа выработки запасов нефти и определения местоположения застойных зон нефтяной залежи. Определено направление дальнейшей работы по методическому обеспечению улучшения технологических и экономических показателей процесса заводнения высоковыработанных нефтяных месторождений.

Ключевые слова: *высоковыработанные нефтяные месторождения Западной Сибири, трудноизвлекаемые запасы нефти, технология заводнения и система поддержания пластового давления, многофазная фильтрация, модель Бакли–Леверетта*

Original article

COMPARATIVE ASSESSMENT OF ACTUAL DEVELOPMENT PERFORMANCE AGAINST BUCKLEY-LEVERETT MODEL RESULTS UNDER CONDITIONS OF HIGH RESERVOIR DEPLETION

A.V. Denisov
Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University (Moscow, Russia)

This article addresses the topical issue of identifying ways to improve the technological and economic performance of waterflooding – a key technology for the development and further exploitation of a major category of hard-to-recover oil reserves: the highly depleted oil fields of Western Siberia. Enhancing this process will extend their effective operational life. Using field development data from actual wells, the study evaluates the consistency of these data with results from physical and mathematical modeling based on Buckley-Leverett theory. An algorithm was developed to estimate the drainage area sizes required to achieve observed cumulative oil production and ensure that oil and water flow behavior aligns with the Buckley-Leverett model; this is essential for analyzing reserve depletion and identifying stagnant zones within the oil reservoir.Directions for future work are outlined regarding the methodological support needed to improve the technological and economic performance of waterflooding in highly depleted oil fields.

Key words: *highly depleted oil fields of Western Siberia, hard-to-recover oil reserves, waterflooding technology and reservoir pressure maintenance systems, multiphase flow, Buckley-Leverett model*

ВВЕДЕНИЕ

Разработка значительной доли эксплуатационных объектов месторождений с запасами традиционной нефти Западной Сибири в настоящее время вступила в финальную стадию, для которой характерна высокая степень выработанности запасов ($C_{изв}$ >80%) и высокая обводненность добываемой продукции (W >90%).

Закачка воды в нефтяные пласты с целью поддержания пластового давления и эффективного вытеснения нефти является основной технологией добычи нефти с доказанной технологической и экономической эффективностью и применяется на большинстве объектов разработки в России.

Достижение высоких значений коэффициентов нефтеизвлечения обеспечивается выбором оптимальной стратегии формирования системы поддержания пластового давления за счет: объединения пластов в

© 2026, А.В. Денисов
Поступила в редакцию 10.09.2026

эксплуатационные объекты, схем размещения и типов скважин, расстояний между скважинами, времени начала закачки воды, выбора темпов закачки воды и отбора жидкости. Значительное число технологий повышения нефтеотдачи пластов и интенсификации добычи нефти рассчитано на использование системы поддержания пластового давления для закачки различных комплексов химреагентов.

Известно, что закачка большого количества воды в нефтяные залежи приводит к негативным последствиям – неизбежному росту обводненности добываемой продукции, формированию слабодренируемых и застойных зон, содержащих остаточную нефть и не охваченных вытеснением, все это проявляется на поздней стадии разработки и является причиной низких значений коэффициентов извлечения нефти и трансформации остаточных запасов таких месторождений в категорию трудноизвлекаемых (ТРИЗН). Данная категория ТРИЗН является наиболее востребованной, и для нее предусмотрено использование льготного режима налогообложения.

Тем не менее, возможности технологии заводнения реализованы не полностью, поэтому актуальной задачей является поиск путей улучшения технологических и экономических показателей этого процесса, что позволит продлить эффективную эксплуатацию высоковыработанных нефтяных месторождений Западной Сибири.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ ВОДОЙ

Как известно, изучение процессов многофазной фильтрации начинается со специальных фильтрационных исследований на образцах керна коллекторов, в результате которых определяются фазовые и относительные фазовые проницаемости (ОФП). Именно они являются основой для дальнейшего использования в математических моделях и программах компьютерного гидродинамического моделирования [1–7].

Для аппроксимации экспериментальных данных широкое применение получили корреляционные модели – A.T. Corey (1954), A.T. Chierici (1984), LET (по фамилиям авторов – F. Lomeland, E. Ebeltoft, W.H. Thomas; 2005). Следует заметить, что использование аппроксимаций зачастую ведет к искажению реального физического процесса, но удобно для расчетов и позволяет получить гладкие кривые.

Математическая формализация процесса многофазной фильтрации связана с необходимостью решения сложных задач о взаимном течении несмешивающихся флюидов разной вязкости в неоднородной пористой геологической среде под действием гидродинамических, капиллярных, гравитационных и прочих сил. Данной тематике посвящено большое количество опубликованных работ с результатами теоретических и экспериментальных исследований [1–25].

В работе [3] была показана удобная для использования форма представления одномерного уравнения совместного течения нефти и воды в пористой среде с учетом действия капиллярных и гравитационных сил:

$$m\frac{\partial}{\partial t}(S_w)+u\frac{\partial}{\partial x}(F_{base}+F_{grav}+F_{cap})=0., \qquad (1)$$

где $F_{base}=1+\frac{k_{ro}\times\mu_w}{k_{rw}\times\mu_o}$ – функция Бакли–Леверетта;

$F_{grav}=\dfrac{\frac{k\times k_{ro}}{u\times\mu_o}(\rho_w-\rho_o)\times g\times\sin(\alpha)}{1+\frac{k_{ro}\times\mu_w}{k_{rw}\times\mu_o}}$ – функция, учитывающая гравитационные силы;

$F_{cap}=\dfrac{\frac{k\times k_{ro}}{u\times\mu_o}\times\frac{\partial P_c}{\partial x}}{1+\frac{k_{ro}\times\mu_w}{k_{rw}\times\mu_o}}$ – функция, учитывающая капиллярные силы.

Без учета гравитационных и капиллярных сил данное уравнение сводится к задаче Бакли–Леверетта [19], а без учета только гравитационных – к задаче Рапопорта–Лиса [20].

Одномерная модель совместного течения нефти и воды в пористой среде без учета действия капиллярных и гравитационных сил, которую в 1941 г. предложили Бакли и Леверетт в своей классической работе [19], до сих пор имеет наибольшее количество ссылок и упоминаний в публикациях специалистов, занимающихся многофазной фильтрацией в пористой среде . Система уравнений этой модели включает обобщенный закон Дарси и законы сохранения масс обеих несмешивающихся фаз.

Результатом решения уравнения (1) без учета гравитационных и капиллярных сил (задача Бакли–Леверетта) является положение заданного значения водонасыщенности как функции времени:

$$X(S_w)=\frac{u\times t}{m}\left(\frac{\partial f(S_w)}{\partial S_w}\right)+X_o, \qquad (2)$$

где X_o – начальное положение фронта водонасыщенности при $t=0$.

Функцию Бакли–Леверетта можно выразить через скорости или параметры подвижностей водной и нефтяной фаз:

$$f(S_w)=\frac{u_в}{u_в+u_н}=\frac{1}{1+\frac{k_{ro}\times\mu_w}{k_{rw}\times\mu_o}}=\frac{\lambda_w}{\lambda_w+\lambda_o}=\frac{\lambda_w}{\lambda}, \qquad (3)$$

где m – пористость; S_w – водонасыщенность; k_{ro} – ОФП по нефти; k_{rw} – ОФП по воде; x – координата; $u_в$ – скорость водной фазы; $u_н$ – скорость нефтяной фазы;

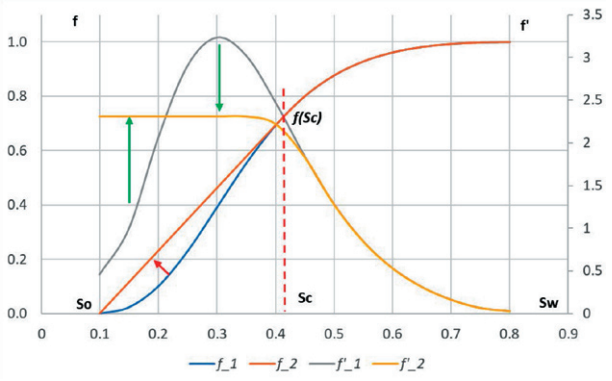


РИС. 1.

Графики исходной функции Бакли–Леверетта и ее производной (f_1; f'_1), и их видоизмененный вариант (f_2; f'_2) для получения плоского фронта вытеснения

u– общая скорость фаз; $\lambda_w = \frac{k_{rw}}{\mu_w}$ – подвижность водной фазы; $\lambda_o = \frac{k_{ro}}{\mu_o}$ – подвижность нефтяной фазы; $\lambda = \lambda_w + \lambda_o$ – общая подвижность.

Ключевыми понятиями модели Бакли–Леверетта являются фронт вытеснения и значение водонасыщенности на фронте вытеснения нефти водой S_c (рис. 1). Абсолютная величина разницы значений между водонасыщенностями на фронте вытеснения и начальной (S_c–S_o) характеризует как устойчивость фронта вытеснения, так и эффективность начального «безводного» этапа заводнения. В иностранных источниках используется термин «point of water breakthrough» – точка прорыва воды, до которой процесс вытеснения нефти происходит очень эффективно и за короткое время, а после этой точки эффективность вытеснения нефти сильно снижается.

Основным общепризнанным недостатком этой модели является появление математически возможной, но физически не возможной многозначности водонасыщенности в интервале водонасыщенностей S_o–S_c. Это следует из графика зависимости водонасыщенности от расстояния S_{w_1} (рис. 2), для построения которого Бакли и Леверетом были введены понятия «линии распространения заданной постоянной насыщенности» и «концы последовательности таких линий, которые затем соединяются плавной кривой, представляющей новую кривую зависимости водонасыщенности от расстояния» [1], при этом возникает вопрос «физичности» этого понятия и соответствия привычному понятию водонасыщенности как доли порового пространства, занятого водной фазой, например, по сечению *X* для одномерного варианта фильтрации.

При общепринятом устранении многозначности водонасыщенности плоским фронтом S_{w_2} (рис. 2) реальный физический процесс в интервале изменения водонасыщенности S_o–S_c игнорируется, начальная часть функции Бакли–Леверетта заменяется линейной

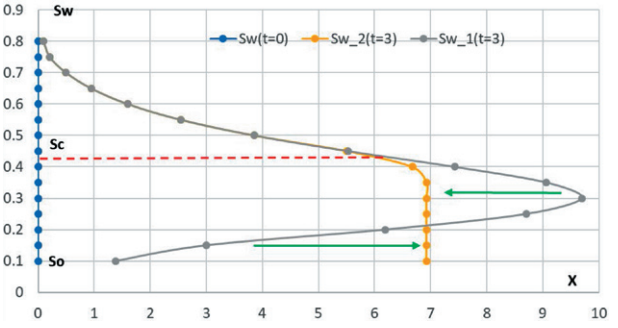


РИС. 2.

Устранение многозначности водонасыщенности плоским фронтом

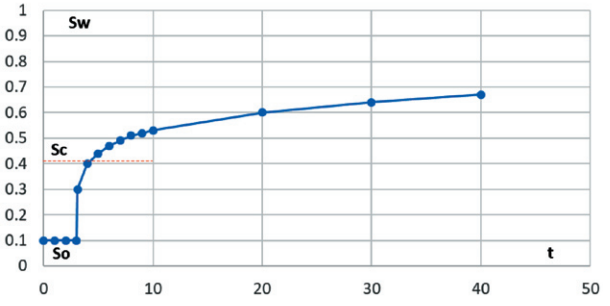


РИС. 3.

График изменения водонасыщенности для определенной координаты *X* во времени

функцией *f_2* с постоянным значением производной *f'_2* (рис. 1), а значит и скоростью распространения водонасыщенности:

$$f'(S_c) = \frac{f(S_c) - f(S_o)}{S_c - S_o}. \qquad (4)$$

Уравнение (4) означает, что в задаче Бакли–Леверетта скорость распространения скачка равна скорости распространения фронтальной насыщенности S_c.

Если построить график изменения водонасыщенности для определенной координаты *X* во времени (рис. 3), то можно отметить, что начальный «безводный» период длится относительно недолго (10% времени), затем происходит очень быстрый рост водонасыщенности от начальной S_o до S_c, после чего рост водонасыщенности происходит медленно в течение продолжительного периода (90% времени). Таким образом, начальный этап очень важен с точки зрения оптимизации заводнения, поскольку за короткий промежуток времени (годы) возможно достичь высоких показателей нефтеотдачи.

Одной из актуальных задач для исследователей, занимающихся вопросами многофазной фильтрации в пористой среде, является оценка соответствия промысловых показателей разработки реальных скважин результатам физического и математического модели-

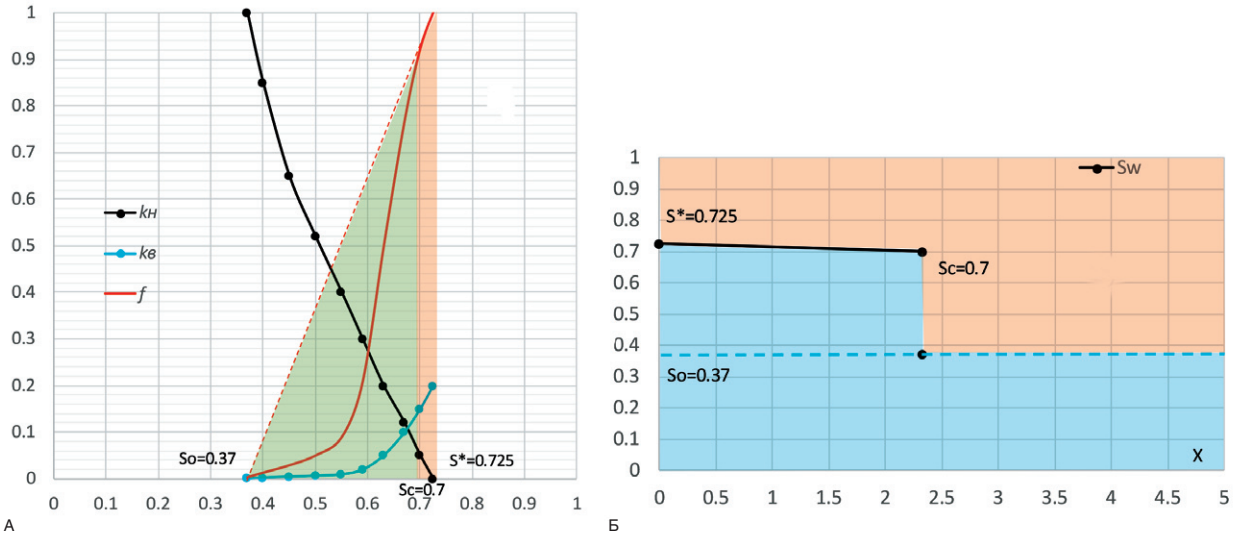


РИС. 4.

Графики ОФП, функции Бакли–Леверетта *f* (А) и значений водонасыщенности вдоль координаты *X* (Б)

рования с использованием ОФП и теории Бакли–Леверетта [2–7].

Для проведения расчетов воспользуемся значениями модифицированных ОФП из проектного документа разработки объекта $БС_{10}^{2-3}$ месторождения Западной Сибири со следующими характеристиками пластовых флюидов – вязкость нефти в пластовых условиях μ_o=1,5 мПа×с, вязкость воды в пластовых условиях μ_w=0,38 мПа×с.

Как видно из рис. 4 касательная к функции Бакли–Леверетта разбивает процесс двухфазной фильтрации на два участка:

– отмеченный зеленым цветом (~90% площади) – характеризует безводный период при изменении водонасыщенности от So=0,37 до Sc=0,7 с $К_{выт}$=0,524, на котором нелинейная часть функции Бакли–Леверетта заменена на линейную для устранения многозначности плоским фронтом вытеснения;

– отмеченный коричневым цветом (~10% площади) – характеризует водный период при изменении водонасыщенности от Sc=0,7 до S*=0,725 с $К_{выт}$=0,04.

Полученное распределение водонасыщенности по координате *X* говорит о том, что для данного объекта возможен практически поршневой режим вытеснения нефти водой с высоким значением коэффициента вытеснения – 0,524.

Следует отметить, что при сравнении ОФП и $К_{выт}$, полученных в лаборатории, с промысловыми показателями скважин, необходимо учесть коэффициент охвата вытеснением как долю объема порового пространства, охваченного вытеснением, от общего порового объема.

Проведем оценку соответствия показателей разработки добывающих скважин результатам расчетов по модели Бакли–Леверетта при использовании ОФП, утвержденных в проектном документе.

Как известно, функция Бакли–Леверетта представляет собой долю воды в общем потоке жидкости, и ее можно выразить либо через скорости нефти и воды, либо через их расходы, при условии совпадения площадей фильтрации для нефти и воды:

$$f(S_w)=\frac{u_в}{u_в+u_н}=\frac{Q_в}{Q_в+Q_н}. \qquad (5)$$

Показатель обводненности добываемой продукции определяется через количество отобранной нефти и воды в поверхностных условиях:

$$\beta(t)=\frac{Q_в}{Q_в+Q_н}. \qquad (6)$$

Как видим, правые части формул (5) и (6) совпадают, и для приведения в соответствие обводненности и функции Бакли–Леверетта необходимо лишь перевести в пластовые условия объемные показатели отобранной нефти и воды и рассчитать для заданного момента времени значение водонасыщенности.

Пример расчета № 1

Карта разработки исследуемого участка представлена на рис. 5, динамика показателей эксплуатации добывающей скважины 7797 – на рис. 6.

Для проведения расчетов используются данные результатов интерпретации геофизических исследований скважин (РИГИС) и месячных эксплуатационных рапортов (МЭР) по выбранной скважине, условная площадь контура питания скважины задается по карте разработки, можно ориентироваться на значение утвержденной плотности сетки скважин 20 га/скв (200 тыс. м^2). Затем объемным методом определяются поровый объем $V_{пор}$ и начальный объем нефти $V_{но}$, содержащийся в нем.

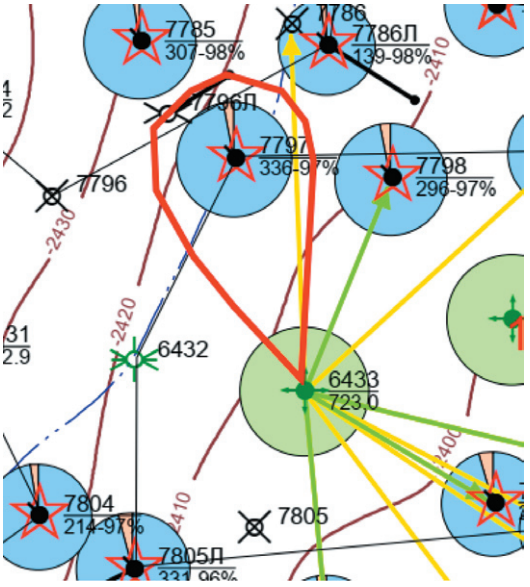


РИС. 5.
Участок района скважины 7797

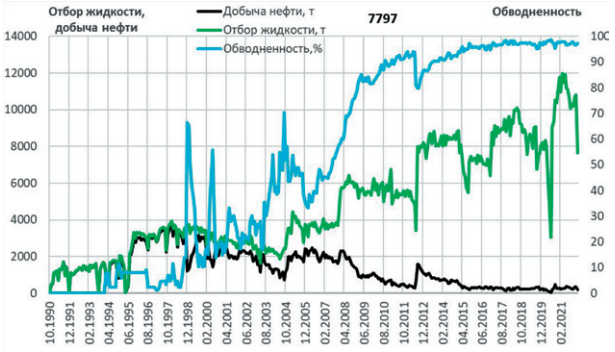


РИС. 6.
Динамика показателей эксплуатации добывающей скважины 7797

Данные из МЭР по добыче нефти, отбору воды, обводненности пересчитываются в пластовые условия, при этом добычу нефти считаем в объемных единицах.

Водонасыщенность для конкретного времени считаем по формуле:

$$S_w(t)=1-\frac{V_{но}-Q_н(t)}{V_{пор}}=S_o+\frac{Q_н(t)}{V_{пор}}, \qquad (7)$$

где $Q_н(t)$ – накопленная добыча нефти в пластовых условиях в метрах кубических.

Таким образом получим дополнительный временной ряд значений водонасыщенности, который используем для построения графика обводненности β(Sw) и наложения его на график ОФП и функции Бакли–Леверетта, изменением значения площади контура питания скважины добиваемся совпадения β(Sw) и функции Бакли–Леверетта. Дополнительно рассчитываем текущий коэффициент извлечения нефти (ТКИН) и отношение количества накопленного отбора воды к поровому объему. Результаты расчетов представлены на рис. 7 и в табл. 1.

Выводы из результатов расчета № 1

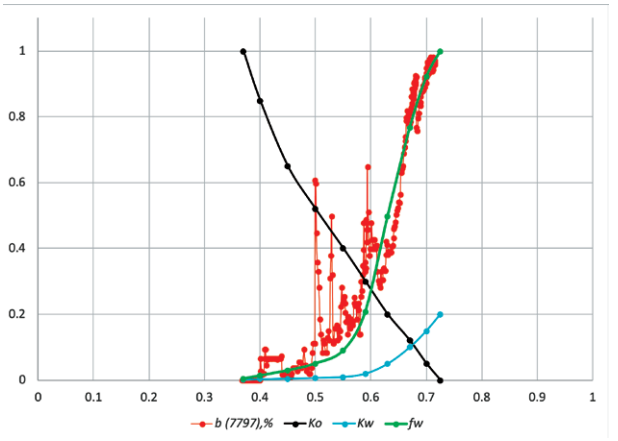


РИС. 7.
Сравнение преобразованной обводненности скважины 7797 с результатами расчетов по модели Бакли–Леверетта

ТАБЛИЦА 1.
Исходные данные и результаты расчетов

Наименование	Источник	Значение
СКВАЖИНА		07797_
Наличие подстилающей воды	РИГИС	ЧНЗ
Плотность нефти п. у., т/м³	ПТД	0,86
Объемный коэффициент нефти	ПТД	1,1
Накопл. нефть Qн, т	МЭР	506 072
Накопл. вода Qв, м³	МЭР	1 301 937
Начало закачки воды в наг. скв. 6433	МЭР	01,1992
$H_{нн}$ по району скважины, м	РИГИС	33,6
$K_{нн}$ по району скважины, д. ед	РИГИС	0,631
S_o по району скважины, д. ед	РИГИС	0,369
$K_п$ по району скважины, д. ед	РИГИС	0,204
Площадь контура питания скважины, м²	Карта разработки	340 000
Площадь контура питания скважины X $K_{охв}$, м²	Расчет	272 000
$V_{пор}$, м³	Расчет	2 330 496
$V_{но}$, м³	Расчет	1 470 543
ТКИН	Расчет	0,440
Накопл. отбор воды/$V_{пор}$	Расчет	0,56

График изменения преобразованной обводненности скважины 7797 в зависимости от водонасыщенности в целом близок к функции Бакли–Леверетта, полученной с использованием ОФП, утвержденных в проектном документе, процесс вытеснения нефти эффективен, количество накопленной попутно отбираемой воды составило 0,56 $V_{пор}$. Оценка площади контура питания скважины для соответствия используемым ОФП для скважины 7797 составляет 340 тыс. м^2 (34 га), что превосходит плановый показатель 20 га/скв. за счет запасов нефти, вытесняемых закачиваемой водой от нагнетательной скважины 6433 (рис. 5).

Пример расчета № 2

Карта разработки исследуемого участка представлена на рис. 8, динамика показателей эксплуатации добывающей скважины 7808 – на рис. 9.

Результаты расчетов, аналогичных проведенным в первом примере, представлены на рис. 10 и в табл. 2.

Выводы из результатов расчета № 2

График изменения преобразованной обводненности скважины 7808 в зависимости от водонасыщенности не соответствует функции Бакли–Леверетта, полученной с использованием ОФП, утвержденных в проектном документе, из-за раннего прорыва воды и образования устойчивых каналов поступления воды в добывающую скважину. Процесс вытеснения нефти недостаточно эффективен, количество накопленной попутно отбираемой воды составило 1,48 $V_{пор}$. Оценка площади контура питания скважины для соответствия используемым ОФП для скважины 7804 составляет 195 тыс. м^2 (19,5 га), что близко к плановому показателю 20 га/скв., в том числе за счет запасов нефти, вытесняемых закачиваемой водой от нагнетательных скважин 6435 и 6436 (рис. 8).

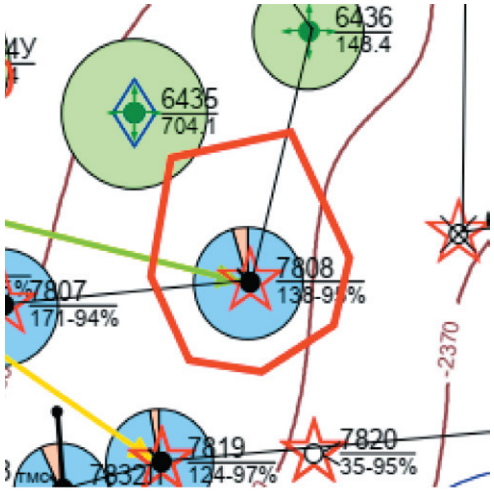


РИС. 8.
Участок района скважины 7808

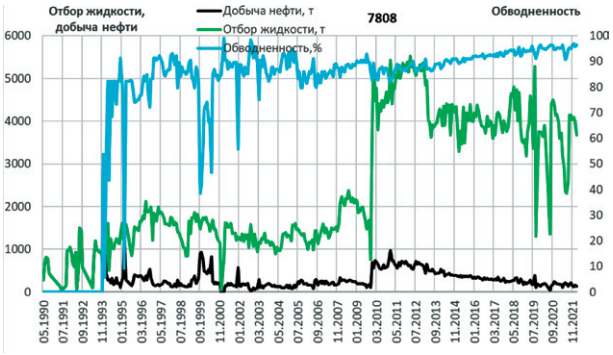


РИС. 9.
Динамика показателей эксплуатации добывающей скважины 7808

ТАБЛИЦА 2
Исходные данные и результаты расчетов

Наименование	Источник	Значение вариант
СКВАЖИНА	ПТД	07808_
Наличие подстилающей воды	РИГИС	ЧНЗ
Плотность нефти п.у., т/м^3	ПТД	0,86
Объемный коэффициент нефти	МЭР	1,1
Накопл.нефть Qн, т	МЭР	122 305
Накопл.вода Qв, м^3	МЭР	781 294
Начало закачки воды в наг. скв. 6435	МЭР	01,1992
$H_{нн}$ по району скважины, м	РИГИС	13,6
$K_{нн}$ по району скважины, д. ед	РИГИС	0,667
S_o по району скважины, д. ед	РИГИС	0,333
$K_п$ по району скважины, д. ед	РИГИС	0,199
Площадь контура питания скважины, м^2	Карта разработки	195 000
Площадь контура питания скважины X $K_{охв}$, м^2	Расчет	156 000
$V_{пор}$, м^3	Расчет	422 198
$V_{но}$, м^3	Расчет	352 008
ТКИН	Расчет	0,44
Накопл. отбор воды/$V_{пор}$	Расчет	1,48

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Потенциал эксплуатационных объектов Западной Сибири высокой степени выработанности запасов ($C_{изв}$ >80%) и высокой обводненности добываемой продукции (W >90%) еще до конца не исчерпан, актуальной задачей является поиск резервов улучшения технологических и экономических показателей методов добычи нефти, и в первую очередь – связанных с технологией заводнения.

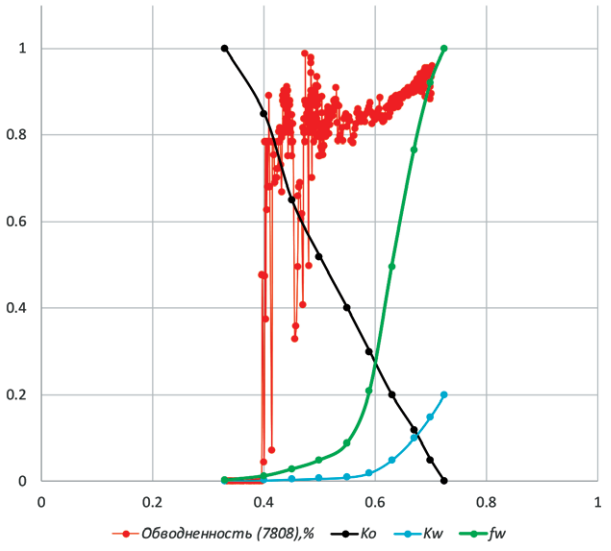


РИС. 10.

Сравнение преобразованной обводненности скважины 7808 с результатами расчетов по модели Бакли–Леверетта

На примерах промысловых показателей разработки реальных скважин проведена оценка их соответствия результатам физического и математического моделирования в рамках теории Бакли–Леверетта. Предложен алгоритм экспресс-оценки значений площадей контуров питания скважин, обеспечивающих накопленный отбор нефти и соответствие фильтрации нефти и воды модели Бакли–Леверетта, что необходимо для анализа выработки запасов нефти и определения местоположения застойных зон нефтяной залежи с целью вовлечения их в разработку за счет назначения адресных геолого-технических мероприятий.

Реальный процесс фильтрации нефти и воды в промысловых условиях может не соответствовать модельным представлениям, поскольку доля воды и нефти в общем фильтрационном потоке периодически изменяется и носит неустойчивый характер. Путь построения и решения дифференциальных уравнений фильтрации с учетом геологической неоднородности и всех изменяющихся параметров представляет сложную и зачастую невыполнимую задачу, поэтому перспективным направлением моделирования двухфазного потока на поздней стадии разработки являются методы оперативного прогноза прорыва воды к добывающим скважинам в условиях неустойчивости фронта вытеснения, основанные на использовании моделей роста [8–25], которые предназначены для регулирования режимов отбора жидкости на добывающих скважинах и закачки воды на нагнетательных скважинах в рамках использования гидродинамических методов повышения нефтеотдачи и интенсификации добычи нефти.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М.** Движение жидкостей и газов в природных пластах. М.: Недра, 1984. 207 с.
2. **Индрупский И.М., Закиров Э.С., Аникеев Д.П., Ипатов А.И., Фахретдинов Р.Н. и др.** Определение относительных фазовых проницаемостей в скважинных условиях // Нефтяное хозяйство. 2008. №5. С. 38–42.
3. **Кряжев Я.А., Гильманов А.Я., Федоров К.М., Шевелёв А.П.** Критериальный анализ возникновения неустойчивости фронта вытеснения при заводнении нефтяных пластов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2024. Т. 10. № 4 (40). С. 114–131. https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-4-114-131
4. **Михайлов Н.Н.** Остаточное нефтенасыщение разрабатываемых пластов. М.: Недра, 1992. 270 с.
5. **Степанов С.В.** Использование данных разработки месторождения нефти для получения кривых фазовых проницаемостей // Нефтяное хозяйство. 2006. №4. С. 67–69.
6. **Степанов С.В., Вокина В.Р.** К вопросу о сопоставимости относительных фазовых проницаемостей, полученных разными методами // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2024. Т. 10. №2 (38). С. 45–55. https://doi. org/10.21684/2411-7978-2024-10-2-45-55
7. **Шабаров А.Б., Шаталов А.В., Марков П.В., Шаталова Н.В.** Методы определения функций относительной фазовой проницаемости в задачах многофазной фильтрации // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2018. Т. 4. №1. С. 79–109. https://doi. org/10.21684/2411-7978-2018-4-1-79-109
8. **Шахвердиев А.Х.** Системная оптимизация процесса разработки нефтяных месторождений. М.: Недра, 2004. 452 с.
9. **Шахвердиев А.Х.** Еще раз о нефтеотдаче // Нефтяное хозяйство. 2014. №1. С. 44–48.
10. **Шахвердиев А.Х., Мандрик И.Э., Панахов Г.М.** Научно-методические и технологические основы оптимизации процесса повышения нефтеотдачи пластов. М.: Нефтяное хозяйство, 2010. 420 с.
11. **Шахвердиев А.Х.** Оптимизация системы поддержания пластового давления при заводнении залежей // Нефтяное хозяйство. 2001. № 3. С. 42–44.
12. **Шахвердиев А.Х.** Системная оптимизация процесса доразработки нефтяных месторождений: Дис. ... д-ра техн. наук / Всероссийский нефтегазовый научно-исследовательский институт им. акад. А.П. Крылова. М., 2001.
13. **Шахвердиев А.Х., Арефьев С.В., Де-**

нисов А.В., Юнусов Р.Р. Методика восстановления оптимального режима функционирования системы пласт – скважина с учетом неустойчивости фронта вытеснения // Нефтяное хозяйство. 2020. №6. С. 52–57.

14. Шахвердиев А.Х., Денисов А.В. Моделирование эволюции геофлюидодинамических углеводородных систем в условиях неустойчивости фронта вытеснения // Вестник РАЕН. 2020. Т. 20. №3. С. 50–55.
15. Шахвердиев А.Х., Денисов А.В. Определение местоположения застойных и слабодренируемых зон нефтяной залежи и вовлечение их в активную разработку // Вестник Азербайджанской Инженерной Академии. 2020. Т. 12. №1. С. 23–30.
16. Шахвердиев А.Х., Денисов А.В., Шахвердиев Э.А. Унифицированная методика оценки эффективности геолого-технических мероприятий // НТЖ Инженер-нефтяник. 2019. № 3. С. 39–46.
17. Шахвердиев А.Х., Денисов А.В., Собаев А.Г., Шахвердиев Э.А. Оптимизация нестационарного заводнения нефтяных залежей с использованием модели роста // Вестник РАЕН. 2019. №1. С. 21–25.
18. Шахвердиев А.Х., Мандрик И.Э. Оптимизация плотности сетки скважин и ее влияние на коэффициент извлечения нефти // Нефтяное хозяйство. 2007. №12. С. 54–58.
19. Buckley S.E., Leverett M.S. Mechanism of Fluid Displacement in Sands // Pet Trans AIME. 1942. Vol. 146. №01. P. 107–116. https://doi.org/10.2118/942107-G
20. Rapoport L.A., Leas W.J. Properties of Linear Waterfloods // Trans AIME. 1953. Vol. 198. P. 139–148.
21. Shakhverdiev A.K., Denisov A.V., Tumanova V.D. New optimization criteria of waterflood patterns preventing premature water breakthrough in the context of water-oil displacement front instability. In: 7th Scientific Exploration Conference – Tyumen 2021: Natural Resources Management as a Cross-Functional Process. 7, Natural Resources Management as a Cross-Functional Process. 2021. С. 50063. https://doi.org/10.3997/2214-4609.202150063
22. Shakhverdiev A.Kh., Shestopalov Yu.V. Qualitative analysis of quadratic polynomial dynamical systems associated with the modeling and monitoring of oil fields // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2019. Vol. 40, №10. P. 1695–1710.
23. Shestopalov Y., Shakhverdiev A. Qualitative theory of two-dimensional polynomial dynamical systems // Symmetry. 2021. Vol. 13. №10.
24. Shestopalov Y.V., Shakhverdiev A.Kh., Arefiev S.V. Bifurcations associated with three-phase polynomial dynamical systems and complete description of symmetry relations using discriminant criterion // Symmetry. 2024. Vol. 16. № 1.
25. Shestopalov Yu.V., Shakhverdiev A.Kh. Three-phase dynamical systems and their applications to monitoring for the development of hydrocarbon fields // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2023. Vol. 44. № 11. P. 5045-5056.

REFERENCES

1. Barenblatt G.I., Entov V.M., Ryzhik V.M. Flow of Fluids and Gases in Natural Reservoirs. Moscow: Nedra, 1984:207. (In Russian).
2. Indrupsky I.M., Zakirov E.S., Anikeev D.P., Ipatov A.I., Fakhretdinov R.N. et al. Determination of relative phase permeabilities under downhole conditions. *Neftyanoe Khozyaystvo*. 2008;5:38–42. (In Russian).
3. Kryazhev Ya.A., Gilmanov A.Ya., Fedorov K.M., Shevelev A.P. Criterion-based analysis of displacement front instability during oil reservoir waterflooding. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoye modelirovaniye. Neft', gaz, energetika.* 2024;10;4;(40:114–131. https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-4-114-131 (In Russian).
4. Mikhailov N.N. Residual Oil Saturation of Reservoirs Undergoing Development. Moscow: Nedra, 1992:270. (In Russian).
5. Stepanov S.V. Using oil field development data to derive phase permeability curves. *Neftyanoe Khozyaystvo*. 2006;4:67–69. (In Russian).
6. Stepanov S.V., Vokina V.R. On the comparability of relative phase permeabilities obtained by different methods. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoye modelirovaniye. Neft', gaz, energetika*. 2024;10;2 (38):45–55. https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-2-45-55 (In Russian).
7. Shabarov A.B., Shatalov A.V., Markov P.V., Shatalova N.V. Methods for determining relative phase permeability functions in multiphase flow problems. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoye modelirovaniye. Neft', gaz, energetika*. 2018;4;(1):79–109. https://doi.org/10.21684/2411-7978-2018-4-1-79-109 (In Russian).
8. Shakhverdiev A.Kh. System optimization of the oil field development process. Moscow: Nedra, 2004:452. (In Russian).
9. Shakhverdiev A.Kh. Revisiting oil recovery. *Neftyanoe Khozyaistvo*. 2014;1:44–48. (In Russian).
10. Shakhverdiev A.Kh., Mandrik I.E., Panakhov G.M. Scientific-methodological and technological foundations for optimizing the process of enhanced oil recovery. Moscow: Neftyanoe Khozyaistvo, 2010: 420. (In Russian).
11. Shakhverdiev A.Kh. Optimization of the reser-

voir pressure maintenance system during waterflooding of deposits. *Neftyanoe Khozyaistvo*. 2001;3:42–44. (In Russian).

12. **Shakhverdiev A.Kh.** System optimization of the process of further development of oil fields: Dissertation... Doctor of Technical Sciences. ...Sciences. Academician A.P. Krylov All-Russian Oil and Gas Research Institute. Moscow, 2001. (In Russian).
13. **Shakhverdiev A.Kh., Arefyev S.V., Denisov A.V., Yunusov R.R.** Methodology for restoring the optimal operating mode of the reservoir-well system, accounting for displacement front instability. *Neftyanoe Khozyaystvo*. 2020;6:52–57. (In Russian).
14. **Shakhverdiev A.Kh., Denisov A.V.** Modeling the evolution of geofluid-dynamic hydrocarbon systems under conditions of displacement front instability. *Vestnik RAYEN.* 2020;20№(3):50–55. (In Russian).
15. **Shakhverdiev A.Kh., Denisov A.V.** Locating stagnant and poorly drained zones in an oil reservoir and incorporating them into active development. *Vestnik Azerbaydzhanskoy Inzhenernoy Akademii*. 2020;12;(1):23–30. (In Russian).
16. **Shakhverdiev A.Kh., Denisov A.V., Shakhverdiev E.A.** Unified methodology for evaluating the effectiveness of geological and technical operations. *NTZH Inzhener-neftyanik*. 2019;3:39–46. (In Russian).
17. **Shakhverdiev A.Kh., Denisov A.V., Sobaev A.G., Shakhverdiev E.A.** Optimization of unsteady-state waterflooding of oil reservoirs using a growth model. *Vestnik RAYEN.* 2019;1:21–25. (In Russian).
18. **Shakhverdiev A.Kh., Mandrik I.E.** Optimization of well pattern density and its impact on the oil recovery factor. *Neftyanoe Khozyaistvo*. 2007;12:54–58. (In Russian).
19. **Buckley S.E., Leverett M.S.** Mechanism of Fluid Displacement in Sands. *Pet Trans AIME*. 1942;146;(01):107–116. https://doi.org/10.2118/942107-G.
20. **Rapoport L.A., Leas W.J.** Properties of Linear Waterfloods. *Trans AIME*. 1953;198:139–148.
21. **Shakhverdiev A.K., Denisov A.V., Tumanova V.D.** New optimization criteria of waterflood patterns preventing premature water breakthrough in the context of water-oil displacement front instability. In: 7th Scientific Exploration Conference – Tyumen 2021: Natural Resources Management as a Cross-Functional Process. 7, Natural Resources Management as a Cross-Functional Process. 2021. C. 50063. https://doi.org/10.3997/2214-4609.202150063
22. **Shakhverdiev A.Kh., Shestopalov Yu.V.** Qualitative analysis of quadratic polynomial dynamical systems associated with the modeling and monitoring of oil fields. *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2019;40;(10):1695–1710.
23. **Shestopalov Y., Shakhverdiev A.** Qualitative theory of two-dimensional polynomial dynamical systems. *Symmetry*. 2021;13;(10).
24. **Shestopalov Y.V., Shakhverdiev A.Kh., Arefiev S.V.** Bifurcations associated with three-phase polynomial dynamical systems and complete description of symmetry relations using discriminant criterion. *Symmetry*. 2024;16;(1).
25. **Shestopalov Yu.V., Shakhverdiev A.Kh.** Three-phase dynamical systems and their applications to monitoring for the development of hydrocarbon fields.*Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2023;44;11:5045–5056.

Денисов Алексей Владимирович,
старший преподаватель кафедры «Разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений» Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе

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

УДК 622.276.012+622.276.53
DOI: 10.52531/1682-1696-2026-26-3-41-52
Научная статья

EDN: GWWVKL

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ И МИНЕРАЛИЗАЦИИ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ НА НАПОРНЫЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИДКОСТНО-ГАЗОВЫХ ЭЖЕКТОРОВ

Е.И. Горелкина
Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы (Москва, Россия),
Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе (Москва, Россия)

Для успешного применения технологии водогазового воздействия как альтернативы заводнению, актуальной является разработка технологии получения и закачки в пласт водогазовой смеси, устойчивой к различным внешним факторам. Для этого необходимо подбирать оборудование и режимные параметры эксплуатации технического решения с максимально оптимальными параметрами. В проводимых ранее исследованиях установлено, что наиболее перспективным решением является применение насосно-эжекторных систем. Для лучшей адаптации технологии ВГВ-НЭС (водогазового воздействия насосно-эжекторной системы) реализованы стендовые эксперименты, характеристика струйного аппарата, в результате получены зависимости развиваемого относительного безразмерного напора и КПД жидкостно-газового эжектора от коэффициента инжекции по газу. В разных сериях эксперимента изменялись геометрические параметры (диаметры сопла и камеры смешения, относительная длина камеры смешения), давление на приёме эжектора, рабочее давление. В первых двух сериях эксперименты проводились при перекачивании пресной воды и воды с добавлением NaCl. Анализ полученных данных позволил установить большее влияние увеличения рабочего и приемного давлений по сравнению с увеличением минерализации воды. Данный эффект наблюдался при перекачивании газожидкостных смесей эжекторами с разными геометрическими параметрами проточной части.

Ключевые слова: *заводнение, водогазовое воздействие на пласт, насосно-эжекторная система, жидкостно-газовый эжектор*

Original article

INFLUENCE OF OPERATING PARAMETERS AND WORKING FLUID MINERALIZATION ON THE PRESSURE AND ENERGY CHARACTERISTICS OF LIQUID-GAS EJECTORS

E.I. Gorelkina
Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia (Moscow, Russia),
Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University (Moscow, Russia)

To successfully implement water-gas injection technology as an alternative to waterflooding, it is essential to develop a method for producing and injecting a water-gas mixture that remains stable under various external conditions. This requires selecting equipment and operating parameters that ensure optimal performance. Previous studies have identified pump-ejector systems as the most promising solution. To better adapt this technology, bench-scale experiments were conducted to characterize the jet apparatus; these tests established the relationships between the gas injection ratio and both the generated relative dimensionless head and the efficiency of the liquid-gas ejector. Various experimental series involved varying geometric parameters (nozzle and mixing chamber diameters, relative mixing chamber length) as well as ejector suction and motive pressures. The first two series of experiments involved pumping fresh water and water with added NaCl. Analysis of the data revealed that increasing motive and suction pressures had a greater impact on performance than increasing water salinity. This effect was observed when pumping gas-liquid mixtures using ejectors with varying flow-path geometries.

Key words: *waterflooding, water-gas injection, pump-ejector system, liquid-gas ejector*

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы применение струйных аппаратов при эксплуатации объектов нефти и газа приобрело популярность, что объясняется рядом неоспоримых преимуществ данных устройств. Конструкция струй-

© 2026, Е.И. Горелкина
Поступила в редакцию 10.09.2026

ных аппаратов проста, в них нет движущихся деталей, что обеспечивает высокую степень надежности и износостойкости при работе с жидкостными и газовыми средами.

Утилизация нефтяного газа реализуется посредством откачки низконапорного газа и его закачке при водогазовом воздействии. Для этого на устье нагнетательной скважины устанавливается струйный аппарат, который откачивает газ, смешивает с водой и закачивает в виде водогазовой смеси [1].

Струйные аппараты применяются в составе погружных насосно-эжекторных систем при эксплуатации добывающих скважин для откачивания потоком скважинной среды пассивного потока газожидкостной смеси или затрубного газа [9], в т.ч. из подпакерного пространства [3], для целей одновременно-раздельной эксплуатации объектов [12].

Гидроструйные аппараты позволяют реализовывать добычу высоковязкой нефти. Предложенная в [4] гидроструйная технология имеет более широкую область применения в сравнении с тепловыми методами (например, технологией парагравитационного дренажа SAGD), т.к. закачиваемая в процессе гидроструйной технологии добычи горячая вода теряет теплоту в процессе закачки медленнее, чем пар при закачке в горизонтальную скважину, т.е. [4] может применяться для более глубоко залегающих пластов.

Газовый эжектор устанавливается на линиях подачи газа из газовых скважин таким образом, чтобы активный поток высоконапорного газа проходил через эжектор, который откачивает пассивный газовый поток из скважины меньшего дебита [5, 45].

Струйный насос предложен как альтернативное насосное оборудование для перекачки водонефтяной смеси, которое отличается меньшей стоимостью по сравнению с традиционным многофазным насосом [34].

Жидкостно-газовый эжектор устанавливают перед установкой электроцентробежного насоса при перекачивании газожидкостных смесей для увеличения эффективности процесса подъема жидкости [2].

Помимо этого, эжекторы используются для увеличения добычи из скважин с низким давлением, для оптимизации работы компрессоров за счет устранения мест с меньшим диаметром поперечного сечения, снижения противодавления для увеличения добычи из скважин, освоения скважин, очисток скважин от песка, удаления скопившихся в газовых скважинах жидкостей, а также в отрасли сельского хозяйства и атомной промышленности и т.д. [14, 52].

Нельзя не упомянуть о применении струйных аппаратов в составе насосно-эжекторных систем, с помощью которых реализуется технология водогазового воздействия на пласты (закачка мелкодисперсных водогазовых смесей – ВГВ (англ. SWAG-technology)) [4, 18, 42, 43]. Данная технология набирает популярность, т.к. при ВГВ может закачиваться нефтяной газ, что актуально в условиях всеобщей обеспокоенности выбросами парниковых газов в атмосферу. Развитие ВГВ как метода поддержания пластового давления, увеличения нефтеотдачи и интенсификации нефтедобычи показало существующие проблемы, требующие всестороннего исследования.

Актуальными вопросами, на решение которых обращено внимание многочисленных исследователей, являются разработка рекомендаций, которые позволят улучшить напорные и энергетические характеристики жидкостно-газового эжектора, и совершенствование методик подбора эжектора для наиболее оптимальной его эксплуатации в выбранных промысловых условиях.

Несмотря на простоту и надежность конструкции, к недостаткам струйного аппарата относят низкий КПД, который по наиболее оптимистичным оценкам стремится к значению 35%. Низкий показатель объясняется принципом работы данных устройств, при которых активный и пассивный потоки перемешиваются, при этом велики потери на трение.

Как неоднократно отмечалось в различных трудах [7, 42], в построение и развитие теории применения струйных аппаратов внесли большой вклад ряд таких ученых, как Е.Я. Соколов и Н.М. Зингер [21], R.G. Cunningham [39], а также Ю.Л. Кирилловский и Л.Г. Подвиз [15], Г. Цейнер [30], Л.Д. Берман, Г.И. Ефимочкин [38], И.А. Тимс [23], Б.Ф. Лямаев [17], Ю.А. Сазонов [20], Б.Е. Кореннова [16], Е.К. Спиридонова [22], А.В. Подзерко [19].

Исследования под руководством Р.С. Яремийчука [32], А.Н. Дроздова [13], Ю.А. Цепляева [31], К.Г. Донца [8], Х.Х. Гумерского [6] сыграли большую роль для применения струйных аппаратов в процессах извлечения и добычи нефти в нашей стране.

Эффективность смешения потоков в эжекторе зависит от ряда параметров устройства, свойств потоков и режимных параметров.

Ключевыми безразмерными геометрическими параметрами, которыми принято оценивать рациональность применения эжектора, являются:

- отношение площади камеры смешения $d_{кс}$ к площади рабочего сопла d_c;
- отношение длины Lкс камеры смешения к его диаметру $d_{кс}$.

Размерные параметры:

- заданное расстояние между выходом рабочего сопла и входом в камеру смешения;
- форма поперечного сечения сопла и конфигурация проточной части.

Параметрами потока, которые влияют на КПД эжектора, являются:

- степень сжатия – отношение давления на выходе P_c к давлению инжектируемого потока $P_и$, большое влияние на степень сжатия оказывает соотношение

давления рабочего и инжектируемого потоков;
– коэффициент инжекции U – отношение расхода инжектируемого потока к расходу рабочей жидкости.

Правильный выбор длины камеры смешения может облегчить правильное перемешивание и, следовательно, снизить потери. При давлениях на входе в приемную камеру эжектора $P_{пр}$ от 0,05 до 0,18 МПа следует выбирать удлиненную камеру смешения, а $P_{пр}$ от 0,18 до 0,6 МПа оптимальная длина – средняя [47].

При перекачивании газо-жидкостных смесей по трубопроводам с применением эжекторных устройств эффективность эксплуатации эжектора снижается, если отношение объема жидкости (воды или конденсата) к объему перекачиваемого газа превышает 0,02. В данном случае рекомендуется отделять газ от воды сепаратором [51].

Эффективность эжектора обычно оценивается по степени повышения относительного безразмерного напора (безразмерного давления), который зависит от степени сжатия и коэффициента инжекции, а также по величине КПД эжектора (η). Установлено, что с ростом коэффициента инжекции степень сжатия уменьшается.

Степень сжатия также играет важную роль при проектировании и выборе размеров эжектора. В большинстве случаев оно не превышает 2–2,5. Для повышения степени сжатия используется последовательное расположение нескольких эжекторов. Компания Caltec, специализирующаяся на струйных аппаратах для нефтегазовой отрасли, достигла значения степени сжатия, равного 5,5 в одноступенчатом эжекторе, что является рекордом в нефтегазовой отрасли [41, 51].

Численный и экспериментальный анализ [48] посвящен разработке метода моделирования проточной части эжектора, в котором удастся оптимизировать процессы перемешивания потоков, и анализу возможных условий, при которых выбранная проточная часть позволит максимально эффективно эксплуатировать устройство.

В [46] предложено прогнозировать эффективность откачивания пассивного потока характеристическими кривыми эжекторов (картами производительности). Точность прогноза ограничивается использованием данных об однофазной откачке потоков.

Как отмечено выше, перспективным методом – альтернативой заводнения – является ВГВ с применением насосно-эжекторных систем, по этой причине многочисленные экспериментальные исследования раскрывают особенности работы эжекторов при перекачке водогазовых смесей. В [4] описан процесс получения и перекачки водогазовой смеси насосно-эжекторной системой при изменяющихся расходах нефтяного газа. Экспериментальные данные показали, что значения КПД эжектора η_{max} с увеличением рабочего давления P_p от 0,4 МПа сначала растут, а после P_p = 1,59 МПа снижаются. Проведенные стендовые исследования подтверждают возможность регулирования работы всей системы за счет изменения рабочего давления перед соплом эжектора и расхода рабочей жидкости через сопло (при изменении расхода инжектируемого потока в несколько раз).

Разработанная насосно-эжекторная система, которая позволяет откачивать для ВГВ затрубный газ добывающих скважин [4], успешно эксплуатируется при снижении затрубного давления до 0,4 МПа – критическое значение давления, ниже которого снижать затрубное давление нецелесообразно. При затрубном давлении 0,4 МПа и больше предложенная в [4] насосно-эжекторная система успешно функционирует при реализации волновых режимов (волновой режим подразумевает попеременное подключение затрубных пространств добывающих скважин для отбора затрубного газа при реализации ВГВ). Важно отметить, что специалисты [4] разработали для условий Ромашкинского месторождения систему [4] для условий закачки пресной воды. Соответственно, для условий получения водогазовой смеси с пресной водой справедливы полученные в [4] результаты испытаний жидкостно-газового эжектора.

Помимо перечисленного, экспериментальные исследования позволили установить, что увеличение рабочего давления P_p увеличивает эффективность работы эжектора и коэффициент инжекции только до определенного уровня, после превышения которого эти параметры начинают уменьшаться [40].

Для большей эффективности ВГВ разработан принцип многоступенчатого эжекторного сжатия [4], а также построены напорно-энергетические кривые и обобщенные характеристические кривые эжектора. Расчет показал, что наивысшие КПД достигаются при степени сжатия ε от 1,5 до 3,5, при увеличении ε КПД снижается.

Увеличение вязкостей (и соотношения вязкостей) потоков приводит к снижению КПД эжектора из-за увеличения потерь на трение. Увеличение длины камеры смешения позволяет снизить потери при большом значении вязкости жидкости [44].

При описании влияния свойств перекачиваемых потоков на эффективность работы жидкостно-газового эжектора необходимо уделить внимание исследованиям процессов коалесценции газовых пузырьков. Как известно, минерализация рабочей жидкости оказывает колоссальное влияние на принцип взаимодействия жидкого и газового потоков и на эффективность струйных аппаратов. Эффект улучшения характеристик ученые связывают с улучшающимся энергообменом между потоками, который предположительно зависит от степени подавления коалесценции газовых пузырьков [4].

Эксперименты по влиянию минерализации и химического состава воды на напорные и энергетические

характеристики жидкостно-газового эжектора проводились на стенде, принципиальная схема которого и методика экспериментов описаны в [40]. Исследовались характеристики эжектора с d_c=3,3 мм и $d_{кс}$=4,4 и с d_c=3,6 мм и $d_{кс}$=5,4 мм. В качестве жидкости использовалась пресная вода, в которую при проведении серий экспериментов добавлялись различные соли, в каждой серии повышали концентрации. Эжектор откачивал струю атмосферного воздуха (P = 0,1 МПа). Сопоставление в [40] характеристик жидкостно-газового эжектора на пресной и соленой воде позволили установить улучшение КПД η и максимального относительного напора $\Delta P_c/\Delta P_p$, развиваемого эжектором.

В [13] рассмотрено влияние пенообразующего ПАВ на характеристики эжекторов различной конструкции. Изложенные в [13] позволили установить, что добавление пенообразующего ПАВ дисолвана при исследовании эжекторов с наиболее совершенной конструкцией не влияет на развиваемые характеристики. Эжектор с большим углом диффузора (60°) и менее подходящей конструкцией для перекачивания газожидкостных смесей развил худшие характеристики при добавлении 0,05% ПАВ. Сравнение характеристик, полученных при перекачивании технической воды и воды с ПАВ, показало, что при увеличении коэффициента инжекции до 0,65 добавление ПАВ наиболее интенсивно снижает развиваемый напор. Далее при увеличении U_g степень снижения развиваемого напора на воде с ПАВ уменьшается.

Накопленный исследовательский опыт в области способов применения струйных аппаратов и подбора параметров для их эффективного применения показал, что вопросы влияния режимных параметров и состава перекачиваемых сред недостаточно исследованы.

В частности, нет достоверных данных о сравнительном анализе влияния минерализационного состава воды и режимных параметров эжектора на развиваемый напор и КПД.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для исследования характеристик жидкостно-газовых эжекторов и их адаптации в составе насосно-эжекторных систем при решении задач ВГВ на пласт были проведены экспериментальные исследования, которые стали логичным продолжением [40].

Схема исследуемого эжектора представлена на рис. 1. Исследовались характеристики жидкостно-газового эжектора с диафрагменным соплом, круглым поперечным сечением и цилиндрической камерой смешения.

Лабораторные исследования были проведены на стенде-макете для изучения характеристик работы насосно-эжекторной системы, схема системы и методика описаны в [11]. В качестве силового насоса применялся электроцентробежный насос CR1-25 (Grundfos), оснащенный однофазным электродвигателем, мощностью 1,5 кВт и номинальной подачей $Q_н$ = 1м^3/ч. В качестве исследуемого струйного аппарата применялся жидкостно-газовый эжектор. Угол раскрытия диффузора составлял 6°, а в качестве рабочих жидкости и газа применялись проточная вода и воздух соответственно. Расстояние от среза сопла до входа камеры смешения l подбиралось в соответствии с работой [10], осуществлявшейся с помощью дополнительной шайбы (не указано на схеме). Длина камеры смешения $L_{кс}$ регулировалась с помощью съемных секций.

Лабораторный стенд ввиду замкнутой системы работы позволяет проводить исследования как при атмосферном, так и при избыточных давлениях в приемной камере жидкостно-газового эжектора (ЖГЭ).

Исследовались зависимости развиваемого относительного безразмерного напора и КПД эжектора при изменяющемся коэффициенте инжекции по газу U_g, давление на приеме эжектора $P_{пр}$ – 1 атм и 6 атм. В качестве жидкости использовались пресная вода и вода с добавлением NaCl разной концентрации.

Измерения проводились при комнатной температуре 20°С.

Концентрации соли выбирались таким образом, чтобы формировалась водогазовая смесь с подавленной коалесценцией (диапазон концентраций охватил зону до критических значений, т.е. такую зону, в преде-

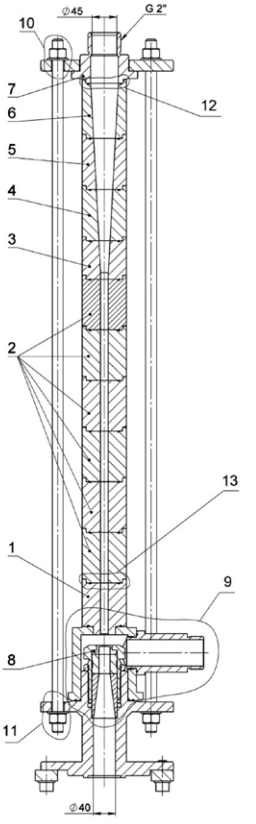


РИС. 1.

Схема исследуемого эжектора. 1 – камера смешения, 2 – блок цилиндрической камеры смешения, 3 – переходная втулка, 4–6 – блоки диффузора, 7 – выходной узел, 8 – сопло диафрагменного типа, 9 – приемная камера, 10–11 – узлы резьбового крепления фланцев, 12–13 – уплотнения блоков с помощью резиновых колец

лах которой увеличение минерализации способствует увеличению степени стабильности водогазовой смеси).

Выбор электролита обусловлен направленностью исследований на практическое применение в процессах реализации водогазового воздействия на пласт. Как известно из многочисленных источников [40], NaCl является компонентом пластовых вод многих месторождений. Содержание ионов данной соли зачастую превышает содержание иных ионов, соответственно, NaCl оказывает влияние на свойства воды и эффекты, которые наблюдаются при закачке водогазовой смеси и фильтрации смеси в пласте.

Первая серия экспериментов проведена для эжектора с диаметром сопла d_c 5,5 мм, камерой смешения $d_{кс}$ 14 мм, относительной длиной камеры смешения $L_{отн}$ = 30 ее диаметров. Первый замер выполнен при перекачивании пресной воды. Далее в воду добавлялась соль, после чего замер повторялся. Результаты замеров режимных параметров заносились в таблицу в каждом цикле.

Вторая серия экспериментов проведена после замены составляющих эжектора на составляющие с d_c3,6 мм, камерой смешения $d_{кс}$ 5,4 мм, *Lотн* – 25.

Расчет производился согласно формулам (1–5).

Относительный перепад давлений (относительный безразмерный напор) $\frac{\Delta P_c}{\Delta P_p}$ находили как:

$$\frac{\Delta P_c}{\Delta P_p} = \frac{P_c - P_{пр}}{P_p - P_{пр}}, \quad (1)$$

где величина ΔP_c – давление, создаваемое эжектором.

$$\Delta P_c = P_c - P_{пр}, \quad (2)$$

где P_c – давление на выходе эжектора; $P_{пр}$ – давление в его приемной камере; ΔP_p – перепад давлений в рабочем сопле

$$\Delta P_p = P_p - P_{пр}, \quad (3)$$

P_p – давление перед рабочим соплом.

Объемный коэффициент инжекции по газу $U_{вх}$ вычисляли как:

$$u_{ВХ} = \frac{Q_{г.пр}}{Q_р}, \quad (4)$$

где $Q_р$ – объемный расход рабочей жидкости (воды) через сопло, $Q_{гпр}$ – объемный расход инжектируемого газа в условиях входа в приемную камеру.

КПД эжектора при откачке газа рассчитывали по формуле:

$$\eta = \frac{u_{ВХ} P_{пр} l П(\frac{P_c}{P_{пр}})}{P_p - P_c} \quad (5)$$

Принципиальным отличием от полученных в [4] результатов является исследование синергетического эффекта изменения состава перекачиваемой жидкости и режимных параметров жидкостно-газового эжектора (в [4] откачивался воздух с атмосферным давлением на приеме). Как видно из [4] и рис. 2 (приведен пример проведенных испытаний для эжектора с d_c=3,6 мм и $d_{кс}$=5,4 мм), существует некоторый диапазон увеличивающейся минерализации, в пределах которого наблюдается увеличение максимального безразмерного напора и КПД для эжекторов с различными геометрическими значениями проточной части.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Первая серия экспериментов. Влияние минерализации рабочей жидкости на напорные и энергетические характеристики жидкостно-газового эжектора с диаметром сопла d_c 5,5 мм, камерой смешения $d_{кс}$ 14 мм, относительной длиной камеры смешения $L_{отн}$ = 30 ее диаметров при рабочем давлении P_p 0,72 МПа и атмосферном давлении $P_{пр}$ на приеме эжектора.

При добавлении порций NaCl в каждом цикле эксперимента и замерах режимных параметров фиксировалось улучшение развиваемых характеристик.

Добавление 7% NaCl позволяет расширить область бескавитационной работы эжектора, коэффициент инжекции по газу $U_г$ увеличивается с 3,78 до 3,88, при этом максимальный КПД эжектора η_{max} возрастает от 34,96 до 38,13%.

Дальнейшее увеличение концентрации в данной серии испытаний не приводит к увеличению характеристик эжектора.

Вторая серия экспериментов. Анализ напорных и энергетических характеристик жидкостно-газового эжектора с диаметром сопла d_c 5,5 мм, камерой смешения $d_{кс}$ 14 мм, относительной длиной камеры смешения $L_{отн}$ = 30 ее диаметров при абсолютном рабочем давлении P_p 1,32 МПа и давлении $P_{пр}$ на приеме эжектора 0,6МПа.

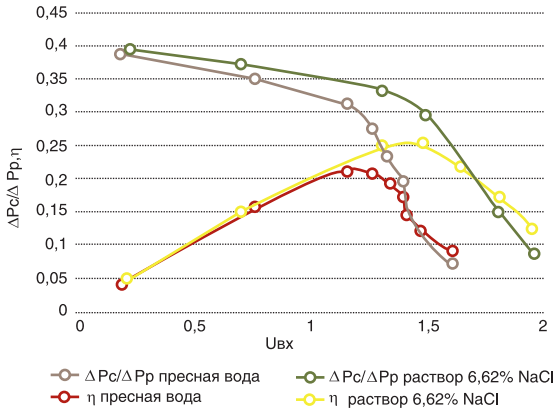


РИС. 2.

Сопоставление напорно-энергетических характеристик второго эжектора с d_c=3,6 мм и $d_{кс}$=5,4 мм при откачке воздуха из атмосферы струей пресной воды (P_p=1,3 МПа, Q_p=1,08 м³/час) и струей соленой воды (P_p=1,35 МПа, Q_p=1,07 м³/час) с массовой концентрацией NaCl, составляющей 6,62% [4]

В последующей серии исследований повышены рабочее и приемное давления до 1,22 и 0,6 МПа соответственно. В сравнении с данными первой серии исследований характеристики изменяются на небольшую величину: коэффициент инжекции, при котором эжектор эксплуатируется в бескавитационном режиме, увеличивается до 3,92 на 0,08 (в пределах погрешности измерений), максимальный КПД η_{max} возрастает 45,6 до 47,5%.

Третья серия экспериментов. Исследование характеристик жидкостно-газового эжектора с диаметром сопла dc 3,6 мм, камерой смешения $d_{кс}$ 5,4 мм, $L_{отн}$ – 25, давлении на приеме $P_{пр}$ – 0,1 МПа и рабочем давлении P_p 1,4 МПа.

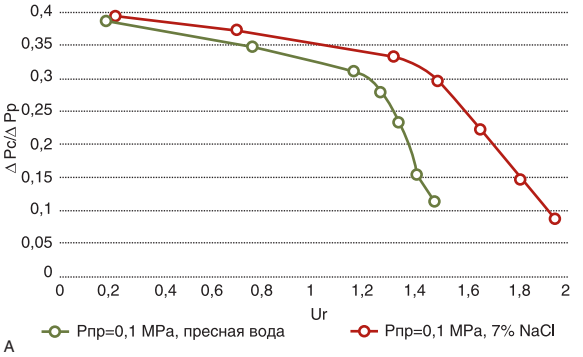
На рис. 3 А представлены зависимости относительного напора жидкостно-газового эжектора при измененных геометрических параметрах проточной части. Здесь коэффициент инжекции Ur увеличился от 1,16 до 1,31 и максимальное значение КПД η_{max}, который может развивать эжектор, возросло от 20,92 до 25,3% (рис. 3Б).

Четвертая серия экспериментов. Зависимости безразмерного напора и КПД жидкостно-газового эжектора с диаметром сопла d_c 3,6 мм, камерой смешения $d_{кс}$ 5,4 мм, $L_{отн}$ – 25, давлении на приеме $P_{пр}$ – 0,6 МПа и рабочем давлении P_p 1,8 МПа.

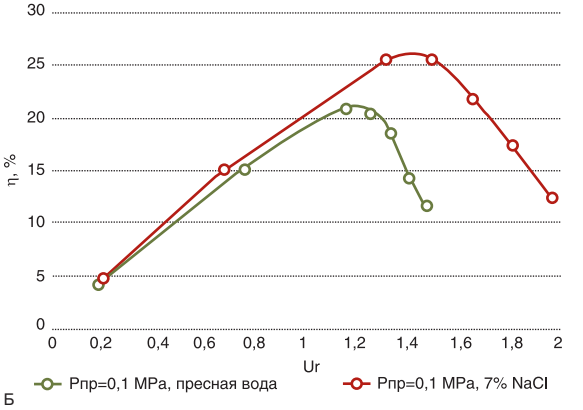
При изменении режимных параметров для эжектора выбранной конфигурации и габаритов $U_г$ увеличился не существенно (с 1,26 до 1,3) (рис. 4А), η_{max} с 38,2 увеличился до 41,27% (рис. 3Б).

ОБСУЖДЕНИЕ

Заводнение, несмотря на накопленный опыт лабораторных и промысловых исследований, сохраняет тревожные тенденции низких КИН, обводнения добываемой продукции, ухудшения коллекторских свойств пород. Теория фильтрации двухфазного потока, созданная Баклий-Левереттом, не позволяет учесть влияние неустойчивости фронта вытеснения и ее негативные последствия, провоцирующие скачкообразное изменение и тройственности водонасыщен-



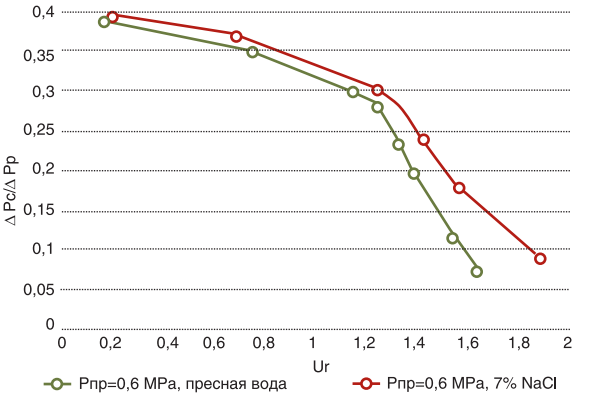
А



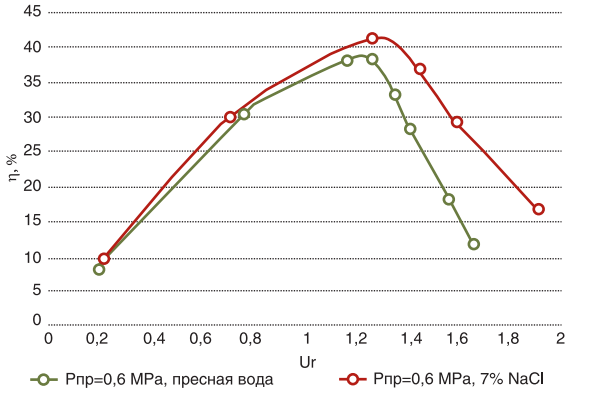
Б

РИС. 3.

А – Напорные характеристики эжектора. Б – Энергетические характеристики эжектора с диаметром сопла d_c 3,6 мм, камеры смешения $d_{кс}$ 5,4 мм, относительной длиной камеры смешения $L_{отн}$ = 25 ее диаметров при откачке воздуха струей пресной воды (1) и соленой воды с концентрацией хлористого натрия 7% (2) при рабочем давлении перед соплом 1,4 МПа и атмосферном давлении в приемной камере



А



Б

РИС. 4.

А – Напорные характеристики эжектора.

Б – Энергетические характеристики эжектора с диаметром сопла d_c 3,6 мм, камеры смешения $d_{кс}$ 5,4 мм, относительной длиной камеры смешения $L_{отн}$ = 25 ее диаметров при откачке воздуха струей пресной воды (1) и соленой воды с концентрацией хлористого натрия 7% (2) при избыточном рабочем давлении перед соплом 1,8 МПа и давлении в приемной камере 0,6 МПа

ности [50]. Данная проблема десятилетиями рассматривается учеными всего мира, заинтересованными в оптимизации процессов углеводорододобычи. Среди наиболее оптимистичных решений выделяются предложения, которые нацелены на количественную и качественную оценку критериев, влияющих на конечный КИН и различные особенности промысла, оптимизацию процесса закачки и отбора для своевременного прогнозирования и предотвращения прорыва фронта вытеснения [24, 26].

С учетом вышеизложенного перед исследователями открывается простор для поиска новых решений, способных охватить многообразие условий и факторов вводимых в разработку объектов и месторождений на поздних стадиях разработки.

Одним из направлений в данной области являются способы добавления в закачиваемую воду веществ, изменяющих ее свойства.

Предложенная в [25, 27, 28, 35–37] технология заключается в закачивании растворов химических реагентов. Пластовые давления и температура инициируют химическую реакцию, продуктом которой является углекислый газ. Образующаяся водогазовая оторочка эффективно вытесняет остаточные запасы. Для увеличения эффективности возможно добавление пенообразующих реагентов [37].

Закачка водогазовых смесей позволяет воздействовать на залежи трудноизвлекаемых запасов углеводородов, в т.ч. залежи высоковязких нефтей [4]. Данный метод увеличения нефтеотдачи пластов позволяет увеличить зону охвата пласта воздействием, что характеризует его как перспективную технологию.

Анализ накопленного промыслового опыта водогазового воздействия, в том числе с применением эжекторных и насосно-эжекторных систем, позволил выявить возможные осложнения, которые могут возникнуть при неверном проектировании процесса воздействия. Одним из примеров является ВГВ на шельфовом месторождении Heera. Согласно пилотному проекту, закачка водогазовой смеси велась в несколько нагнетательных скважин. Для получения водогазовой смеси использовалась насосно-эжекторная система, которая работала следующим образом. Насос для подачи воды закачивал морскую воду в сопло эжектора. Эжектор откачивал попутный нефтяной газ объекта, диспергировал получаемую водогазовую смесь, которая по линии подачи смеси нагнеталась в выбранные скважины. Пластовые температуры и географическое расположение объекта, а также использование морской минерализованной воды обеспечили ингибирование выпадения гидратов. Предполагалось, что в процессе закачки по стволу скважины давление нагнетания увеличится за счет формирования столба водогазовой смеси в стволе. Однако, согласно результатам интерпретации данных проведенного комплекса промыслово-геофизических исследований, водогазовая смесь начала расслаиваться на газ и воду несколькими метрами ниже башмака НКТ. В дальнейшем, согласно опубликованным материалам, потоки воды и газа устремились к добывающим скважинам. Процесс ВГВ был прекращен в связи с его неэффективностью и убыточностью проекта [39, 49].

Водогазовое воздействие, спроектированное на Котовском месторождении, внедрялось посредством откачивания высоконапорного газа из газового пласта. Эжектор смешивал воду и откачиваемый газ для направления мелкодисперсной водогазовой смеси в скважину [29]. После периода эксплуатации, когда давление в газовом пласте упало ниже предельно допустимого значения, ВГВ было прекращено.

Минерализация пластовых вод месторождений Урало-Поволжья превышает минерализацию морских вод. Закачка пластовой воды в качестве газовой фазы смеси положительно отразится на характеристиках насосно-эжекторной системы в процессах ВГВ и эффективности воздействия водогазовой смеси на пластовые флюиды, о чем свидетельствует опыт Ромашкинского месторождения [4].

В опубликованных источниках раскрываются данные о внедрении на иных отечественных и зарубежных объектах, исходя из анализа которых, можно уверенно говорить о недостаточной проработанности проектирования и подготовки оборудования для ВГВ. Соответственно, актуальность результатов данной работы не вызывает сомнений: они позволят расширить надежность и эффективность водогазового воздействия.

Обсуждая полученные зависимости, необходимо отметить наличие положительных приращений характеристик в каждом эксперименте (табл. 1).

При сопоставлении результатов исследований при изменении режимных параметров наблюдается большее изменение характеристик в сторону их увеличения. Энергетическая характеристика, полученная при проведении 2-й серии исследований, на 10% превышает $\Delta\eta max$ при меньших режимных давлениях (серия 1). Это связано с тем, что увеличение давления приводит к уменьшению газосодержания. Газ обладает высокой сжимаемостью, при увеличении давления диаметры газовых пузырьков уменьшаются, и перекачиваемая водогазовая смесь становится более однородной. Данное улучшение также наблюдается при сравнении результатов серий 3 и 4 (здесь $\Delta\eta max$ составляет более 10% и для пресной, и для минерализованной воды).

ВЫВОДЫ

Анализируя полученные данные, основные выводы можно сформулировать в следующих положениях:

1. Увеличение концентрации растворенной соли до 7% улучшает напорную и энергетическую характеристики жидкостно-газового эжектора.
2. Изменение значений относительного напора и

ТАБЛИЦА 1.

Полученные результаты исследований напорных и энергетических характеристик жидкостно-газовых эжекторов на пресной воде и воде с добавлением 7% NaCl

Параметры	d_c – 5,5 мм, $d_{кс}$ – 14 мм, $L_{отн}$ – 30		d_c – 3,6 мм, $d_{кс}$ – 5,4 мм, $L_{отн}$ – 25	
	$P_р$ – 0,72 МПа, $P_{пр}$ – 0,1 МПа	$P_р$ – 1,22 МПа, $P_{пр}$ – 0,6 МПа	$P_р$ – 1,3 МПа, $P_{пр}$ – 0,1 МПа	$P_р$ – 1,8 МПа, $Pп_р$ – 0,6 МПа
ΔU_g при $\Delta\eta_{max}$	0,1	0,08	0,15	0,04
$\Delta\eta_{max}$, %	3,17	1,9	4,38	3,07

КПД эжекторов с различными значениями геометрических параметров с разной степенью зависят от минерализации рабочей жидкости и давления на приеме эжекторов и рабочего давления.

3. Повышение давления в приемной камере оказывает более сильное влияние по сравнению с увеличением минерализации рабочей жидкости.
4. Увеличение концентрации добавляемой соли в пределах каждой серии реализовывалось одинаковыми порциями. При этом значения максимального КПД увеличивались линейно в пределах каждой серии экспериментов (в зависимости от концентрации соли).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты подтверждают целесообразность закачки минерализованной (пластовой) воды в качестве рабочей жидкости в насосно-эжекторных системах: минерализация пластовых вод некоторых месторождений превышает минерализацию морской воды, что положительно отражается на характеристиках системы и эффективности воздействия на пластовые флюиды.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00882 «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Апасов Т.К., Апасов Г.Т., Саранча А.В.** Использование устьевого эжектора для утилизации попутного газа на Южно-Охтеурском месторождении // Фундаментальные исследования. 2016. № 1–1. С. 13–17.
2. **Вербицкий В.С., Горидько К.А., Федоров А.Э., Дроздов А.Н.** Исследование характеристик электроцентробежного насоса с эжектором на входе при откачке газожидкостных смесей // Нефтяное хозяйство. 2016. № 9. С. 106–109.
3. **Вербицкий В.С., Дроздов А.Н., Деньгаев А.В., Маркелов Д.В., Грехов И.В.** Промысловые исследования насосно-эжекторных систем «Тандем» в ОАО «Юганскнефтегаз» // Нефтяное хозяйство. 2005. № 2. С. 96–99.
4. **Горелкина Е.И.** Совершенствование технологий применения насосно-эжекторных систем для эксплуатации нефтяных и газовых месторождений: дисс. ... канд. техн. наук. М.: ИПНГ РАН, 2025.
5. **Грязнова И.В.** Повышение степени извлечения природного газа в период падающей добычи с применением эжекторных технологий, Дисс. на сои-ие уч. ст. к.т.н., М.: РГУНГ. 2011,
6. **Гумерский Х.Х.** Особенности эксплуатации добывающих скважин струйными насосными установками: дисс. ... канд. техн. наук. М.: Государственная академия нефти и газа имени И.М. Губкина. 1996. 131 с.
7. **Демьянова Л.А.** Теоретические и экспериментальные исследования работы струйных аппаратов на газожидкостных. Дисс. на сои-ие уч. ст. к.т.н. М.: Государственная академия нефти и газа им. И.М. Губкина. 1999. 174 с.
8. **Донец К.Г.** Гидроструйные компрессорные установки. М.: Недра. 1990.
9. **Дроздов А.Н., Дроздов Н.А.** Исследование характеристик эжектора для совершенствования технологии откачки газа из затрубного пространства при эксплуатации скважин электроцентробежными насосами // Нефтяное хозяйство. 2020. № 2. С. 54–57. DOI:10.24887/0028-2448-2020-2-54-57
10. **Дроздов А.Н., Закенов С.Т., Карабаев С.Д., Олмасханов Н.П., Дроздов Н.А., Есниязов Д.Г., Косжанов А.А.** Влияние расстояния от рабочего сопла до камеры смешения на характеристику жидкостно-газового эжектора // Нефтяное хозяйство. 2020. №8. С. 92–95. DOI:10.24887/0028-2448-2020-8-92-95
11. **Дроздов А.Н., Карабаев С.Д., Олмасханов Н.П., Есниязов Д.Г., Косжанов А.А. и др.** Исследование характеристик эжекторов для технологий нефтегазового и горного дела // Деловой журнал Neftegaz. RU. 2020. №. 3, 5. С. 35–42.
12. **Дроздов А.Н.** Опыт применения и перспективы развития погружных насосно-эжекторных систем // Территория НЕФТЕГАЗ. 2012. № 2. С. 86–88.
13. **Дроздов А.Н.** Технология и техника добычи нефти погружными насосами в осложнённых условиях.

М. 2008. 312 с.

14. **Дроздов Н.А.** Повышение кавитационного коэффициента инжекции струйного аппарата для реализации экологически чистых технологий // SOCAR Proceedings. 2022. №S2. С. 13–18. DOI: 10.5510/OGP2022SI200733
15. **Кирилловский Ю.Л., Подвидз Л.Г.** Расчет струйных насосов и установок // Труды ВНИИГидромаш. М., 1968. Вып. 38. С. 44–95.
16. **Кореннов Б.Е.** Исследование водовоздушных эжекторов с удлиненной цилиндрической камерой смешения: дисс. ... к.т. н. М.: ВТИ. 1980.
17. **Лямаев Б.Ф.** Гидроструйны насос и установки. Л.: Машиностроение. Ленингр. отделениение, 1988. 256 с.
18. **Пестов В.М., Яновский А.В., Дроздов А.Н.** Совершенствование технологии закачки водогазовых смесей в пласт // Нефтяное хозяйство. 2019. № 4. С. 84–86.
19. **Подзерко А.В.** Исследование и расчет струйного насоса с газожидкостной эжектируемой средой. Дисс. на сои-ие уч. ст. д.т.н. Пермь: Южно-Уральский государственный университет. 2000.
20. **Сазонов Ю.А.** Разработка методологических основ проектирования насосно-эжекторных установок для условий нефтегазовой промышленности: дисс. ... д-ра техн. наук. Москва: РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина. 2010. 394 с.
21. **Соколов Е.Я., Зингер Н.М.** Струйные аппараты. М.: Энергоатомиздат. 1989.
22. **Спиридонов Э.К.** Теоретические основы расчета и проектирования струйных аппаратов для газожидкостных сред: дисс. ... д-ра техн. наук. Челябинск. 1996.
23. **Тиме И.А.** Второе исследование водоструйных приборов // Горный журнал. 1892. Т. 1. № 2. С. 25–31.
24. **Шахвердиев А.Х., Арефьев С.В.** Прогноз прорыва воды при заводнении в условиях неустойчивости фронта вытеснения нефти водой // SOCAR Proceedings. 2023. № 3. С. 58–67. DOI: 10.5510/OGP20230300887
25. **Шахвердиев А.Х., Панахов Г.М., Аббасов Э.М., Мандрик И.Э., Бахтияров С.И.** Интегративная эффективность воздействия на пласт при внутрипластовой генерации газа // Нефтяное хозяйство. 2006. №11. С. 76–78.
26. **Шахвердиев А.Х., Панахов Г.М., Аббасов Э.М., Расулова С.Р.Г.** О возможности регулирования вязкостной аномалии в гетерогенных смесях // Вестник РАЕН. 2014. Т. 14. № 1. С. 28–33.
27. **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.
28. **Шахвердиев А.Х., Панахов Г.М., Аббасов Э.М., Jiang R., Bakhtiyarov S.** Высокоэффективная технология повышения нефтеотдачи и интенсификации добычи нефти на основе внутрипластовой генерации CO_2 // Нефтяное хозяйство. 2014. № 5. С. 90–95.
29. **Шевченко А.К., Чижов С.И., Тарасов А.В.** Предварительные результаты закачки в пласт мелкодисперсной водогазовой смеси на поздней стадии разработки Котовского месторождения // Нефтяное хозяйство. 2011. № 10. С. 100–102.
30. **Цейнер Г.А.** Техническая термодинамика, 1887.
31. **Цепляев Ю.А.** Исследование подъема жидкости из скважин струйными насосами на нефтяных месторождениях Западной Сибири. Дисс. на сои-ие уч. ст. к.т.н. Тюмень: Тюменский индустриальный институт. 1974.
32. **Яремийчук Р.С. и др.** Применение струйных аппаратов при освоении скважин. М.: ВНИИОЭНГ, 1988.
33. **Agrawal G., Verma V., Gupta S., Singh R., Pandey A. et. al.** Novel Approach for Evaluation of Simultaneous Water and Gas Injection Pilot Project in a Western Offshore Field, India // SPE Oil & Gas India Conference and Exhibition. 24–26 November 2015, Mumbai, India. Society of Petroleum Engineers. 2015. SPE-178122-MS. DOI: 10.2118/178122-MS
34. **Asuaje M., Toteff J., Noguera R.** Evaluation of a jet-pump for the improvement of oil-water flow in pipeline loops using CFD tools, E3S Web of Conferences 321, 02012 (2021) https://doi.org/10.1051/e3sconf/202132102012
35. **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.
36. **Bakhtiyarov S.I., Panakhov G.M., Shakhverdiyev A.Kh., Abbasov E.M.** Oil recovery by in-situ gas generation: Volume and pressure measurements // Proceedings of ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting 2006. 2006. 1 SYPMOSIA. FEDSM2006. P. 1487–1492. DOI: 10.1115/FEDSM2006-98359
37. **Bakhtiyarov S.I., Panakhov G.M., Shakhverdiyev A.Kh., Abbasov E.M.** Polymer/surfactant effects on generated volume and pressure of CO_2 in EOR technology // Proceedings of the 5th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Summer Conference, FEDSM 2007, 2007, 1 SYMPOSIA(PART B), P. 1583–1589. DOI: 10.1115/FEDSM2007-37100
38. **Berman L.D., Efimochkin G.I.** Characteristics and calculation of low-pressure water jet ejectors Teploenergetika // Thermal Power Engineering. 1966. V. 6. P. 89–92.
39. **Cunningham R.G., Hansen A.G., Na T.Y.** Jet Pump Cavitation // Journal of Basic Engineering. 1970.

V. 92(3). P. 483. DOI:10.1115/1.3425040

40. **Drozdov A.N., Drozdov N.A., Bunkin N.F., Kozlov V.A.** Study of suppression of gas bubbles coalescence in the liquid for use in technologies of oil production and associated gas utilization // Society of Petroleum Engineers – SPE Russian Petroleum Technology Conference 2017. 2017. DOI: 10.2118/187741-RU
41. **Drozdov A.N., Malyavko E.A., Alekseev Y.L., Shashel O.V.** Stand research and analysis of liquid-gas jet-pump's operation characteristics for oil and gas production // Proceedings – SPE Annual Technical Conference and Exhibition. 2011. V. 3. P. 2122–2130.
42. **Drozdov A.N., Verbitsky V.S., Lambin D.N., Dengaev A.V.** Stand research and analysis of average-integral characteristics of submersible centrifugal pumps operating at gas-liquid mixtures // SPE Production and Operations Symposium, Proceedings. 2011. C. 311–317. DOI:10.2118/146638-MS
43. **Drozdov A.N., Telkov V.P., Egorov Yu.A., Verbitsky V.S., Dengaev A.V., Lambin D.N., Krasilnikov I.A.** Solution of problems of water-gas influence (WGI) on the layer using jet and electrical centrifugal pumping technology // Society of Petroleum Engineers - SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition 2008. 2008. 2. C. 1155–1170. DOI: 10.2118/117380-RU
44. **Elgozali A., Linek V., Fialová M., Wein O., Zahradník J.** Influence of viscosity and surface tension on performance of gas–liquid contactors with ejector type gas distributor // Chemical Engineering Science. 2002. V. 57, Is. 15. P. 2987–2994. DOI: 10.1016/S0009-2509(02)00165-3
45. **Fedorov A., Ibatulin A.** Increasing of Operation Efficiency of Low Pressure Gas Wells by Using of Gas-Jet Device's, SPE Russian Petroleum Technology Conference, Moscow, Russia, October 2018. SPE-191733-18RPTC-MS https://doi.org/10.2118/191733-18RPTC-MS
46. **Haider M., Elbel S.** Development of Ejector Performance Map for Predicting Fixed-geometry Two-phase Ejector Performance for Wide Range of Operating Conditions // International Journal of Refrigeration. 2021. V. 128(1). DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2021.03.022
47. **Karabaev S.D.** Investigations of the Liquid-Jet Gas Pump's Mixing Throat Lengths for Well Operations and Associated Petroleum Gas Utilization // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. V. 666(6). P. 062003. DOI: 10.1088/1755-1315/666/6/062003
48. **McGovern R.K., Bulusu K.V., Antar M., Lienhard J.** One-dimensional Model of an Optimal Ejector and Parametric Study of Ejector Efficiency // Conference: ECOS 2012 – The 25th International Conference On Efficiency, Cost, Optimization, Simulation And Environmental Impact Of Energy Systems June 26–29, 2012, Perugia, ItalyAt: Perugia, Italy.
49. **Rounce J., Lenn C.P., Catala G.** New power in production logging // SPE 53239. 1999.
50. **Shakhverdiev A.K., Shestopalov Y.V., Mandrik I.E., Arefyev S.V.** Optimization of reservoir waterflooding with unstable displacement front // ANAS Transactions, Earth Sciences. 2023. V. 2. P. 64–78. DOI: 10.33677/ggianas20230200103
51. **Sonawat A., Samad A.** Flare gas recovery using ejector- a review // Proceedings of 39th National Conference on Fluid Mechanics & Fluid PowerAt: SVNIT, Surat, Gujrat, Proceedings of the Thirty Ninth National Conference on Fluid Mechanics and Fluid Power, December 13–15, 2012, SVNIT Surat, Gujarat, India, FMFP201282.
52. **Varsegova E., Osipova L., Bugembe D.** A study of flow characteristics in a low-pressure ejector installation // E3S Web of Conferences. 2021. V. 274. P. 08006 https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127408006

REFERENCES

1. **Apasov T.K., Apasov G.T., Sarancha A.V.** Use of a wellhead ejector for associated petroleum gas utilization at the Yuzhno-Okhteurskoye field. *Fundamental'nyye issledovaniya.* 2016; 1-1: 13–17. (In Russian).
2. **Verbitsky V.S., Goridko K.A., Fedorov A.E., Drozdov A.N.** Investigation of the characteristics of an electric submersible pump with an inlet ejector for pumping gas-liquid mixtures. *Neftyanoe Khozyaystvo.* 2016; 9: 106–109. (In Russian).
3. **Verbitsky V.S., Drozdov A.N., Dengayev A.V., Markelov D.V., Grekhov I.V.** Field studies of "Tandem" pump-ejector systems at OJSC Yuganskneftegaz. *Neftyanoe Khozyaystvo.* 2005;2:96–99. (In Russian).
4. **Gorelkina E.I.** Improving technologies for the application of pump-ejector systems in oil and gas field operations: Diss. ... Cand. Sc. (Eng.). Moscow: IPNG RAN, 2025. (In Russian).
5. **Gryaznova I.V.** Increasing the natural gas recovery rate during the declining production period using ejector technologies: Candidate of Technical Sciences dissertation, Moscow: Gubkin Russian State University of Oil and Gas. 2011. (In Russian).
6. **Gumersky Kh.Kh.** Operational features of production wells using jet pump units: Candidate of Technical Sciences dissertation. Moscow: Gubkin State Academy of Oil and Gas. 1996: 131. (In Russian).
7. **Demyanova L.A.** Theoretical and experimental studies of jet device operation with gas-liquid mixtures: Candidate of Technical Sciences dissertation. Moscow: Gubkin State Academy of Oil and Gas. 1999: 174. (In Russian).
8. **Donets K.G.** Hydro-jet compressor units. Moscow: Nedra. 1990. (In Russian).
9. **Drozdov A.N., Drozdov N.A.** Investigation of ejector characteristics to improve the technology of gas

evacuation from the annulus during electric submersible pump (ESP) well operations. *Neftyanoe Khozyaystvo*. 2020; 2: 54–57. DOI:10.24887/0028-2448-2020-2-54-57 (In Russian).

10. **Drozdov A.N., Zakenov S.T., Karabaev S.D., Olmaskhanov N.P., Drozdov N.A. et al.** Effect of the distance from the motive nozzle to the mixing chamber on the performance of a liquid-gas ejector. *Neftyanoe Khozyaystvo*. 2020;8: 92–95. DOI:10.24887/0028-2448-2020-8-92-95 (In Russian).
11. **Drozdov A.N., Karabayev S.D., Olmaskhanov N.P., Yesniyazov D.G., Koszhanov A.A. et al.** Study of ejector characteristics for oil, gas, and mining technologies. *Delovoy zhurnal Neftegaz*. 2020;3(5): 35–42. (In Russian).
12. **Drozdov A.N.** Application experience and development prospects of downhole pump-ejector systems. *Territoriya NEFTEGAZ*. 2012; 2: 86–88. (In Russian).
13. **Drozdov A.N.** Technology and Equipment for Oil Production Using Submersible Pumps in Challenging Conditions. Moscow, 2008:312. (In Russian).
14. **Drozdov N.A.** Increasing the Cavitation Injection Coefficient of a Jet Apparatus for Implementing Environmentally Friendly Technologies. *SOCAR Proceedings*. 2022;S2:13–18. DOI: 10.5510/OGP2022-SI200733 (In Russian).
15. **Kirillovsky Yu.L., Podvidz L.G.** Calculation of Jet Pumps and Units. Proceedings of VNIIGidromas, Moscow, 1968;38: 44–95. (In Russian).
16. **Korennov B.E.** Investigation of water-air ejectors with an elongated cylindrical mixing chamber: Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Moscow: VTI, 1980. (In Russian).
17. **Lyamaev B.F.** Hydro-jet pumps and installations. Leningrad: *Mashinostroenie*, 1988:256. (In Russian).
18. **Pestov V.M., Yanovsky A.V., Drozdov A.N.** Improving the technology for injecting water-gas mixtures into the reservoir. *Neftyanoye khozyaistvo*. 2019; 4: 84–86. (In Russian).
19. **Podzerko A.V.** Investigation and design of a jet pump with a gas-liquid ejected medium: Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. Perm: South Ural State University, 2000. (In Russian).
20. **Sazonov Yu.A.** Development of methodological foundations for the design of pump-ejector units for oil and gas industry applications: Doctoral dissertation (Engineering). Moscow: Gubkin Russian State University of Oil and Gas. 2010:394. (In Russian).
21. **Sokolov E.Ya., Zinger N.M.** Jet apparatuses. Moscow: Energoatomizdat. 1989. (In Russian).
22. **Spiridonov E.K.** Theoretical foundations for the calculation and design of jet apparatuses for gas-liquid media: Doctoral dissertation (Engineering). Chelyabinsk. 1996. (In Russian).
23. **Time I.A.** Second study of water-jet devices. *Gorny Zhurnal*. 1892;1;(2): 25–31. (In Russian).
24. **Shakhverdiev A.Kh., Arefyev S.V.** Prediction of water breakthrough during waterflooding under conditions of oil-water displacement front instability. SOCAR Proceedings. 2023; 3: 58–67. DOI: 10.5510/OGP20230300887 (In Russian).
25. **Shakhverdiev A.Kh., Panakhov G.M., Abbasov E.M., Mandrik I.E., Bakhtiyarov S.I.** Integrative efficiency of reservoir treatment involving in-situ gas generation. *Neftyanoye khozyaistvo*. 2006;11: 76–78. (In Russian).
26. **Shakhverdiev A.Kh., Panakhov G.M., Abbasov E.M., Rasulova S.R.G.** On the possibility of controlling viscosity anomalies in heterogeneous mixtures. *Vestnik RAEN*. 2014;14; (1): 28–33. (In Russian).
27. **Shakhverdiev A.Kh., Panakhov G.M., Abbasov E.M., Huimin Zeng, Yigang Liu, Shunyao Luo.** Innovative technology for recovering residual hydrocarbon reserves via in-situ carbon dioxide generation. *Neftyanoye khozyaistvo*. 2010; 6: 44–47. (In Russian).
28. **Shakhverdiev A.Kh., Panakhov G.M., Abbasov E.M., Jiang R., Bakhtiyarov S.** High-efficiency technology for enhanced oil recovery and production stimulation based on in-situ CO_2 generation. *Neftyanoye khozyaistvo*. 2014; 5: 90–95. (In Russian).
29. **Shevchenko A.K., Chizhov S.I., Tarasov A.V.** Preliminary results of injecting a finely dispersed water-gas mixture into the reservoir at the late stage of the Kotovskoye field development. *Neftyanoye khozyaistvo*. 2011; 10: 100–102. (In Russian).
30. **Zeuner G.A.** Technical Thermodynamics, 1887. (In Russian).
31. **Tseplyaev Yu.A.** Investigation of fluid lifting from wells using jet pumps at Western Siberian oil fields: Candidate of Technical Sciences dissertation. Tyumen: Tyumen Industrial Institute, 1974. (In Russian).
32. **Yaremiychuk R.S. et al.** Application of jet devices in well completion. Moscow: VNIIOENG, 1988. (In Russian).
33. **Agrawal G., Verma V., Gupta S., Singh R., Pandey A. et al.** Novel Approach for Evaluation of Simultaneous Water and Gas Injection Pilot Project in a Western Offshore Field, India. SPE Oil & Gas India Conference and Exhibition. 24–26 November 2015, Mumbai, India. Society of Petroleum Engineers. 2015. SPE-178122-MS. DOI: 10.2118/178122-MS
34. **Asuaje M., Toteff J., Noguera R.** Evaluation of a jet-pump for the improvement of oil-water flow in pipeline loops using CFD tools, E3S Web of Conferences 321, 02012 (2021) https://doi.org/10.1051/e3sconf/202132102012
35. **Bakhtiyarov S., Grigg R., Seright R., Svec R., Sneider R. et al.** Technology on in-situ gas generation to recover residual oil reserves. № DE-FC26-05-NT15478. 2008.
36. **Bakhtiyarov S.I., Panakhov G.M., Shakhverdiyev A.Kh., Abbasov E.M.** Oil recovery by in-situ

gas generation: Volume and pressure measurements. Proceedings of ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting 2006. 1 SYPMOSIA. FEDSM2006: 1487–1492. DOI: 10.1115/FEDSM2006-98359

37. **Bakhtiyarov S.I., Panakhov G.M., Shakhverdlyev A.Kh., Abbasov E.M.** Polymer/surfactant effects on generated volume and pressure of CO 2 in EOR technology. Proceedings of the 5th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Summer Conference, FEDSM 2007: 1583–1589. 1 SYMPOSIA(PART B). DOI: 10.1115/FEDSM2007-37100
38. **Berman L.D., Efimochkin G.I.** Characteristics and calculation of low-pressure water jet ejectors Teploenergetika. *Thermal Power Engineering*. 1966:6: 89–92.
39. **Cunningham R.G., Hansen A.G., Na T.Y.** Jet Pump Cavitation. Journal of Basic Engineering. 1970;92(3): 483. DOI:10.1115/1.3425040
40. **Drozdov A.N., Drozdov N.A., Bunkin N.F., Kozlov V.A.** Study of suppression of gas bubbles coalescence in the liquid for use in technologies of oil production and associated gas utilization. Society of Petroleum Engineers – SPE Russian Petroleum Technology Conference 2017. 2017. DOI: 10.2118/187741-RU
41. **Drozdov A.N., Malyavko E.A., Alekseev Y.L., Shashel O.V.** Stand research and analysis of liquid-gas jet-pump's operation characteristics for oil and gas production. Proceedings – SPE Annual Technical Conference and Exhibition. 2011;3: 2122–2130.
42. **Drozdov A.N., Verbitsky V.S., Lambin D.N., Dengaev A.V.** Stand research and analysis of average-integral characteristics of submersible centrifugal pumps operating at gas-liquid mixtures. SPE Production and Operations Symposium, Proceedings. 2011;311–317. DOI:10.2118/146638-MS
43. **Drozdov A.N., Telkov V.P., Egorov Yu.A., Verbitsky V.S., Dengaev A.V. et al.** Solution of problems of water-gas influence (WGI) on the layer using jet and electrical centrifugal pumping technology. Society of Petroleum Engineers – SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition 2008;2:1155–1170. DOI: 10.2118/117380-RU
44. **Elgozali A., Linek V., Fialová M., Wein O., Zahradník J.** Influence of viscosity and surface tension on performance of gas–liquid contactors with ejector type gas distributor. Chemical Engineering Science. 2002;57(15): 2987–2994. DOI: 10.1016/S0009-2509(02)00165-3
45. **Fedorov A., Ibatulin A.** Increasing of Operation Efficiency of Low Pressure Gas Wells by Using of Gas-Jet Device's, SPE Russian Petroleum Technology Conference, Moscow, Russia, October 2018. SPE-191733-18RPTC-MS https://doi.org/10.2118/191733-18RPTC-MS
46. **Haider M., Elbel S.** Development of Ejector Performance Map for Predicting Fixed-geometry Two-phase Ejector Performance for Wide Range of Operating Conditions. *International Journal of Refrigeration*. 2021;128(1). DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2021.03.022
47. **Karabaev S.D.** Investigations of the Liquid-Jet Gas Pump's Mixing Throat Lengths for Well Operations and Associated Petroleum Gas Utilization. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021;666(6): 062003. DOI: 10.1088/1755-1315/666/6/062003
48. **McGovern R.K., Bulusu K.V., Antar M., Lienhard J.** One-dimensional Model of an Optimal Ejector and Parametric Study of Ejector Efficiency. Conference: ECOS 2012 – The 25th International Conference On Efficiency, Cost, Optimization, Simulation And Environmental Impact Of Energy Systems June 26–29, 2012, Perugia, ItalyAt: Perugia, Italy.
49. **Rounce J., Lenn C.P., Catala G.** New power in production logging. SPE 53239. 1999.
50. **Shakhverdiev A.K., Shestopalov Y.V., Mandrik I.E., Arefyev S.V.** Optimization of reservoir waterflooding with unstable displacement front. ANAS Transactions, Earth Sciences. 2023;2: 64–78. DOI: 10.33677/ggianas20230200103
51. **Sonawat A., Samad A.** Flare gas recovery using ejector- a review. Proceedings of 39th National Conference on Fluid Mechanics & Fluid PowerAt: SVNIT, Surat, Gujrat, Proceedings of the Thirty Ninth National Conference on Fluid Mechanics and Fluid Power, December 13–15, 2012, SVNIT Surat, Gujarat, India, FMFP201282.
52. **Varsegova E., Osipova L., Bugembe D.** A study of flow characteristics in a low-pressure ejector installation. E3S Web of Conferences. 2021;274: 08006 https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127408006

Горелкина Евгения Ильинична,
к.т.н., старший преподаватель Российского университета дружбы народов им. П. Лумумбы, Российского государственного геологоразведочного университета им. С. Орджоникидзе

117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6,
117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23,
117198, Moscow, Miklukho-Maklaya St., 6,
117997, Moscow, Miklukho-Maklaya St., 23,
e-mail: Gorelckina.Evgenia@yandex.ru

УДК 620.193:541.13:543.25
DOI: 10.52531/1682-1696-2026-26-3-53-57
Научная статья

EDN: MJEVMC

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНГИБИТОРОВ КОРРОЗИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНАЛИЗА КРИВЫХ ТАФЕЛЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЯХ ИНГИБИТОРА

Х.В. Верес
РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина(Москва, Россия);
Университет Дыре Дава Технологический институт (Дыре Дава, Эфиопия)

В данной статье анализируется электрохимическое коррозионное поведение трех образцов металла: нержавеющей стали, углеродистой стали и сварных соединений на углеродистой стали в кислой среде. Для анализа использовался потенциостат PARSTAT 4000+ с программным обеспечением VERSA STUDIO. Были исследованы два ингибитора: ингибитор А (Anticor-A), на основе нитрита натрия и ингибитор Б (Rutrol AC1201), на основе коллоидного углерода, в различных концентрациях, смешанных с различными концентрациями электролита (0.03, 0.1 и 0.15) г/мл лимонной кислоты (C6H8O7); этот раствор демонстрирует кислую среду. Результаты показали, что скорость коррозии в значительной степени зависит от типа ингибитора, его концентрации и агрессивности электролита. В целом, исследование подчеркивает важную роль оптимизированного выбора ингибитора для эффективной защиты от коррозии в кислых условиях.

Ключевые слова: *ингибирование коррозии; поляризация Тафеля; электрохимическая оценка; электролит уксусной кислоты; электрохимическая реакция; скорость коррозии; кривая Тафеля; концентрация*

Original article

ELECTROCHEMICAL EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF CORROSION INHIBITORS USING TAFEL METHOD ANALYSIS AT VARIOUS INHIBITOR CONCENTRATIONS

H.W. Weres
Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (Moscow, Russia);
Dire Dawa University, Institute of Technology (Dire Dawa, Ethiopia)

This article analyzes the electrochemical corrosion behavior of three metal samples; stainless steel, carbon steel, and welded joints on carbon steel in acidic environment. PARASTAT 4000+ potentiostat with Versa Studio software was used for analysis. Two inhibitors, Inhibitor A, based on sodium nitrite, and Inhibitor B, based on colloidal carbon., were evaluated with different concentrations (10 ml, 20 ml, 30 ml, and 40 ml) mixed with different electrolyte concentrations (3, 10 and 15% (wt./vol)) of citric acid ($C_6H_8O_7$); this solution demonstrates acidic environment. Results showed that the corrosion rate is highly dependent on the type of inhibitor, its concentration, and the aggressiveness of the electrolyte. Overall, the study highlights the important role of optimized inhibitor selection for effective corrosion protection in acidic conditions.

Key words: *Corrosion inhibition, Tafel polarization, Electrochemical evaluation, Acidic electrolyte, Electrochemical reaction, Corrosion rate, Taffel curve, Concentration*

ВВЕДЕНИЕ

Деградация металлических материалов в агрессивных средах представляет собой серьезную проблему для различных отраслей промышленности, что обусловливает постоянный интерес к ингибиторам коррозии как к практическому средству борьбы с этим явлением [6]. Защита материалов от коррозии может быть достигнута различными способами. Среди них использование эффективных ингибиторов является одним из наиболее экономически выгодных [6, 10]. Ингибиторы коррозии – химические соединения, которые вводятся в малых концентрациях и замедляют скорость электрохимических реакций, вызывающих коррозию, за счет взаимодействия с поверхностью

© 2026, Х.В. Верес
Поступила в редакцию 08.09.2026

металла или с коррозионно-активной средой [7]. Ингибиторы действуют активно, адсорбируясь на поверхности металла и образуя барьер, который влияет на электрохимические реакции, ответственные за коррозию [3, 4]. Эффективность ингибиторов коррозии обычно оценивается с помощью электрохимических методов; среди них центральное место занимает метод потенциодинамической поляризации, широко известный как метод Тафеля [4, 8].

В данной работе исследуются два образца промышленных ингибиторов коррозии: ингибитор А и ингибитор Б, которые подавляют коррозию нержавеющей стали, углеродистой стали и сварных соединений на углеродистой стали в кислых (лимонная кислота) растворах с соответствующими концентрациями (3, 10 и 15% масс. /об.). Органические кислоты широко используются в качестве модели в исследованиях благодаря их умеренной агрессивности и применимости в промышленных условиях, таких как нефтехимическая переработка и кислотная очистка. Ингибиторы применялись в различных дозировках 10, 20, 30 и 40 мл на 100 мл кислого электролитного раствора для определения оптимальной стабильности ингибитора, обеспечивающей надежную коррозионную стойкость. Основная цель данного исследования – электрохимическая оценка эффективности ингибирования коррозии ингибитором А и ингибитором Б с использованием анализа по методу Тафеля при различном количестве ингибитора в кислой среде для трех образцов металлов [1, 9]. Ожидается, что результаты позволят лучше понять влияние типа металла, дозировки ингибитора и концентрации кислоты на коррозионные свойства, что поможет определить наиболее эффективные условия для минимизации скорости коррозии и повышения долговечности материалов в кислых средах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Подготовка образцов

Для испытаний были подготовлены металлические образцы из нержавеющей стали (12Kh18N10T), углеродистой стали (C: 0,14–0,22%, Mn: 0,40–0,65%) и сварного соединения на углеродистой стали (09Г2С), каждый с открытой поверхностью площадью 1 см^2. Открытые поверхности были механически отполированы наждачной бумагой различной зернистости до гладкости, затем промыты дистиллированной водой и высушены на воздухе для обеспечения чистоты и однородности поверхности перед погружением в электролит.

Приготовление электролитов и методика электрохимических измерений

Электролиты готовили растворением лимонной кислоты в дистиллированной воде до концентраций 0,03; 0,10 и 0,15 г/мл (3, 10 и 15 мас. %) без добавления солей. Использовали два ингибитора: Anticor-A (сеpия, SC ZECASIN-Brazi, Румыния) – ингибитор А, и RUTROL AC 1201 (на основе коллоидного углерода) – ингибитор Б. К 100 мл электролита добавляли 10; 20; 30 и 40 мл ингибитора, что соответствует 9,1; 16,7; 23,1 и 28,6 об. % системы «кислота + ингибитор». Растворы готовили непосредственно перед тестированием и выдерживали при 25°C. Измерения проводили на потенциостате PARSTAT 4000+ (ПО VERSA STUDIO) в трехэлектродной ячейке: рабочий образец, графитовый вспомогательный электрод и электрод сравнения. Поляризационные кривые снимали от –250 до +250 мВ относительно потенциала разомкнутой цепи со скоростью 1 мВ×с$^{-1}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Лимонная кислота была выбрана в качестве модельной слабой органической кислоты, поскольку она широко применяется в процессах кислотной очистки оборудования в пищевой, фармацевтической и нефтегазовой отраслях, а также входит в состав средств для удаления накипи и продуктов коррозии. Полученные закономерности могут быть экстраполированы на другие слабые органические кислоты (уксусную, щавелевую, муравьиную) с учетом их констант диссоциации.

Нержавеющая сталь

Результаты электрохимического анализа (рис. 1) показывают, что электрохимическая коррозия нержавеющей стали в значительной степени зависит от концентрации кислотного электролита, типа ингибитора и его дозировки. При 0,03 г/мл концентрации нержавеющая сталь демонстрировала низкую скорость коррозии при использовании обоих ингибиторов, что указывает на присущую сплаву коррозионную стойкость в слабокислых средах. По результатам ингибитор Б продемонстрировал несколько лучшую стабилизацию при более низких концентрациях ингибитора, в то время как ингибитор А потребовал более высоких дозировок для достижения сопоставимой защиты.

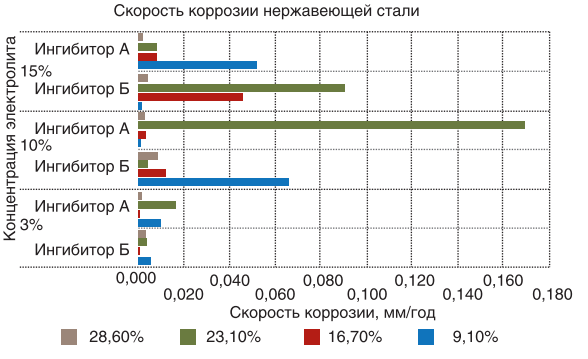


РИС. 1.
Электрохимическая коррозионная стойкость нержавеющей стали в электролите на основе органических кислот в присутствии ингибиторов

Как видно из рисунка 1, при увеличении концентрации электролита с 0,03 до 0,10 г/мл скорость коррозии значительно возрастала, особенно в присутствии ингибитора А, где наблюдалось заметное увеличение при дозировке ингибитора 23,1%. Это указывает на нестабильность защитной пленки ингибитора в более агрессивных кислых условиях. В отличие от этого, ингибитор Б поддерживал относительно более низкие скорости коррозии при оптимизированных концентрациях, что свидетельствует о лучшей адсорбции и более эффективном покрытии поверхности. При 0,15 г/мл концентрации электролита коррозионная среда стала очень агрессивной, что привело к дальнейшему увеличению скорости коррозии нержавеющей стали. Ингибитор Б продемонстрировал более стабильные ингибирующие свойства при различных концентрациях кислоты, в то время как ингибитор А показал большую чувствительность как к агрессивности электролита, так и к его концентрации. Эти результаты подтверждают, что даже коррозионностойкие материалы, такие как нержавеющая сталь, требуют тщательно оптимизированных систем ингибиторов в сильнокислых средах.

Углеродистая сталь

Электрохимические коррозионные испытания углеродистой стали (рис. 2) показывают значительно более высокую коррозионную активность, чем у нержавеющей стали, при всех концентрациях органических веществ. При 0.03 г/мл концентрации кислоты скорость коррозии была относительно умеренной, но отмечены явные различия между двумя ингибиторами. Ингибитор Б обеспечивал частичную защиту от коррозии при более низких концентрациях, в то время как ингибитор А демонстрировал колебания эффективности, что указывает на неравномерное образование пленки ингибитора на поверхности углеродистой стали.

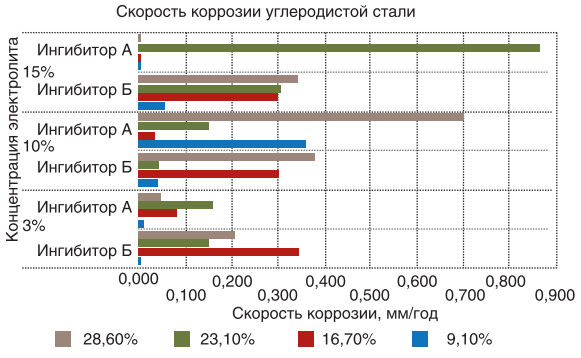


РИС. 2.

Электрохимический анализ коррозии углеродистой стали в органических кислотных электролитах в присутствии ингибиторов

Увеличение скорости коррозии при определенных дозировках ингибитора предполагает, что в слабокислых условиях может наблюдаться недостаточное покрытие поверхности или конкурентная адсорбция между ингибиторами и агрессивными ионами. Результаты, представленные на графике выше, показали, что скорость коррозии резко возрастала с увеличением концентрации кислотного электролита до 10 и 15 мас. %, что подтверждает агрессивность электролита по отношению к углеродистой стали. В сильнокислой среде ингибитор А продемонстрировал некоторое улучшение при более высоких концентрациях, особенно при 28,6 об. %, что указывает на усиление адсорбции ингибитора и улучшение барьерных свойств. В отличие от этого, ингибитор Б продемонстрировал переменную эффективность, с увеличением скорости коррозии при промежуточных дозировках, что указывает на возможную десорбцию ингибитора или нестабильность защитной пленки. В целом, результаты подчеркивают, что для эффективного снижения коррозии в сильнокислых средах углеродистой стали требуются более высокие концентрации ингибитора и тщательный выбор химического состава ингибитора.

Сварное соединение на углеродистой стали

Результаты электрохимического анализа коррозии сварного соединения на углеродистой стали указывают на значительно более высокую скорость коррозии по сравнению с основной углеродистой сталью, что подчеркивает критическое влияние микроструктурной неоднородности, вызванной сваркой. При концентрации кислоты 3 мас. % сварное соединение уже продемонстрировало выраженную коррозионную активность, особенно при низких дозах ингибитора (9,1 об. %), при этом для обоих ингибиторов была продемонстрирована ограниченная защитная способность. Такое поведение можно объяснить гальваническим взаимодействием между металлом сварного шва и основным металлом, которое способствует локальной коррозии и снижает эффективность ингибитора при недостаточных концентрациях.

Как видно из рисунка 3, увеличение концентрации кислоты до 10 и 15 мас. %, резко повышает скорость коррозии, особенно в присутствии ингибитора А при более высоких дозах, где наблюдались чрезвычайно высокие скорости коррозии. В отличие от него, ингибитор Б продемонстрировал относительно лучшую эффективность ингибирования при оптимизированных концентрациях. В аналогичных условиях ингибитор Б поддерживает более низкие скорости коррозии, чем ингибитор А. Эти результаты указывают на то, что сложная химия поверхности и остаточные напряжения в сварных соединениях препятствуют равномерной адсорбции ингибитора, что требует более высоких концентраций и более стабильных составов ингибитора. В целом, результаты показывают, что сварные соединения являются наиболее уязвимыми участками

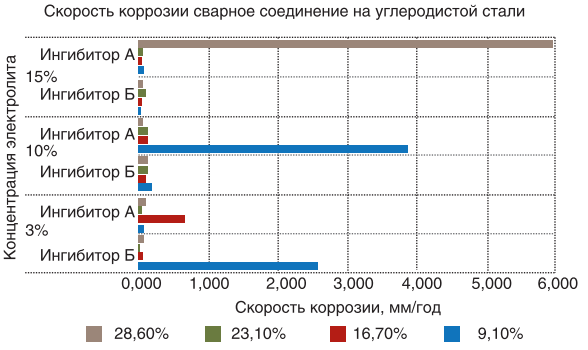


РИС. 3.

Химический анализ сварное соединение на углеродистая сталь в электролитах на основе органических кислот в присутствии ингибиторов коррозии

в кислых средах и требуют специализированных стратегий защиты от коррозии, отличных от тех, которые используются для неблагородных металлов.

Впервые с использованием метода тафелевских кривых было проведено систематическое сравнительное исследование эффективности двух ингибиторов (А и В) в средах лимонной кислоты трех концентраций (3, 10 и 15 мас. %). Результаты нашего эксперимента применимы для углеродистых и нержавеющих сталей в средах лимонной кислоты с концентрацией 3–15 мас. % при температурах 20–25°C. Они могут найти применение в нефтегазовой отрасли (защита трубопроводов при кислотной обработке скважин), пищевой и энергетической промышленности (химическая очистка котлов), а также в металлообработке (травление поверхностей). Ожидается, что установленный для лимонной кислоты механизм адсорбции ингибитора будет характерен и для других слабых органических кислот, однако для сильных минеральных кислот (HCl, H_2SO_4) требуется дополнительная проверка.

ВЫВОДЫ

Электрохимический анализ коррозии нержавеющей стали, углеродистой стали и сварных соединений на углеродистой стали в среде органических кислот демонстрирует четкую зависимость коррозионного поведения от типа материала, концентрации кислоты и состава ингибитора. По результатам электрохимического анализа, нержавеющая сталь продемонстрировала самую высокую коррозионную стойкость при всех условиях испытаний, что подтверждает ее превосходное пассивное поведение даже в агрессивных кислых средах. Углеродистая сталь показала умеренную и высокую скорость коррозии, которая значительно возрастала с увеличением концентрации кислоты, в то время как сварные соединения неизменно демонстрировали самую высокую коррозионную активность. Выраженная коррозионная активность в сварных соединениях подчеркивает пагубное влияние микроструктурной неоднородности и гальванического взаимодействия между металлическим швом и прилегающими зонами.

Из двух ингибиторов, изученных в данной статье, ингибитор Б продемонстрировал в целом более высокое и стабильное ингибирование на всех трех образцах металлов, особенно при более высокой дозировке ингибитора (23,1 и 28,6 об. %) и в более агрессивных электролитах (10–15 мас. %). В то время как ингибитор А продемонстрировал эффективное снижение коррозии только в ограниченных условиях, и показал нестабильное поведение, особенно на углеродистой стали и сварных соединениях при более высоких концентрациях кислоты. Таким образом, ингибитор Б при оптимизированных более высоких дозировках можно считать более эффективным ингибитором для защиты как основных металлов, так и сварных соединений в кислых средах.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бережная А.Г., Чернявина В.В., Павлицкий И.Н.** Серосодержащие органические вещества и их смеси с моноэтаноламидом таллового масла как ингибиторы сернокислотной коррозии стали-3 // Коррозия: защита материалов и методы исследований. 2025. №3. С. 52–64.
2. **Гайдар С.М., Низамов Р.К., Голубев М.И., Голубев И.Г.** Защитная эффективность водорастворимых ингибиторов коррозии // Инженерные технологии и системы. 2018. №28(3). С. 429–444.
3. **Гройсман А.** Проблемы коррозии и их решения в нефтяной, газовой, нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности // Журнал «КОМ» – Коррозия и защита материалов. 2017. №61(3). С. 100–117.
4. **Нарзуллаев А.Х., Бекназаров Х.С., Джалилов А.Т.** Изучение эффективности ингибитора коррозии ИКЦФ-1 в 1М HCl // Universum: химия и биология. 2019. №2 (56). С. 34–39.
5. **Нуриллоев З., Бекназаров Х., Номозов А.** Получение ингибиторов коррозии на основе кротонового альдегида и их ингибирующие свойства // Международный журнал инженерных тенденций и технологий. 2021. № 70. С. 423–434. https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V70I8P243.
6. **Савенок О.В., Горпинченко А.Н., Порывкин П.П.** Анализ коррозионно-механических разрушений конструкционных материалов нефтегазопромыслового оборудования // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). 2022. № 3. 133 с.
7. **Успенский И.А., Фадеев И.В., Пестряева Л.Ш., Садетдинов Ш.В., Казарин А.С.** Новые ингибиторы коррозии для за-

щиты сельскохозяйственной техники // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2020. №3 (59). С. 365–376.

8. **Ушаков И.А., Никонова В.С., Полынский И.В., Князева Л.Г., Полынская М.М., Анциферов Е.А.** Исследование эффективности ингибиторов коррозии на основе производных изотиурониевых солей // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2021. №11(2, 37). С. 326–332.
9. **Чен С., Шен Т., Вэй Дж., Ян Дж., Цао В., Ли В.** Автономное самовосстанавливающееся антикоррозионное покрытие, созданное благодаря синергии гидрофобного глубокоэвтектического растворителя и эластичной смолы // Передовые функциональные материалы. 2026. №36(4), e12310.
10. **Шерязов С.К., Саркулова З.С., Балгинова А.М., Шукирова С.С.** Методы защиты от коррозии оборудования и трубопроводов в нефтегазовой отрасли // Вестник Актюбинского регионального университета имени К. Жубанова. 2024. № 76(2). С. 35–42.

REFERENCES

1. **Berezhnaya A.G., Chernyavina V.V., Pavlitsky I.N.** Sulfur-containing organic substances and their mixtures with tall oil monoethanolamide as inhibitors of sulfuric acid corrosion of steel-3. *Korroziya: zashchita materialov i metody issledovaniy*. 2025;3:52–64.
2. **Gaidar S.M., Nizamov R.K., Golubev M.I., Golubev I.G.** Protective effectiveness of water-soluble corrosion inhibitors. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy*. 2018;28;(3):429–444.
3. **Groysman A.** Problems of corrosion and their solutions in the oil, gas, oil refining and petrochemical industries. *Zhurnal «KOM» – Korroziya i zashchita materialov*. 2017;61;(3):100–117.
4. **Narzullaev A.Kh., Beknazarov Kh.S., Dzhalilov A.T.** Study of the effectiveness of the corrosion inhibitor IKCF-1 in 1 M HCl. *Universum: khimiya i biologiya*. 2019;2;(56):34–39.
5. **Nurilloev Z., Beknazarov Kh., Nomozov A.** Preparation of corrosion inhibitors based on crotonaldehyde and their inhibitory properties. *Mezhdunarodnyy zhurnal inzhenernykh tendentsiy i tekhnologiy*. 2021;70: 423–434. https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V70I8P243.
6. **Savenok O.V., Gorpinchenko A.N., Poryvkin P.P.** Analysis of corrosion-mechanical destruction of structural materials of oil and gas field equipment. *Nauka. Tekhnika. Tekhnologii (politekhnicheskiy vestnik)*. 2022;3:133.
7. **Uspensky I.A., Fadeev I.V., Pestryaeva L.Sh., Sadetdinov Sh.V., Kazarin A.S.** New corrosion inhibitors for the protection of agricultural machinery. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vyssheye professional'noye obrazovaniye*. 2020;3;(59):365–376.
8. **Ushakov I.A., Nikonova V.S., Polynsky I.V., Knyazeva L.G., Polynskaya M.M., Antsiferov E.A.** Study of the effectiveness of corrosion inhibitors based on derivatives of isothiuronium salts. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya*. 2021;11;(2, 37):326–332.
9. **Chen S., Shen T., Wei J., Yang J., Cao W., Li W.** Autonomous self-healing anti-corrosion coating created by the synergy of hydrophobic deep eutectic solvent and elastic resin. *Peredovyye funktsional'nyye materialy*. 2026;36;(4):12310.
10. **Sheryazov S.K., Sarkulova Z.S., Balginova A.M., Shukirova S.S.** Methods of corrosion protection of equipment and pipelines in the oil and gas industry. *Vestnik Aktyubinskogo regional'nogo universiteta imeni K. Zhubanova*. 2024;76;(2):35–42.

Хафту Велдеслассие Верес,
аспирант Российского государственного университета нефти и газа; Университета Дыре Дава Технологический институт (Дыре Дава, Эфиопия)

119991, г. Москва, пр-т Ленинский, д. 65, корп. 1,
119991, Moscow, Leninsky Ave., 65, bldg. 1,
тел.: +7 (991) 698-71-16, e-mail: haftoma54@gmail.com

УДК 622.276.5
DOI: 10.52531/1682-1696-2026-26-3-58-67
Научная статья
EDN: PIZMDI

КОМПЛЕКС ТЕХНОЛОГИЙ КОНТРОЛЯ ПЕСКОПРОЯВЛЕНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ НЕСЦЕМЕНТИРОВАННЫХ КОЛЛЕКТОРОВ НЕФТЯНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ БОХАЙ

Ван Ц.[1], Е.С. Юшин[1], Ян Ю.[1], Чу Ц.[2,3], И. Ефенди[4]
[1] Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы (Москва, Россия)
[2] Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе (Москва, Россия)
[3] Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия)
[4] Китайский нефтяной университет (Пекин, КНР)

Основные продуктивные горизонты Бохайского нефтяного месторождения представлены рыхлыми песчаными коллекторами с низкой степенью цементации. В процессе разработки и эксплуатации таких залежей повсеместно возникает проблема выноса песка, что ограничивает эффективность и экономичность добычи. В результате длительных исследований на месторождении Бохай произошел переход от применения традиционных гравийных фильтров к технологиям контролируемого выноса песка и далее к адаптивным системам пескоконтроля. Сформирован комплекс технологий, ставших ключевыми инструментами стабилизации и увеличения добычи. В работе рассмотрены технологии гравийной набивки, контролируемого выноса песка, адаптивного пескоконтроля, а также гидроразрыва пласта с гравийной набивкой в глубоких наклонно-направленных скважинах. Показано, что технология гравийной набивки прошла эволюцию от однослойной циркуляционной закачки до многослойной гравийной набивки.
Технология контролируемого выноса песка позволила повысить эффективность разработки и коэффициент извлечения нефти за счет оптимизации работы призабойной зоны.
Ключевые слова: *Бохайское нефтяное месторождение; тяжелая нефть; рыхлые песчаные коллекторы; вынос песка; гравийная набивка; контролируемый вынос песка; адаптивный пескоконтроль*

Original article

TECHNOLOGIES FOR SAND CONTROL IN THE DEVELOPMENT OF UNCONSOLIDATED RESERVOIRS AT THE BOHAI OFFSHORE OIL FIELD

Wang J.[1], E.S. Yushin[1], Yang Y.[1], Chu J.[2, 3], I. Efendi[4]
[1] Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (Moscow, Russia)
[2] Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (Moscow, Russia)
[3] Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)
[4] China University of Petroleum (Beijing, China)

The main productive reservoirs of the Bohai oil field are unconsolidated sandstone reservoirs with low degrees of cementation. During the development and production of such reservoirs, sand production is a widespread problem, which limits production efficiency and economic performance.
Through long-term research in the Bohai oil field, a technological evolution has been achieved from conventional gravel packing to controlled sand production and further to adaptive sand control systems. A comprehensive set of technologies has been established, becoming one of the key methods for production stabilization and enhancement.
This paper reviews gravel packing technology, controlled sand production technology, adaptive sand control technology, and hydraulic fracturing with gravel packing in highly deviated wells. It is shown that gravel packing technology has evolved from single-stage circulating gravel placement to multistage gravel packing.
Key words: *Bohai oil field; heavy oil; unconsolidated sandstone reservoirs; sand production; gravel packing; controlled sand production; adaptive sand control; hydraulic fracturing with gravel packing; highly deviated wells*

© 2026, Ван Цзюньсян, Е.С. Юшин, Ян Юймин, Чу Цзюнь, И. Ефенди
Поступила в редакцию 29.07.2026

ВВЕДЕНИЕ

Рыхлые песчаные коллекторы составляют около 80% разрабатываемых морских нефтяных месторождений залива Бохай. Для них характерны широкое распространение, небольшая глубина залегания и слабая сцементированность, что обусловливает высокую вероятность выноса песка при эксплуатации скважин. По статистике, около 90% скважин на месторождениях залива Бохай требуют применения технологий пескозащитного заканчивания, от эффективности которых напрямую зависит коэффициент извлечения нефти.

Развитие технологий контроля выноса песка на месторождении Бохай прошло три основных этапа: традиционная гравийная технология, контролируемый вынос песка и адаптивный контроль песка [2].

Первый этап – традиционный контроль выноса песка. Его основная цель заключалась в полном предотвращении выноса пластового песка. На этом этапе преимущественно применялись методы плотной пескозащиты, прежде всего гравийная набивка. Ключевым технологическим достижением стал переход от однослойной циркуляционной гравийной набивки к многослойной. При однослойной набивке для каждого продуктивного пласта требовалось последовательно выполнять перфорацию, пескозащитное заканчивание, установку заглушки и повторную перфорацию, что было трудоемким и дорогостоящим процессом. Многослойная гравийная набивка позволяет за один спуск оборудования выполнить пескозащитное заканчивание сразу нескольких пластов [7], существенно повышая эффективность работ. Однако применение плотного фильтра снижает проницаемость призабойной зоны пласта, что приводит к увеличению скин-фактора.

Второй этап – контролируемый вынос песка. Его концепция основана на контролируемом выносе части мелких песчаных и глинистых частиц, что способствует формированию высокопроницаемых каналов в призабойной зоне пласта и улучшению ее фильтрационных свойств. Впервые данная технология была успешно применена на скважине CF1 месторождения SZ-36-1, а затем получила распространение на месторождениях QHD-32-6, PL-19-3 и других.

Третий этап – адаптивный контроль выноса песка. Его концепция основана на индивидуальном проектировании системы пескозащиты для каждой скважины и каждого продуктивного интервала. Это позволяет максимально реализовать продуктивный потенциал каждого пласта при гарантированном предотвращении выноса песка. Одновременно для глубоких наклонно-направленных скважин была разработана технология гидроразрыва пласта с гравийной набивкой, позволяющая обеспечить качественную укладку гравия даже при углах наклона ствола более 60°. Этого удалось достичь за счет оптимизации отношения диаметра промывочной трубы к диаметру фильтра (не менее 0,8) и применения вязкой жидкости-носителя.

Концепция контроля выноса песка на месторождении Бохай изменилась: от пассивного удержания песка – к его контролируемому использованию, от унифицированных решений – к индивидуальному проектированию, от технологий для вертикальных скважин – к технологиям для скважин сложного профиля.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ БОХАЙ И НЕОБХОДИМОСТЬ КОНТРОЛЯ ВЫНОСА ПЕСКА

Коллекторы месторождения Бохай представлены русловыми и дельтовыми отложениями, залегающими на небольшой глубине. Они характеризуются контактным типом цементации, высоким содержанием глинистых минералов и низкой механической прочностью. Для них также характерна выраженная неоднородность проницаемости: с увеличением проницаемости снижается прочность цементации пород, что приводит к повышению риска выноса песка [1].

Процесс выноса песка протекает в две стадии. На первой стадии под действием горного и фильтрационного напряжений скелетные зерна породы переходят в подвижное состояние. На второй стадии подвижные частицы песка выносятся потоком пластового флюида. Высокая вязкость тяжелой нефти (до 380 мПа×с) способствует интенсификации выноса песка. Коллекторы характеризуются высокой чувствительностью к воздействию воды и изменению напряженного состояния пород.

Вынос песка приводит к закупорке и засыпке подземного оборудования, абразивному износу электроцентробежных и винтовых насосов, эрозионному износу наземных трубопроводов, а также снижению безопасности эксплуатации. На морских платформах действуют жесткие ограничения на содержание песка в добываемой продукции – не более 0,003%. Интенсивный вынос песка может вызвать потерю устойчивости стенок скважины, деформацию обсадной колонны и даже выход скважины из эксплуатации. По статистике, доля скважин с поврежденной обсадной колонной в рыхлых песчаных коллекторах превышает 10%, а на отдельных месторождениях (или участках, если это точнее соответствует оригиналу) достигает 30%.

ТЕХНОЛОГИИ КОНТРОЛЯ ВЫНОСА ПЕСКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАВИЙНОЙ НАБИВКИ НА МЕСТОРОЖДЕНИИ БОХАЙ

До 2002 г. для разработки рыхлых песчаных коллекторов месторождения Бохай преимущественным методом контроля выноса песка являлась гравийная набивка, основной целью которой было предотвращение выноса песка из скважин. Принцип гравийной набивки заключается в том, что засыпной гравий задерживает частицы пластового песка, а противофиль-

трационный экран (фильтр) удерживает сам гравий, формируя многоступенчатый барьер для миграции песка.

ТЕХНОЛОГИЯ ОДНОСЛОЙНОЙ ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ ГРАВИЙНОЙ НАБИВКИ

Технология однослойной циркуляционной гравийной набивки являлась базовым методом контроля выноса песка на раннем этапе разработки месторождения Бохай; до 1998 г. она широко применялась при заканчивании скважин с пескозащитой. Принципиальная схема процесса (рис. 1) заключается в следующем: гравийно-жидкостная смесь закачивается насосом по бурильной колонне, затем через отверстия сервисного инструмента поступает в зону набивки, далее через муфту гравийной набивки попадает в кольцевое пространство между фильтром и обсадной колонной, а также в перфорационные каналы пласта, постепенно заполняя интервал пескозащиты. Гравий, размещенный в кольцевом пространстве «фильтр – обсадная колонна» и в призабойной зоне пласта, задерживает пластовый песок, а фильтр, в свою очередь, удерживает сам гравий, формируя многоступенчатую систему барьеров для предотвращения выноса песка.

Недостатки технологии включают многооперационность, необходимость многократных спуско-подъемных операций, высокий риск повреждения пласта и низкую эффективность в многопластовых коллекторах. Вместе с тем, для скважин с небольшим числом продуктивных интервалов (до трех) и при проведении ремонтных работ эта технология сохраняет практическую значимость. Последующие усовершенствования инструмента, включая добавление штуцера закрытия и механического центратора, позволили повысить его надежность [12].

ТЕХНОЛОГИЯ МНОГОСЛОЙНОЙ ГРАВИЙНОЙ НАБИВКИ

Технология многослойной гравийной набивки позволяет за один спуск колонны выполнить пескозащитное заканчивание сразу нескольких продуктивных пластов. Основной принцип технологии заключается в следующем: однократная перфорация обеспечивает вскрытие всех продуктивных интервалов, после чего в скважину спускается компоновка, включающая верхний главный пакер, промежуточные изолирующие пакеры, внутренние и наружные узлы гравийной набивки, сигнализатор заполнения, проволочный фильтр, переводник для закачки и циркуляции, нижний мост и другие элементы (рис. 2). С помощью пакерных систем продуктивные пласты разделяются на отдельные интервалы, после чего каждый интервал поочередно изолируется и осуществляется последовательная закачка гравийно-жидкостной смеси с заполнением кольцевого пространства и призабойной зоны.

Преимуществами технологии являются сокращение числа спуско-подъемных операций, возможность избирательной обработки интервалов, высокая плотность и качество размещения гравия, а также наличие сигнализации о завершении заполнения.

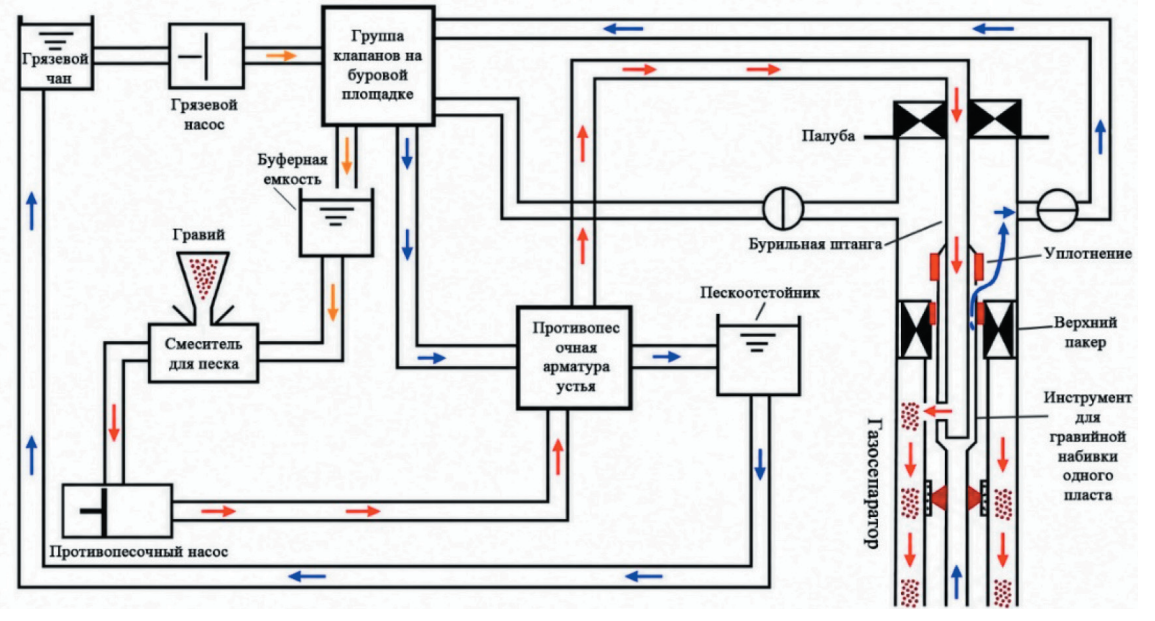


РИС. 1.
Принципиальная схема однослойной циркуляционной гравийной набивки

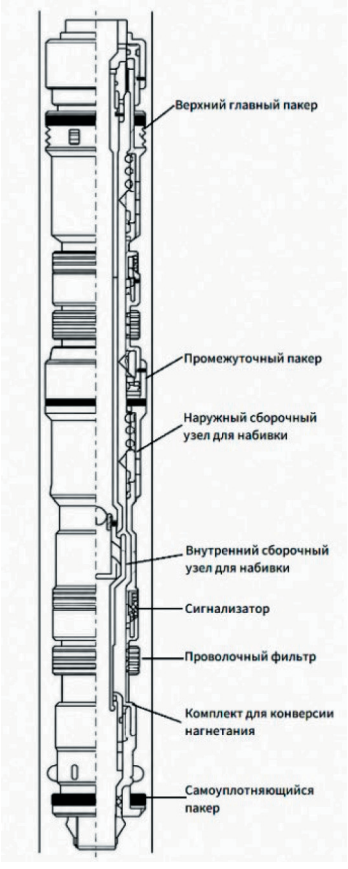


РИС. 2.
Односпускная колонна для многослойной гравийной набивки

Технология была внедрена с конца 1997 г. на месторождениях JZ9-3, SZ36-1 (II фаза) и QHD32-6. Бохай стал одним из регионов с наиболее широким применением технологий STMZ и DTMZ. Согласно исследованиям [10], STMZ-гидроразрыв для термошахт характеризуется низким скин-фактором, глубоким проникновением и высокой проводимостью трещины. При длине трещины до 20 м, ширине менее 20 мм и использовании гравия фракции 0,3–0,6 мм достигается высокая продуктивность скважин [13].

Согласно правилу R. J. Saucier, размер набивочного гравия выбирается на основе медианного размера пластового песка d50: медианный размер гравия D50 принимается равным (5-6)×d50, где D50 – медианный размер набивочного гравия, d50 – медианный размер пластового песка в продуктивном интервале.

Согласно данным о характере проникновения пластового песка в гравийный слой [8], степень его проникновения определяется отношением RGS (ratio of gravel to sand size – отношение медианного размера гравия к медианному размеру песка). При RGS < 5 проникновение пластового песка отсутствует; при 5 < RGS < 6 оно практически не наблюдается; при 6 < RGS < 8 наблюдается слабое проникновение песка в гравий с образованием тонкого переходного слоя; при 10 < RGS < 15 пластовый песок со временем постепенно проникает в поровое пространство гравия и мигрирует внутри него; при RGS > 15 песок свободно проходит через гравийный слой, и он утрачивает функцию пескоудержания.

Таким образом, гравийная набивка, рассчитанная по правилу R.J. Saucier, приводит к формированию вокруг фильтра низкопроницаемой переходной зоны, представляющей собой смесь гравия и пластового песка, что обусловливает увеличение скин-фактора и снижение продуктивности скважины.

ТЕХНОЛОГИЯ КОНТРОЛИРУЕМОГО ВЫНОСА ПЕСКА НА МЕСТОРОЖДЕНИИ БОХАЙ И ЕЕ ОСОБЕННОСТИ

В 2002 г. на месторождении Бохай начала внедряться концепция контролируемого выноса песка. В отличие от традиционного подхода, направленного на полное предотвращение выноса песка, эта концепция предусматривает контролируемый вынос части мелких песчаных и глинистых частиц. На основе анализа гранулометрического состава пластового песка и прогноза пескопроявления подбираются фильтр и набивочный гравий с оптимальной пескоудерживающей способностью. В частности, медианный размер набивочного гравия принимается равным D50 = (6–8) d50 или более, то есть, используется гравий несколько более крупной фракции по сравнению с традиционными рекомендациями. Это позволяет мелким частицам пластового песка и глины выноситься вместе с добываемым флюидом, предотвращая закупорку фильтра и каналов притока в призабойной зоне пласта. В результате происходит своеобразная «разгрузка» призабойной зоны, устраняется повреждение пласта, возникшее в процессе бурения и заканчивания скважины, формируются высокопроницаемые каналы, повышаются проницаемость призабойной зоны, коэффициент проводимости и, как следствие, продуктивность скважины.

МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЙ КОНТРОЛИРУЕМОГО ВЫНОСА ПЕСКА

При проектировании заканчивания скважины с пескозащитой в первую очередь выполняют прогнозирование пескопроявления. Для этого используют данные акустического каротажа, результаты лабораторных испытаний керна на прочность, сведения о пескопроявлении на соседних месторождениях, а также результаты испытаний разведочных скважин (DST). На основании этих данных определяется необходимость применения пескозащитного заканчивания. Затем по результатам гранулометрического анализа керна, данным геофизических исследований скважин и с учетом опыта эксплуатации соседних месторождений выбирают технологию и требуемую степень контроля выноса песка [4].

МЕТОДИКА ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЙ КОНТРОЛИРУЕМОГО ВЫНОСА ПЕСКА НА МЕСТОРОЖДЕНИИ БОХАЙ

Направленные скважины

Если пластовый песок имеет крупную или среднюю зернистость, хорошо отсортирован, порода характеризуется удовлетворительной цементацией, нефть обладает благоприятными реологическими свойствами, а содержание глинистых минералов в коллекторе не превышает 10%, рекомендуется применять простейшую схему пескозащиты – спуск высокоэффективного фильтра после перфорации. При более мелкозернистом и плохо отсортированном пластовом песке, неудовлетворительных свойствах нефти и содержании глинистых минералов более 10% рекомендуется использовать гравийную набивку. Для обычных наклонно-направленных скважин применяют проволочный фильтр, а для глубоких наклонно-направленных – высокоэффективный фильтр, который, помимо удержания пластового песка, обеспечивает дополнительное удержание набивочного гравия, компенсируя снижение эффективности гравийной набивки в скважинах с большими углами наклона ствола.

ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ СКВАЖИНЫ

Для горизонтальных скважин с открытым стволом при хорошо отсортированном пластовом песке, благоприятных свойствах нефти и содержании глинистых минералов менее 10% рекомендуется применять высокоэффективный фильтр, устанавливаемый непосредственно в открытом стволе. При плохо отсортированном пластовом песке, неудовлетворительных свойствах нефти и содержании глинистых минералов более 10% сначала устанавливают высокоэффективный фильтр, после чего выполняют гравийную набивку.

Степень фильтрации фильтра и размер набивочного гравия выбирают в соответствии с принципами контролируемого выноса песка. При необходимости применения гравийной набивки используют гравий увеличенного размера, что позволяет обеспечить контролируемый вынос мелких песчаных частиц вместе с добываемым флюидом, повысить проницаемость призабойной зоны и увеличить продуктивность скважины. Дополнительное повышение эффективности достигается за счет применения качественных буровых растворов для заканчивания скважин и оптимизации режима эксплуатации.

После завершения пескозащитного заканчивания в скважину спускают электроцентробежный или электровинтовой насос. Производительность насосной установки регулируют с помощью системы частотного управления (индивидуальной или групповой), поддерживая оптимальную депрессию на пласте, обеспечивающую реализацию режима контролируемого выноса песка [6].

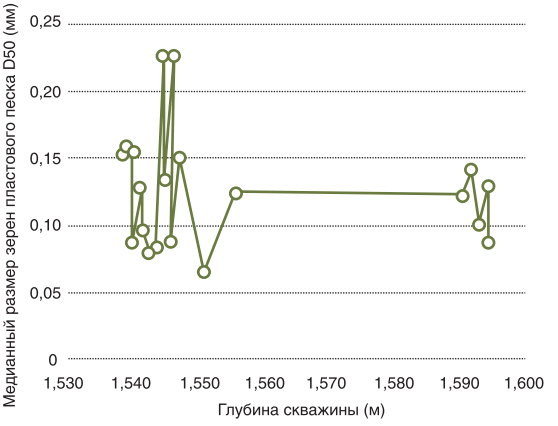


РИС. 3.

Медианные размеры пластового песка в соседней скважине CF1 на месторождении SZ36-1

ОПЫТ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ КОНТРОЛИРУЕМОГО ВЫНОСА ПЕСКА

В качестве примера рассмотрим скважину CF1 месторождения SZ36-1. Глубина залегания продуктивного пласта составляет 1300–1600 м, плотность нефти – 968 кг/м^3, вязкость – 380 мПа×с, проницаемость коллектора – 500–2300 мД. Скважина представляет собой многоствольную горизонтальную скважину, законченную открытым стволом с установкой высокоэффективного фильтра.

По результатам гранулометрического анализа керна соседней скважины медианный размер частиц пластового песка составил 0,05–0,15 мм (рис. 3).

Исходя из допустимого уровня выноса песка (10%), для проектирования системы пескозащиты медианный размер пластового песка был принят равным 0,081 мм. В соответствии с принципами контролируемого выноса песка медианный размер набивочного гравия должен в 6–8 раз превышать медианный размер пластового песка. На основании этого было определено, что пескоудерживающая способность установленного фильтра эквивалентна применению гравийной набивки с размером частиц 0,42–0,60 мм (30/40 mesh). Для сравнения, на ранних этапах разработки месторождения параметры пескозащиты определялись по правилу R.J. Saucier, которому соответствует гравий с размером частиц 0,25–0,42 мм (40/60 mesh).

После завершения пескозащитного заканчивания в скважину был спущен винтовой насос с погружным электроприводом производительностью 100 м^3/сут. На начальном этапе эксплуатации насос работал стабильно: дебит жидкости составлял около 80 м^3/сут, депрессия на пласт – 0,9 МПа, вынос песка не наблюдался.

В дальнейшем погружное оборудование было заменено на электроцентробежный насос производитель-

ностью 200 м^3/сут, что позволило увеличить депрессию на пласт и реализовать режим контролируемого выноса песка. После запуска насоса дебит жидкости достиг 180 м^3/сут. При этом выносимый песок дважды вызвал засорение фильтров технологической линии морской платформы, после чего режим эксплуатации стабилизировался. Вынос песка прекратился, дебит жидкости установился на уровне 165 м^3/сут, обводненность составила около 1%, а депрессия поддерживалась в диапазоне 1,5–2,0 МПа.

После стабилизации режима эксплуатации суточный дебит скважины CF1 превысил проектное значение (100 м^3/сут при депрессии 3 МПа). Аналогичные результаты были получены на горизонтальных многоствольных скважинах C25hf и C26hf платформы C, оборудованных системами контролируемого выноса песка, дебиты которых после ввода в эксплуатацию также превысили проектные значения (рис. 4).

Разработка месторождения SZ36-1 осуществлялась в два этапа. На первом этапе (опытный участок) были введены в эксплуатацию платформы A, B и J, на которых пробурено 64 скважины. Второй этап включал освоение платформ C, D, E, F, G и H, где было пробурено 186 скважин. Успешное внедрение технологии контролируемого выноса песка продемонстрировало преимущества такого подхода по сравнению с традиционной концепцией полного предотвращения выноса пластового песка, и открыло новые возможности для эффективной разработки залежей тяжелой нефти на месторождениях залива Бохай. В дальнейшем технология получила широкое распространение при бурении скважин уплотняющего бурения и освоении новых месторождений, включая вторую очередь разработки SZ36-1, месторождение QHD32-6, а также первую очередь разработки PL19-3, месторождение BZ25-1, группу месторождений Люйда, NB35-2 и другие.

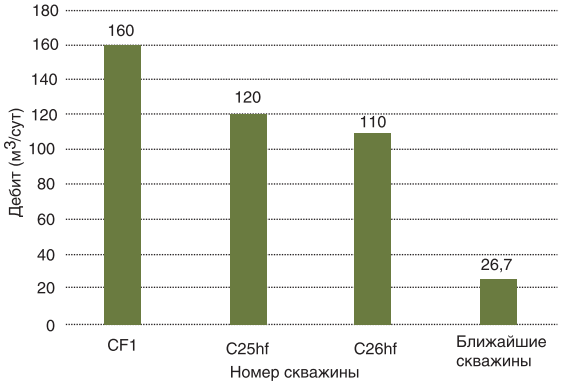


РИС. 4.

Производственные показатели трех скважин уплотняющего бурения месторождения SZ36-1 после применения технологии контролируемого выноса песка

В акватории залива Бохай также расположено значительное число низкорентабельных месторождений, характеризующихся высокими вязкостью нефти и обводненностью продукции. При использовании традиционных схем разработки их экономическая эффективность оказывается недостаточной, а внутренняя норма доходности не достигает требуемого уровня. Применение технологии контролируемого выноса песка позволяет повысить дебит отдельных скважин, сократить необходимое их количество для разработки месторождения, увеличить внутреннюю норму доходности проектов и тем самым расширить возможности освоения низкорентабельных месторождений.

ТЕХНОЛОГИЯ АДАПТИВНОГО КОНТРОЛЯ ВЫНОСА ПЕСКА НА МЕСТОРОЖДЕНИИ БОХАЙ

Технология адаптивного заканчивания с контролем выноса песка

Технология контролируемого выноса песка позволила эффективно решить проблему интенсивного пескопроявления на большинстве месторождений Бохая, приуроченных к отложениям свит Минхуачжэнь и Гуаньтао, характеризующихся небольшой глубиной залегания и слабой цементацией пород. Однако на отдельных низконапорных месторождениях тяжелой нефти ее эффективность оказалась недостаточной. В связи с этим на основе концепции умеренного контроля выноса песка была разработана технология адаптивного (индивидуализированного) контроля выноса песка, предусматривающая подбор конструкции пескозащиты для каждой скважины и каждого продуктивного интервала.

Новый подход заменил традиционное проектирование заканчивания, ориентированное на платформу в целом, индивидуальным проектированием для каждой скважины. Для каждого продуктивного интервала выполняются отдельный анализ геолого-промысловых условий и подбор оптимальных способов и параметров контроля выноса песка. Такой подход позволяет при сохранении высокой эффективности пескозащиты максимально реализовать продуктивный потенциал каждого пласта. В результате технология контроля выноса песка стала одним из важнейших инструментов повышения и стабилизации добычи на месторождениях Бохая и внесла существенный вклад в достижение к концу 2010 г. годовой добычи нефти на уровне 30 млн т.

ОПЫТ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ АДАПТИВНОГО КОНТРОЛЯ ВЫНОСА ПЕСКА

При бурении и заканчивании горизонтальной многоствольной скважины A25M на одном из месторождений залива Бохай была реализована технология адаптивного контроля выноса песка, основанная на детальном проектировании конструкции для кон-

кретной скважины. Работы выполнялись в рамках интегрированного подхода к бурению и заканчиванию, при котором решения по заканчиванию принимались на этапе проектирования и проводки скважины.

Так, еще на этапе бурения была определена глубина установки электроцентробежного насоса, а соответствующий участок ствола выполнен с постоянным углом наклона. Для предотвращения засорения фильтра твердыми частицами при заканчивании применяли вибросито с размером ячеек 74 мкм (210 mesh) и проводили интенсивную циркуляцию бурового раствора для его эффективной очистки. В боковых стволах буровой раствор заменяли на буровой раствор на углеводородной основе плотностью 850 кг/м^3, а в основном стволе – на глинистый раствор. Особое внимание уделялось обеспечению высокого качества ствола скважины и оптимизации его траектории для беспрепятственного спуска фильтра. При проектировании заканчивания учитывался риск преждевременного прорыва подошвенной воды, в связи с чем был установлен фильтр со ступенчатой характеристикой фильтрации, позволяющий замедлить конусообразование воды. Для изоляции глинистых прослоев применяли наружные пакеры.

Комплексное применение технологии адаптивного контроля выноса песка и интегрированного подхода к бурению и заканчиванию позволило получить дебит нефти около 800 м^3/сут [11].

В настоящее время на месторождениях Бохая технология адаптивного контроля выноса песка широко применяется при проектировании пескозащитного заканчивания. Ежегодно с ее использованием вводится в эксплуатацию более 100 скважин, при этом эффективность пескозащитных мероприятий достигает практически 100%. Для большинства новых скважин фактические дебиты превысили проектные значения, а на ряде месторождений были получены высокодебитные скважины с производительностью около 1000 м^3/сут нефти. В результате удалось устранить проблему низких начальных дебитов и их быстрого снижения, характерную для ряда скважин, оборудованных системами контролируемого выноса песка.

ТЕХНОЛОГИЯ ГИДРОРАЗРЫВА С ГРАВИЙНОЙ НАБИВКОЙ В ГЛУБОКИХ НАКЛОННО-НАПРАВЛЕННЫХ СКВАЖИНАХ НА МЕСТОРОЖДЕНИИ БОХАЙ

Особенности применения технологии гидроразрыва пласта с гравийной набивкой в глубоких наклонно-направленных скважинах

При проведении гидроразрыва пласта с гравийной набивкой наиболее распространенными осложнениями являются преждевременное экранирование трещины, неполная закачка проппанта и образование песчаных мостов. Основными причинами этих осложнений являются неоптимальная компоновка внутрискважинного оборудования, неправильно выбранные параметры закачки (особенно в неоднородных коллекторах, например на месторождении NB35-2), а также вынос пластового песка до начала операции, приводящий к накоплению песка в затрубном пространстве и образованию песчаных мостов.

ТЕХНОЛОГИЯ ЗАКАЧКИ ПРОППАНТА ПРИ ГИДРОРАЗРЫВЕ ПЛАСТА С ГРАВИЙНОЙ НАБИВКОЙ В ГЛУБОКИХ НАКЛОННО-НАПРАВЛЕННЫХ СКВАЖИНАХ

Угол наклона ствола скважины оказывает влияние не только на величину гидравлических потерь при циркуляции, но и на эффективность операций по пескозащите [5]. Экспериментальные исследования показали, что в глубоких наклонно-направленных скважинах с углом наклона менее 60° влияние этого параметра на эффективность гравийной набивки несущественно, и процесс может осуществляться по стандартной технологической схеме. Однако при углах наклона более 60° эффективность гравийной набивки при традиционных режимах существенно снижается (рис. 5).

Это связано с тем, что с увеличением угла наклона ствола скважины направление действия гравитационных сил перестает совпадать с направлением транспортировки гравийной суспензии. В результате частицы гравия начинают оседать на нижней образующей стенке кольцевого пространства до достижения зоны перфорации или интервала вскрытия пласта. Постепенно формируется локальное скопление гравия («дюна»), которое под действием потока жидкости распространяется и смещается в направлении забоя.

При этом процесс заполнения кольцевого пространства происходит неравномерно и фактически реализуется по схеме «сверху вниз», а не по традиционной схеме равномерного заполнения интервала «снизу вверх». Это приводит к преждевременному перекрытию кольцевого пространства и формированию

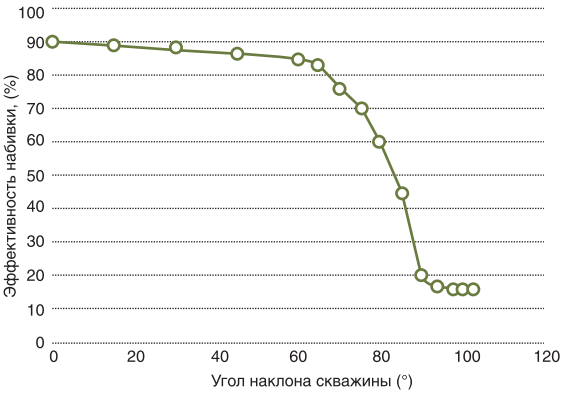


РИС. 5.
Зависимость эффективности гравийной набивки от угла наклона скважины

устойчивого песчаного моста, который препятствует дальнейшему продвижению гравия. В результате нижняя часть интервала пескозащиты остается незаполненной, что приводит к нарушению технологии и снижению эффективности операции пескозащиты.

Мероприятия, направленные на повышение эффективности операции:

– в процессе закачки осуществлять непрерывный мониторинг параметров операции в режиме реального времени и своевременно корректировать режим нагнетания;

– применять набивочную жидкость средней вязкости, обеспечивающую оптимальные транспортирующие свойства по отношению к частицам гравия и их устойчивое взвешенное состояние, что позволяет предотвратить образование песчаных мостов и пустот;

– увеличить отношение «промывочная труба – фильтр» (отношение наружного диаметра промывочной трубы к внутреннему диаметру фильтра), что приводит к уменьшению площади проходного сечения в кольцевом пространстве «промывочная труба – фильтр» и увеличению гидравлического сопротивления. В результате поток гравийной суспензии перераспределяется в кольцевое пространство «фильтр – обсадная колонна», что способствует более равномерному формированию гравийной набивки.

Экспериментальные исследования показали, что при значении отношения «промывочная труба – фильтр» выше 0,8 эффективность гравийной набивки существенно возрастает (рис. 6).

ТЕХНОЛОГИЯ КОНЦЕВОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ ТРЕЩИНЫ ПРИ ГИДРОРАЗРЫВЕ ПЛАСТА С ГРАВИЙНОЙ НАБИВКОЙ В ГЛУБОКИХ НАКЛОННЫХ СКВАЖИНАХ

Процесс формирования режима концевого экранирования трещины (tip screen-out, TSO) в рыхлых песчаниках глубоких наклонных скважин трудно поддается точному численному моделированию и воспроизведению в лабораторных условиях; в ряде случаев его возникновение также сложно достоверно зафиксировать. Формирование концевого экранирования определяется совокупностью факторов, включая ограничения существующих инженерных моделей, локальный или многоточечный характер развития экранирования, а также недостаточную точность измерений и интерпретации забойного давления.

Ключевым условием эффективного гидроразрыва пласта с гравийной набивкой в рыхлых песчаниках является оперативное управление процессом закачки, обеспечивающее формирование режима концевого экранирования трещины (TSO), остановку ее дальнейшего роста и переход к увеличению раскрытия трещины. В отличие от гидроразрыва в низкопроницаемых коллекторах, для высокопроницаемых пластов требуется формирование короткой трещины высокой проводимости [3, 9].

Формирование и стабилизация трещины достигаются последовательной закачкой: сначала относительно небольшого объема жидкости разрыва, затем низкоконцентрированной суспензии проппанта, обеспечивающей развитие и частичное заполнение трещины. После прекращения роста трещины последующая закачка суспензии способствует увеличению ее раскрытия, при этом требуется повышение концентрации проппанта в потоке.

На завершающей стадии закачки, как правило, снижают скорость нагнетания и частично открывают затрубное пространство для обеспечения контролируемого расхода на выходе, что способствует эффективному заполнению приствольной части трещины. Снижение скорости закачки также может применяться при отсутствии признаков формирования концевого экранирования по данным забойного давления с целью его инициирования.

РИС. 6.

Зависимость эффективности гравийной набивки от отношения «промывочная труба – фильтр

ОПЫТ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ГИДРОРАЗРЫВА С ГРАВИЙНОЙ НАБИВКОЙ В ГЛУБОКИХ НАКЛОННЫХ СКВАЖИНАХ

Технология гидроразрыва пласта с гравийной набивкой была применена на скважине Ах месторождения NB35-2. В скважине использовалась временная тампонирующая жидкость для выравнивания перепадов пластового давления между интервалами свиты Минхуачжэнь 0, I и II (при котором верхний интервал характеризуется интенсивным поглощением жидкости, а нижний – притоком флюида).

Благодаря оптимизации проектных решений и эффективному контролю технологических операций на скважине успешно выполнены операции микрогидроразрыва с гравийной набивкой для трех нижних интервалов (одиночные пласты), а также многослойного гидроразрыва с гравийной набивкой за один спуск для двух верхних интервалов.

По результатам пескозащиты установлено, что для одиночных интервалов линейная масса гравийной набивки превышала 134 кг/м, а для двух верхних интервалов – более 446 кг/м. Высота заполнения гравием над фильтром (глухой секцией трубы) превышала 1,8 м.

По результатам гидроразрыва пласта (табл. 1) скважина была успешно введена в эксплуатацию. Дебит жидкости составил 100 м^3/сут, дебит нефти – 80 м^3/сут.

ВЫВОДЫ

1. На месторождении Бохай сформирован комплекс технологий контроля выноса песка, включающий технологию гравийной набивки, технологию контролируемого выноса песка, адаптивную (индивидуализированную) технологию контроля песка, а также технологию гидроразрыва пласта с гравийной набивкой в глубоких наклонных скважинах. Эти технологии стали одним из ключевых инструментов увеличения и стабилизации добычи нефти на месторождении. Их внедрение и масштабное применение обеспечили эффективную разработку месторождения Бохай и представляют практический интерес для освоения аналогичных морских месторождений в Китае и за рубежом.

2. Технология контролируемого выноса песка, основанная на традиционных методах пескозащиты, предполагает использование детального анализа гранулометрического состава пластового песка и прогнозирования выноса песка для обоснованного выбора фильтра и гравийной набивки с заданной удерживающей способностью. Это позволяет снизить риск закупорки фильтра и каналов притока, улучшить фильтрационно-емкостные свойства призабойной зоны, повысить коэффициент проводимости и продуктивность скважин. Первое применение технологии на скважине CF1 дало положительные результаты, после чего она была масштабирована на месторождении Бохай и обеспечила устойчивый рост добычи.

3. Адаптивная технология контроля выноса песка, основанная на детальном проектировании для каждой скважины и каждого продуктивного интервала, позволяет максимально раскрыть потенциал пласта при обеспечении эффективного контроля выноса песка. Технология была применена на сотнях скважин месторождения Бохай; при этом эффективность пескозащиты достигла 100%, а фактические дебиты большинства скважин превысили проектные значения. На ряде месторождений были дебиты нефти порядка 1000 м^3/сут., и при этом устранены случаи низких начальных дебитов и их быстрого падения, характерные для ряда скважин с контролируемым выносом песка.

4. Технология гидроразрыва пласта с гравийной набивкой в глубоких наклонных скважинах включает четыре ключевых компонента: формирование хвостового фильтра, обоснование ключевых параметров гидроразрыва, предотвращение преждевременного экранирования, а также технологию закачки проппанта в условиях высоких углов наклона. Использование хвостового фильтра позволяет формировать короткие трещины высокой проводимости в высокопроницаемых пластах. Меры по предотвращению преждевременного экранирования обеспечивают стабильное проведение операции гидроразрыва. Оптимизированная технология закачки проппанта устраняет снижение эффективности гравийной набивки при углах наклона более 60°, обеспечивая качественное формирование фильтрующего слоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Дзюбло А.Д., Харченко Ю.А., Сторожева А.С., Сидоров В.В., Петренко В.Е., Иванов А.Н., Бондаренко В.А.** Нефтегазоносность, обустройство и разработка месторождений континентального шельфа: монография. М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. 2025. 527 с.
2. **Харченко Ю.А., Шахвердиев А.Х.** Этапы освоения месторождений нефти и газа континентального шельфа // Российский государственный геологоразведочный университет имени С. Орджоникидзе. 2025. 70 с.
3. **Chang F.R.** Application of Fracture-Packing Sand Control Technology // Journal of Shengli Oilfield Staff University. 2004. N 1. P. 28–30.
4. **Deng J.G., Li P., Zhou J.L. et al.** Optimization of Sand Control Method for Moderate Sand Production

ТАБЛИЦА 1.
Результаты гидроразрыва пласта

Способ	Интервал	Расход при нагнетании, м^3/с	Массовая концентрация проппанта, кг/м^3	Полудлина трещины, м	Высота трещины, м	Средняя ширина трещины, мм	Масса закачанного проппанта, т	Поверхностная концентрация проппанта, кг/м^2
ГРП с набивкой	Средне-верхний	0,032	60…719	27,0	21,5	6,4	11,9	1,88
	Верхний	0,032	60…599	24,0	16,0	8,1	10,0	2,67

Wells in Offshore Unconsolidated Sandstone in China // Acta Petrolei Sinica. 2012. Vol. 33. N 4. P. 676–680.

5. **Economides M., Oligney R., Valko P.** Unified Fracture Design. Orsa Press, 2002.
6. **Fan B.T., Deng J.M.** Offshore Well Completion Technology and Concepts // Oil Drilling & Production Technology. 2004. Vol. 26. N 3. P. 23–26.
7. **Li H.W.** Research on Single-trip Circulating Gravel Pack Sand Control Completion Technology // Petrochemical Technology. 2019. N 12. P. 325–330.
8. **Ma D.X.** Optimization Design of High-pressure Gravel Pack Sand Control Process Parameters // Oil Drilling & Production Technology. 2007. Vol. 29. N 3. P. 52–55.
9. **Zhang J. et al.** Handbook of Offshore Oil and Gas Well Completion. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998.
10. **Zhang M.** Research and Application of Autonomous One-trip Multilayer Gravel Pack Sand Control Technology // Petrochemical Industry Application. 2016. Vol. 35. N 3. P. 111–114.
11. **Zhang T., Shi M.L., Wang R. et al.** Experimental Study on Optimization of Gravel Pack Sand Control Design in Unconsolidated Sandstone Reservoirs // Natural Gas and Oil. 2026. Vol. 44. N 1. P. 61–67.
12. **Zhang Y.** Application of New Single-layer Gravel Pack Sand Control Tool and Supporting Technology // Petrochemical Technology. 2020. Vol. 27. N 3. P. 37–38.
13. **Zhou W.B.** Application of STMZ Gravel Pack Sand Control Technology in Bohai Bay // China Petroleum and Chemical Standard and Quality. 2020. N 17. P. 244–245.

REFERENCES

1. **Dzyublo A.D., Kharchenko Yu.A., Storozheva A.S., Sidorov V.V., Petrenko V.E., Ivanov A.N., Bondarenko V.A.** Oil and gas potential, development and development of continental shelf fields: monograph. Moscow: RGU nefti i gaza (NIU) imeni I.M. Gubkina. 2025:527. (In Russian).
2. **Kharchenko Yu.A., Shakhverdiev A.Kh.** Stages of development of oil and gas fields on the continental shelf. Moscow: RGU nefti i gaza (NIU) imeni I.M. Gubkina. . 2025:70. (In Russian).
3. **Chang F.R.** Application of Fracture-Packing Sand Control Technology. *Journal of Shengli Oilfield Staff University*. 2004;1:28–30.
4. **Deng J.G., Li P., Zhou J.L. et al.** Optimization of Sand Control Method for Moderate Sand Production Wells in Offshore Unconsolidated Sandstone in China. *Acta Petrolei Sinica*. 2012;33;(4):676–680.
5. **Economides M., Oligney R., Valko P.** Unified Fracture Design. Orsa Press, 2002.
6. **Fan B.T., Deng J.M.** Offshore Well Completion Technology and Concepts. *Oil Drilling & Production Technology*. 2004;26;(3):23–26.
7. **Li H.W.** Research on Single-trip Circulating Gravel Pack Sand Control Completion Technology. *Petrochemical Technology*. 2019;12:325–330.
8. **Ma D.X.** Optimization Design of High-pressure Gravel Pack Sand Control Process Parameters. *Oil Drilling & Production Technology*. 2007;29;(3):52–55.
9. **Zhang J. et al.** Handbook of Offshore Oil and Gas Well Completion. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998.
10. **Zhang M.** Research and Application of Autonomous One-trip Multilayer Gravel Pack Sand Control Technology. *Petrochemical Industry Application*. 2016;35;(3): 111–114.
11. **Zhang T., Shi M.L., Wang R. et al.** Experimental Study on Optimization of Gravel Pack Sand Control Design in Unconsolidated Sandstone Reservoirs. *Natural Gas and Oil*. 2026;44;(1):61–67.
12. **Zhang Y.** Application of New Single-layer Gravel Pack Sand Control Tool and Supporting Technology. *Petrochemical Technology*. 2020;27;(3):37–38.
13. **Zhou W.B.** Application of STMZ Gravel Pack Sand Control Technology in Bohai Bay. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*. 2020;17:244–245.

Ван Цзюньсян,
аспирант Российского университета дружбы народов им. Патриса Лумумбы

117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6,
117198, 6 Miklukho-Maklaya Street, Moscow,
e-mail: 1042218149@rudn.ru

Юшин Евгений Сергеевич,
к.т.н., доцент Российского университета дружбы народов им. Патриса Лумумбы

117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6,
117198, 6 Miklukho-Maklaya Street, Moscow,
e-mail: yushin-es@rudn.ru

Ян Юймин,
аспирант Российского университета дружбы народов им. Патриса Лумумбы

117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6,
117198, 6 Miklukho-Maklaya Street, Moscow,
e-mail: 1042218150@rudn.ru

Чу Цзюнь,
аспирант Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе (МГРИ), аспирант Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23,
117997, 23 Miklukho-Maklaya Street, Moscow, Russia
e-mail: vladimirchujun@yandex.ru

Ефенди Иван,
аспирант Китайского нефтяного университета (Пекин)

102249, Пекин, район Чанпин, ул. Фусюэ, д. 18,
102249, 18 Fuxue Road, Changping District, Beijing, China
e-mail: Ivan.efndi@gmail.com

УДК 338.1+ 338.26
DOI: 10.52531/1682-1696-2026-26-3-68-75
Научная статья
EDN: QDZNCK

РЕСУРСНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ АЛЮМИНИЕВОГО СЫРЬЯ РЕСПУБЛИКИ КАМЕРУН

А.А. Рассказов[1], А.Ф. Георгиевский[1], Е.В. Карелина[1], А.А. Назарова[1], Т.П. Морозова[2], З. Эиоман[1]
[1] Российский Университет Дружбы Народов им. Патриса Лумумбы (Москва, Россия)
[2] ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе» (Москва, Россия)

В статье представлен анализ потенциала бокситового сырья Камеруна. Основное внимание уделяется внушительным запасам высококачественных бокситов, в частности месторождениям Миним-Мартап, Фонго-Тонго и Нгаундаль. Приводятся данные по объёмам ресурсов и уникальным геохимическим характеристикам руд, подтверждающим их соответствие мировым стандартам высшего класса. Подчёркиваются текущие усилия по модернизации транспортной инфраструктуры для освоения месторождений. На основе сравнительного анализа доказывается стратегическая целесообразность и экономическая выгода от развития в Камеруне полного цикла производства – от добычи бокситов до выпуска глинозёма, что обусловлено низкими затратами и высоким качеством сырья по сравнению с альтернативными источниками, такими, как российские бокситы.

Ключевые слова: *бокситы, алюминий, экономика бокситов, Камерун, бокситоносные районы, Миним-Мартап, Фонго-Тонго, Нгаундаль*

Original article

RESOURCE POTENTIAL OF ALUMINUM RAW MATERIALS OF THE REPUBLIC OF CAMEROON

A.A. Rasskazov[1], A.F. Georgievskiy[1], Ye.V. Karelina[1], A.A. Nazarova[1], T.P. Morozova[2], Z. Eioman[1]
[1] Russian University of Friendship of Peoples named after Patrice Lumumba (Moscow, Russia)
[2] FSBEI HE "Russian State Geological Exploration University named after Sergo Ordzhonikidze" (Moscow, Russia)

The article provides an analysis of the potential of Cameroon's bauxite resources. It focuses on the significant reserves of high-quality bauxite, particularly at the Minim-Martap, Fongo-Tongo, and Ngaundal deposits. The article presents data on the volume of resources and the unique geochemical characteristics of the ores, which demonstrate their compliance with global standards for high-quality bauxite. It also highlights the ongoing efforts to modernize the transportation infrastructure for the development of these deposits. Based on a comparative analysis, the strategic feasibility and economic benefits of developing a full production cycle in Cameroon - from bauxite mining to alumina production, are demonstrated due to the low costs and high quality of raw materials compared to alternative sources such as Russian bauxite.

Key words: *bauxite, aluminum, bauxite economy, Cameroon, bauxite-bearing regions, Minim-Martap, Fongo-Tongo, Ngaundal*

Алюминий – материал легкий и пластичный, стойкий к воздействиям окружающей среды. Именно поэтому во всем мире его используют во многих сферах, таких как строительство, машиностроение, а также в промышленности.

Рынок алюминия во всем мире является сложной системой, включающей производство алюминия и его сбыт. Данный рынок динамичен и находится под влиянием разных факторов. По ситуации на сегодняшний день можно сделать вывод, что цена на алюминий выросла практически на 50% за последние пять лет (рис. 1). На это в основном повлияли инфляция, сокращение запасов и перебои в поставках.

Больше всего первичного алюминия производится в Китае, Индии и России. Эти и другие страны (Канада, Объединенные Арабские Эмираты) занимаются экспортом алюминия.

Цена за тонну промышленного сырья (для производства алюминия, огнеупоров и др.) на мировом рын-

© 2026, А.А. Рассказов, А.Ф. Георгиевский, Е.В. Карелина, А.А. Назарова, Т.П. Морозова, З. Эиоман
Поступила в редакцию 04.05.2026

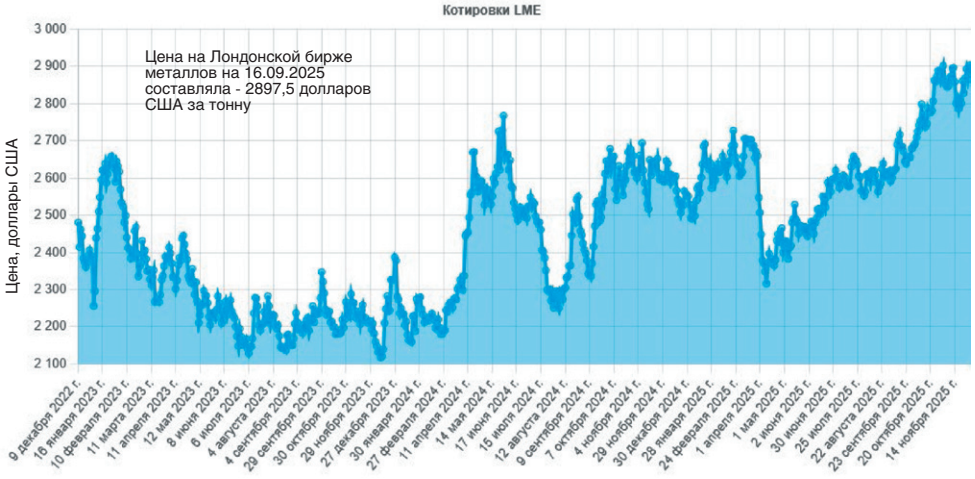


РИС. 1.

Динамика цен на первичный алюминий на Лондонской бирже металлов (LME). Дата обращения к биржевым данным: 16.09.2025 21:53 [6]

ке меняется в диапазонах 130–460 долларов США за тонну. На цену влияют содержание оксида алюминия (Al_2O_3), влажность, наличие примесей, а также условия поставки (FOB – стоимость доставки до судна) и объем партии [8]

В Камеруне нет активного рынка бокситов с устоявшимися ценами, потому что бокситы там не добывают в промышленных масштабах [9].

Цена на глинозем на мировом рынке в настоящее время держится примерно в районе 300–320 долларов США за тонну [10]. В Камеруне единой фиксированной цены на бокситы нет, т.к. нет масштабной и развитой добычи бокситов. Поэтому рынок здесь неликвидный: бокситы в Камеруне в основном привозные.

По данным Future Market Report, в 2025 г. глобальный рынок глинозема оценивался в 12 200 млн долларов США. Ожидается, что к 2033 г. рынок достигнет 19 700 млн долларов США с показателем роста 6,17% в период 2026–2033 гг. [11]. Алюминий на мировых биржах в сегодня торгуется примерно по 3100–3200 долларов США за тонну [12].

В Камеруне нет публичной рыночной цены на алюминий в виде фиксированного тарифа для всех потребителей, страна не торгует металлом на бирже, поэтому единой розничной или оптовой ставки не существует.

Основным источником для производства алюминия являются бокситы. Африка является одним из ведущих регионов мира по запасам бокситов. По данным Геологической службы США (USGS) на 2024 год, общие мировые запасы бокситов (основного сырья для производства алюминия) оценивались в диапазоне 55–75 млрд т, из которых примерно 30 млрд т экономически выгодны для производства.

На начало XXI века из общемировых запасов бокситов на Африку приходилось 15–20 млрд т. При этом, по мере расширения геологоразведочных работ оценки постоянно росли [2].

Подавляющая часть запасов сконцентрирована в Западной Африке – около 86% общеафриканских запасов. На первом месте по запасам бокситов в списке стран Африки – Гвинея, которая владеет 30% от мировых запасов (по разным оценкам 15–20 млрд тонн) [3]. Значительными запасами бокситового сырья также обладает Камерун. По некоторым источникам [3] их общие запасы оцениваются, в 2,4 млрд т, что ставит Камерун на второе после Гвинейской Республики место в Африке. Однако существует проблема недостаточной их изученности, в связи с чем освоение бокситовых месторождений Камеруна сильно замедлено.

Актуальность и новизна исследования обусловлена также отсутствием обобщающих публикаций по данной теме. Многие исследования посвящены минералогии и геохимии бокситовых месторождений Камеруна и структурам бокситового сырья [3, 16, 17, 18], другие работы – роли Африки как ключевого региона по запасам алюминиевого сырья [1, 2]. Данная статья обобщает геологическую историю камерунских бокситовых месторождений, особенности их геологического строения и сопоставление геохимических особенностей основных месторождений Камеруна и Гвинеи.

Настоящее исследование основано на анализе современных опубликованных данных по ресурсному потенциалу бокситовой отрасли Камеруна, а также по качественным характеристикам сырья, для чего использованы открытые и верифицируемые источники. При отборе источников приоритет отдавался данным, содержащим количественные показатели запасов и ресурсов, сведения о составе руд, геолого-промышленные характеристики месторождений и информацию о транспортной и производственной инфраструктуре. Дополнительно учитывались публи-

кации, в которых сведения были получены на основе результатов бурения, лабораторных анализов и геолого-экономической оценки.

Ограничения анализа связаны с тем, что исследование основано преимущественно на опубликованных и доступных в открытом доступе материалах, без использования единой базы первичных проб и без проведения собственных лабораторных испытаний.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Геологическая история Камеруна начинается в архейской эре, 3,5–2,5 млрд лет назад; различные фазы его развития представлены геологическими массами, сформированными в ходе последовательных орогенных циклов, характеризующихся образованием горных хребтов, и последующими фазами растяжения.

Выделяют три орогенных цикла:

– либерийский, представленный гранулитовым комплексом Нтем, который датируется архейской эрой и имеет возраст около 2,5 млрд лет.
– эбурнейский или трансамазонский с формациями Ньонг и Айна, которые датируются палеопротерозойским периодом (2,5–1,8 млрд лет назад);
– панафриканский, включающий геологические формации неопротерозойской эры, сформировавшиеся 1000–600 млн лет назад.

Все известные крупные бокситовые провинции Камеруна расположены в центральной и западной частях Камерунского плоскогорья, сложенного в основном докембрийскими кристаллическими породами (гранитами, гнейсами, кварцитами) [1]. Наиболее крупные из месторождений – Миним-Мартап и отстоящий от него к северо-западу Нгаундаль (в районе Адамава, центральная часть Камеруна), а также Фонго-Тонго (Западный регион) [13]. Разработку месторождений провинции Адамава осуществляет компания «Cameroon Alumina Limited» (CAL) – совместное предприятие, созданное фирмами «Hydromine», «Dubai Aluminum Company» и «Hindalco Industries».

По оценкам австралийской горнодобывающей компании «Canyon Resources», ресурсы месторождения Миним-Мартап превышают 1 млрд т со средним содержанием глинозема 51,3%. Для месторождения Нгаундаль бокситовые ресурсы оцениваются в 120 млн т с содержанием глинозема более 40%. Ресурсы Фонго-Тонго оцениваются в 46 млн т со средним содержанием глинозема 47%.

По данным той же компании, в ходе поисково-оценочных работ в районе месторождений Миним-Мартап и Нгаундаль, было обнаружено 65 дополнительных бокситовых плато (общее количество достигло 79). Прогнозные ресурсы только 16 из 79 перспективных участков оцениваются в 892 млн т руды, из которых 250 млн т относятся к «рудам очень высокого сорта». Благодаря своему качеству и химическому составу сырье может применяться в различных производственных областях, таких как изготовление алюминия и сплавов, специальных видов электрокерамики, абразивных и огнеупорных материалов, а также использование в составе цемента.

Согласно геохимическим данным, для всех провинций характерно стабильно высокое содержание оксида алюминия (Al_2O_3), варьирующееся в пределах 37,4–57,5 мас. %, при относительно низких концентрациях оксида железа (Fe_2O_3 <29,5 мас. %), оксида титана (TiO_2 <7,5 мас. %) и оксида кремния (SiO_2 = 0,48–3,21 мас. %) [3, 5]. Для сравнения приведен график среднего содержания компонентов в гвинейских и камерунских бокситах (рис. 2).

Особо выделяется своими запасами бокситовое месторождение Миним-Мартап, расположенное между населенными пунктами Миним и Мартап и приуроченное к вулканическому поясу Центральной Африки. Миним-Мартап расположен в особом геологическом комплексе в пределах Центрально-Камерунской сдвиговой зоны (ЦКСЗ). Данное геологическое положение сыграло важную роль в формировании залежей бокситов.

Бокситоносный регион Миним-Мартап занимает значительную часть плато Адамава, расположенного между Центрально-Камерунской сдвиговой зоной и Камерунской вулканической линией. Последняя простирается в восточном направлении от побережья Атлантического океана на юго-западе страны до гористой местности с высотными отметками от 1000 до 2500 м. Здесь же начинается плато Адамава, которое является большей, но менее расчлененной областью по сравнению с другими плато региона. Панафриканская орогения привела к появлению в регионе Адамава множества гранитоидных интрузий. Метаморфизм и основные тектонические движения происходили по двум основным структурным зонам: Центрально-Камерунской сдвиговой зоне и Камерунской вулканической линии. В геологическом строении региона доминируют верхнепротерозойские гранитоиды, гнейсовые и метаосадочные породы биримианско-эбурнианского возраста, а также кайнозойские вулканиты и мигматиты. Геологический разрез снизу вверх представлен породами фундамента, вулканогенно-осадочными отложениями и слоями почвы, частично покрытыми базальтовыми потоками лав, варьирующих по возрасту от меловых до современных и имеющих типично щелочной состав (рис. 3).

Бокситовый регион Миним-Мартап представляет собой скопление из 11 плато, округлой формы, общей площадью около 1000 км^2, которые сформировались в результате гипергенного выветривания вулканических пород, представляющих собой расчлененные базальтовые толщи.

Исследование материнских пород указывает на то, что бокситы образовались из основных базальтовых и

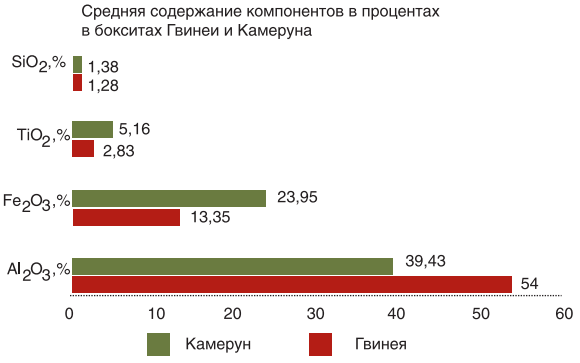


РИС. 2.

График сравнения содержания SiO_2 , TiO_2, Fe_2O_3, Al_2O_3 в бокситах Гвинеи и Камеруна

андезитовых магматических пород с промежуточным pH (щелочно-кислотными характеристиками) [3].

Месторождение приурочено к центральной части плато, где оно образовалось в результате гипергенного выветривания вулканических пород и иммобилизации алюминия в палеогене. Этот процесс не только обусловил формирование месторождения Миним–Мартап, но и привел к образованию других важных в промышленном отношении залежей бокситов в районах Нгаундаль и Нгаондору.

Территория бокситового месторождения Миним–Мартап в ландшафтном плане представляет собой расчлененный базальтовый поток, который формирует относительно ровную поверхность плато, отчетливо воздымающуюся и обособленную от окружающих равнинных участков территории, сложенных гранитоидами [17].

Плато покрыто тонким слоем плейстоцен-четвертичного аллювия. Ниже залегают латериты, сформированные за счет третичных и четвертичных базальтов. Бокситы заключают в себе отвердевшие реликты преобразованных материнских пород в виде выпуклых образований, полностью покрывающих поверхность плато. Мощность горизонта бокситов варьирует от 3 до свыше 30 м при средней мощности 8,6 м на плато Галео-Даниэлле.

Опубликованные минералогические исследования показывают, что бокситовое месторождение Миним-Мартап обладает бокситами мирового класса благодаря их высокому качеству, что было проверено методами классификации в соответствии с Австралийским кодексом для публикации результатов разведки, минеральных ресурсов и рудных запасов (Кодекс JORC, 2012).

Средние значения содержаний основных элементов (Al_2O_3 (51,3%), Fe_2O_3 (7,17%), SiO_2 (1,7%) и TiO_2 (4,54%)) на месторождении указывают на то, что бокситы Миним-Мартапа соответствуют стандарту мирового класса по их содержанию ($A1_2O_3$ (40–60%), Fe_2O_3 (менее 10%) и SiO_2 (менее 8% вместе взятого)). При этом количество примесей очень небольшое по сравнению с мировыми стандартными требованиями к высококачественным бокситам. К распространенным микроэлементам относятся Zr, Ce, Sr, V, Ba, Nd, Ga и Nb.

Месторождение Галео-Даниэлле является одним из 11 плато бокситового района Миним-Мартап и относится к латеритным корам выветривания. Плато находится на высоте 1294 м над уровнем моря, а мощность бокситового горизонта составляет от 3 до 30 м.

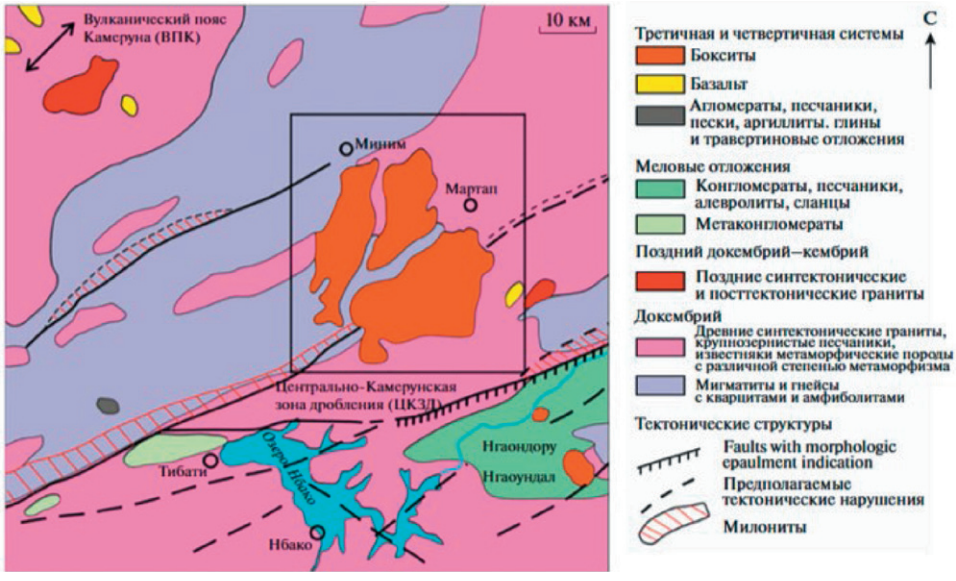


РИС. 3.

Геологическая карта бокситоносного района Миним-Мартап [14]

В 2021 г. сообщалось, что австралийская компания Canyon Resources завершила разведку месторождений бокситов в регионе Адамава, включая месторождение Галео-Даниэлле. В июле 2018 г. компания получила от правительства Камеруна три лицензии на разведку и добычу полезных ископаемых. Однако на момент 2026 г. нет сведений о разработке этого месторождения.

С 13 сентября 2024 г. компания Camalco (камерунская дочерняя компания австралийской горнодобывающей junior-компании Canyon Resources) объявила, что геологические, геохимические, геотехнические, экономические, логистические, экологические и социальные исследования подтвердили, что проект Миним-Мартап является одним из самых богатых месторождений бокситов в мире.

Компания Canyon Resources представила проект по разработке бокситов Миним-Мартап, в рамках которого добычные операции предлагается вести на трех плато – Беатрис, Галео-Даниэлле и Раймонд, с использованием поверхностных горных машин для производства продукта из бокситов DSO с содержанием примерно 51,3% общего глинозема (Al_2O_3) и 1,7% общего кремнезема (SiO_2).

Благодаря низкому содержанию кремнезема (1,7%) в бокситах ограничивается образование побочных продуктов обескремнивания (ППО или DSP) в процессе Байера, что влияет на качество конечного продукта, обеспечивая низкую загрязненность глинозема и позволяя получать глинозем сортности «smelter grade» (99,5% Al_2O_3). Важно отметить, что за счет снижения потребления едкого натра и потерь глинозема, связанных с осаждением силикатов, может быть улучшена эффективность процесса плавки алюминия, что, в свою очередь, повышает производительность завода и снижает себестоимость производства.

Также сокращение образования ППО, как известно, приводит к уменьшению количества отходов и, следовательно, к меньшему воздействию на окружающую среду, и снижает или даже устраняет необходимость управления экологическими проблемами, связанными с шламовыми отходами (красный шлам), которые являются основными остатками переработки бокситов [15].

Тем не менее, является дискуссионной возможность обогащения этих бокситов с применением процесса Байера. Поскольку, как известно, боксит, квалифицируемый как высококачественный для этого процесса, должен содержать ≥60% Al_2O_3. Это означает, что боксит с содержанием около 51% потребует значительно больших объемов добычи руды для получения всего лишь половины количества глинозема по сравнению с действительно высококачественным бокситом, и, к сожалению, это приведет к увеличению расходов и затрат на обогащение.

Но особенность этих богатых глиноземом и бедных кремнеземом бокситов, заключается в их пригодности для других процессов, кроме Байера, таких как процесс Педерсена, который позволяет извлекать глинозем без образования отходов, способствуя утилизации железа и кальция в рамках единой операции [5].

Компаниями Camrail и Camalco также будет осуществлена модернизация инфраструктуры на севере Камеруна в рамках подготовки к предстоящей промышленной разработке бокситового месторождения Миним-Мартап, расположенного в регионе Адамава.

Национальный железнодорожный перевозчик и концессионер Camrail отчитался о вложениях, превышающих 457 млн евро, которые были направлены на усовершенствование путевого хозяйства, инфраструктуры и подвижного состава с момента подписания соглашения. Проводимые мероприятия призваны обеспечить рост надежности железнодорожных магистралей, повышение уровня эксплуатационной безопасности и увеличение их провозной возможности для грузового сообщения.

Взаимодействие с горнодобывающим предприятием Camalco представляет собой этап подготовки к организации долгосрочных поставок сырья из внутренних районов добычи в порты. Партнеры планируют сделать железнодорожные перевозки ключевым звеном в будущей экспортной логистике бокситов.

Помимо Миним-Мартап крупной бокситоносной провинцией является Фонго-Тонго, расположенная в высокогорной части Западного Камеруна. По генезису – это латеритные бокситы, в которых основными минералами являются гиббсит и гетит. Латеритный боксит Фонго-Тонго отличается высоким содержанием глинозема (от 37,4 до 57,5% по массе) при относительно низком содержании Fe_2O_3 (<29,5% по массе) и низким содержанием примесей: TiO_2 (<7,5% по массе) и SiO_2 (0,48–3,21% по массе), что делает его важным с точки зрения металлогении источником сырья для алюминиевой промышленности. В составе бокситов присутствуют также микропримеси в следующих концентрациях (ppm): Zr (504–2310), Nb (104–350), Sr (0,7–345), V (8–667), Ce (24,9–239), La (2,4–144) и Nd (3,1–126) [10].

Кроме перечисленных крупных провинций, в стране есть ряд более мелких. Так, в районе Бангем (юго-западная часть Камеруна) разведанные запасы бокситовой руды составляют 19 млн т., а прогнозные ресурсы – 30 млн т. Также, по оценкам государственной горнодобывающей компании Камеруна CAPAM в провинции Фумбан (Западный регион) сосредоточено порядка 4 млн т алюминиевой руды [17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Россия является одним из крупнейших экспортеров алюминия на мировой рынок, но из-за нехватки собственного сырья компании закупают бокситы и глинозем за рубежом, в основном в Китае.

Себестоимость добычи и переработки камерунских бокситов является конкурентной, их ключевое преимущество перед российскими аналогами заключается в высоком качестве. Российские бокситы, как правило, характеризуются низким качеством, в то время как камерунские месторождения, такие как Миним-Мартап и Нгаундаль, содержат высококачественные руды с концентрацией оксида алюминия (Al_2O_3) 40–60% и выше.

В этой связи представляется стратегически обоснованным укрепление и расширение позиций в области освоения богатых месторождений бокситов именно Камеруна, с параллельной организацией на территории страны производства глинозема. Такой подход соответствует долгосрочным тенденциям, а также потенциальным требованиям местного законодательства о развитии глубокой переработки сырья. Экономическая целесообразность подтверждается значительной разницей в стоимости продукции передела: одна тонна глинозема оценивается примерно в 10 раз дороже, чем одна тонна бокситов, а тонна алюминия – в 50 раз дороже.

Дополнительный экономический эффект достигается за счет оптимизации логистических расходов. Транспортировка глинозема для последующей выплавки алюминия существенно выгоднее перевозки эквивалентного по объему выпуска металла количества бокситовой руды. Таким образом, камерунские бокситы и производимый на месте глинозем способны обеспечить потребности по более выгодным ценам по сравнению с другими зарубежными поставщиками.

Проведенный анализ показывает, что бокситовые ресурсы Камеруна представляют собой один из наиболее перспективных источников алюминиевого сырья в Центральной Африке. Месторождения Миним-Мартап, Фонго-Тонго и Нгаундаль характеризуются значительными ресурсными объемами и благоприятными геохимическими параметрами, прежде всего высоким содержанием Al_2O_3 и относительно низкими концентрациями вредных примесей. Это позволяет отнести их к сырью, потенциально пригодному для промышленного освоения для производства глинозема и дальнейшего алюминиевого передела. Сопоставление с альтернативными источниками, включая отдельные российские бокситы, подтверждает конкурентоспособность камерунского сырья по качественным и экономико-геологическим признакам.

Результаты исследования имеют прикладное значение для формирования минерально-сырьевой стратегии Камеруна. Освоение бокситовых месторождений может стать основой для развития полного производственного цикла – от добычи сырья до выпуска глинозема и, в перспективе, первичного алюминия. Это способно усилить экспортный потенциал страны, расширить налоговую базу, создать новые рабочие места и стимулировать развитие транспортной и энергетической инфраструктуры. С точки зрения минерально-сырьевой политики приоритетными направлениями должны стать: ускорение геологоразведочных работ, уточнение ресурсной базы, развитие логистических коридоров к районам добычи и привлечение инвестиций в переработку сырья внутри страны, а не только в сырьевой экспорт. Такой подход позволит повысить добавленную стоимость в национальной экономике и снизить зависимость от внешней конъюнктуры рынка сырья.

Следует отметить, что настоящее исследование носит обзорно-аналитический характер и основано преимущественно на данных открытых источников, опубликованных геологических отчетов и вторичных статистических материалов. Отсутствие единой актуализированной базы по всем рассматриваемым месторождениям, а также различия в методиках опробования, аналитического контроля и оценки запасов в исходных публикациях могут влиять на сопоставимость отдельных показателей. Кроме того, экономические выводы о целесообразности освоения месторождений имеют предварительный характер, поскольку не включают детализированный расчет капитальных и операционных затрат, логистических издержек, параметров обогащения и переработки по каждому месторождению, экологических рисков и сценариев изменения мировых цен. В связи с этим полученные результаты следует рассматривать как оценочные, требующие дальнейшей верификации на основе детальных технико-экономических исследований, и как основу для последующих специализированных геолого-экономических и технико-экономических исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Большая российская энциклопедия. География, 2023. https://old.bigenc.ru/geography/text/2038869
2. **Калинина Л.П.** Алюминиевое сырье Африки / Федеральное государственное бюджетное учреждение науки. Институт Африки Российской академии наук, 2010. https://www.inafran.ru/node/58?ysclid=mrm3pu9f3801741550
3. **Ephraïm N'Doumbé Kanga.** The geology and mineral resources of Cameroon. In Geological Surveys in West and Central Africa // Springer Berlin Heidelberg. 2015. P. 221–234.
4. **Faugeras P.A. et al.** Bauxite deposits in the western part of Central Africa. In Handbook of African Bauxites // Springer Nature Switzerland AG. 2018. P. 251–260.
5. https://smartlab.news/read/163901-mirovye-ceny-na-aliuminii-rastut-na-fone-uveliceniia-sprosa-i-szatiia-predlozeniia-the-financial-times
6. https://sciencejournals.ru/issues/lit/2020/vol_2020/iss_3/Lit2003004Nyamsari/Lit2003004Nyamsari-F1.gif
7. https://yandex.ru/search/?text=%D1%81%D1%82%

D0%BE%D0%B8%D0%BC%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C+%D0%B1%D0%BE%D0%BA%D1%81%D0%B8%D1%82%D0%BE%D0%B2%2C&lr=213&clid=2233626&src=suggest_Pers
8. https://dzen.ru/a/aYnOeNSrMzjMzFeC
9. https://www.expertmarketresearch.com/price-forecast/aluminium-oxide-price-trends
10. https://www.verifiedmarketreports.com/ru/product/global-alumina-market/
11. https://ru.investing.com/commodities/aluminum-historical-data
12. https://dzen.ru/a/Zg4KEb4mfAdAhlFt
13. https://www.researchgate.net/figure/Sketch-geological-map-of-Cameroon-adapted-from-38-Oubanguide-Complex-NCSG-Northern_fig2_349027253
14. **Lemougna P.N. et al.** Characteristics and Potential Applications of Red Mud Derived from Minim Martap Bauxite Deposits, Cameroon // Journal of Materials and Environmental Science. 2023. Vol. 14. N 2. P. 14–22.
15. **Mbangue C.D.P. et al.** Preparation and characterization of red mud derived from minim martap bauxite. Academia.edu. 2016. P. 9–16.
16. **Nyamsari J. et al.** Bauxites from Cameroon: A Review of Their Mineralogy and Geochemistry //Science Journal. 2020. №3. P. 4–16.
17. **Nyamsaria D.G., Yalcina M.G., Вольфсон И.Ф.** Изменения, химические процессы и материнские породы бокситов плато Галео-Даниэлле (провинция Адамава, Камерун) // Литология и полезные ископаемые. 2020. № 3. С. 272–286.
18. **Tchamba A.B. et al.** Phase and microstructural evolution during densification of bauxite of Haleo-Danielle Minim-Martap Cameroon between 1000° C and 1600° C // International Journal of Materials Science, 2014. Vol. 6. N 1. P. 89–100.
19. **Tchiroma Ngongang L.C.** Alumina Production in Cameroon: Challenges and Opportunities / Aluminium Industry in Africa. Springer International Publishing, 2019. P. 615–630.
20. **Wikander O.** Early Use of Water-Powered Machinery for Mining and Metallurgy / The Cambridge History of Technology. Cambridge University Press. 2004. Vol. I. P. 137–154.
21. **Zainudeen N.M., Mohammed L., Nyamful A., Adotey D., Osae S.K.** A comparative review of the mineralogical and chemical composition of African major bauxite deposits // Heliyon. 2023. Vol. e19070. P. 1–22.

REFERENCES

1. The Great Russian Encyclopedia. Geography, 2023. https://old.bigenc.ru/geography/text/2038869 (In Russian).
2. **Kalinina L.P.** Aluminum Raw Materials of Africa / Federal State Budgetary Scientific Institution. Institute for African Studies, Russian Academy of Sciences, 2010. https://www.inafran.ru/node/58?ysclid=mrm3pu9f3801741550 (In Russian).
3. **Ephraïm N'Doumbé Kanga.** The geology and mineral resources of Cameroon. In Geological Surveys in West and Central Africa. *Springer Berlin Heidelberg.* 2015:221–234.
4. **Faugeras P.A. et al.** Bauxite deposits in the western part of Central Africa. In Handbook of African Bauxites. *Springer Nature Switzerland AG*. 2018:251–260.
5. https://smartlab.news/read/163901-mirovye-ceny-na-aliuminii-rastut-na-fone-uveliceniia-sprosa-i-szatiia-predlozeniia-the-financial-times
6. https://sciencejournals.ru/issues/lit/2020/vol_2020/iss_3/Lit2003004Nyamsari/Lit2003004Nyamsari-F1.gif
7. https://yandex.ru/search/?text=%D1%81%D1%82%D0%BE%D0%B8%D0%BC%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C+%D0%B1%D0%BE%D0%BA%D1%81%D0%B8%D1%82%D0%BE%D0%B2%2C&lr=213&clid=2233626&src=suggest_Pers
8. https://dzen.ru/a/aYnOeNSrMzjMzFeC
9. https://www.expertmarketresearch.com/price-forecast/aluminium-oxide-price-trends
10. https://www.verifiedmarketreports.com/ru/product/global-alumina-market/
11. https://ru.investing.com/commodities/aluminum-historical-data
12. https://dzen.ru/a/Zg4KEb4mfAdAhlFt
13. https://www.researchgate.net/figure/Sketch-geological-map-of-Cameroon-adapted-from-38-Oubanguide-Complex-NCSG-Northern_fig2_349027253
14. **Lemougna P.N. et al.** Characteristics and Potential Applications of Red Mud Derived from Minim Martap Bauxite Deposits, Cameroon. *Journal of Materials and Environmental Science.* 2023;14;(2):14–22.
15. **Mbangue C.D.P. et al.** Preparation and characterization of red mud derived from minim martap bauxite. Academia.edu. 2016. P. 9–16.
16. **Nyamsari J. et al.** Bauxites from Cameroon: A Review of Their Mineralogy and Geochemistry. *Science Journal*. 2020;3:4–16.
17. **Nyamsaria D.G., Yalcina M.G., Wolfson I.F.** Alterations, chemical processes and source rocks of bauxites of the Galeo-Danielle plateau (Adamawa province, Cameroon). *Litologiya i poleznyye iskopayemyye*. 2020;3:272–286. (In Russian).
18. **Tchamba A.B. et al.** Phase and microstructural evolution during densification of bauxite of Haleo-Danielle Minim-Martap Cameroon between 1000° C and 1600° C. *International Journal of Materials Science*. 2014;6;(1): 89–100.
19. **Tchiroma Ngongang L.C.** Alumina Production in Cameroon: Challenges and Opportunities. Aluminium Industry in Africa. Springer International Publishing, 2019:615–630.

20. **Wikander O.** Early Use of Water-Powered Machinery for Mining and Metallurgy / The Cambridge History of Technology. Cambridge University Press. 2004. Vol. I. P. 137–154.
21. **Zainudeen N.M., Mohammed L., Nyamful A., Adotey D., Osae S.K.** A comparative review of the mineralogical and chemical composition of African major bauxite deposits. *Heliyon*. 2023;e19070:1–22.

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

115419, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3,
115419, Moscow, st. Ordzhonikidze, 3,
e-mail: rasskasov_aa@pfur.ru

Георгиевский Алексей Федорович,
к.г.-м.н., доцент Департамента недропользования и нефтегазового дела Инженерной академии Российского университета дружбы народов

115419, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3,
115419, Moscow, st. Ordzhonikidze, 3,
e-mail: georgievskiy-af@rudn.ru

Карелина Елена Викторовна,
к.г.-м.н., доцент Департамента недропользования и нефтегазового дела Инженерной академии Российского университета дружбы народов

115419, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3,
115419, Moscow, st. Ordzhonikidze, 3,
e-mail: karelina_ev@pfur.ru

Назарова Алиса-Мария Андреевна,
студентка специалитета по направлению Прикладная геология кафедры недропользования и нефтегазового дела Инженерной академии Российского университета дружбы народов

115419, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3,
115419, Moscow, st. Ordzhonikidze, 3,
e-mail: alisan05@list.ru

Морозова Татьяна Петровна,
к.г.-м.н., доцент кафедры месторождений полезных ископаемых Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе

117485, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23,
117485, Moscow, Miklukho-Maklaya st., 23,
e-mail: morozovatp@mgri.ru

Эиоман Зе Амандин Линда,
студент магистратуры по направлению Инновационные методы в геологии кафедры недропользования и нефтегазового дела Инженерной академии Российского университета дружбы народов

115419, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3,
115419, Moscow, st. Ordzhonikidze, 3,
e-mail: lyndazeh97@icloud.com

УДК 622.85:336.763.3(470)
DOI: 10.52531/1682-1696-2026-26-3-76-91
EDN: QVWJDB
Научная статья

ФИНАНСОВЫЕ ИСТОЧНИКИ СТИМУЛИРОВАНИЯ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОГЕННЫХ ОТВАЛОВ В РАМКАХ ПОЛИТИКИ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ РЕГИОНОВ

В.Е. Черняков
Акционерная золотодобывающая компания «Золото Якутии» (Москва, Россия)

Устойчивое развитие горнопромышленных регионов России сдерживается тем, что накопленные техногенно-минеральные образования – отвалы, хвостохранилища, золошлаковые накопители – рассматриваются преимущественно как объект экологического вреда, тогда как заключенный в них ресурсный и финансовый потенциал остается недооцененным. По официальным данным, отходы горнодобывающего сектора страны превысили в 2025 г. 9 млрд т, а в них может содержаться до 10 тыс. т золота, 12 тыс. т серебра, 500 тыс. т олова и 8 млн т меди. Статья обосновывает целесообразность специализированного долгового инструмента – облигаций устойчивого развития горнодобывающих компаний, средства от размещения которых направляются на переработку техногенно-минеральных образований, и показывает, что такой инструмент порождает экономический, экологический, социальный и управленческий эффект, рассматриваемый как единый мультипликативный эффект регионального развития.

Ключевые слова: *техногенно-минеральные образования, техногенные отвалы, хвостохранилища, устойчивое развитие регионов, ESG-облигации, зеленые облигации, переходные облигации, рекультивация, критические металлы, мультипликативный эффект, индекс техногенной инвестиционной привлекательности, преференциальные режимы, горнопромышленный комплекс*

Original article

FINANCIAL SOURCES FOR STIMULATING THE DEVELOPMENT OF TECHNOGENIC MINE WASTE DUMPS WITHIN THE FRAMEWORK OF REGIONAL SUSTAINABLE DEVELOPMENT POLICY

V.E. Chernyakov
Joint-Stock Gold Mining Company "Gold of Yakutia" (Moscow, Russia)

The sustainable development of Russia's mining regions is constrained by the fact that accumulated technogenic mineral formations – waste dumps, tailings storage facilities, ash-and-slag deposits – are treated mainly as environmental liabilities, while their resource and financial potential remains underestimated. Mining-sector waste exceeded 9 billion tonnes in 2025 and is estimated to contain up to 10 thousand tonnes of gold, 12 thousand tonnes of silver, 500 thousand tonnes of tin and 8 million tonnes of copper. The article argues for a specialised debt instrument – sustainability bonds whose proceeds are directed toward reprocessing such formations – and shows that this instrument generates an economic, environmental, social and governance effect, treated as a single multiplicative effect of regional development.

Key words: *technogenic mineral formations, mine waste dumps, tailings, sustainable regional development, ESG bonds, green bonds, transition bonds, land reclamation, critical metals, multiplicative effect, technogenic investment attractiveness index, preferential regimes, mining industry*

ВВЕДЕНИЕ

Одной из особенностей современной российской горнодобывающей промышленности является то, что истощение рентабельных для первичной отработки участков месторождений происходит одновременно с накоплением значительного, но системно неучтенного фонда техногенно-минеральных образований (ТМО), которые по вещественному составу и экономической ценности нередко превосходят отдельные балансовые запасы месторождения, однако не вовлекаются в оборот из-за отсутствия адаптированных под их специфику финансовых инструментов. Отраслевые оценки накопленного объема расходятся в разы: одни источники называют порядка 40 млрд т при ежегодном приросте свыше 4,8 млрд т [15], другие – 80–100 млрд т за весь период работы отрасли. Детальная региональная инвентаризация, проведенная в Свердловской области, выявила 188 самостоятельных техногенных объектов на 66 предприятиях с суммарными запасами свыше 8,5 млрд т [23] – такое расхождение свидетельствует об отсутствии единого федерального реестра,

© 2026, В.Е. Черняков
Поступила в редакцию 24.08.2026

без которого ни институт развития, ни организатор облигационного займа не в состоянии сформировать надежное представление ни об объеме залоговой базы, ни о содержании в ней полезных компонентов. По более поздним официальным данным, отходы горнодобывающего сектора страны превысили в 2025 г. 9 млрд т, а содержащиеся в них запасы металлов оцениваются в 10 тыс. т золота, 12 тыс. т серебра, 500 тыс. т олова и 8 млн т меди [20].

Между тем именно содержание, а не сам факт присутствия металла в отвале, определяет инвестиционную привлекательность проекта, поскольку технологические потери, закономерно попадающие в отвалы при добыче, составляют от 10–15% разведанных запасов на месторождениях простого строения и до 30–50% – на месторождениях сложного строения [5]. Значит в техногенном объекте по геологическим, а не только техническим причинам оказывается сырье, извлечение которого требует принципиально иных технологических решений, чем переработка первичной руды. Эта закономерность подтверждается и обратным примером: в углях Подмосковного угольного бассейна зафиксированы измеримые концентрации галлия, иттрия, лантана, церия и скандия, достигающие 213 г/т по цинку и 85 г/т по иттрию [22], однако, по прямой оценке регионального министерства, эта концентрация оказалась недостаточной для того, чтобы инвесторы сочли извлечение редких земель из местных золошлаков экономически целесообразным при сложившейся рыночной конъюнктуре [34]. Отсюда следует принципиальный для настоящей статьи вывод: финансовый инструмент, обслуживающий разработку ТМО, не может быть универсальным и должен явно учитывать, какой именно компонент совокупного эффекта – стоимость извлекаемого полезного компонента, предотвращенный экологический ущерб или социальная выгода для территории – определяет рентабельность конкретного объекта.

Нормативную основу вовлечения ТМО в оборот через инструменты устойчивого финансирования формируют Постановление Правительства РФ № 1587, устанавливающее критерии проектов устойчивого развития, требования к системе верификации соответствующих финансовых инструментов [29], Положение Банка России № 706-П в части особенностей эмиссии облигаций, направленных на финансирование природоохранных проектов [20]. Международным ориентиром выступают принципы ICMA и таксономия ВЭБ.РФ, на которые прямо опирается российское регулирование [19]. При этом действующее законодательство о недрах исторически формировалось применительно к первичной добыче и не учитывает двойственный правовой статус техногенного объекта, одновременно являющегося источником накопленного вреда и источником минерального сырья, что порождает существенную правовую неопределенность для потенциальных инвесторов и институтов развития [38].

Мировая горнодобывающая отрасль демонстрирует устойчивый тренд на интеграцию ESG-принципов во все звенья производственной цепочки, а успешность отдельных проектов все в большей степени определяется способностью компании подтвердить ответственное отношение к окружающей среде и социальной сфере территории присутствия. Российский рынок устойчивого финансирования продолжает расти: объем выпуска ESG-облигаций в 2023 г. составил 142,8 млрд руб., что на 34,5% больше показателя предыдущего года [27]. Вместе с тем ни отечественная, ни зарубежная литература по устойчивому финансированию не предлагает отраслевого фреймворка, который связывал бы геологическую неоднородность ТМО с выбором конкретного долгового инструмента. Технологическая база вовлечения техногенного сырья в переработку раскрыта применительно к отдельным типам объектов – извлечению цветных и благородных металлов из хвостов медно-никелевых руд [35], геохимии платиноидов, золота и серебра в породах сульфидной Cu–Ni формации [40], выщелачиванию золота неоцианистыми растворителями [13], обогащению россыпей шлюзовыми установками [14], управлению геологическими процессами в теле ТМО [18] и переработке золошлаковых отходов [17, 18], тогда как вопросы финансового структурирования [16] рассматриваются в отрыве от этой геологической специфики. Аналогичный разрыв фиксируется и в зарубежных источниках: техническая реализуемость извлечения критических минералов из хвостохранилищ [25, 26], роль ESG-фондов в финансировании энергоперехода [42] и практика тематических облигаций для ответственной добычи [43] анализируются как самостоятельные сюжеты, вне связи с неоднородностью геолого-промышленного профиля объектов. Устранение этого разрыва и составляет основную задачу настоящего исследования.

Цель настоящей статьи – разработать и обосновать модель финансового стимулирования освоения ТМО, которая связывает геологическую, минералого-технологическую и региональную специфику техногенного объекта с выбором финансового инструмента его освоения, распределением риска между бюджетным и рыночным контурами и оценкой мультипликативного эффекта для устойчивого развития региона. Достижение цели потребовало решения нескольких взаимосвязанных задач: систематизации геологической и минералого-технологической характеристики ТМО как объекта, принципиально отличного от первичного месторождения; формализации мультипликативного эффекта его разработки и построения авторского скринин-

гового индекса инвестиционной привлекательности; описания методики финансового структурирования облигационного выпуска применительно к проектам комплексной глубокой переработки техногенного сырья; проверки предложенной модели на пяти пилотных регионах с различным профилем накопленных техногенных образований; и, наконец, формулирования институциональных барьеров, ограничивающих практическое применение модели, включая уже действующий прецедент упрощенного лицензирования геологического изучения техногенных объектов, примененный в 2023 г. к Кючусскому рудному полю в Якутии [4].

МЕТОДЫ И ПОДХОДЫ

Исследование опирается на сочетание нормативно-правового, сравнительного и модельного методов. Нормативно-правовой анализ применен для систематизации требований к проектам устойчивого развития и верификации финансирующих их инструментов в соответствии с российской таксономией [5, 6] и международными принципами устойчивого финансирования. Сравнительный метод применен к пяти регионам, отобранным по критерию контрастности геолого-промышленного профиля, а не по критерию наибольшей изученности объекта, поскольку типичная ошибка отраслевых обзоров состоит в иллюстрации предлагаемой методики исключительно благоприятными примерами, тогда как задачей настоящей работы было проверить модель и на объекте, экономика которого находится вблизи порога рентабельности.

Модельный метод использован для формализации мультипликативного эффекта разработки ТМО и авторского индекса техногенной инвестиционной привлекательности, а также для развития ранее предложенной автором методики [37] структурирования облигационных выпусков ESG-сегмента применительно к проектам переработки техногенного сырья (формулы расчета капитальных затрат, обслуживания долга и экологических ключевых показателей эффективности). Отдельно необходимо оговорить ограничение исследования: там, где отраслевая литература не предоставляет прямых данных о содержании ценного компонента непосредственно в складированном материале – в первую очередь применительно к отвалам комбината «Печенганикель» и солеотвалам Верхнекамского месторождения, для которых в открытом доступе имеются сведения по рудам и нормативам образования отходов, но не по фактическому содержанию металлов в отвале – количественные параметры обозначены как оценочные по геологической аналогии и подлежат замене на данные Государственной комиссии по запасам полезных ископаемых и технологических испытаний при переходе к стадии проектного финансирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Геологическая и минералого-технологическая характеристика ТМО как объекта освоения

Техногенно-минеральное образование отличается от первичного месторождения по трем взаимосвязанным параметрам, которые в совокупности определяют финансовую модель проекта его освоения. Понимание этих различий составляет необходимую предпосылку корректного структурирования любого облигационного выпуска в данном сегменте.

Первое отличие касается содержания полезных компонентов, которое в техногенном объекте закономерно ниже, чем в исходной руде, поскольку в отвал попадает уже частично выработанное или технологически не извлеченное сырье. В сульфидных медно-никелевых рудах, генетически связанных с дифференцированными базит-гипербазитовыми массивами, содержание никеля варьирует от 0,25 до 4,5%, а на комбинате «Печенганикель» бедные руды с содержанием никеля 0,5–0,6% составляют 95% запасов, тогда как богатые руды с содержанием 12,4% – лишь 5% [21], и возможности вовлечения накопленных отходов региона в оборот отдельно рассмотрены применительно именно к Мурманской области [6]. В хвостах обогащения аналогичных по генезису руд Норильского промышленного района содержание падает на один–два порядка, а основными полезными компонентами шламовой фракции становятся уже не никель и медь, а платина и палладий, тогда как золото, медь и никель переходят в разряд попутных [35], что согласуется с геохимическими данными о концентрации платиноидов, золота и серебра во вмещающих интрузивных породах того же рудного узла [40]. Схожая, хотя количественно еще более выраженная закономерность, прослеживается и на золоте: в неотработанной россыпи руч. Кебиргэл-Юрэгэ Усть-Янского улуса содержание составляет порядка 1,07 г/м^3 при запасах 78 кг [9], тогда как в эфельных отвалах шлюзовых промывочных приборов, не обеспечивших полного извлечения мелкой фракции, оно снижается до 0,080–0,378 г/м^3, то есть в три–тринадцать раз [39], и тем не менее переработка таких объектов зачастую остается рентабельной за счет того, что материал уже добыт, раздроблен и не требует затрат на вскрышные работы.

Второе отличие связано с минералого-геохимической зональностью, которая формируется по мере того, как техногенный объект, находясь на дневной поверхности десятилетиями, подвергается гипергенному изменению под воздействием атмосферы, осадков, технологических вод и жизнедеятельности микроорганизмов, процесс, который применительно к твердой и гидроминеральной частям ТМО закономерно описывается в геологической литературе как техногеогенез [18]. Наиболее детально этот процесс исследован на хвостохранилищах Дальнегорского района Приморского края, где разрабаты-

ваются скарново-полиметаллические месторождения свинцово-цинковых руд: в результате окисления сульфидов на поверхности и в толще хвостов кристаллизуются новообразованные вторичные минералы – гетит, гидрогетит, гипс, эпсомит, ярозит, халькантит, брошантит, англезит, плюмбоярозит, адамин и монтмориллонит, а соотношение сульфидов и вмещающей породы прямо определяет минеральный состав новообразований [33]. Схожая закономерность зафиксирована и для распределения золота по объему хвостохранилищ золотоизвлекательных фабрик в целом: содержание возрастает с глубиной по сравнению с окисленными верхними слоями, максимальные концентрации приурочены к зонам, ближайшим к обогатительной фабрике, а по периметру объекта формируется обогащенная приплотинная полоса [24] (рис. 1), откуда следует важное практическое правило: опробование и технико-экономическое обоснование проекта переработки ТМО должны строиться на объемном, а не на поверхностном опробовании, поскольку иначе оценка содержания будет систематически смещена в зависимости от того, где именно отобраны пробы.

Третье отличие заключается в неоднородности вещественного состава вмещающей массы: если первичная руда добывается селективно, в контуре подсчитанных запасов, то отвал представляет собой механическую смесь рудного и нерудного материала – вскрышных, эфельных, галечных и смешанных разновидностей, зачастую неоднократно перемытых на старых объектах (на месторождении Юрское в Якутии в границах одного лицензионного контура выявлено 72 отдельных техногенных отвала четырех генетических типов [39]), из чего следует, что технологическая схема переработки ТМО почти никогда не повторяет схему переработки первичной руды: для

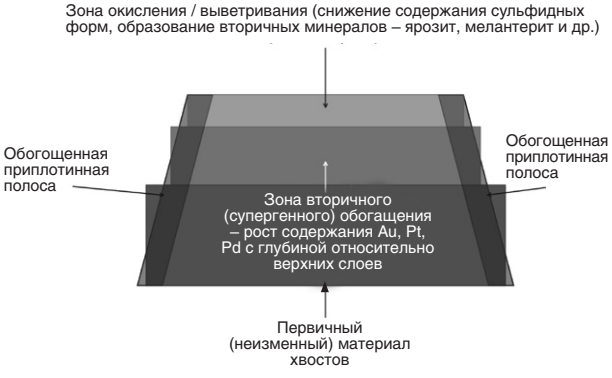


РИС. 1.

Принципиальная схема вертикальной зональности техногенного минерального образования по данным опробования лежалых хвостов золотоизвлекательных фабрик [24] и исследований гипергенного изменения хвостов Sn-Ag-Pb-Zn руд [33]. *Источник:* составлено автором

сульфидных отвалов актуальны гравитационное доизвлечение платиноидов до операции флотации [32] и выщелачивание неоцианистыми растворителями [13], для полиметаллических хвостов – селективное вскрытие вторичных минералов, а для золошлаков – либо прямое вовлечение в строительную промышленность без металлургического передела [1], либо, при достаточной концентрации редких элементов, попутное извлечение галлия, скандия, иттрия и лантаноидов [22].

Отдельного упоминания заслуживает случай, когда источником техногенного минерального сырья выступает не отвал вскрышных пород или хвостохранилище в узком смысле, а побочный продукт последующего металлургического передела апатитового концентрата – фосфогипс, ежегодно накапливаемый в отвалах при сернокислотной переработке апатит-нефелиновых руд Хибинской группы месторождений Мурманской области. Редкоземельные металлы, содержание которых в апатите составляет около 1%, при такой переработке распределяются между экстракционной фосфорной кислотой (около 20%) и фосфогипсом (около 80%), который складируется как твердые отходы производства [26], а значит именно отвалы фосфогипса, а не первичная руда, концентрируют основную массу редкоземельного сырья, теоретически доступного для попутного извлечения. Показательно, что практика такого извлечения в России развивается неравномерно: установка по выпуску разделенных редкоземельных металлов из фосфогипса на предприятии ПАО «Акрон», запущенная в 2016 г., была остановлена в 2021 г. из-за отрицательной рентабельности, успев произвести за время работы 313,3 т продукции в пересчете на оксиды [26]. А проект ООО «Скайград Инновации» получил в 2023 г. заем Фонда развития промышленности в размере 865 млн руб. на строительство завода по переработке фосфогипса мощностью 60 тыс. т сырья в год с получением 180–200 т концентрата редкоземельных металлов [19]. АО «АРМЗ» (с 2024 г. – АО «Росатом Недра») по результатам детального аудита технологий переработки фосфогипсового сырья оценило потенциальную производительность профильного комбината в 4 тыс. т редкоземельных металлов в год [26]. Это сосуществование остановленного из-за нерентабельности проекта и параллельно развивающихся новых производств на том же типе техногенного сырья служит прямым эмпирическим подтверждением тезиса, вынесенного во введение настоящей статьи: экономическая ценность ТМО не является ни постоянной, ни автоматической величиной, а зависит от технологии извлечения, масштаба перерабатывающих мощностей и конъюнктуры конкретного момента, что и оправдывает применение предлагаемого ниже скрининговогo индекса, а не единого решения по всем объектам сразу.

В таблице 1 систематизированы основные типы ТМО, рассмотренные в статье, с указанием домини-

ТАБЛИЦА 1.
Геолого-технологическая типизация рассмотренных объектов ТМО

Тип объекта	Регион / объект	Доминирующие компоненты	Содержание в ТМО (по опубл. данным)	Источник
Хвосты сульфидных Cu–Ni руд	Мурманская обл., «Печенганикель» (по аналогии с Норильским промрайоном)	Pt, Pd (осн.); Au, Cu, Ni (попутные)	н/д по конкретному объекту; в рудах Ni 0,5–0,6% (бедные, 95 % запасов) / 12,4% (богатые, 5 % запасов)	[8, 29]
Фосфогипсовые ТМО апатитовой промышленности	Мурманская обл., отвалы АО «Апатит» и АО «СЗФК»	РЗМ (попутно, La, Ce, Nd, Pr и др.)	~1 % РЗМ в исходном апатите; ок. 80% переходит в фосфогипс	[26]
Техногенные золотоносные россыпи и эфеля	Респ. Саха (Якутия), Усть-Янский улус, Куларский район	Au	0,080–0,378 г/м^3 (эфельные отвалы); 1,07 г/м^3 (россыпь-аналог, руч. Кебиргэл-Юрэгэ)	Геологические данные
Хвосты скарново-полиметаллических Pb–Zn–Ag руд	Приморский край, Дальнегорский район	Pb, Zn, Ag; попутно Au, Pt, Pd	Содержание в жильных телах: Pb 0,02–2,55%, Zn 0,02–2,13%, Ag до 3315,7 г/т; в хвостах — существенный неизвлеченный остаток при извлечении 92–98% (Pb, Zn) и 80–85% (Ag)	[33]
Золошлаковые отходы угледобычи	Тульская обл., Подмосковный угольный бассейн	Ga, Zn, Y, La, Ce, Sc, Ta (попутно)	Ga 20–40 г/т; Zn 20–213 г/т; Y 15–85 г/т; La 13–50 г/т; Ce 30–50 г/т; Sc до 19 г/т; Ta до 10 г/т	Геологические данные
Солеотвалы и шламохранилища калийного производства	Пермский край, Верхнекамское м-ние	KCl (товарная соль), MgCl2	3,5–4,5 т галитовых отходов + 0,1–0,5 т глинисто-солевых шламов на 1 т KCl	[12]
Кислые шахтные воды и отвалы ликвидированной угледобычи	Пермский край, Кизеловский угольный бассейн	Fe, Al, SO4 (загрязнители, не сырье)	Изливы кислых вод 25–45 млн м^3/год; отвалы вскрышных пород на площади свыше 110 га	[7, 8]

рующих компонентов и содержания по опубликованным данным.

Экономико-правовые основы финансового стимулирования

Действующая в РФ система финансового стимулирования разработки ТМО складывается из трех взаимодополняющих контуров. Бюджетный контур включает инвестиционный налоговый вычет по капитальным вложениям в перерабатывающее и природоохранное оборудование, пониженные ставки налога на добычу полезных ископаемых для отдельных категорий техногенного сырья и льготное заемное финансирование через Фонд развития промышленности, региональные фонды и профильные программы ВЭБ.РФ, однако сама конструкция этих льгот, как уже отмечалось, исторически рассчитана на первичную добычу и не учитывает двойственного статуса техногенного объекта [38].

Рыночный контур представлен зелеными, переходными облигациями, облигациями устойчивого развития и облигациями, привязанными к ключевым показателям эффективности (Sustainability-Linked Bonds), причем, выбор конкретного инструмента должен определяться тем, какой компонент мультипликативного эффекта доминирует в структуре проекта: там, где рентабельность обеспечена содержанием и рыночной стоимостью извлекаемого металла, как в якутском и приморском кейсах, уместны переходные облигации, поскольку проект по существу остается горнодобывающим, тогда как там, где рентабельность обеспечена прежде всего природоохранным и социальным эффектом при пограничной экономике самого извлечения металла, как в тульском и пермском кейсах – зеленые облигации либо облигации, привязанные к КПЭ, со ступенчатым механизмом изменения купонной ставки:

$$r_{new} = r_{base} + \Delta r,$$

где Δr — надбавка за недостижение целевого значения ключевого показателя эффективности, применяемая симметрично со снижением ставки (step-down) при его достижении. Подготовка облигационного выпуска в любом случае включает предпроектную ESG-оценку и экологический аудит территории размещения объекта (установление базового уровня), разработку ESG-фреймворка с разделом целевого использования средств (Use of Proceeds), обеспечение раздельного учета поступлений, получение независимого заключения (Second Party Opinion), юридическое оформление выпуска и последующую ежегодную отчетность по достигнутым экологическим показателям, а обязательным сквозным требованием остается принцип «не навреди» (Do No Significant Harm), закрепленный в национальной таксономии [29] и означающий при-

менительно к сульфидным и полиметаллическим отвалам необходимость контроля миграции тяжелых металлов при технологическом вскрытии описанных выше вторичных минералов.

Мультипликативный эффект и индекс техногенной инвестиционной привлекательности

Совокупный мультипликативный эффект разработки ТМО (ME) определен в настоящей работе как сумма четырех компонентов – прямого и косвенного экономического эффекта (E_{econ}), монетизированного экологического эффекта (E_{env}), социального эффекта для территории (E_{soc}) и стратегической премии за вовлечение критических металлов в оборот (E_{ec}):

$$ME = E_{econ} + E_{env} + E_{soc} + E_{sec}.$$

Экономический компонент раскрывается через массу извлеченного металла (M_{ext}, см. табл. 2, где M_{feed} – масса переработанного сырья, C_{metal} – его содержание, η_{ext} – коэффициент извлечения) и прямой экономический эффект от его реализации: $E_{econ\ direct} = M_{ext} \times P_{metal} - OPEX_{year}$. Величина и даже знак этого показателя принципиально различаются по рассмотренным кейсам: для якутского и приморского случаев компонент положителен и значим при текущих ценах на золото, серебро и цветные металлы, тогда как для тульского случая он, по прямому признанию регионального министерства, близок к нулю или отрицателен применительно к редкоземельной составляющей [34], и проект в этом случае оправдан прежде всего компонентами E_{env} и E_{soc}, а не E_{econ}, – различие, которое единая формула ME маскирует, и которое поэтому требует самостоятельного скрининговой инструмента.

Индекс техногенной инвестиционной привлекательности (ИТИП), не имеющий прямого аналога в разобранной литературе, предназначен именно для такого предварительного скрининга объектов на предпроектной стадии, до полного технико-экономического обоснования:

$$ИТИП = (C_{metal} / C_{cutoff}) \times k_{log} \times k_{sec} \times k_{pref},$$

где C_{metal} – фактическое или ожидаемое по геологической аналогии содержание ведущего компонента, C_{cutoff} – условный порог безубыточности повторной переработки при текущих ценах и уровне технологии, $k_{log} \in (0; 1)$ – коэффициент логистической доступности объекта (значение, близкое к 1, соответствует площадке, примыкающей к действующему горно-обогатительному комбинату, тогда как значения порядка 0,3–0,5 характерны для удаленных объектов Арктической зоны и Дальнего Востока без круглогодичной наземной логистики), $k_{sec} \geq 1$ – коэффициент стратегической значимости металла, принимающий значение 1 для сырья, не входящего в перечни критического и стратегического, и повышающийся до 1,2–1,5 для металлов платиновой группы, олова и редкоземельных элементов, а $k_{pref} \in [1, 16]$ – коэффициент наличия преференциальных режимов, отражающий присутствие на территории объекта территории опережающего развития, Свободного порта Владивосток, Арктической зоны РФ или иного льготного административного режима, снижающего налоговую и административную нагрузку на проект. Значение индекса выше 1 указывает на объект, самодостаточный для рыночного, преимущественно облигационного финансирования, значение в диапазоне 0,3–1 – на кандидата для блендированной схемы с существенным бюджетным участием, а значение ниже 0,3 – на объект, финансовое обоснование которого должно строиться на компонентах E_{env} и E_{soc}, а не на стоимости извлекаемого металла.

Иллюстративный расчет индекса для пяти рассмотренных кейсов приведен в таблице 3; коэффициенты C_{cutoff}, k_{log}, k_{sec} и k_{pref} заданы экспертно как условные ориентиры, демонстрирующие метод, и подлежат калибровке на исторических данных реализованных проектов при практическом применении.

Расчет объясняет ключевое расхождение выборки: даже при повышенном коэффициенте стратегической значимости, отражающем принадлежность скандия и иттрия к редкоземельной группе, низкое отношение фактического содержания к условному порогу рентабельности, усиленное отсутствием преференциального режима на территории, не выводит тульский кейс в зону самостоятельной рыночной привлекательности, что совпадает с прямым заявлением регионального министерства о нерентабельности извлечения [34] и служит независимой, хотя и предварительной, проверкой адекватности индекса. Пермский кейс структурно не укладывается в логику ИТИП, поскольку ценность объекта определяется не концентрацией ме-

ТАБЛИЦА 2.

Вспомогательные параметры и показатели

Параметр	Определение	Экономический смысл
M_{ext}	M_feed × C_metal × η_ext	Масса извлеченного металла
Byproduct_utilization	M_byproduct_used / M_byproduct_total × 100%	Доля вовлеченных в оборот попутных продуктов
ΔC_soil	C0_soil – Ct_soil	Снижение концентрации загрязнителя в почве

ТАБЛИЦА 3.

Иллюстративный расчет ИТИП для пяти региональных кейсов

Регион / объект	Ведущий компонент	C_{metal} (услов.)	C_{cutoff} (услов.)	k_{log}	k_{sec}	k_{pref}	ИТИП (услов.)
Якутия, Куларский р-н (эфельные отвалы)	Au	0,38 г/м³ (верхняя граница диапазона)	0,15 г/м³	0,4	1,3	1,2	1,58
Приморье, Дальнегорский р-н (полиметаллические хвостохранилища)	Pb+Zn (в среднем по массе хвостохранилища)	Условное содержание выше C_{cutoff}	—	0,8	1,3	1,0	2,10
Мурманская обл., «Печенганикель» (по аналогии)	Ni + Pt-Pd (попутно)	0,55% Ni (аналог по руде)	0,35% Ni	0,7	1,2	1,15	1,52
Пермский край, Верхнекамское м-ние (солеотвалы)	KCl (товарная соль)	н/д — оценка по объему, не по содержанию	—	0,9	1,0	1,0	н/п (иная логика – по объемам)
Тульская обл., золошлаки	Sc, Y, La, Ce (попутно)	До 19 г/т Sc	40 г/т Sc (эксперт. оценка)	0,9	1,4	1,0	0,60

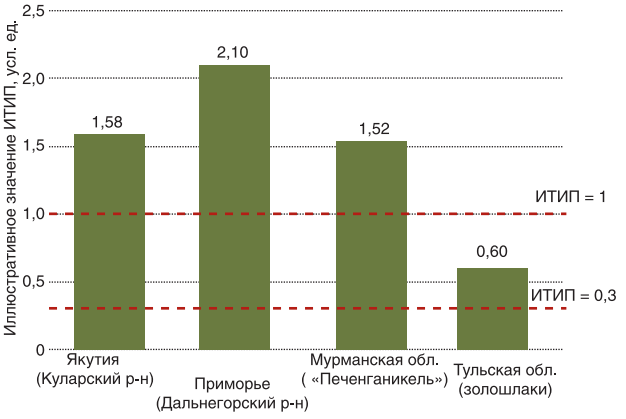


РИС. 2.

Иллюстративные значения индекса ИТИП для четырех региональных кейсов, допускающих оценку через содержание металла, с учетом коэффициента преференциальных режимов (рассчитано автором по данным табл. 3; верхнекамский кейс Пермского края использует иную логику – по объему вовлекаемого сырья и предотвращенному ущербу – на рисунке не показан)

талла, а объемом вовлекаемой в оборот товарной соли и снижением площади засоления – для объектов такого типа вместо индекса предлагается использовать показатель Byproduct_utilization, рассмотренный далее.

Методика финансового структурирования

Совокупный объем капитальных затрат проекта разработки ТМО определяется как сумма затрат на технологическое оборудование, природоохранную инфраструктуру, рекультивацию, экологический мониторинг и инженерную инфраструктуру:

$$CAPEX_{total} = CAPEX_{tech} + CAPEX_{env} + CAPEX_{rec} + CAPEX_{mon} + CAPEX_{infra},$$

а годовая потребность в финансировании учитывает объем государственной поддержки:

$$Need_{year} = CAPEX_{year} + OPEX_{year} - Subsidies_{year} - Grants_{year}.$$

Купонные выплаты определяются стандартно ($Coupon_payment = Nominal \times r_{coupon} \times (Days_{period} / 365)$), совокупное обслуживание долга складывается из купона и погашения основного долга, а устойчивость его обслуживания оценивается коэффициентом покрытия $DSCR = CFADS / Debt_{service}$; при значении DSCR ниже единицы проект нуждается в реструктуризации графика платежей, гарантийном покрытии со стороны институтов развития, либо в формировании резервного фонда обслуживания долга ($DSRA = Coupon_{year} \times k$, где k – целевой период покрытия, как правило от 6 месяцев до 1 года).

Институциональный прецедент, способный на практике снизить геологический риск на предпроектной стадии, уже существует: в 2023 г. подконтрольное ПАО «Селигдар» ООО «Белое золото» получило по заявительному принципу лицензию на геологическое изучение флангов Кючусского рудного поля в Усть-Янском и Верхоянском районах Якутии, что впервые позволило согласовывать проекты опытно-промышленной разработки техногенных месторождений в упрощенном порядке, минуя часть процедур, обязательных для лицензирования первичных участков недр [4]. Распространение этого механизма на всю категорию ТМО, о чем подробнее говорится в разделе об институциональных барьерах, это не гипотетическое предложение, а прямая экстраполяция уже работающей практики.

Блендированная финансовая модель

Специфика проектов разработки ТМО заключается в повышенной неопределенности геологических параметров в сочетании со значимым положительным экологическим и социальным эффектом, что делает целесообразным блендированное, то есть комбинированное финансирование, при котором рыночный облигационный транш дополняется бюджетным (льготным займом или субсидией на компенсацию части капитальных затрат). Средневзвешенная стоимость такого капитала определяется как:

$$r_{blended} = (D_{market} \times r_{market} + D_{budget} \times r_{budget}) / (D_{market} + D_{budget}),$$

а эффективность использования бюджетной поддержки для мобилизации частного капитала может быть выражена коэффициентом бюджетного рычага $Leverage_{budget} = D_{market} / D_{budget}$. Расчет ИТИП, приведенный выше, задает при этом ясное практическое правило дифференциации: для объектов с индексом выше 1 (Якутия, Приморье) бюджетная часть может быть минимальной и ограничиваться гарантийным покрытием геологического риска на стадии опытно-промышленной разработки; для объектов с индексом в диапазоне 0,3–1 (Мурманская область) бюджетная часть должна покрывать существенную долю природоохранных капитальных затрат; а для объектов с индексом ниже 0,3 (Тульская область) рыночное облигационное финансирование в чистом виде нецелесообразно, и основным источником должны выступать целевые бюджетные субсидии на рекультивацию.

Роль институтов развития в блендированном финансировании

Бюджетный контур блендированной модели на практике не сводится к абстрактной «государственной поддержке», а формируется конкретными институтами развития, каждый из которых закрывает свой участок финансовой архитектуры проекта и обладает собственной региональной специализацией, что напрямую отражается на структуре проектов переработки ТМО в пяти рассмотренных кейсах. Методологическим центром системы выступает государственная корпорация развития ВЭБ.РФ, администрирующая национальную таксономию устойчивого финансирования [21] и синдицирующая долевое и заемное участие дочерних институтов развития в крупных проектах, включая проекты, реализуемые в горно-промышленном комплексе.

Применительно к дальневосточным и арктическим кейсам настоящей статьи – Якутии, Приморью и отчасти Мурманской области, территория которой отнесена к Арктической зоне РФ, практическое значение имеют сразу два института группы ВЭБ.РФ. Фонд развития Дальнего Востока и Арктики предоставляет платное и возвратное финансирование приоритетных инвестиционных проектов на льготных условиях, и к середине 2020-х гг. направил в проекты региона свыше 60 млрд руб., причем, более трети профинансированных им проектов реализуется резидентами территорий опережающего развития и Свободного порта Владивосток [36], что делает фонд естественным источником льготного бюджетного транша для проектов с ИТИП выше 1, где требуется прежде всего покрытие геологического риска, а не масштабная субсидия. Комплексное сопровождение инвестора – от выбора преференциального режима до создания инженерной и транспортной инфраструктуры – обеспечивает Корпорация развития Дальнего Востока и Арктики, использующая, помимо прямой поддержки резидентов, механизмы государственно-частного партнерства в форме дальневосточной и арктической концессии [10]. Применительно к проектам переработки ТМО в Усть-Янском улусе и Дальнегорском районе именно этот институт способен снять часть инфраструктурных барьеров, удорожающих логистическую составляющую индекса ИТИП (коэффициент k_{log}).

На региональном уровне сопоставимые функции выполняют профильные корпорации развития субъектов РФ, включая Корпорацию развития Приморского края и Корпорацию развития Республики Саха (Якутия), которые обеспечивают сопровождение инвестиционных проектов «одного окна» на этапе, предшествующем обращению к федеральным институтам, готовят площадки и снимают земельно-имущественные и разрешительные барьеры, что, применительно к ТМО-проектам, особенно значимо ввиду отмеченной выше правовой неопределенности статуса техногенного объекта [38]. Для кейсов, тяготеющих к центральной части страны – тульского и пермского – федеральным аналогом такой поддержки выступает Фонд развития промышленности, предоставляющий целевые льготные займы на техническое перевооружение и создание новых производств; именно этот механизм уже использован применительно к переработке фосфогипсовых техногенных образований Мурманской области, где заем фонда в размере 865 млн руб. стал основным источником финансирования строительства перерабатывающих мощностей [26]. Таким образом, институциональная архитектура блендированной модели закономерно повторяет географию самой ресурсной базы: для дальневосточных и арктических объектов основную нагрузку несет группа ВЭБ.РФ совместно с региональными корпорациями развития, тогда как для объектов европейской части страны – Фонд развития промышленности и региональные фонды поддержки промышленности.

Региональные кейсы

Географическое положение пяти рассмотренных объектов показано на рисунке 3. Удаленность от опорной транспортной и перерабатывающей инфраструкту-

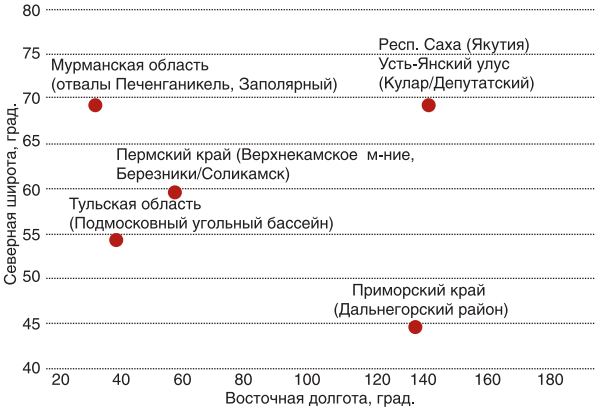


РИС. 3.

Схема географического положения рассмотренных объектов ТМО (условная картосхема по координатам населенных пунктов-ориентиров). Составлена автором. Не является топографической картой

ры – один из параметров, напрямую входящих в коэффициент логистической доступности индекса ИТИП.

Мурманская область дает пример региона, в котором накопленный техногенный фонд представлен сразу двумя различными по генезису типами объектов, что делает регион особенно показательным с точки зрения диверсификации инструментов финансирования. Комбинат «Печенганикель» ведет добычу сульфидных медно-никелевых руд на месторождениях Каула, Семилетка, Котсельваара-Каммикиви, Ждановское, Восток и Заполярное с 1945 г. [21], и многолетняя флотационная переработка сформировала хвостохранилища, в шламовой фракции которых основными полезными компонентами являются, как показано выше, уже не никель и медь, а платина и палладий [8, 11], для доизвлечения которых технологически наиболее релевантны гравитационное выделение собственных минералов платиновых металлов до операции флотации [32] и выщелачивание неоцианистыми растворителями [13]. Параллельно с этим тот же регион концентрирует практически всю российскую сырьевую базу редкоземельных металлов: на семи объектах Мурманской области сосредоточено 45,9% балансовых запасов страны, а Ловозерское месторождение лопаритовых руд остается единственным в России объектом, товарно разрабатываемым непосредственно на редкоземельные металлы [26], тогда как переработка апатит-нефелиновых руд Хибинской группы месторождений на фосфор попутно формирует фосфогипсовые техногенные образования с существенным содержанием редкоземельного сырья, судьба извлечения которого, как показано выше, определяется не столько геологией, сколько экономикой конкретного проекта. Сочетание экологически ориентированного никелевого кейса и стратегически значимого редкоземельного кейса в границах одного региона помещает Мурманскую область в промежуточную зону блендированного финансирования согласно иллюстративному расчету ИТИП (табл. 3), где зеленые облигации целесообразны применительно к никелевым хвостохранилищам (компонент E_{env} выше среднего по выборке ввиду риска кислотного дренажа и вторичного пыления сульфидных отвалов), а бюджетная поддержка на возвратной основе – применительно к фосфогипсовым объектам, экономика которых, как показывает опыт ПАО «Акрон», может оказаться как отрицательной, так и стать основой нового производства при должном масштабе и технологии.

Республика Саха (Якутия) представлена в исследовании Куларским золотоносным районом Усть-Янского улуса – территорией промышленной россыпной золотодобычи с 1960-х гг., в разные периоды отрабатывавшейся горно-обогатительным комбинатом «Куларзолото» [4]. Отработка велась по транспортной схеме с накатыванием эфельных отвалов поверх вскрышных, а в конце 1980-х – начале 1990-х гг. часть отвалов была перемыта повторно промывочными приборами типа «Ромашка» и «Поиск», в результате чего на одном лишь месторождении Юрское в границах единого лицензионного контура выявлено 72 отдельных техногенных отвала четырех генетических типов с содержанием золота 0,080–0,378 г/м^3 [39] против 1,07 г/м^3 в неотработанной россыпи руч. Кебиргэл-Юрэгэ того же улуса [9]. По экспертным оценкам, в техногенных образованиях Дальневосточного федерального округа в целом может содержаться от 2,5 до 3 тыс. т золота – на порядок больше содержимого крупного действующего рудника – при том, что из объема россыпного золота, извлеченного производственными объединениями «Северовостокзолото» и «Золото Якутии» в 1972–1992 гг. (около 1,2 тыс. т), лишь 701 т получена из учтенных государственным балансом запасов, а более 35 т дали именно техногенные отложения при явно неполном их учете [4]. Прецедент 2023 г. с заявительной лицензией ООО «Белое золото» на фланги Кючусского рудного поля [4] как соседний объект косвенно относится к рассматриваемому кейсу и подтверждает разрешимость нормативного барьера, а иллюстративное значение ИТИП (1,58, табл. 3) помещает объект в число наиболее привлекательных в выборке для рыночного долгового финансирования.

Приморский край дает пример вещественного состава и минералого-геохимической эволюции ТМО на скарново-полиметаллических месторождениях Дальнегорского района, где сосредоточены основные мощности отечественной свинцово-цинковой промышленности. Жильные рудные тела содержат 0,02–2,55% свинца, 0,02–2,13% цинка и до 3315,7 г/т серебра, а основную промышленную ценность пред-

ставляют скарновые руды с высоким и неравномерным содержанием серебра [33]. При первичной переработке извлечение свинца и цинка достигает 92–98%, серебра – 80–85%, и, следовательно, в хвостах закономерно остается неизвлеченный остаток, который за десятилетия хранения претерпевает гипергенные изменения с образованием вторичных минералов – гетита, гидрогетита, гипса, эпсомита, ярозита, халькантита, брошантитита, англезита, плюмбоярозита, адамина и монтмориллонита [33], часть которых облегчает последующее гидрометаллургическое вскрытие остаточных сульфидов. Гипергенное преобразование этого материала одновременно формирует и экологический риск: в реке Рудной, служащей конечным водосбором технологических вод горного производства, зафиксированы концентрации меди, кратно превышающие предельно допустимые (в 359 раз), а также аномально высокие концентрации кадмия, бериллия, железа, цинка, никеля, свинца, кобальта и марганца [33], что делает природоохранный компонент проекта переработки ТМО в данном случае не менее значимым, чем экономический.

Кейс структурно близок к переходным облигациям, поскольку переработка первичного сырья на действующих комбинатах продолжается, но при направлении части средств на переработку хвостохранилищ снижается связанная с их хранением экологическая нагрузка. Дополнительным экологическим ключевым показателем эффективности выпуска естественно выступает динамика концентрации тяжелых металлов в дренажных водах ($\Delta C_{water} = C0_{water} - Ct_{water}$). Иллюстративный ИТИП кейса (табл. 3) оказывается одним из наиболее высоких в выборке ввиду сочетания значительного объема накопленных хвостов, устойчивого спроса на свинец и цинк и близости к действующей перерабатывающей инфраструктуре региона.

Тульская область иллюстрирует принципиально иной тип объекта – золошлаковые отходы (ЗШО) угольной генерации Подмосковного угольного бассейна, который разрабатывается с 1855 г. и обеспечил за более чем полтора столетия своей истории добычу порядка 1589,3 млн т угля, из которых, с учетом доли региона не менее 80% общего объема, на Тульскую область приходится порядка 1271,4 млн т [3], при геологических запасах бассейна, оцениваемых в диапазоне 11,8–17,5 млрд т в зависимости от года и методики подсчета [22]. Концентрации попутных элементов в углях действующих предприятий бассейна измерены и опубликованы (галлий 20–40 г/т, цинк 20–213 г/т, иттрий 15–85 г/т, лантан 13–50 г/т, церий 30–50 г/т, скандий до 19 г/т, тантал до 10 г/т [22]), однако, как уже отмечалось во введении, региональное министерство прямо констатировало недостаточность измеренной концентрации для того, чтобы инвесторы сочли извлечение редких земель из местных золошлаков рентабельным при сложившейся конъюнктуре [34]: присутствие попутного компонента само по себе не создает инвестиционного кейса без превышения порога рентабельности, и именно поэтому реалистичным источником экономической ценности кейса выступает не металлургическое, а строительное направление – вовлечение золошлаков в производство стройматериалов, для которого в отрасли уже накоплен собственный технологический задел [1].

Для показателя $Byproduct_{utilization}$ (табл. 2) такие проекты задают эффективный ориентир: технологии переработки золошлаков в тяжелый заполнитель, керамзитобетонные изделия и сопутствующую строительную продукцию позволяют вовлекать в товарный оборот значительную часть массы отвала, оставляя на повторный передел лишь мелкую фракцию [17, 18]. Финансовым инструментом для кейса целесообразны зеленые облигации, либо облигации, привязанные к КПЭ по доле вовлеченных в оборот золошлаков, а не переходные облигации, поскольку рудной добычи в собственном смысле слова на объекте не ведется. Социальная составляющая эффекта в данном случае значима отдельно от экономической: территория Подмосковного бассейна – зона угасающей угледобычи, где отмечена интенсивная эрозия на 43% площади сельскохозяйственных угодий и около 700 га нарушенных земель на месте 27 брошенных карьеров [31], а значит диверсификация занятости и рекультивация выступают самостоятельным основанием проекта вне зависимости от того, удастся ли когда-либо довести редкоземельную составляющую до промышленной рентабельности.

Пермский край представлен Верхнекамским месторождением калийных солей, разрабатываемым с 1934 г. и охватывающим разведанную полосу протяженностью около 140 км с севера на юг и около 60 км с запада на восток; запасы месторождения, по оценкам отраслевой литературы, превышают 120 млрд т, что соответствует порядка 31 % мировых запасов хлористого калия и делает Верхнекамское месторождение вторым по величине в мире после канадского Саскачевана. На каждую тонну получаемого хлористого калия образуется 3,5–4,5 т твердых галитовых отходов и 0,1–0,5 т глинисто-солевых шламов, ежегодно складируемых в солеотвалы и рассолошламохранилища на дневной поверхности [12]. В отличие от четырех предыдущих кейсов, ценность этого объекта определяется не концентрацией металла, а объемом вовлекаемой в оборот товарной продукции – технической соли, противогололедных реагентов – а также предотвращенным эффектом засоления почв и поверхностных вод и снижением риска техногенной сейсмичности на подработанных территориях. Вследствие этого индекс ИТИП в его исходной, ориентированной на металлы форме, к данному кейсу неприменим, и вместо него релевантны показатель $Byproduct_{utilization}$ и экологический КПЭ

ΔC_{soil} (табл. 2), отражающий снижение концентрации хлоридов в почвах прилегающих территорий.

Экологическая повестка региона этим кейсом не исчерпывается: в границах того же Пермского края расположен Кизеловский угольный бассейн, отработка которого прекращена, а закрытые шахты продолжают формировать самостоятельный и притом более острый источник накопленного вреда – кислые шахтные воды. Изливы кислых вод в реки Гремячинского, Губахинского и Кизеловского районов составляют суммарно 25–45 млн м^3 в год, а высокоминерализованные кислые стоки формируются также с отвалов вскрышных пород, занимающих более 110 га. Гидрохимический режим таких изливов не статичен: после затопления горных выработок концентрация сульфатов, железа и алюминия в шахтных водах первоначально превышает уровень, наблюдавшийся в период эксплуатации шахт, поскольку вода вымывает накопленные продукты окисления пирита, и лишь по прошествии 15–20 лет минерализация выходит на новый, более низкий стабильный уровень [7].

Восстановительные мероприятия в бассейне – строительство очистных сооружений и известкование водотоков – уже частично финансируются из федерального бюджета, однако остаются бюджетными по своей природе и не используют рыночных долговых инструментов [8]. С точки зрения предложенной модели кизеловский материал – предельный случай объекта с E_{env}, полностью доминирующим над E_{econ}: он не содержит рентабельного к извлечению сырья и потому не поддается оценке через ИТИП ни в его металлической, ни в его объемной модификации, а его целесообразно финансировать исключительно за счет целевых бюджетных программ и, в перспективе, зеленых облигаций, КПЭ которых будет полностью определяться динамикой ΔC_{water}, а не экономическим эффектом.

Финансовым инструментом для верхнекамского кейса выступают зеленые облигации либо облигации устойчивого развития, ориентированные на предотвращение засоления и стабилизацию отработанных горных выработок, а компонент E_{env} в структуре мультипликативного эффекта структурно доминирует над E_{econ} – соотношение, прямо противоположное приморскому и якутскому кейсам и еще более выраженное применительно к кизеловскому материалу.

Сведение пяти кейсов на основе комплексной систематизации показывает не универсальность одного финансового решения, а закономерное разделение объектов на три группы в зависимости от значения индекса ИТИП: объекты, для которых рыночное, преимущественно переходное финансирование, самодостаточно, а бюджетное участие ограничивается покрытием геологического риска на предпроектной стадии (Якутия, Приморье); объекты, требующие блендированной схемы с существенной бюджетной долей на природоохранный CAPEX (Мурманская область); объекты, для которых основанием проекта выступает не содержание полезного компонента, а объем вовлекаемого в оборот сырья или предотвращенный экологический ущерб, вследствие чего рыночное облигационное финансирование в чистом виде для них нецелесообразно (Тульская область, Пермский край).

Институциональные барьеры и предложения

Практическое применение предложенной модели на данный момент ограничивается тремя барьерами. Первый – неопределенность правового статуса ТМО как объекта недропользования [38], усугубленная отсутствием единого федерального реестра техногенных образований. Расхождение национальных оценок накопленного объема в 2,5 раза [15] есть прямое следствие того, что детальная инвентаризация проведена лишь в отдельных субъектах РФ по образцу Свердловской области [23]. Устранение этого барьера требует комплексного системного решения – вывода техногенных месторождений из-под общего регулирования отходов производства и потребления и закрепления для них отдельным нормативным актом упрощенного порядка лицензирования, разведки и эксплуатации, дополненного государственным кадастром техногенных образований в виде единой цифровой платформы, включающей актуализированные данные об объеме, вещественном составе и потенциальной ценности каждого объекта. Фактически речь идет об институционализации того самого федерального реестра, отсутствие которого настоящая статья определяет как первопричину расхождения национальных оценок.

Второй барьер связан с процедурами государственной экологической экспертизы, не учитывающими совмещение геологического изучения техногенного объекта с его последующей разработкой. Частичным решением здесь служит уже упомянутое заявительное лицензирование, примененное к флангам Кючусского рудного поля в 2023 г. [4], а дополнительным шагом в том же направлении – обновленные методические рекомендации Роснедр по разведке техногенных месторождений россыпного золота и платиноидов, утвержденные 10.09.2025 [30].

Автором предлагается ввести обязательную верификацию архивных геологических данных, используемых при оценке техногенного объекта на основе доразведки, переоценки запасов и локальной опытно-промышленной отработки представительного участка заданной площади. Также целесообразным является разработать и использовать поправочные коэффициенты надежности, учитывающие срок давности формирования отвала и полноту исходной документации, в том числе учитывать указанную в разделе о геологической характеристике ТМО зависимость содержания металла от глубины и удаленности от плотины хвостохранилища, из-за которой поверхностное или

недостаточно верифицированное опробование систематически искажает оценку объекта.

Третий барьер – отсутствие стандартизированной системы измерения, отчетности и верификации экологических показателей (MRV), затрудняющее сопоставимость проектов для институциональных инвесторов и рейтинговых агентств, выдающих Second Party Opinion. Предложенные в настоящей статье показатели – $Reduction_{rate}$, Rec_{share}, $Byproduct_{utilization}$, ΔC_{soil}, ΔC_{water} – могут составить основу такого отраслевого MRV-фреймворка, дополняющего действующую национальную таксономию [29]. Целесообразным представляется также распространение на техногенные объекты уже применяемых к первичной добыче налоговых стимулов – прежде всего пониженного коэффициента платы за негативное воздействие на окружающую среду и временного освобождения от налога на добычу полезных ископаемых на период отработки запасов техногенных месторождений, поскольку в отсутствие подобной донастройки бюджетный контур блендированной модели, описанный выше, останется структурно слабее рыночного и не сможет выполнять функцию, отведенную ему для объектов с низким значением индекса ИТИП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Содержание полезных компонентов в ТМО закономерно ниже, чем в исходной руде, что выражается и в переходе от никеля и меди, как основных компонентов первичной руды, к платине и палладию как основным компонентам хвостов, и в снижении содержания золота с 1,07 г/м^3 в целиковой россыпи до 0,08–0,38 г/м^3 в эфельных отвалах того же улуса. Эта закономерность представляет собой не техническую деталь, а структурную характеристику объекта, которую необходимо закладывать в выбор финансового инструмента на самой ранней стадии проекта, до технико-экономического обоснования освоения объекта недропользования.

Наличие измеримой концентрации полезного компонента, в том числе отнесенного к перечню критических и стратегических, при этом не тождественно инвестиционной привлекательности объекта: так, в Тульской области содержание скандия и иттрия в золошлаках зафиксировано и опубликовано, но регионом признано недостаточным для рентабельного извлечения, что служит прямым эмпирическим опровержением распространенного в литературе о критических минералах допущения, что присутствие такого металла в отходах автоматически создает финансируемый проект. При этом экспертная оценка освоения фосфогипсовых объектов Мурманской области, где один проект был остановлен из-за отрицательной рентабельности, а другой в те же годы получил заем Фонда развития промышленности на строительство нового производства, показывает, что экономическая ценность техногенного сырья определяется не только геологией, а сочетанием технологии, масштаба проекта, включая объемы добычи, переработки и текущей рыночной конъюнктуры.

Предложенный в статье индекс техногенной инвестиционной привлекательности переводит эти качественные наблюдения в количественный критерий предпроектного отбора: институтам развития и организаторам облигационных выпусков целесообразно применять его до полного технико-экономического обоснования, чтобы сфокусировать ограниченную бюджетную поддержку на объекты, где ее эффективнее направить непосредственно на компоненты экологического и социального эффекта, минуя рыночный долговой инструмент, тогда как для объектов с высоким значением индекса бюджетное участие может и должно ограничиваться покрытием геологического риска на предпроектной стадии, высвобождая тем самым бюджетные средства для менее рентабельных, но экологически и социально значимых объектов.

Установлено, что устойчивое развитие горнопромышленного региона обеспечивается не переработкой ТМО как таковой, а сочетанием всех четырех компонентов мультипликативного эффекта: приростом валовой добавленной стоимости и налоговых поступлений, снижением накопленного экологического вреда и предотвращением дальнейшего загрязнения водных и земельных объектов, созданием рабочих мест и диверсификацией структуры занятости в моногородах и удаленных территориях с истощаемыми балансовыми запасами и угасающей первичной добычей, а также совершенствованием управленческих практик недропользователя, вынужденного в рамках подготовки облигационного выпуска выстраивать верифицируемую систему экологического мониторинга и публичной отчетности, которая ранее для техногенных объектов отсутствовала.

На основе комплексного анализа освоения ТМО государственному регулятору предлагается закрепить распространение заявительного принципа лицензирования геологического изучения, уже примененного к Кючусскому рудному полю, на категорию ТМО в целом отдельным нормативным актом, не дожидаясь накопления новых точечных прецедентов. На основе проведенных исследований институтам развития рекомендуется рассмотреть возможность включения индекса ИТИП или его отраслевого аналога в стандартную процедуру предпроектной оценки заявок на льготное финансирование проектов освоения техногенного минерального сырья.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Астафьева О.Е.** Применение золошлаковых отходов в промышленности строительных материалов // Уголь. 2024. № 2. С. 85–88. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2024-2-85-88.

2. **Бодуэн А.Я., Петров Г.В., Диаките Л.Л., Богинская А.С., Спыну А.Ю.** Концентрирование благородных металлов при переработке шлакопылевых отходов сульфидных руд // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2013. № 2. С. 164–167.
3. **Грязев М.В.** Горнодобывающая отрасль в экономике Тульской области. Состояние и перспективы // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2015. № 2. С. 57–66.
4. Дорог золотник, да закон сыроват // EastRussia. URL: https://www.eastrussia.ru/material/dorog-zolotnik-da-zakon-syrovat/ (дата обращения: 08.08.2026).
5. **Едильбаев А.И.** Разработка классификации твердых техногенных металлосодержащих минеральных образований горно-металлургического комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. №1. С. 335–338.
6. **Иванов С.В.** О возможностях использования горнопромышленных отходов в Мурманской области // Известия Коми научного центра Уральского отделения РАН. Серия «Экономические науки». 2023. № 3(61). С. 79–85. https://doi.org/10.19110/1994-5655-2023-3-79-85.
7. **Имайкин А.К., Блинов С.М.** Шахтные воды Косьвинского месторождения Кизеловского угольного бассейна. Прогноз гидрохимического режима шахтных вод, изливающихся на поверхность // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. С. 667–668.
8. Кизеловский угольный бассейн: экологические проблемы и пути решения : монография / под ред. С.М. Блинова. Пермь : Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2020.
9. Кебиргэл-Юрэгэ, ручей, левый приток реки Яна. Золото россыпное // НедраДВ. URL: https://nedradv.ru/nedradv/ru/find_place?obj=a5d4a8f861b68f76a3cd3dfc3ed8bbab (дата обращения: 08.08.2026).
10. Корпорация развития Дальнего Востока и Арктики (КРДВ) // Производства.рф. URL: https://xn--80adahnf5bdekrm.xn-p1ai/company/korporatsiya-razvitiya-dalnego-vostoka-i-arktiki-krdv/ (дата обращения: 12.08.2026).
11. **Кутлиахметов А.Н., Дьяконов В.В.** Техногенно-минеральные образования Башкирского Зауралья и их экологическая роль // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2016. № 3. С. 19–24.
12. **Лискова М.Ю.** Негативное воздействие, оказываемое на окружающую среду предприятиями по добыче и обогащению калийно-магниевых солей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2017. Т. 16, № 1. С. 82–88. DOI: 10.15593/2224-9923/2017.1.9.
13. **Михайлов А.Г., Харитонова М.Ю., Вашлаев И.И., Свиридова М.Л.** Выщелачивание золота и цветных металлов неоцианистыми растворителями // Успехи современного естествознания. 2016. № 7. С. 132–136.
14. **Мурзин Н.В., Ченг Мун Иль, Скворцов Д.Е., Бурдонов А.Е.** Оценка опыта обогащения россыпей шлюзовыми промывочными установками // Устойчивое развитие горных территорий. 2026. Т. 18. № 1(67). С. 242–250. https://doi.org/10.21177/1998-4502-2026-18-1-242-250.
15. **Мустафин С.К., Анисимова Г.С., Трифонов А.Н., Стручков К.К.** Техногенное минеральное сырье регионов недропользования: природа, состав и перспективы рационального использования // Наука и образование. 2017. №4. С. 7–16.
16. **Нагаева О.С., Шапарев Н.Я.** Система платежей за природные ресурсы для устойчивого развития сырьевой территории // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2009.
17. **Наумов В.А., Илалтдинов И.Я., Наумова О.Б., Кольцов В.А.** Оценка содержания золота в техногенных намывных отложениях // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 4.
18. **Наумов В.А.** Научные основы управления геологическими процессами в техногенно-минеральных образованиях // Международный научно-исследовательский журнал. 2018. № 9 (75). С. 14–19. https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.75.9.016.
19. Облигации устойчивого развития // Санкт-Петербургская Биржа. URL: https://spbexchange.ru/listing/segments/spb_esg/sdev_bonds/ (дата обращения: 06.08.2026).
20. Отходы российской горной добычи в 2025 году превысили 9 млрд тонн : заявление директора департамента государственной политики и регулирования в области геологии и недропользования Минприроды России Е. Танина // РИА Новости / 1Prime. 2026. URL: https://gold.1prime.ru/20260521/otkhody-1453488.html (дата обращения: 12.08.2026).
21. Печенганикель / Кольская энциклопедия. URL: https://ke-culture.gov-murman.ru/slovnik/?ELEMENT_ID=98866 (дата обращения: 08.08.2026).
22. Природа России: Тульская область // Информационно-справочная система «Природа России». URL: https://www.priroda.ru/regions/nedra/detail.php?FO_ID=619&ID=9163 (дата обращения: 08.08.2026).
23. **Прохоров Д.О.** Техногенные месторождения: комплексная инвентаризация и кадастровая оценка техногенно-минеральных объектов Свердловской области. Тула, 2024. 333 с.
24. **Пунишко О.А., Катышева С.В.** Способы опро-

бования лежалых хвостов золотоизвлекательных фабрик и некоторые закономерности распределения золота в хвостохранилищах // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2011. № 10(57). С. 157–161.

25. **Размахнин К.К., Хатькова А.Н., Шумилова Л.В., Номоконова Т.С.** Технология переработки и обогащения золошлаковых отходов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 10. С. 122–135. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_10_0_122.
26. Редкоземельные металлы // Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2023 году. М.: Росгеолфонд, 2024. С. 489–508.
27. Российский рынок ESG-финансирования: прогноз на 2024 год // Коммерсантъ. 2024. URL: https://www.kommersant.ru/doc/6617983 (дата обращения: 06.08.2026).
28. Российская Федерация. Положение Банка России от 19.12.2019 № 706-П «О стандартах эмиссии ценных бумаг» (ред. от 04.03.2024). Гл. 65.
29. Российская Федерация. Постановление Правительства РФ от 21.09.2021 № 1587 «Об утверждении критериев проектов устойчивого (в том числе зеленого) развития в Российской Федерации и требований к системе верификации инструментов финансирования устойчивого развития в Российской Федерации» (ред. от 14.10.2025).
30. Российская Федерация. Федеральное агентство по недропользованию. Методические рекомендации по разведке техногенных месторождений россыпного золота и платиноидов (утв. Роснедрами 10.09.2025).
31. **Рябов Г.Г.** Экологическая характеристика территории Подмосковного угольного бассейна // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2014. № 4. С. 25–36.
32. Способ обогащения сульфидных медно-никелевых руд, содержащих собственные минералы платиновых металлов и магнетит: пат. RU 2144429 C1 // Google Patents. URL: https://patents.google.com/patent/RU2144429C1/ru (дата обращения: 08.08.2026).
33. **Тарасенко И.А., Зиньков А.В.** Экологические последствия минералого-геохимических преобразований хвостов обогащения Sn-Ag-Pb-Zn руд. Владивосток : Дальнаука, 2001. 184 с.
34. Тульские шахты Подмосковного угольного бассейна ожидают инвесторов // Тульские новости. URL: https://newstula.ru/fn_187642.html (дата обращения: 08.08.2026).
35. **Усманова Н.Ф., Шошина А.С.** Извлечение цветных и благородных металлов из шламовой фракции выветрелых хвостов обогащения медно-никелевых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. Т. 15. № 12. С. 493–500.
36. Фонд развития Дальнего Востока и Арктики. Официальный сайт Министерства Российской Федерации по развитию Дальнего Востока и Арктики. URL:https://minvr.gov.ru/about/podvedomstvennye-organizatsii/organizacii/frdv.php (дата обращения: 12.08.2026).
37. **Черняков В.Е.** Методика формирования облигационных выпусков ESG-сегмента для проектов устойчивого развития в горнопромышленной отрасли России. 2026.
38. **Черняков В.Е.** Проблематика правового регулирования промышленного извлечения россыпного золота из техногенно-минеральных образований в Российской Федерации // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2025. № 7. С. 184–193. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_7_0_184.
39. Юрское месторождение золота в Якутии: методика разведки россыпей золота // Vnedra.ru. URL: https://www.vnedra.ru/geologorazvedka/provedenie-poiskovo-oczenochnyh-rabot-na-tehnogennom-rossypnom-mestorozhdenii-yurskij-rs-ya-23653/ (дата обращения: 08.08.2026).
40. **Canhimbue L., Talovina I.** Geochemical Distribution of Platinum Metals, Gold and Silver in Intrusive Rocks of the Norilsk Region // Minerals. 2023. Vol. 13. N 6. Art. 719. https://doi.org/10.3390/min13060719.
41. Critical-Minerals Recovery from Mine Tailings: A Technical Assessment. Idaho National Laboratory, 2026. Report N INL-RPT-25-89279.
42. ESG Funds and Critical Minerals: Financing the Energy Transition // SFA Oxford. URL: https://www.sfa-oxford.com/market-news-and-insights/sfa-esg-funds-and-critical-minerals-financing-the-energy-transition/ (дата обращения: 06.08.2026).
43. Financing the Responsible Mining of Critical Minerals Using Thematic Bonds: Roundtable Summary // Center on Global Energy Policy, Columbia University SIPA. 2024.
44. Use and Recovery of Extractive Waste and Tailings for Sustainable Raw Materials Supply // Mining. 2024. https://doi.org/10.3390/mining4010010.

REFERENCES

1. **Astafieva O.E.** Use of Ash and Slag Waste in the Construction Materials Industry. *Ugol'*. 2024;2:85–88. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2024-2-85-88. (In Russian).
2. **Boduen A.Ya., Petrov G.V., Diakite L.L., Boginskaya A.S., Spynu A.Yu.** Concentration of Precious Metals in the Processing of Slag-Dust Waste of Sulphide Ores. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Tsvetnaya Metallurgiya*. 2013;2:164–167. (In Russian).
3. **Gryazev M.V.** Mining Industry in the Economy of the Tula Region. Status and Prospects. *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zem-*

le. 2015;2:57–66. (In Russian).

4. Every Grain of Gold Is Dear, but the Law Is Still Unripe. EastRussia. (In Russian).
5. **Edilbaev A.I.** Development of a Classification of Solid Technogenic Metal-Bearing Mineral Formations of the Mining and Metallurgical Complex. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2012; 1:335–338. (In Russian).
6. **Ivanov S.V.** On the Possibilities of Using Mining Waste in the Murmansk Region. *Izvestiya Komi Nauchnogo Tsentra Uralskogo Otdeleniya RAN*. 2023;3;(61):79–85. https://doi.org/10.19110/1994-5655-2023-3-79-85. (In Russian).
7. **Imaikin A.K., Blinov S.M.** Mine Waters of the Kosvinskoye Deposit of the Kizel Coal Basin. Forecast of the Hydrochemical Regime of Mine Waters Discharging to the Surface. *Sovremennye Problemy Nauki i Obrazovaniya*. 2014;5:667–668. (In Russian).
8. Kizel Coal Basin: Environmental Problems and Solutions: monograph, ed. by S.M. Blinov. Perm, Perm State University Publ. 2020. (In Russian).
9. Kebirgel-Yurege Creek, Left Tributary of the Yana River. Placer Gold. NedraDV. (In Russian).
10. Far East and Arctic Development Corporation (KRDV). Proizvodstva.rf. (In Russian).
11. **Kutliakhmetov A.N., Dyakonov V.V.** Technogenic Mineral Formations of the Bashkir Trans-Urals and Their Ecological Role. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Inzhenernyye issledovaniya*. 2016;3:19–24. (In Russian).
12. **Liskova M.Yu.** Negative Environmental Impact of Potassium-Magnesium Salt Mining and Processing Enterprises. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoye i gornoye delo*. 2017;16;(1):82–88. DOI: 10.15593/2224-9923/2017.1.9. (In Russian).
13. **Mikhailov A.G., Kharitonova M.Yu., Vashlaev I.I., Sviridova M.L.** Leaching of Gold and Non-Ferrous Metals with Non-Cyanide Solvents. *Uspekhi Sovremennogo Estestvoznaniya*. 2016;7:132–136. (In Russian).
14. **Murzin N.V., Cheng Mun Il, Skvortsov D.E., Burdonov A.E.** Assessment of Placer Beneficiation Experience Using Sluice Washing Units. *Ustoychivoye razvitiye gornykh territoriy*. 2026;18;1(67):242–250. https://doi.org/10.21177/1998-4502-2026-18-1-242-250. (In Russian).
15. **Mustafin S.K., Anisimova G.S., Trifonov A.N., Struchkov K.K.** Technogenic Mineral Raw Materials of Subsoil Use Regions: Nature, Composition and Prospects for Rational Use. *Nauka i Obrazovanie*. 2017;4:7–16. (In Russian).
16. **Nagaeva O.S., Shaparev N.Ya.** System of Payments for Natural Resources for the Sustainable Development of a Resource Territory. *Vestnik SibGAU*. 2009. (In Russian).
17. **Naumov V.A., Ilaltdinov I.Ya., Naumova O.B., Koltsov V.A.** Assessment of Gold Content in Technogenic Alluvial Deposits. *Sovremennye Problemy Nauki i Obrazovaniya*. 2013;4. (In Russian).
18. **Naumov V.A.** Scientific Foundations for Managing Geological Processes in Technogenic Mineral Formations. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*. 2018;9;(75):14–19. https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.75.9.016. (In Russian).
19. Sustainable Development Bonds. St. Petersburg Exchange. (In Russian).
20. Waste from Russian Mining Exceeded 9 Billion Tonnes in 2025: Statement by E. Tanin, Director of the Department of State Policy and Regulation in Geology and Subsoil Use, Russian Ministry of Natural Resources. RIA Novosti / 1Prime, 2026. (In Russian).
21. Pechenganikel. Kola Encyclopedia. (In Russian).
22. Nature of Russia: Tula Region. Information and Reference System "Nature of Russia". (In Russian).
23. **Prokhorov D.O.** Technogenic Deposits: Comprehensive Inventory and Cadastral Assessment of Technogenic Mineral Objects of the Sverdlovsk Region. Tula, 2024:333. (In Russian).
24. **Punishko O.A., Katysheva S.V.** Methods of Sampling Stored Tailings of Gold Recovery Plants and Some Patterns of Gold Distribution in Tailings Storage Facilities. *Vestnik Irkutskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*, 2011;10;(57):157–161. (In Russian).
25. **Razmakhnin K.K., Khatkova A.N., Shumilova L.V., Nomokonova T.S.** Technology of Processing and Beneficiation of Ash and Slag Waste. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2023;10:122–135. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_10_0_122. (In Russian).
26. Rare Earth Metals. State Report on the Status and Use of Mineral Resources of the Russian Federation in 2023. Moscow, Rosgeolfond Publ. 2024:489–508. (In Russian).
27. The Russian ESG Financing Market: 2024 Forecast. Kommersant, 2024. (In Russian).
28. Russian Federation. Bank of Russia Regulation N 706-P of 19.12.2019, "On Securities Issuance Standards" (as amended on 04.03.2024), Ch. 65. (In Russian).
29. Russian Federation. Decree of the Government of the Russian Federation N 1587 of 21.09.2021, "On Approval of the Criteria for Sustainable (Including Green) Development Projects in the Russian Federation..." (as amended on 14.10.2025). (In Russian).
30. Russian Federation. Federal Agency for Subsoil Use. Methodological Recommendations for the Exploration of Technogenic Deposits of Placer Gold and Platinum Group Metals. Approved by Rosnedra on 10.09.2025. (In Russian).
31. **Ryabov G.G.** Ecological Characteristics of the Territory of the Moscow Coal Basin. *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*.

2014;4:25–36. (In Russian).

32. Method for Beneficiation of Sulphide Copper-Nickel Ores Containing Platinum Group Minerals and Magnetite: Patent RU 2144429 C1. Google Patents. (In Russian).
33. **Tarasenko I.A., Zinkov A.V.** Environmental Consequences of Mineralogical and Geochemical Transformations of Sn-Ag-Pb-Zn Ore Processing Tailings. Vladivostok, Dalnauka Publ. 2001:184. (In Russian).
34. Tula Mines of the Moscow Coal Basin Await Investors. Tula News. (In Russian).
35. **Usmanova N.F., Shoshina A.S.** Extraction of Non-Ferrous and Precious Metals from the Slime Fraction of Weathered Tailings of Copper-Nickel Ore Processing. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2009;15;(12):493–500. (In Russian).
36. Far East and Arctic Development Fund. Official Website of the Russian Ministry for the Development of the Far East and the Arctic. (In Russian).
37. **Chernyakov V.E.** Methodology for Structuring ESG-Segment Bond Issues for Sustainable Development Projects in the Russian Mining Industry. 2026. (In Russian).
38. **Chernyakov V.E.** Problems of Legal Regulation of Industrial Extraction of Placer Gold from Technogenic Mineral Formations in the Russian Federation. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2025;7:184–193. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_7_0_184. (In Russian).
39. The Yurskoye Gold Deposit in Yakutia: Placer Exploration Methodology. Vnedra.ru. (In Russian).
40. **Canhimbue L., Talovina I.** Geochemical Distribution of Platinum Metals, Gold and Silver in Intrusive Rocks of the Norilsk Region. *Minerals.* 2023;13;(6) art. 719. https://doi.org/10.3390/min13060719.
41. Critical-Minerals Recovery from Mine Tailings: A Technical Assessment. *Idaho National Laboratory*. 2026, Report N INL-RPT-25-89279.
42. ESG Funds and Critical Minerals: Financing the Energy Transition. SFA Oxford.
43. Financing the Responsible Mining of Critical Minerals Using Thematic Bonds: Roundtable Summary. Center on Global Energy Policy, Columbia University SIPA, 2024.
44. Use and Recovery of Extractive Waste and Tailings for Sustainable Raw Materials Supply. Mining, 2024. https://doi.org/10.3390/mining4010010.

Данные по промышленным объектам взяты из публичных источников и архивов Российского федерального геологического фонда (Росгеолфонда).

Черняков Валентин Евгеньевич,
соискатель кандидата экономических наук, член совета директоров объединения АЗДК «Золото Якутии», представитель Высшего горного совета по развитию юниорных компаний и проектов переработки техногенных отвалов

129515, г. Москва, ул. Академика Королева, д. 13, стр. 1,
129515, Moscow, st. Academician Koroleva, 13, building 1,
тел.: +7 (985) 108-35-22, e-mail: ch.valentin.gold@bk.ru

УДК 338.574
DOI: 10.52531/1682-1696-2026-26-3-92-97
Научная статья
EDN: RVSNRA

ВАЛЮТА ПРИРОДЫ: КАК РАБОТАЕТ СИСТЕМА НАЦИОНАЛЬНОГО БАЛАНСА ЕДИНИЦ ПРИРОДНОГО КАПИТАЛА (НБЕПК)

Е.В. Кузьмина[1], Д.И. Тартаковская[2], К.Э. Чилингаров[3]
[1] ПАО Банк ПСБ (г. Ярославль, Россия)
[2] ООО «Рош диагностика Рус» (Москва, Россия)
[3] Администрация Президента РФ (Москва, Россия)

В статье рассматривается внутренняя логика и организационно-экономические механизмы функционирования системы «Национального баланса единиц природного капитала», позволяющей, по мнению авторов, минимизировать «экологические провалы» современной рыночной системы хозяйствования. Эти провалы заключаются в системной недооценке природного потенциала, позитивных и полезных эффектов от функционирования устойчивых экологических систем. В частности, предложен алгоритм расчета сальдо единиц природного капитала (сальдо ЕПК) для каждого субъекта РФ.

Ключевые слова: *регион, реформа, природные ресурсы, экономическая оценка, сальдо, единица природного капитала*

Original article

THE CURRENCY OF NATURE: HOW THE NATIONAL BALANCE OF NATURAL CAPITAL UNITS (NBUCU) SYSTEM WORKS

E.V. Kuzmina[1], D.I. Tartakovskaya[2], K.E. Chilingarov[3]
[1] PAO Bank PSB (Yaroslavl, Russia)
[2] OOO Roche Diagnostics Rus (Moscow, Russia)
[3] Administration of the President of the Russian Federation (Moscow, Russia)

This article examines the internal logic and organizational and economic mechanisms of the National Balance of Natural Capital Units system. The authors believe this system minimizes the "environmental failures" of the modern market economy. These failures stem from the systemic underestimation of natural potential and the positive and beneficial effects of sustainable ecological systems. Specifically, an algorithm for calculating the Balance of Natural Capital Units (BNU) for each constituent entity of the Russian Federation is proposed.

Key words: *region, reform, natural resources, economic assessment, balance, natural capital unit*

ВВЕДЕНИЕ

В предыдущей статье авторов [2] была рассмотрена фундаментальная проблема современной экономики – «экологическая слепота» бизнеса, ведущая к накоплению экологического долга. Было показано, что природный капитал России является не пассивом, а стратегическим активом, способным обеспечить конкурентное преимущество в условиях глобального климатического регулирования (CBAM).

Однако констатация факта наличия актива ещё не делает его ликвидным. Чтобы природный капитал стал работающим инструментом экономической политики, необходима точная, верифицируемая и прозрачная система учета. Бизнес и региональные власти справедливо задают вопрос: «Как это будет работать на практике? Не превратится ли это в еще один налог?».

Настоящая статья посвящена рассмотрению и описанию ядра концепции Национального баланса единиц природного капитала (НБЕПК). Будет подробно разобрана механика расчета, система коэффициентов и экономические механизмы, которые гарантируют предсказуемость затрат и защиту от шоковых нагрузок.

© 2026, Е.В. Кузьмина, Д.И. Тартаковская, К.Э. Чилингаров
Поступила в редакцию 07.09.2026

СОДЕРЖАНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЕГО РЕЗУЛЬТАТЫ

Ключевой инновацией концепции НБЕПК является двухэтапная процедура оценки и управления.

Первый этап (физический учет и агрегация) представляет собой блок научной методологии, который можно назвать «Физическим учетом». На этом этапе все разнородные виды воздействий (выбросы, сбросы, отходы, физическое нарушение земель) и все виды экологической устойчивости (поглощение CO_2, очистка воды, сохранение биоразнообразия) приводятся к единой метрике – условной единице воздействия (УЕВ), на основе принципов Системы эколого-экономического учета ООН (SEEA) [11] и международных факторов характеризации жизненного цикла (LCA) [5].

Процесс работает следующим образом. Заводы, леса и почвы, как источники воздействия или поглотители, измеряются в физических единицах (тонны, кубометры, гектары). Затем применяется формула перевода в УЕВ.

Важно понимать, что к разным процессам применяются разные коэффициенты качества.

Если мы создаем актив (сажаем лес, восстанавливаем почву), применяется коэффициент постоянства (α). Он снижает оценку результата, если есть риск, что лес сгорит или почва деградирует (концепция перманентности, адаптированная из методологий МГЭИК [6]).

Если мы уничтожаем уникальный актив (вырубаем девственную тайгу, разрушаем чернозем), применяется индекс невосполнимости (ИН). Он многократно увеличивает оценку ущерба, так как восстановить такое невозможно (опирается на теорию критического природного капитала [7]).

Таким образом, формула учета выглядит так:

Физический объем × Коэффициент эквивалентности (e_i) × Коэффициент качества (α или ИН) = УЕВ.

Коэффициент физической эквивалентности (e_i) – научно обоснованный множитель для перевода физических объемов воздействий (тонны, $м^3$, га) в УЕВ. Базируется на потенциале ущерба или пользы относительно эталонного воздействия.

Коэффициент постоянства (α) – Понижающий коэффициент ($\alpha < 1$), применяемый к единицам НБЕПК, связанным с рисками потери достигнутого результата. Применяется только к созданию/восстановлению активов и предоставлению услуг. Дополняется ИН для уникальных экосистем. Рассчитывается на основе оценки рисков и плана минимизации риска «непостоянства».

Индекс невосполнимости (ИН) – метрический показатель ($\geq 1{,}0$), оценивающий уникальность и невозможность восстановления экосистемы в случае утраты. Применяется только к потере/деградации активов и услуг. Коэффициенты α и ИН никогда не применяются одновременно к одному потоку (правило взаимного исключения).

Важно подчеркнуть, что этот первый этап утверждается создаваемым Научно-методологическим комитетом (НМК) и не зависит от политической конъюнктуры. Это гарантирует бизнесу стабильность правил игры: научные методики не меняются ежегодно под давлением бюджетных потребностей.

Второй этап (экономическая оценка и применение механизмов) представляет собой блок экономической политики, который можно назвать «Экономической оценкой». Только после расчета всех балансов в УЕВ, для целей финансовых стимулов и санкций устанавливается расчетная стоимостная ставка (РСС) в рублях за 1 УЕВ [3]. Формула второго этапа проста: УЕВ × РСС = Финансовое обязательство.

Эта ставка является инструментом экономической политики и утверждается Правительством РФ. Таким образом, система четко разделяет научно-методологическую основу (перевод в УЕВ) и экономико-управленческое применение (перевод в рубли через РСС). Между двумя этапами осуществляется верификация Федеральным экологическим центром (ФЭЦ), который обеспечивает целостность системы.

В центре системы – расчет сальдо единиц природного капитала (сальдо ЕПК) для каждого субъекта РФ. Это не просто отчетный показатель, это «экологический баланс» территории, аналогичный финансовому балансу предприятия.

Сальдо ЕПК (в УЕВ) определяется за отчетный период (год) по формуле:

Сальдо ЕПК = Σ (поглотительная/регенеративная способность экосистем региона в УЕВ) – Σ (антропогенная нагрузка от хозяйственной деятельности региона в УЕВ), где:

– антропогенная нагрузка – совокупный объем всех видов воздействия хозяйственной деятельности (выбросы, сбросы, отходы, физическое воздействие), пересчитанный через систему коэффициентов физической эквивалентности (e_i) в УЕВ;

– поглотительная способность – потенциал природных экосистем ассимилировать загрязнения и восстанавливать ресурсы, выраженный в УЕВ с учетом соответствующего коэффициента постоянства (α).

Интерпретация сальдо ЕПК имеет три аспекта. Положительное сальдо означает, что регион функционирует с экологическим запасом прочности: поглотительная способность превышает антропогенную нагрузку. Отрицательное сальдо свидетельствует о том, что регион живет в режиме экологического перерасхода: нагрузка превышает способность природы к самовосстановлению, что ведет к накоплению экологического долга. Динамика (прирост) сальдо ЕПК – изменение абсолютного сальдо относительно базового уровня – является ключевым показателем эффективности системы.

Чтобы проиллюстрировать, как работает система на практике, рассмотрим динамику сальдо для условного промышленного региона. При базовом сценарии (без внедрения НБЕПК) сальдо такого региона неуклонно снижается: начиная с –10 млн УЕВ в 2026 г., оно падает до –50 млн УЕВ к 2035 г. Это сценарий накопления экологического долга.

Однако при внедрении НБЕПК траектория меняется кардинально. Регион начинает с того же уровня (–10 млн УЕВ в 2026 г.), но благодаря последовательным мерам ситуация улучшается. В 2027 г. внедряются наилучшие доступные технологии (НДТ), что замедляет падение сальдо. К 2028 г. начинается рекультивация земель, и сальдо выходит на нулевую отметку. К 2030 г. запускается масштабное лесовосстановление, и регион переходит в зону положительного сальдо, достигая +45 млн УЕВ к 2035 г.

Этот пример наглядно демонстрирует, что цель системы – не наказание за отрицательное сальдо, а стимулирование его положительной динамики (прироста). НБЕПК создает экономические стимулы для перехода от экологического долга к экологическому активу, что соответствует современным подходам к оценке национального богатства Всемирного банка [12].

Наиболее критичным вопросом для бизнеса и экологического сообщества является достоверность оценки. Не все гектары лесов и не все тонны выбросов одинаковы. Концепция НБЕПК вводит два защитных механизма, исключающих «зеленый камуфляж» и обеспечивающих научную строгость: коэффициент постоянства (α) и индекс невосполнимости (ИН).

Важно подчеркнуть Правило взаимного исключения: коэффициенты α и ИН никогда не применяются одновременно к одному и тому же потоку.

Коэффициент постоянства (α) применяется только к созданию/восстановлению активов (защита от риска обратной потери).

ИН применяется только к потере/деградации активов (защита от необратимой утраты уникальности).

Коэффициент постоянства (α) – дисконтирование за риск.

Концепция «постоянства» (permanence) отвечает на вопрос: «Как долго сохранится достигнутый результат поглощения?». Единицы НБЕПК, полученные за счет поглотителей с высоким риском обратной потери (например, углерод, накопленный в почве в засушливом регионе), учитываются с понижающим коэффициентом.

Примеры значений коэффициента постоянства (α):

– коренные ненарушенные леса (тайга): 0,90–0,98 (высокая устойчивость);

– лесопосадки промышленного назначения (<20 лет): 0,50–0,70 (риск пожаров, болезней);

– секвестрация углерода в почвах (нулевая обработка почвы): 0,30–0,45 (высокий риск распашки).

Это означает, что бизнесу выгоднее инвестировать в устойчивые проекты с высоким α, чем в рискованные «однодневки».

Индекс невосполнимости (ИН) – защита уникальности, это повышающий мультипликативный коэффициент, который применяется к потерям экосистемы при расчете экологического ущерба. Его функция – сделать уничтожение уникальных природных объектов экономически нецелесообразным.

Примеры значений ИН:

– базовая деградация земель (восстановимые агроэкосистемы): 1,0;

– нарушение вторичных лесов: 2,0–3,0;

– уничтожение участков девственной тайги, нетронутых степей: 7,0–10,0;

– уничтожение черноземов (эрозия, загрязнение): 8,0–10,0.

Чтобы продемонстрировать, как работает матрица коэффициентов на практике, рассмотрим три сценария для участка леса площадью 1000 га.

Сценарий 1. Вырубка вторичного леса. Потеря составляет 100 000 т CO_2. Применяем коэффициент e_i(1,0) и ИН(2,5) для вторичных лесов. Расчет: 100 000 × 1,0 × 2,5 = 250 000 УЕВ ущерба.

Сценарий 2. Вырубка девственной тайги. Та же потеря 100 000 т CO_2, но для уникальной экосистемы применяется ИН(8,0). Расчет: 100 000 × 1,0 × 8,0 = 800 000 УЕВ ущерба.

Сценарий 3. Лесовосстановление. Прирост составляет 50 000 т CO_2. Применяем e_i(1,0) и α(0,6) для молодых посадок. Расчет: 50 000 × 1,0 × 0,6 = 30 000 УЕВ актива.

Эти расчеты наглядно демонстрируют критически важный принцип: уничтожение уникального актива требует компенсации в 20+ раз большей, чем создание нового. Уничтожение девственной тайги (800 000 УЕВ) обходится в 26 раз дороже, чем создание нового леса (30 000 УЕВ). Система защищает качественный природный капитал, делая экономически невыгодным уничтожение уникальных экосистем.

Для российских условий, учитывая разнообразие регионов и чувствительность промышленности, наилучшей представляется гибридная модель, построенная по принципу «обязательное ядро – опциональная гибкость», что согласуется с теорией гибридных экологических инструментов [3].

Ядро – двухконтурная система финансовой ответственности.

1. Первый контур (Плата за состояние): регионы с отрицательным абсолютным сальдо ЕПК уплачивают базовый экологический платеж. Это реализация принципа «загрязнитель платит».
2. Второй контур (Стимулы к трансформации) – для каждого региона утверждается план перехода к положительному сальдо:

– выполнение плана – регион получает «экологическую премию»;

– невыполнение плана – регион уплачивает целевой экологический сбор (штраф).

Инструменты гибкости – ограниченный рынок УЕВ. Рынок УЕВ рассматривается как вспомогательный инструмент, а не движущая сила системы:

– лимитирование – не более 30–50% от планового прироста сальдо ЕПК регион может покрыть за счет покупки УЕВ. Остальное – за счет внутренних действий (снижение выбросов, восстановление);

– для предприятий I категории – лимит покупки УЕВ составляет 20–30% от обязательств по сокращению воздействия. Это гарантирует, что бизнес будет инвестировать в модернизацию, а не просто откупаться;

– ценовой потолок – государство готово продавать единицы из резерва по фиксированной цене, защищая рынок от спекулятивных шоков.

Ключевым элементом системы является принцип замкнутого финансового цикла, который гарантирует, что средства не уходят в «черную дыру» бюджета, а реинвестируются в модернизацию и восстановление.

В центре системы находится создаваемый Экологический фонд НБЕПК, который аккумулирует все финансовые потоки (модель целевого экологического фондирования [1]).

Доходы Фонда:

– платежи за отрицательное сальдо ЕПК от регионов-должников, которые функционируют в режиме экологического перерасхода;

– целевые сборы за невыполнение установленных показателей от регионов, т.е. не справившихся с траекторией прироста сальдо ЕПК;

– отчисления с рынка УЕВ (комиссии от транзакций);

– от размещения временно свободных средств Фонда;

– добровольные и благотворительные взносы.

Расходы Фонда:

– эко-премии регионам-лидерам (40–50%) – значительная часть средств возвращается регионам, выполнившим и перевыполнившим целевые показатели. Это создает позитивный цикл: чем лучше регион работает, тем больше средств получает на дальнейшие экологические инвестиции.

– программа «Зеленый рывок» для промышленных регионов (30–40%) – средства направляются на софинансирование модернизации, переподготовки кадров и создания новой экономики в депрессивных промышленных регионах. Это инвестиция в сокращение будущих экологических платежей и социальных рисков.

– инфраструктура и федеральные проекты (10–20%) – финансирование проектов восстановления экосистем федерального значения и содержание Национальной платформы экологических данных (НПЭД).

Таким образом, система создает полноценный замкнутый финансовый цикл, в котором штрафные платежи за деградацию трансформируются в инвестиции в восстановление и стимулирование дальнейшего прироста природного капитала. Принцип самоокупаемости системы обеспечивает ее долгосрочную устойчивость и снимает перманентную нагрузку с федерального бюджета.

Чтобы понять преимущества новой системы, проведем сравнение НБЕПК с существующим инструментом – платой за негативное воздействие на окружающую среду (НВОС), зарегулированной Федеральным законом № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» [4].

По объекту учета:

– плата за НВОС учитывает только негативное воздействие (выбросы, сбросы, отходы);

– НБЕПК учитывает баланс между нагрузкой и поглотительной способностью экосистем. Это принципиально иной подход: система оценивает не только то, сколько регион загрязняет, но и сколько природа может поглотить.

По стимулам:

– плата за НВОС не создает стимулов за восстановление – это просто плата за загрязнение;

– НБЕПК предусматривает премии за прирост сальдо. Регионы и компании получают финансовую выгоду от улучшения экологической ситуации.

По прозрачности:

– плата за НВОС характеризуется низкой прозрачностью – методики расчета часто непрозрачны, данные разрознены;

– НБЕПК обеспечивает высокую прозрачность через блокчейн-инфраструктуру и Национальную платформу экологических данных (НПЭД). Все транзакции, расчеты и данные доступны для верификации.

По защите от CBAM:

– плата за НВОС не дает защиты от углеродного налога ЕС;

– НБЕПК предусматривает верифицируемые платежи, которые могут быть зачтены при расчете CBAM. Это позволяет российским экспортерам снижать платежи в бюджет ЕС, аккумулируя средства внутри страны.

По экономическому эффекту:

– плата за НВОС представляет собой затраты без возврата – деньги уходят в бюджет без целевого использования;

– НБЕПК создает замкнутый финансовый цикл, где средства реинвестируются в экологические проекты и модернизацию.

Критики концепции часто апеллируют к рискам для промышленности. Однако архитектура НБЕПК

содержит встроенные механизмы смягчения этих рисков.

1. Поэтапность внедрения: полноценный запуск экономического контура планируется только после 2030–2035 гг. (Этап III Дорожной карты). Бизнес получает время на адаптацию.
2. Предсказуемость ставок: разделение физической методики (УЕВ) и экономической ставки (РСС) позволяет бизнесу моделировать затраты на долгосрочную перспективу. РСС утверждается Правительством РФ с учетом социально-экономических факторов.
3. Возможность зачета платежей CBAM: платежи в рамках НБЕПК могут служить инструментом снижения платежей по механизму CBAM для российских экспортеров. Согласно статье 9 Регламента CBAM [7], механизм предусматривает возможность вычета из суммы сбора тех платежей за выбросы углерода, которые уже были уплачены в стране происхождения товара. Деньги остаются в России (в Экологическом фонде НБЕПК) и идут на модернизацию отечественной промышленности, а не в бюджеты других стран.
4. Поддержка трансформеров: для промышленных регионов предусмотрены программы «Зеленый рывок» и льготные переходные периоды. Средства Фонда направляются на софинансирование модернизации, а не только на штрафы.

Реализация НБЕПК невозможна без надежной цифровой архитектуры. Технологической основой системы станет Национальная платформа экологических данных (НПЭД) – единый источник верифицированных данных, концептуально развивающий международные подходы к цифровому MRV (мониторингу, отчетности и верификации) [13].

1. Сбор данных: интеграция с государственными системами (Росгидромет, Росстат, Росприроднадзор), данными ДЗЗ (спутники «Канопус-В», «Метеор-М») и IoT-сенсорами предприятий.
2. Верификация: использование ИИ для проактивного выявления аномалий и рисков фальсификации.
3. Реестр: блокчейн-инфраструктура для учета УЕВ, гарантирующая защиту от двойного счета и прозрачность транзакций, что подтверждается мировой практикой применения распределенных реестров в углеродном регулировании [9].

Оператором системы выступит Федеральный экологический центр (ФЭЦ) – аналог ЦБ в экологии, наделенный полномочиями по расчету сальдо и управлению фондом. Важно отметить разграничение полномочий: ФЭЦ не подменяет контрольно-надзорные органы (Росприроднадзор), а предоставляет им верифицированные данные для принятия решений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Национальный баланс единиц природного капитала (НБЕПК) – это не «налог на воздух», это система навигации для экономики в условиях экологических ограничений. Она предлагает бизнесу и регионам прозрачную формулу: Усилия по снижению нагрузки + Восстановление капитала = Финансовая выгода.

Внедрение двухэтапной методики (УЕВ + РСС), системы защитных коэффициентов (α и ИН) и гибридной экономической модели создает баланс между экологической необходимостью и экономической реалистичностью.

В последующих публикациях авторами будет сформулирована дорожная карта внедрения НБЕПК, определены параметры пилотных проектов и предложены конкретные шаги для регионов и компаний, желающих стать участниками «зеленого рывка» на ранних его этапах.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бобылев С.Н.** Экономика природопользования: учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2021. 415 с.
2. **Кузьмина Е.В., Тартаковская Д. И., Чилингаров К.Э.** Экологическая слепота экономики: почему природный капитал становится главным активом будущего // «Вестник РАЕН». 2026. Т. 26. №2. С. 73–78.
3. **Титенберг Т.** Экономика окружающей среды и природных ресурсов. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2018. 511 с.
4. Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды». Собрание законодательства РФ. 2002. № 2. Ст. 133 (с изм. и доп.).
5. **Huijbregts M.A.J., Steinmann Z.J.N., Elshout P.M.F. et al.** ReCiPe2016: a harmonised life cycle assessment method to characterise environmental impacts // The International Journal of Life Cycle Assessment. 2017. V. 22. N 2. P. 138–147.
6. IPCC. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Geneva: IPCC, 2019. 660 p.
7. **Pearce D., Turner R.K.** Economics of Natural Resources and the Environment. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1990. 332 p.
8. Regulation (EU) 2023/956 of the European Parliament and of the Council of 10 May 2023 establishing a Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) // Official Journal of the European Union. 2023. L 130. P. 5–54.
9. **Tasca L., Cechinel M., Lenz R.** Blockchain for environmental markets and carbon credits: A systematic review // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 318. Article 128532.

10. The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard. 5th ed. Washington, DC: World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development, 2015. 394 p.
11. United Nations. System of Environmental-Economic Accounting 2012: Central Framework (SEEA-CF). New York: United Nations, 2014. 525 p.
12. World Bank. The Changing Wealth of Nations 2021: From Wealth to Wellbeing. Washington, DC: World Bank, 2021. 254 p.
13. World Resources Institute (WRI). Digital MRV: Using Technology to Enhance Transparency in Climate and Environmental Action. Washington, DC: WRI, 2022. 84 p.

REFERENCES

1. **Bobylev S.N.** Economics of Nature Management: A Textbook for Higher Education Institutions. 2nd ed., revised and supplemented. Moscow: Yurayt, 2021:415.
2. **Kuzmina E.V., Tartakovskaya D.I., Chilingarov K.E.** The Economic Blind Spot Regarding the Environment: Why Natural Capital Is Becoming the Key Asset of the Future. *Vestnik RAYEN*. 2026;26;(2):73–78.
3. **Tietenberg T.** Environmental and Natural Resource Economics. Moscow: UNITY-DANA, 2018:511.
4. Federal Law No. 7-FZ of January 10, 2002, "On Environmental Protection". Collection of Legislation of the Russian Federation. 2002. N 2. Art. 133 (as amended and supplemented).
5. **Huijbregts M.A.J., Steinmann Z.J.N., Elshout P.M.F. et al.** ReCiPe2016: a harmonised life cycle assessment method to characterise environmental impacts. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2017;22;(2):138–147.
6. IPCC. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Geneva: IPCC, 2019:660.
7. **Pearce D., Turner R.K.** Economics of Natural Resources and the Environment. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1990:332.
8. Regulation (EU) 2023/956 of the European Parliament and of the Council of 10 May 2023 establishing a Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM). *Official Journal of the European Union*. 2023;130:5–54.
9. **Tasca L., Cechinel M., Lenz R.** Blockchain for environmental markets and carbon credits: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*. 2021;318. Article 128532.
10. The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard. 5th ed. Washington, DC: World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development, 2015:394.
11. United Nations. System of Environmental-Economic Accounting 2012: Central Framework (SEEA-CF). New York: United Nations, 2014:525.
12. World Bank. The Changing Wealth of Nations 2021: From Wealth to Wellbeing. Washington, DC: World Bank, 2021:254.
13. World Resources Institute (WRI). Digital MRV: Using Technology to Enhance Transparency in Climate and Environmental Action. Washington, DC: WRI, 2022:84.

Кузьмина Екатерина Витальевна,
Вице-президент, управляющий директор по развитию ПАО Банк ПСБ

150003, Ярославская обл., г. Ярославль,
ул. Республиканская, д. 16,
150003, Yaroslavl region, Yaroslavl, st. Respublikanskaya, 16,
тел.: +7 (901) 551-51-11,
e-mail: mammontheffectorg@gmail.com

Тартаковская Дина Игоревна,
к.б.н., менеджер ООО «Рош диагностика Рус»

107031, г. Москва, Трубная площадь, д. 2,
107031, Moscow, Trubnaya Ploshchad, 2,
тел.: +7 (903) 199-94-43, e-mail: dina.ttv@gmail.com

Чилингаров Карен Эдуардович,
зам. начальника департамента Управления по вопросам формирования и деятельности государственного Совета РФ Администрации Президента РФ

103132, г. Москва, Старая площадь, д. 4, стр. 1,
103132, Moscow, Staraya Square, 4, Bldg. 1,
тел.: +7 (906) 794-83-30, e-mail: chili-kar@mail.ru

УДК 626.88
DOI: 10.52531/1682-1696-2026-26-3-98-106
Научная статья
EDN: SDQTFR

О НАИБОЛЕЕ ДОСТУПНОЙ ПРИРОДОПОДОБНОЙ ТЕХНОЛОГИИ СОХРАНЕНИЯ, РАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДНЫХ БИОРЕСУРСОВ И УЛУЧШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ПУТЕМ УНИФИКАЦИИ РИФОЗДАНИЯ

А.В. Иванов, П.В. Ратников
АО «Институт Гидропроект» (Москва, Россия)

Рассмотрены проблемы и перспективы оптимизации мер по сохранению водных биоресурсов при эксплуатации особо крупных водозаборов и ГЭС. Показано, что пути оптимизации мер следует искать в использовании возможностей рыбохозяйственной рифовой мелиорации, позволяющей обеспечить защиту рыб и рациональное использование кормовых ресурсов путем эколандшафтной коррекции естественной среды их обитания с помощью рукотворных рифовых структур, создаваемых из унифицированных деталей: колец стеновых и балок Г-образного профиля.

Ключевые слова: *сохранение рыб и иных водных биоресурсов, защита рыб, рыбохозяйственная мелиорация, эколандшафтная коррекция подводного ландшафта, рукотворный рифовый модуль, унифицированная деталь*

Original article

ABOUT THE MOST ACCESSIBLE NATURE-LIKE TECHNOLOGY CONSERVATION AND RATIONAL USE OF WATER RESOURCES BIORESOURCES AND IMPROVEMENT OF THE ECOLOGICAL CONDITION OF WATER BODIES THROUGH THE UNIFICATION OF REEF CREATION

A.V. Ivanov, P.V. Ratnikov
JSC «Institute Hydroproject» (Moscow, Russia)

The problems and prospects for optimizing measures to preserve aquatic biological resources during the operation of particularly large water intake structures and hydroelectric power plants are considered. It is shown that the ways to optimize measures should be sought in leveraging the potential of fishery reef reclamation, which makes it possible to ensure the protection of fish and the rational use of feeding resources through ecological landscape correction of their natural habitat using man made reef structures created from standardized components: wall rings and L shaped beams.

Key words: *conservation of fish and other aquatic biological resources, fish protection; fishery reclamation, eco landscape correction of the underwater landscape, man made reef module, standardized component*

АНАЛИЗ ЗАКОНОДАТЕЛЬНОЙ БАЗЫ

Развитие современной цивилизации немыслимо без увеличения водопотребления для нужд энергетики, промышленности, сельского и коммунального хозяйств. Однако вместе с водой в водозаборы попадают и гибнут рыба и иные водные биоресурсы (ВБР). Рыбному хозяйству причиняется серьезный вред, который согласно российскому законодательству необходимо предотвращать. Существуют два основных подхода к охране ВБР на водозаборах. Так, водопользователи обязаны принимать меры согласно:

– Водному кодексу РФ от 03.06.2006 № 74-ФЗ – по предотвращению попадания рыб и иных ВБР в водозаборы [1];

– Федеральному закону от 20.12.2004 № 166-ФЗ «О рыболовстве и сохранении водных биологических ресурсов» – по сохранению ВБР и среды их обитания [17].

© 2026, А.В. Иванов, П.В. Ратников
Поступила в редакцию 01.09.2026

Казалось бы, оба документа об одном и том же – однако это не так.

Водный кодекс РФ обязывает предотвращать гибель ВБР в водозаборах. Федеральный закон «О рыболовстве ...» [17] обязывает сохранить ВБР в прежнем состоянии, то есть, если не удастся уберечь их от гибели, то восстановить «посредством искусственного воспроизводства» [9], предварительно получив от водопользователя компенсацию за гибель ВБР на водозаборах.

Отсюда следует, что Федеральный закон «О рыболовстве ...» [17] допускает гибель ВБР на водозаборах с тем, чтобы компенсировать ее выпуском искусственно выращенной молоди ценных видов рыб, которая также погибнет в тех же водозаборах, не оборудованных рыбозащитой [6].

Однако Конституция РФ обязывает «сохранять природу, бережно относиться к ее богатствам» [5], то есть на водозаборах рыбу необходимо беречь от гибели, а не делать ставку на ее искусственное восстановление.

Поэтому в Постановлении Правительства РФ от 29.05.2025 № 785 «Об утверждении положения о мерах по сохранению водных биологических ресурсов и среды их обитания» гибель ВБР на водозаборах и проведение восстановительных мероприятий допускаются только «в случае невозможности предотвращения негативного воздействия» [5]. В то же время при оборудовании водозабора эффективной рыбозащитой шансы на «проведение мероприятий по устранению последствий негативного воздействия на состояние биоресурсов и среды их обитания посредством искусственного воспроизводства» [5] сводятся к минимуму. Однако такая перспектива устраивает далеко не всех. Поэтому, чтобы исключить возможность отказа от проведения компенсационного искусственного воспроизводства ВБР, необходимо скомпрометировать рыбозащиту, создать миф о невозможности ее существования на крупных водозаборах и ГЭС – источниках взимания максимальных компенсаций.

Очевидно, что основным инструментом, с помощью которого этот миф можно создать, является «рыбозащитный» Свод правил СП 101.13330.2023 «Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения» [14].

Каким же образом с помощью СП [14] можно скомпрометировать рыбозащиту, доказать, что создать ее на крупных водозаборах и, главное, на ГЭС, якобы невозможно?

АНАЛИЗ НОРМАТИВНОЙ БАЗЫ

Если проанализировать структуру СП [14], можно отметить, что он состоит из двух основных компонентов:

– объективно необходимые, обязательные к выполнению требования, предъявляемые к защите рыб, которая предназначена для предотвращения попадания рыб в водозабор и отведения в жизнеспособном состоянии в безопасное место рыбохозяйственного водного объекта;

– субъективно рекомендуемые конструкции рыбозаградителей, главным образом, сетчатых или электрических, то есть, по сути, браконьерских сетей и электроудочек, допускающих травмирующий молодь контакт с защитным экраном или полем, приводящий к потере рыбами жизнеспособности. Кроме того, в конструкции нормативных рыбозаградителей на водохранилище отсутствует безопасное место, в которое необходимо отводить защищенных рыб, и которое обязано обеспечивать их безопасность, в частности, укрывать от хищников и предотвращать повторное возвращение к водозабору.

Анализ СП [14] показывает, что субъективные рекомендации практически полностью противоречат объективно необходимым, обязательным к выполнению требованиям, то есть не обеспечиваются:

– жизнеспособность травмированных рыб;

– защита от хищников;

– предупреждение повторного возвращения к водозабору.

Поэтому рыба даже при наличии рыбозаградителя, циркулируя перед водозабором и регулярно травмируясь и слабея, становится более доступной для хищников и водозабора. Тем самым защита рыб не обеспечивается, а для защиты планктона рыбозаградители вообще не предназначены. Поэтому водопользователя понуждают платить ежегодную компенсацию за гибель рыб и иных ВБР, не защищенных заведомо ущербными рыбозаградителями.

Что касается крупных ГЭС, то СП не требует от водопользователя-гидроэнергетика достижения на них нормативной эффективности 70% [14]. Компенсационные выплаты определяются по факту реальной гибели на ГЭС рыб и планктона. Причем очевидно, что чем рыбозащита хуже, тем больше вред ГЭС причиняет ВБР, тем больше размер компенсаций.

Повышению вреда, причиняемого ВБР, а вместе с ним и размера компенсаций, способствует также изобилие в СП [14] энергозатратных рыбозаградителей, которые для экономии электроэнергии на период между их проверками можно просто отключить. Очевидно, что после этого рыбозаградители перестают выполнять свою основную рыбозащитную функцию, и водозабор причиняет состоянию ВБР максимально возможный вред.

Для того, чтобы исправить негативную ситуацию необходимо субъективные рекомендации рыбозаградителей [14] привести в соответствие с объективными требованиями к нормативной защите рыб [14]. Однако в настоящее время поступают иначе – при разработке и согласовании проектов рыбозаградителей ориентируются на перечень субъективных рекомен-

даций, а их несоответствие объективным требованиям оставляют без внимания.

Для приведения рыбозащиты в приемлемое для водопользователя-гидроэнергетика состояние в его интересах приоритетным должно быть не столько оборудование ГЭС рыбозаградителем, рекомендуемым СП [14], сколько проведение мер, действительно предотвращающих подход и попадание ВБР в ГЭС.

При расчете размера вреда и компенсаций чрезвычайно важным представляется также учет рыб, которые, подходя к ГЭС уже находятся в нежизнеспособном состоянии. Дело в том, что больные, голодные и ослабленные, то есть уже нежизнеспособные, но еще живые особи, беспомощно скатывающиеся в водозаборном течении, не реагируют ни на какие отпугивающие их сигналы рыбозаградителя, попадают в ГЭС и фиксируются как вполне живые, то есть жизнеспособные особи, за «гибель» которых водопользователю-гидроэнергетику предлагается платить компенсацию. Однако следует учитывать, что согласно Приказу Министерства сельского хозяйства РФ от 31 марта 2020 г. № 167 "Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного водным биологическим ресурсам" [10] численность особей, потерявших жизнеспособность по естественным причинам, превышает численность жизнеспособных особей, доживших до промыслового возраста, на 2–4 порядка (рис. 1). И именно эти не только погибшие, но еще живые, но уже нежизнеспособные особи составляют основу ихтиопланктона, пассивно скатывающегося и «гибнущего» в ГЭС. Отсюда следует, что водопользователя-гидроэнергетика понуждают возмещать вред от гибели нежизнеспособных особей, на 2–4 порядка превышающий действительный вред, который ГЭС потенциально может причинить ВБР [4].

Однако действительный вред, который ГЭС причиняет ВБР, может быть еще меньше. Дело в том, что в водохранилище обитают, преимущественно, жилые виды рыб, для которых эмиграция из полноводного «рукотворного моря» не только жизненно необязательна, но и смертельно опасна. Поэтому жизнеспособные особи жилых рыб, в отличие от рыб проходных, скатываются с нерестилищ не в море, а только

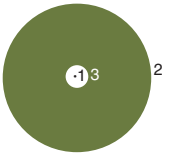


РИС. 1.

Количество рыб, которые должны погибнуть по естественным причинам, чтобы одна жизнеспособная личинка достигла промыслового размера: 1 – 0,01% – жизнеспособная личинка, которая доживет до промыслового размера; 2 – 99,00% – личинки, которые не доживут до навески 1 г – ихтиопланктон; 3 – 0,99% – молодь весом более 1 г, которая не доживет до промыслового размера

до ближайшего кормного места в водохранилище, где можно комфортно, безопасно обитать и интенсивно нагуливаться. Причем очевидно, что чем больше в водохранилище таких мест и чем больше их приемная емкость, тем меньше конкуренция за право обитания в них, тем меньшая численность неконкурентных особей вытесняется более сильными собратьями в малокормные открытые воды и, составляя основу уже нежизнеспособного ихтиопланктона, пассивно скатывается в стоковом течении к ГЭС, – тем меньший размер «вреда» водопользователь-гидроэнергетик должен компенсировать.

Поскольку вред, причиняемый ВБР, напрямую зависит от численности неконкурентного нежизнеспособного ихтиопланктона, скатывающегося по водохранилищу в ГЭС, то наиболее доступной мерой снижения вреда представляется сокращение численности нежизнеспособных мигрантов. Очевидно, что для этого необходимо снизить уровень конкуренции молоди рыб за «место под солнцем», то есть на безопасном от ГЭС удалении повысить количество и качество безопасных мест для ее комфортного оседлого обитания. Поэтому для снижения размера компенсаций водопользователь-гидроэнергетик должен быть заинтересован в создании в водохранилище разветвленной сети естественных или рукотворных безопасных мест оседлого обитания ВБР.

При этом, если проанализировать основные объективные требования, предъявляемые СП [14] к защите рыб, можно отметить, что создание на безопасном удалении от ГЭС мест оседлого обитания ВБР, полностью им соответствует. Так, согласно СП конечной целью рыбозащиты на водохранилищах является обеспечение пребывания рыб, отведенных от водозабора, в безопасном месте [14]. Отсюда следует, что, создавая в водохранилище благоприятные условия для комфортного продолжительного обитания повышенной численности ВБР, можно обеспечить их продолжительное обитание на удалении от ГЭС и тем самым отвлечь от подхода и попадания в нее. В свою очередь это позволило бы в полном соответствии с требованиями СП [14] достичь конечной цели рыбозащиты даже без использования дорогостоящего энергозатратного посредника – рыбозаградителя, что на порядки упрощает и сокращает стоимость ее создания при полном отсутствии затрат на эксплуатацию и энергообеспечение.

Каким же образом можно создать такое рукотворное безопасное место?

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОТОПА-ОАЗИСА ДЛЯ ЗАЩИТЫ РЫБ

Использование неоднородностей ландшафта, то есть естественной среды обитания, в качестве значимых ориентиров, и их роль в жизни животных переоценить невозможно. Животные даже по нужде ходят,

ориентируясь на характерные объекты естественного или искусственного происхождения. Поэтому грамотно используя упорядоченную систему значимых ориентиров можно предсказуемо управлять поведением, перемещением и обитанием животных, в том числе рыб.

Так, например, проточно развитые в водную толщу обширные или протяженные структуры подводного ландшафта с повышенной привлекательной неоднородностью, которую рыбы используют в качестве значимых ориентиров, обитаемых субстратов, надежных убежищ и кормовых стоянок, способно привлечь и долго удерживать ихтиофауну от длительных перемещений, в том числе в сторону ГЭС. Однако распределение естественных неоднородностей подводного ландшафта по водному объекту весьма неоднородно – где-то их густо, а где-то пусто. Поэтому именно через образовавшиеся между этими неоднородностями сквозные коридоры рыбы, не задерживаясь, свободно проходят к ГЭС.

Для предупреждения прохода рыб к ГЭС коридоры необходимо перекрыть, то есть также целенаправленно обустроить регулярной совокупностью доступных стационарных не требующих эксплуатации и энергообеспечения, привлекательных для рыб и иных ВБР рукотворных элементов повышения неоднородности подводного ландшафта. Это позволяет в проблемном водном объекте на участке перемещений рыб и их кормового ресурса, скорости водозаборного течения через который еще не превышают критических для рыб значений, создать рукотворный биотоп-оазис, привлекательный для продолжительного обитания и отвлекающий рыб от продолжения дальнейшего движения к ГЭС. Очевидно, что этот рукотворный биотоп-оазис и является тем самым безопасным местом, которое СП обязывает применять для обеспечения эффективной защиты рыб [14].

Каким же образом можно рукотворно повысить привлекательную для рыб и их кормового ресурса неоднородность подводного ландшафта?

Наиболее доступным представляется использование заметно развитых в водную толщу гидротехнических конструкций – рифовых модулей, которые, заселяясь колониями кормовых бентосных или перифитонных резидентов-фильтраторов, со временем полностью интегрируются в естественную среду их обитания и становятся природной станцией самоочистки воды. Поэтому согласно Федеральному закону «О рыболовстве ...» их применяют для улучшения экологического состояния водного объекта [17]. Тем самым рукотворные рифы на законных основаниях являются экологически полезными и допустимыми к использованию.

Практически, не затеняя водную толщу, проточные рифовые модули в подводном ландшафте создают также разнообразие ориентиров, субстратов, убежищ и кормовых стоянок, привлекательных для массового заселения и оседлого обитания ихтиофауны и иных, в том числе кормовых ВБР.

Поэтому размещение рифовых структур комфортного обитания ВБР на безопасном от ГЭС удалении способствует естественным путем и без участия человека оседлому обитанию в них рыб, отвлечению их от миграций к ГЭС и попадания в нее, то есть обеспечивает достижение основной цели – предотвращения попадания жизнеспособных рыб в водозаборное сооружение и обеспечения их пребывания в жизнеспособном состоянии в безопасном месте [14], в комфортных условиях для обитания и нагула.

Очевидно также, что заселение кормовыми организмами перифитонно-бентосного сообщества обитаемого субстрата рифовых модулей, развитого в водную толщу дрейфа планктона, способствует интенсивной утилизации последнего рифовыми резидентами, которые переводят мигрирующий кормовой ресурс в свой собственный длительное время, в том числе на зимний период, сохраняющийся на рифе в живом виде для продолжительного порционного потребления ихтиофауной. При этом особо важным для водопользователя-гидроэнергетика представляется то, что резиденты рифа, утилизируя мигрирующий планктон, рационально используют его и тем самым регулируют численность не только утилизированных особей, но также и эмигрирующих из водохранилища. Последнее является чрезвычайно важным, поскольку это, пожалуй, единственный жизненно важный регулярно восполняемый кормовой ресурс, поставляемый водохранилищем оседлым обитателям нижнего бьефа гидроузла.

Существенным преимуществом рифовых структур является то, что они не нуждаются не только в эксплуатации и энергообеспечении, но и в коммуникациях. Поэтому рифовые биотопы-оазисы могут размещаться не перед самой ГЭС, а на безопасном от него удалении, где скорость водозаборного течения еще не превышает критических для рыб значений. Это позволяет жизнеспособным рыбам комфортно обитать в безопасном месте и удерживаться от сноса течением, ими преодолимым [4].

В связи с этим выход из рифового биотопа-оазиса и попадание в ГЭС его оседлых жизнеспособных обитателей практически не наблюдается. Тем самым рифовые безопасные места оседлого обитания ВБР в полном соответствии с СП [14] обеспечивают выполнение рыбозащитной функции.

Кроме того, согласно Постановлению Правительства РФ [5] помимо искусственного воспроизводства в состав восстановительных мер сохранения ВБР входит мелиоративная мера, которая, согласно Федеральному закону «О рыболовстве...» направлена, прежде всего, на улучшение экологического состояния водных объектов и должна проводиться именно путем «соз-

дания искусственных (рукотворных) рифов и донных ландшафтов» [17], что свидетельствует о легитимности и природополезности рукотворных рифов.

Выступая на 70-й сессии Генеральной Ассамблеи ООН Президент России В.В. Путин призвал мировое сообщество к созданию и внедрению «принципиально новых природоподобных технологий, которые не наносят урон окружающему миру, а существуют с ним в гармонии и позволяют восстановить нарушенный человеком баланс между биосферой и техносферой». При этом Президент подчеркнул, что «это действительно вызов планетарного масштаба. Убежден, чтобы ответить на него, у человечества есть интеллектуальный потенциал» [11].

Поскольку природополезные рукотворные рифовые модули повышения неоднородности подводного ландшафта полностью интегрируются в естественную среду обитания ВБР, то есть становятся даже не подобием, а, фактически, частью живой природы, то логично предположить, что они вполне могут стать основой для разработки наиболее доступной экологически ориентированной рыбоохранной природоподобной технологии. Потому, поддерживая убежденность нашего Президента, в настоящее время разрабатывается наиболее доступная природоподобная рифовая технология сохранения и рационального использования водных биоресурсов путем эколандшафтной коррекции естественной среды их обитания, которая реализуется по принципу «поставил и забыл». Причем природа все делает сама, то есть сама себя защищает. Человек лишь помогает ей на начальном этапе в ключевых точках водохранилища запустить процессы самоорганизации и саморегуляции локальных биотопов, оседлое обитание в которых предостерегает жизнеспособных жилых рыб и иных ВБР от подхода и попадания в ГЭС [2].

Чем же человек может помочь природе самой себя защищать?

Для активизации природных процессов необходим некий катализатор, вокруг которого начинаются и происходят процессы самоорганизации и саморегуляции природных, но целенаправленно формируемых биотопов-оазисов. Очевидно, что такими катализаторами-аттракторами являются заметно развитые в водную толщу обитаемые рифовые модули. Причем для целенаправленной настройки создаваемых биотопов-оазисов для выполнения конкретных задач их объединяют в упорядоченные протяженные или обширные структуры, которые гармонично вписывают в подводный ландшафт в ключевой точке проблемного водного объекта, характеризующейся максимальным биостоком.

Таким образом с помощью рифовой мелиорации легитимно обеспечивают предупреждение подхода и попадания рыб в ГЭС путем проведения экологически полезной, наиболее доступной, не нуждающейся в эксплуатации и энергообеспечении природоподобной защиты рыб нового поколения [2], полностью отвечающей объективным нормативным требованиям [14]. При этом себестоимость реализации природоподобной рифовой технологии минимум на два порядка ниже себестоимости «нормативных» рыбозаградителей [14].

Помимо создания комфортного привлекательного безопасного места оседлого обитания ихтиофауны на удалении от ГЭС, то есть «пряника», рифовая технология позволяет создать также «кнут», то есть источник биологической угрозы – биобарьер, отпугивающий жизнеспособных рыб от источника техногенной опасности – ГЭС (рис. 2). Биобарьер формируют на поперечной или косой упорядоченно-протяженной гряде рифовых модулей, оседло заселенных стайными хищными рыбами-засадчиками, которые используют модули в качестве развитых в водную толщу охотничьих стоянок и засад. О смертельной опасности встречи с охотящимися хищниками мирные рыбы знают на инстинктивном уровне, поэтому, ощущая их массовое присутствие, заблаговременно избегают встречи с ними и уходят от биобарьера обратно в водохранилище, например, в безопасное место – рифовый биотоп-оазис.

В то же время наиболее доступных – больных, голодных и ослабленных, то есть неконкурентных и уже нежизнеспособных особей, представляющих для ихтиоценоза серьезную опасность и подлежащих изъятию из экосистемы, хищники биобарьера утилизируют, переводя их малоценную биомассу в свою более ценную. При этом хищники устраняют также малоценных конкурентов промысловых планктофагов и бентофагов, а также регулируя их численность, выводят из-под излишнего пресса водных беспозвоночных фильтраторов. Тем самым обеспечивается, одновременно, оздоровление и регулирование ихтиоценоза, нагул и улучшение промыслового качества совокупного водного биоресурса, а также улучшение экологического состояния водного объекта.

Биобарьер нельзя отключить, например, с целью экономии электроэнергии. Поэтому, являясь наиболее действенным природным источником биологической угрозы, он способен независимо от человеческого фактора предотвращать подход и попадание рыб в ГЭС с эффективностью, достигающей 95–98% [7, 8].

Причем, не менее важной способностью и преимуществом биобарьера является то, что он, отпугивая от ГЭС жизнеспособных рыб, в том числе планктофагов, способствует их объединению в крупное организованное скопление – утилизатор планктона, которое не только коллективно обороняется от хищников, но и продуктивно нагуливается на дрейфующем к ГЭС планктоне (рис. 2). Это позволяет регулировать эмиграцию кормового ресурса (планктона и нежизнеспособного ихтиопланктона) из водохранилища, то есть

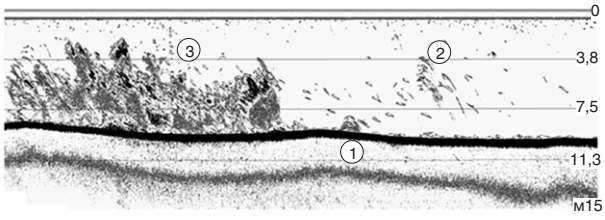


РИС. 2.

Управление целенаправленными перемещением и распределением рыб и планктона барьером, организованном на поперечной рифовой гряде (эхограмма): 1 – поперечная рифовая гряда; 2 – охотничье построение организованных стайных ихтиофагов – биобарьер; 4 – скопление планктофагов, остановленных биобарьером – утилизатор планктона

распределять его между потребителями в верхнем и нижнем бьефах гидроузла.

Таким образом использование рифовой природоподобной технологии позволяет осуществить доступную, не требующую эксплуатации и энергообеспечения, нормативно и законодательно востребованную эффективную технологию предотвращения попадания рыб и планктона в ГЭС, работающую по принципу «поставил и забыл».

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ РИФОВОГО МОДУЛЯ

Основной отличительной особенностью и преимуществом рукотворных рифовых модулей является не только доступность и экономичность их изготовления, но и возможность создания многообразия форм и конструкций с заданными свойствами. Поэтому с их помощью на локальном участке водного объекта можно целенаправленно повысить и развить в водную толщу требуемую неоднородность подводного ландшафта, создать для водного населения разнообразную, привлекательную обстановку, отличающуюся в лучшую сторону от однотонной среды остального водоема, и обеспечить необходимые условия для безопасного оседлого обитания и продуктивного нагула [13]. При этом разнообразие рифовых модулей позволяет рыбам, совершающим между ними поисково-кормовые перемещения, рассматривать каждый последующий модуль, как отличный от предыдущего. Поэтому рыбы воспринимают различные участки локального биотопа-оазиса, как все время новые, а сам биотоп-оазис более разнообразным и, главное, обширным и потому привлекательным для обитания, чем он есть на самом деле. Причем, чем разнообразнее состав формирующих биотоп-оазис рифовых модулей, тем устойчивее и продолжительнее оказывается привлекательность для его обитателей.

Однако отсюда следует, что для обустройства рифами проблемного участка водного объекта требуется повышенное разнообразие модулей, технологии изготовления которых могут различаться существенно, вплоть до невозможности их изготовления на одном предприятии. Поэтому выбор между стремлением к увеличению разнообразия конструкций модулей и доступностью их массового производства становится существенным препятствием, тормозящим создание рукотворных биотопов-оазисов.

Вряд ли есть смысл акцентировать внимание на разнообразии уникальных сложных конструкций рифовых модулей. Более оправданным и перспективным представляется создание и использование ограниченной группы базовых унифицированных деталей, из которых может быть изготовлено многообразие существенно отличающихся друг от друга рифовых конструкций. В свою очередь, эти рифовые конструкции могут быть дооборудованы множеством дополнительных ориентиров-субстратов, различных по конструкции, материалу и функционалу. Эти комплекты могут изготавливаться как на одном заводе, так и поставляться на него с других предприятий и монтироваться на рифовый модуль непосредственно на месте, перед его установкой в рабочее положение. Причем однотипность крепления таких комплектов позволяет обеспечить совместимость и взаимозаменяемость каждого из них со всеми многочисленными и дополняющими друг друга разновидностями.

В результате использование ограниченного числа базовых унифицированных деталей вкупе с возможностью оснащения их разнообразием дополнительных ориентиров-субстратов позволяет создать практически безграничное разнообразие конструкций рифовых модулей, повышающих привлекательную для гидробионтов неоднородность проточного развития донного рельефа в водную толщу, и одновременно значительно увеличить производительность и снизить себестоимость их изготовления [3].

Необходимость в разнообразии рифовых модулей объясняется тем, что практически все они являются значимыми ориентирами-субстратами, то есть аттракторами, вблизи которых оседлые рыбы обитают и совершают свои локальные поисково-кормовые перемещения. В зависимости от размерно-видового состава предполагаемых оседлых обитателей рифовые модули различаются существенно.

Так, мирные рыбы младшего возраста могут полноценно нагуливаться и тем самым выживать только в условиях полной безопасности, обеспеченной присутствующим по близости надежным убежищем, в котором можно спрятаться от опасности. Поэтому приоритетным для оседлой молоди рыб является стремление к обитанию и нагулу рядом с надежным убежищем, оборудованным элементами повышения неоднородности подводного ландшафта, соразмерными с укрывающейся среди них молодью. Кроме того, эти элементы должны быть хорошо заметными ориентирами и обитаемыми субстратами, заселенны-

ми кормовыми организмами, численность которых на твердом субстрате, проточно развитом в водную толщу дрейфа планктона, не менее чем в 3 раза превышает численность кормовых организмов, обитающих на ровном дне [16].

Для крупных же рыб, главным образом, ихтиофагов, а также планктофагов более существенной является возможность охотиться из засады. Поэтому они предпочитают держаться рифовых модулей и их упорядоченно-протяженных гряд, которые можно использовать в качестве укромных охотничьих стоянок, параметры укрытия которых соразмерны с затаившимися засадчиками.

Поэтому для оптимизации создания рифовых модулей из всего их разнообразия выделены две основные линейки, одна из которых – надежные убежища для молоди (рис. 3), а другая – охотничьи стоянки-засады для взрослых рыб (рис. 4). При этом в качестве унифицированных бетонных деталей для создания надежного убежища используют кольцо стеновое [12], а укромной охотничьей засады – балку Г-образного профиля [15].

Для создания многообразия рифовых модулей различных конструкций и назначения разработан метод оптимизации изготовления каждого из них с использованием унифицированных деталей всего лишь одной модификации, по окружности/длине которых упорядоченно-равномерно распределены монтажные отверстия. Используя при сборке необходимое сочетание этих отверстий, определяют варианты рифового модуля требуемой конструкции. Монтажные отверстия, не задействованные при сборке требуемой конструкции, используют для размещения различных также унифицированных комплектов дополнительных ориентиров-субстратов, обеспечивающих максимально возможное разнообразие базовых рифовых модулей [12, 15]. Кроме того, применение унифицированных комплектов дополнительных ориентиров позволяет использовать базовые унифицированные детали, например, кольцо стеновое, для создания различных специфических конструкций рифовых модулей, работающих на участках водного объекта с различной глубиной воды – от глубоководной пелагиали (рис. 3В) до осушаемого мелководья (рис. 3Д).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одной из важнейших природоохранных задач гидроэнергетики является защита молоди рыб и планктона от гибели в крупной ГЭС. Однако современные нормативные рыбозаградители допускают травмирующий контакт рыб с защитным экраном/полем. В результате рыбы теряют жизнеспособность и гибнут. Кроме того отсутствие в конструкции рыбозаградителей специального безопасного места, в котором молодь могла бы спрятаться от опасности, приводит к ее возвращению к источнику этой опасности – хищнику или водозабору. Что касается планктона, то для его защиты рыбозаградители не предназначены.

Для действительного предотвращения попадания и гибели рыб и планктона в ГЭС необходимо создание новых экологически обоснованных, технически выполнимых и экономически приемлемых технологий заблаговременного управления поведением рыб и иных водных биоресурсов.

Именно о создании таких «новых природоподобных технологий, которые не наносят урон окружаю-

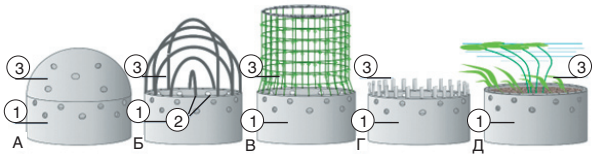


РИС. 3.

Модификации рифового модуля-убежища, разработанного с использованием унифицированного бетонного кольца стенового: А – рифовый модуль-убежище с дополнительными ориентирами-субстратами в виде перфорированной оболочки-крыши; Б – рифовый модуль-убежище с дополнительными ориентирами-субстратами в виде разновысоких дуг, имитирующих в совокупности проточную оболочку-крышу; В – глубоководный рифовый модуль с сетью дополнительных ориентиров-субстратов в виде гибких имитаторов водной растительности, автоматически развертывающейся в рабочее положение при произвольном опускании модуля в рабочее положение; Г – мелководный рифовый модуль с дополнительными ориентирами-субстратами в виде закручивающих лопаток, имитирующих в совокупности жесткую водную растительность; Д – мелководный рифовый модуль с самовосстанавливающейся в вегетационный период естественной водной растительностью, предназначенный для оборудования осушаемых на зиму мелководий.
1 – унифицированное кольцо стеновое; 2 – упорядоченная совокупность монтажных отверстий; 3 – комплект дополнительных ориентиров-субстратов

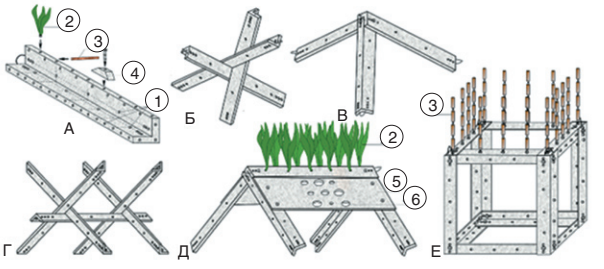


РИС. 4.

Модификации рифового модуля-засады, разработанного с использованием унифицированной балки Г-образного профиля: А – унифицированная балка Г-образного профиля; Моноцентрические рифовые модули; Б – гексаподтрансформер; В – пирамида; Полицентрические рифовые модули: Г – ёрш (ко́злы); Д – призма; Е – куб. 1 – упорядоченная совокупность монтажных отверстий; 2 – гибкий имитатор водной растительности; 3 – жесткий имитатор водной растительности; 4 – волнообразная вставка, формирующая криволинейные обводы прямолинейных рифовых деталей; 5 – щиты-субстраты, увеличивающие твердую обитаемую площадь рифового модуля; 6 – вплывные отверстия

щему миру, а существуют с ним в гармонии» говорил в своем выступлении на 70-й сессии Генеральной Ассамблеи ООН Президент РФ В.В. Путин [11].

Чтобы Россия и её гидроэнергетика существовали в гармонии с природой, разработана наиболее доступная инновационная природоподобная технология сохранения и рационального использования водных биоресурсов с использованием естественной среды их обитания, которая на крупных ГЭС реализуется путем проведения эколандшафтной коррекции ключевых точек водохранилища с помощью доступных, технологичных, не требующих эксплуатации и энергообеспечения высокопродуктивных рукотворных биотопов-оазисов, состоящих из разнообразных малых гидротехнических форм – рифовых модулей, которые, целенаправленно повышая неоднородность и привлекательность природной среды, полностью в нее интегрируются, улучшая ее экологическое состояние. С помощью рукотворных рифовых структур можно, управляя поведением гидробионтов, не только предотвращать их попадание в ГЭС, но регулировать и оздоравливать ихтиоценозы, рационально использовать совокупный водный биоресурс, повышать его промысловое качество, и тем самым помогать природе самой себя защищать.

Для проведения эколандшафтной коррекции множества разнообразных водохранилищ необходимо изготовление многообразных рифовых модулей различных конструкций и назначения. Для оптимизации данного процесса разработан метод изготовления модулей с использованием унифицированных деталей всего лишь одной модификации, по окружности/длине которых упорядоченно-равномерно распределены монтажные отверстия. Используя при сборке необходимое сочетание этих отверстий, определяют варианты рифового модуля требуемой конструкции. Так, для создания надежного убежища и укромной охотничьей засады в качестве унифицированных деталей используют бетонные: чашу и балку Г-образного профиля, соответственно. Монтажные отверстия, не задействованные при сборке требуемой конструкции рифового модуля, используют для размещения различных также унифицированных комплектов дополнительных ориентиров, обеспечивающих максимально возможное разнообразие базовых рифовых модулей [15]. При этом в качестве унифицированных бетонных деталей для создания надежного убежища используют кольцо стеновое [12], а укромной охотничьей засады – балку Г-образного профиля [15].

ЛИТЕРАТУРА

1. Водный кодекс РФ от 03.06.2006 № 74-ФЗ.
2. **Иванов А.В.** Наиболее доступная природоподобная технология сохранения водных биологических ресурсов с использованием естественной среды их обитания // Фрактал. 2020. Вып. 4. С. 5–12.
3. **Иванов А.В.** Некоторые аспекты унификации рифоздания // Гидротехническое строительство. 2024. № 8. С. 28–37.
4. **Иванов А.В.** Рыбозащита или защита рыб? // Гидротехническое строительство. 2024. № 2. С. 2–15.
5. Конституция Российской Федерации (Принята всенародным голосованием 12 декабря 1993 года с изменениями, одобренными в ходе общероссийского голосования 1 июля 2020 года).
6. **Логинов В.В., Клевакин А.А., Моисеев А.В.** Определение вреда водным биологическим ресурсам на водозаборных сооружениях технического водоснабжения Нижегородской ГЭС // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2016. № 1. С. 84–98.
7. **Иванов А.В.** О защите рыб на ГЭС // Гидротехническое строительство. 2022. № 6. С. 23–33.
8. Научно-технический отчет по договору от 01.09.2011 года № 10.10.2011 П-46/10-08 «Мониторинг и проверка эффективности рыбоохранных мероприятий с помощью оборудования Вазузского водохранилища местами оптимального обитания рыб». Тверь: ФГБУ «Центррыбвод», 2013. 118 с.
9. Постановление Правительства РФ от 29.05.2025 № 785 «Об утверждении положения о мерах по сохранению водных биологических ресурсов и среды их обитания».
10. Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 31 марта 2020 г. № 167 «Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного водным биологическим ресурсам».
11. **Путин В.В.** Выступление на пленарном заседании 70-й сессии Генеральной Ассамблеи ООН. Нью-Йорк, 28.09.2015.
12. Рифовая чаша / Патент RU 219940 U1 // Бюл. № 23, 2023.
13. Рыбозащитное убежище. Патент RU 57758 U1, Бюл. 2006. № 30.
14. СП 101.13330.2023 Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения. СНиП 2.06.07-87 (утв. Приказом Минстроя России от 16.06.2023 № 420/пр). М.: Минстрой России, 2023.
15. Способ улучшения условий обитания гидробионтов / Патент RU 2819899 C1 // Бюл. № 16, 2024.
16. Тезисы докладов Всесоюзной конференции «Искусственные рифы для рыбного хозяйства». М. 1987. 131 с.
17. Федеральный закон от 20.12.2004 № 166-ФЗ «О рыболовстве и сохранении водных биологических ресурсов».

REFERENCES

1. The Water Code of the Russian Federation dated June 2006; 3. N 74-FZ (In Russian).
2. **Ivanov A.V.** The most accessible nature-like technology

for the storage of aquatic biological resources using their natural habitat. *Fractal*. 2020;4:5–12. (In Russian).

3. **Ivanov A.V.** Some Aspects of the Unification of Reef Construction. *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo*. 2024;8:28–37. (In Russian).
4. **Ivanov A.V.** Fish Protection or Fish Protection? *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo*. 2024;(2):2–15.
5. The Constitution of the Russian Federation (Adopted by popular vote on December 12, 1993, with amendments approved during the nationwide vote on July 1, 2020). (In Russian).
6. **Loginov V.V., Klevakin A.A., Moiseev A.V.** Determination of harm to aquatic biological resources at the water intake structures of the technical water supply of the Nizhny Novgorod Hydroelectric Power Station. *Vodnoye khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravleniye*. 2016;1:84–98. (In Russian).
7. **Ivanov A.V.** On Fish Protection at Hydroelectric Power Stations. *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo*. 2022; 6:23–33. (In Russian).
8. Scientific and Technical Report on the agreement dated 09.01.2011 No. 10.10.2011 P-46/10-08 "Monitoring and verification of the effectiveness of fish protection measures using the equipment of the Vazuza reservoir for optimal fish habitat" Tver: Federal State Budgetary Institution Centrrybvod, 2013:118. (In Russian).
9. Resolution of the Government of the Russian Federation N 785 dated May 29, 2025, "On the Approval of the Regulations on Measures to Conserve Aquatic Biological Resources and Their Habitat." (In Russian).
10 Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation dated March 31, 2020, N 167 "On Approval of the Methodology for Calculating the Amount of Damage Caused to Aquatic Biological Resources." (In Russian).
11. **Putin V.V.** Speech at the plenary session of the 70th session of the UN General Assembly. New York, 09.28.2015. (In Russian).
12. Reef Bowl. Patent RU 219940 U1. Bull. 2023. N 25, (In Russian).
13. Fish Protection Shelter. Patent RU 57758 U1. Bull. 2006. N 30. (In Russian).
14. SP 101.13330.2023. Retaining walls, navigation locks, fish passage and fish protection structures. SNiP 2.06.07-87 (approved by Order of the Ministry of Construction of Russia dated June 16, 2023, N 420/pr). Moscow: Ministry of Construction of Russia, 2023. (In Russian).
15. Method for improving the living conditions of aquatic organisms. Patent RU 2819899 C1. Bull. N 16. 2024. (In Russian).
16. Abstracts of Reports of the All Union Conference "Artificial Reefs for Fisheries" Moscow: 1987:131. (In Russian).
17. Federal Law N 66-FZ dated December 20, 2004, "On Fishing and the Conservation of Aquatic Biological Resources." (In Russian).

Иванов Александр Васильевич
д.т.н., главный специалист АО «Институт Гидропроект»

125080, г. Москва, Волоколамское ш., д. 2, эт. 5, пом. I, ком. 12
125080 Moscow, Volokolamskoye Shosse, Room 12, Premises I, 5th Floor, 2
тел.: +7 (495) 727-36-05 # 3247,
e-mail: a.ivanov@hydroproject.ru

Ратников Павел Васильевич
главный инженер проекта АО «Институт Гидропроект»

125080, г. Москва, Волоколамское ш., д. 2, эт. 5, пом. I, ком. 12
125080 Moscow, Volokolamskoye Shosse, Room 12, Premises I, 5th Floor, 2
тел.: +7 (495) 727 36 05 # 3058
e-mail: p.ratnikov@hydroproject.ru

УДК 519.86:332.14
DOI: 10.52531/1682-1696-2026-26-3-107-120
Научная статья

EDN: TDANUD

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В СТРАТЕГИЧЕСКОМ УПРАВЛЕНИИ РЕГИОНОМ

А.Н. Соломатин
ORCID 0000-0002-9960-6285
Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук (Москва, Россия)

Рассматривается подход к формализации процесса стратегического управления регионом на основе использования дискретных многомерных стратегических пространств, которые формируются посредством перевода показателей объектов региональной экономики в ранговые шкалы путем дискретизации диапазонов их значений. Предлагается интегрированная модель, позволяющая описать различные этапы процесса стратегического управления на различных уровнях региональной системы; на единой основе рассматриваются матричный и конкурентный анализ, синтез стратегий и контроль их реализации. Приводится новый способ визуализации многомерных объектов региональной экономики.

Ключевые слова: *региональная социально-экономическая система, стратегическое управление регионом, визуализация, дискретные стратегические пространства, матричные модели, карты стратегических групп конкурентов, формирование стратегий, мониторинг реализации*

Original article

MATHEMATICAL MODELS IN REGIONAL STRATEGIC MANAGEMENT

A.N. Solomatin
Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)

This article examines an approach to formalizing the regional strategic management process based on the use of discrete multidimensional strategic spaces, which are formed by converting regional economic indicators into rank scales through discretization of their value ranges. An integrated model is proposed that allows for describing the various stages of the strategic management process at various levels of the regional system. Matrix and competitive analysis, strategy synthesis, and implementation monitoring are described within a unified framework. A new method for visualizing multidimensional regional economic indicators is presented.

Key words: *regional socioeconomic system, regional strategic management, visualization, discrete strategic spaces, matrix models, strategic competitor group maps, strategy formation, implementation monitoring*

ВВЕДЕНИЕ

Для региональных социально-экономических систем (РСЭС) [11, 21] необходим механизм, который связывает оперативное управление с долгосрочными стратегическими ориентирами. Рост самостоятельности субъектов РФ на фоне глобализации и нестабильности мировой экономики делает внешнюю среду менее предсказуемой. Между тем инструменты стратегического управления регионом (СУР) в значительной части остаются качественными, описательными [5], что затрудняет использование современных информационных технологий и уменьшает эффективность стратегического управления. Требуются формализованные модели, алгоритмы и программные средства, охватывающие полный цикл СУР на всех его этапах.

В отделе математических методов регионального программирования ФИЦ ИУ РАН (ранее ВЦ РАН) много лет разрабатываются автоматизированные системы долгосрочного регионального планирования и проектирования для решения задач комплексного освоения территорий [23]. На этой базе сложилось направление регионального программирования как части региональной экономики, где строятся теория и количественные методы формирования проектов комплексного освоения [22] территорий. Естественным развитием долгосрочного планирования стали работы по региональному стратегическому планированию и управлению.

Формализованные модели корпоративного стратегического управления были предложены в работе [14]. Сегодня регион нередко рассматривают как квазикорпорацию, что открывает путь к переносу технологий корпоративного стратегического управления при сохранении особенностей территориальных систем

© 2026, А.Н. Соломатин
Поступила в редакцию 30.06.2026

[11]. Опираясь на это и на опыт решения конкретных региональных задач, прежде всего, в области нефтегазодобычи [23], в работах [15, 18, 23] был сформирован подход к решению задач СУР для различных его этапов, включая стратегический и конкурентный анализ, формирование и корректировку стратегий. Также был предложен метод визуализация многомерных точек [13] как единый аналитический инструмент для различных этапов процесса СУР.

Наконец, в [16] были изучены дискретные стратегические пространства как формальный аппарат, возникающий при переводе интервалов значений характеристик региональных объектов в ранговые шкалы, и позволяющий описывать все этапы процесса СУР на единой основе. Практическая значимость такого подхода проявляется, в частности, при согласовании среднесрочных программ и долгосрочных стратегий: они могут формироваться сначала в непрерывном виде в расчетных моделях, а затем переводиться в ранговые шкалы для позиционирования и анализа объектов региональной экономики. Это снижает риск расхождения между «стратегической картиной» и «расчетной моделью» региона, позволяет аналитикам и стратегам оперировать одними и теми же дискретными координатами.

Структура статьи соответствует логике интегрированной модели процесса СУР: последовательно рассматриваются дискретные пространства, матричные модели, стратегических группы конкурентов, формирование и оценка стратегических альтернатив, мониторинг реализации стратегий и вопросы автоматизации.

РЕГИОНАЛЬНАЯ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Регион удобно описывать как саморазвивающуюся территориальную социально-экономическую систему с ограниченными ресурсами, изменяющимися целями и свойствами нестационарности, целостности и устойчивости. Сложность моделирования и анализа связана с комплексным, межотраслевым и территориальным характером региональных проблем [3, 8, 27].

Управление регионом осложняется двойственностью его положения. С одной стороны, регион как субъект РФ входит в народное хозяйство страны, выполняет свою специализированную роль и поставляет продукцию для национальной экономики. С другой стороны, он остается самостоятельной территориально-хозяйственной единицей со своими приоритетами, где требуется комплексное социально-экономическое развитие.

Наряду с глобализацией усиливается регионализация – рост роли и самостоятельности территорий в мировой экономике. По данным [7], именно регионы способны стать главными опорными точками развития России. Этому способствует расширение полномочий субъектов РФ, а также сочетание у них черт государства (территориальная социально-экономическая система, собственная политика) и компании (самостоятельный экономический субъект).

При плановой экономике регионы рассматривались как административные единицы и площадки для размещения производительных сил, что оставило часть регионов без устойчивого экономического ядра. Региональная асимметрия подталкивает регионы к дезинтеграции: сохраняющаяся экспортно-сырьевая ориентация экономики РФ, импортозависимость, слабая инфраструктура и рост тарифов стимулируют внешний, а не межрегиональный товарооборот.

Помимо системных проблем, большинство субъектов РФ сталкиваются также с экономическими и социальными проблемами, включая санкционные ограничения, последствия СВО, зависимость от импорта, дефицит инвестиций, износ фондов и инфраструктуры, сокращение и старение населения, неравенство доходов, слабо контролируемая миграция и т.д.

Перечисленные проблемы усиливают потребность в формализованных инструментах СУР: дискретные пространства дают возможность легко включать в анализ как количественные показатели (бюджет, инвестиции, занятость, инвестиции), так и экспертные оценки для социальной сферы.

СТРАТЕГИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕГИОНОМ

Корпоративное стратегическое управление (СУ) сформировалось на Западе в 1990-е гг. как ответ на резкий рост изменчивости и сложности рыночной среды. Стратегическое рыночное управление исходит из того, что при нестабильной среде и постоянно меняющемся объекте управления классическое планирование теряет эффективность. Неожиданные угрозы и возможности требуют быстрых решений вне жесткого планового цикла, а ранее принятые меры в таких условиях могут быстро устаревать и нуждаются в корректировке. Поэтому стратегия не должна пассивно следовать среде: она должна опережать изменения внутри и вне объекта управления и воздействовать на эти изменения [5, 7, 26].

В литературе регион часто описывают как квазикорпорацию, что оправдывает перенос технологий корпоративного стратегического управления на региональный уровень [11]. Ведь и компания, и регион – развивающиеся системы, к которым применимы подходы системного анализа и теории управления. Но если менеджмент и собственники компании отвечают за развитие фирмы, то органы власти и население – за социально-экономическое развитие региона. При этом регион все чаще выступает в качестве самостоятельного экономического субъекта, имеющего свою собственность и ведущего собственную хозяйственную деятельность.

Поэтому для СУР с учетом региональной специфики применимы матричный анализ, портфельные методики, оценка конкурентоспособности и подходы к формированию стратегий, характерные для корпоративного уровня. Тем не менее, между регионом и компанией имеют место существенные различия, которые необходимо учитывать в процессе СУР (табл. 1).

Процесс стратегического управления регионом включает восемь основных этапов [21], причем каждый этап можно формализовать с использованием дискретных стратегических пространств: целеполагание задает целевую точку в стратегическом пространстве, анализ среды и конкуренции фиксирует положение объекта и конкурентов, формирование стратегии строит траекторию между исходной и целевой точками, стратегический контроль сопоставляет запланированное и фактическое развитие.

1. Установление ориентиров развития РСЭС, включая комплекс целей.
2. Анализ внешней и внутренней среды региона.
3. Формирование вариантов стратегий регионального развития.
4. Оценка стратегических альтернатив.
5. Выбор альтернативы для реализации.
6. Детальная проработка стратегии и среднесрочных программ.
7. Реализация выбранной стратегии.
8. Стратегический контроль достижения целей.

МОДЕЛИРОВАНИЕ В СТРАТЕГИЧЕСКОМ УПРАВЛЕНИИ РЕГИОНОМ

Задачи формализации и моделирования для стратегического регионального управления остаются открытыми, поскольку СУР относится к слабо структурированным проблемам, сочетающим количественные и качественные элементы. К соответствующим моделям и алгоритмам можно предъявить, в частности, следующие требования:

– принимать решения в условиях нестабильной внешней среды;
– учитывать многоаспектность объектов (территория, отрасль, корпорация);
– производить расчеты на длительный период в динамике;
– формировать и анализировать большое число вариантов;
– учитывать многокритериальность при выборе варианта;
– обеспечивать динамическое проектирование с обратной связью.

Важной задачей стратегического управления регионом является интеграция количественных подходов, используемых в региональной экономике, региональном программировании, и качественных подходов современного стратегического управления. Это позволяет обеспечить процесс СУР надежной количественной базой и спрогнозировать поведение основных показателей развития региона на длительный период времени.

Для РСЭС в силу их сложности более эффективными оказываются «мягкие» модели (лингвистические, семиотические, графические, когнитивные), что подтверждается широким применением наглядных матричных моделей и карт стратегических групп конкурентов вместо сложного аппарата дискретной оптимизации и оптимального управления.

Все достижения современной цивилизации основаны на использовании математики и формализации, а начиная с XX в. – также моделирования и оптимизации. Для общественных наук сопоставимого аппарата пока не существует, поэтому академик А.А. Дородницын справедливо указывал, что главная задача

ТАБЛИЦА 1.

Сравнение компании и региона с точки зрения стратегического управления

№	Аспект сравнения	Компания	Регион
1.	Объект управления	Производственно-хозяйственная система	Социо-эколого-экономическая система
2.	Предмет управления	Производство и экономические отношения	Жизнедеятельность населения на территории
3.	Природа целей	Преимущественно экономические	Социальные, экономика – средство
4.	Субъекты управления	Менеджмент, собственники	Власть, население, бизнес, федеральный центр
5.	Горизонт стратегии	Несколько лет	15–20 лет
6.	Структура объекта	Относительно простая иерархия	Многоуровневая территориально-отраслевая
7.	Инерционность	Сравнительно низкая	Высокая
8.	Тип управления	Преимущественно прямое	Рефлексивное и адаптивное
9.	Крайний исход	Банкротство и ликвидация	Банкротство и ликвидация невозможны

математики в XXI в. – формализация общественных наук и создание адекватного математического инструментария [4].

Процесс СУР включает множество этапов, выполняемых для разных отраслей и направлений функционирования РСЭС. Поэтому целесообразно использовать взаимосвязанный набор моделей, методов и алгоритмов, каждый из которых ориентирован на свою задачу. Среди них – общая теория управления, синергетика, маркетинговый анализ, линейная алгебра и семиотика (многомерные матричные модели), кластерный анализ (стратегические группы конкурентов), многокритериальная оптимизация и методы визуализации.

Для региональных расчетов особую роль играет согласование горизонтов планирования: стратегические решения на 15–20 лет должны быть совместимы со среднесрочными программами и ежегодными бюджетными циклами. Дискретизация значений показателей обеспечивает такое согласование, поскольку облегчает агрегирование показателей разной природы в единую систему.

ДИСКРЕТНЫЕ СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРОСТРАНСТВА

Предлагаемый подход к формализации процесса СУР строится на обобщении результатов теории матричных моделей стратегического анализа – одного из наиболее распространенных и немногих формализованных инструментов стратегического планирования [5, 7, 26].

В матричных моделях положение компании, стратегической бизнес-единицы, продукта или иного экономического объекта показывается окружностью на координатной плоскости, осям которой соответствуют различные характеристики (например, для матрицы МакКинси – «преимущество компании на рынке, привлекательность рынка» [5]). Значения по каждой характеристике делятся пороговыми характеристиками на равные диапазоны, и в I квадранте координатной плоскости формируется набор клеток, каждой из которых сопоставляются качественно различные ситуации и стратегии развития.

Как обобщение матричных моделей, вводится многомерное стратегическое пространство (пространство стратегических позиций) [15, 23]. Пусть n – максимальное число характеристик объектов РСЭС. Характеристики могут быть количественными или качественными, заданными в шкалах абсолютной, интервальной, порядковой или номинальной. Тогда каждый региональный объект описывается некоторым вектором x длиной n в пространстве S^n характеристик объектов региональной экономики, что соответствует определению любой системы как вектора ее характеристик [22].

Производится дискретизация характеристик объектов за счет приведения характеристик к единой порядковой шкале измерений: качественным значениям присваиваются ранги (в зависимости от степени выраженности), номинальные шкалы превращаются в порядковые (значения упорядочиваются по какому-либо критерию полезности), интервалы интервальной шкалы нумеруются, значения в порядковой шкале оставляются без изменений, количественные значения в абсолютной шкале разбиваются на ранжированные интервалы. В результате получаем дискретное пространство стратегических позиций $H^n = P$, изоморфное S^n.

При конечном числе рангов пространство P представимо как декартово произведение конечных множеств целых чисел P_i – множеств целочисленных значений для i-й характеристики, принимающих значения от 0 до m_i. Здесь 0 означает отсутствие признака, а m_i берется не более, чем 8–10 (для удобства визуализации и компьютерной реализации).

Тогда, очевидно, каждый кортеж этого декартова произведения, каждая многомерная точка P, каждый вектор неотрицательных целых чисел определяет позицию объекта региональной экономики в стратегическом пространстве и однозначно описывает этот объект.

Дискретизация в задачах стратегического управления оправдана по нескольким причинам. Во-первых, мир дискретен от метагалактик до кварков, а в экономике и управлении работают обычно с дискретными сущностями – материальными объектами, денежными единицами, людьми. Далее, матричные модели стратегического планирования неявно обеспечивают дискретизацию, разбивая множества значений на интервалы. Наконец, в когнитивных моделях нечеткие лингвистические значения (типа «очень мало», «мало», ..., «очень много») нередко заменяют балльными оценками, например по 10-балльной шкале.

Предложенный подход при решении задач СУР обеспечивает следующие преимущества. Дискретизация существенно упрощает расчеты и программную реализацию: вместо векторов в S^n с разнородными шкалами и широкими диапазонами в пространстве P используются унифицированные целочисленные векторы с ограниченными значениями, также облегчается визуализация объектов, их отношений и динамики. Наконец, каждому целочисленному вектору из P соответствует многомерный «куб» в S^n, образованный выделенными диапазонами по каждому измерению. Каждый такой диапазон значений можно трактовать как значение нечеткой переменной для соответствующей характеристики, т.е. в процессе дискретизации все нечеткое и качественное превращается в четкое и дискретное.

Пространство стратегических позиций P обладает следующими основными алгебраическими свойствами [2]:

– как обобщение многомерных матричных моделей, оно по построению является дискретным, цело-

численным и конечномерным;
– число точек в нем конечно, поскольку конечно число диапазонов по каждому измерению;
– пространство является метрическим, например, при использовании манхэттенской метрики как суммы разностей по измерениям;
– пространство будет линейным при введении операций сложения векторов и умножения на целочисленный скаляр.

Перечислим некоторые интерпретации свойств и операторов пространства P в терминах различных этапов процесса СУР и их характеристик:
– подмножества P – допустимые позиции объектов РСЭС;
– подпространства меньшей размерности – многомерные матричные модели;
– расстояние между точками – опасность другого объекта как конкурента либо его перспективность для включения в портфель;
– расстояние от точки до множества – удаленность объекта от стратегической группы групп конкурентов;
– открытый шар – соседи объекта в группе конкурентов;
– ломаная, соединяющая точки P – стратегия перевода объекта из исходного в целевое состояние либо фактическое движение объекта во времени в стратегическом пространстве.

По построению, точки H^n являются кортежами декартова произведения множеств целочисленных значений P_r. Следовательно, для точек этого пространства можно ввести отношение порядка, определяемого стандартным образом через отношения равенства и неравенства (строгого и нестрогого) между значениями по различным измерениям. Поэтому различные множества точек можно интерпретировать как некие специфические отношения: члены стратегической группы конкурентов, участники портфеля, поставщики и потребители для некоторого объекта РСЭС, а также точки, задающие стратегию развития данного объекта.

ИНТЕГРИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ СУР

В работах [15, 23] была предложена формализованная модель СУР на базе дискретных метрических стратегических пространств, где задаются состояния объектов РСЭС, их взаимодействие и стратегии развития. На единой базе рассматриваются традиционные модели СУР: стратегического анализа, анализа конкурентов, портфельного анализа, формирования стратегий и мониторинга реализации как процессы анализа и преобразования многомерных точек этих пространств.

Модель охватывает:
– различные объекты РСЭС – районы, населенные пункты, отрасли, корпорации, предприятия (компании) и стратегические бизнес-единицы;
– территориальный, отраслевой и корпоративный аспекты;
– все этапы процесса СУР.

Предпринята попытка согласовать множество процессов разных уровней и аспектов: конкуренцию, сотрудничество, развитие; по уровням региона; по территориям, отраслям, корпорациям; в динамике. В итоге формируется трехмерный куб «районы/населенные пункты × отрасли/подотрасли × холдинги/нет холдинга», каждой ячейкой которого выступает предприятие (компания) в трех перечисленных аспектах.

Объекты РСЭС образуют иерархию с одновременной декомпозицией по отраслевому, территориальному и корпоративному признакам (рис. 1). Общие признаки и характеристики объектов РСЭС разных уровней позволяют говорить о фрактальном характере модели.

Выделяются два типа фракталов, два типа моделей: с гомогенными и гетерогенными объектами подчиненных уровней:
– карты стратегических групп конкурентов отражают конкуренцию однородных объектов, что более типично для территориального среза (районы региона, города района, предприятия отрасли; на рис. 1 – пометка «К»).;
– портфельные модели описывают взаимодействие (сотрудничество) гетерогенных объектов, что более типично для отраслевого среза (отрасли района, предприятия района или города; на рис. 1 – пометка «П»).

МЕТОД СВЯЗАННЫХ ПРОЕКЦИЙ

Инвариантным инструментом наглядного представления дискретных многомерных моделей СУР на экране компьютера выступает метод связанных проекций, который позволяет отображать точки n-мерного стратегического пространства на плоскости в виде многоугольников или ломаных [13, 20].

РИС. 1.
Иерархия объектов региональной экономики

Пусть $p = (p_1, p_2, p_3, p_4)$ – некоторая четырехмерная точка (рис. 2). Для ее визуализации в каждом из четырех квадрантов координатной плоскости отображается отдельная двумерная проекция это точки (для пар параметров (p_1, p_2), (p_2, p_3), (p_3, p_4) и (p_4, p_1)), проекции соединяются отрезками; цифрами на рисунке указан порядок обхода квадрантов.

Различаются замкнутые и открытые модели. В замкнутой модели четный квадрант присоединяется к предыдущему снизу или сверху, нечетный – слева или справа; первый и последний квадранты имеют общую ось. В открытой модели четный квадрант присоединяется снизу, нечетный – справа, образуя «лестницу». Замкнутая модель симметрична.

Правила построения едины для обоих типов модели: модель состоит из квадрантов одинакового размера, соседние квадранты имеют общую ось, в каждом квадранте строится проекция по паре координат; результатом является многоугольник или ломаная с ребрами между проекциями в разных квадрантах. Суть метода составляет введение неоднородности координатной плоскости, когда каждый квадрант задает собственную систему координат для пары параметров.

Для метода связанных проекций вводится ряд определений. Так, неоднозначная ось –это общая координатная ось двух связанных квадрантов, разным сторонам которой соответствуют разные параметры (измерения). Модель называется правильной, если не содержит неоднозначных осей, замкнутая модель называется симметричной, если комбинация ее квадрантов имеет симметрию 4-го порядка относительно центра модели (рис. 3).

Главное достоинство метода составляет то, что он позволяет производить анализ многомерных точек как целостных объектов с регулярными свойствами. Большая площадь многоугольника соответствует более высоким значениям по совокупности показателей, симметрия фигуры относительно начала координат отражает сбалансированность набора показателей объекта. А при согласовании решений с ЛПР визуальный образ многоугольника воспринимается быстрее, чем таблица значений показателей.

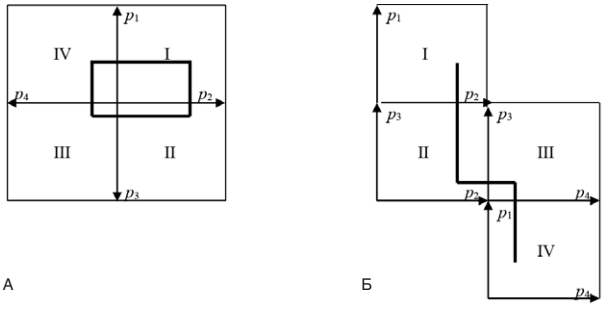


РИС. 2.

Замкнутая (А) и открытая (Б) модели визуализации

Как и другие методы визуализации, метод позволяет сравнивать различные региональные объекты и отслеживать их перемещение при реализации стратегии: сопоставление объектов выполняется наложением фигур, реализация стратегии отображается как последовательность фигур.

Опыт применения метода показывает, что замкнутая модель удобнее для сравнения объектов одного типа (районы, отрасли), а открытая модель лучше подходит для случаев, когда число измерений велико, и фигура «разворачивается» по вертикали.

Метод связанных проекций применим при визуализации многомерных матриц стратегического анализа, карт стратегических групп конкурентов, многокритериальных стратегических альтернатив. Он также может использоваться для визуализации произвольных многомерных точек в физике, биологии, социологии, при решении задач классификации, многокритериальной оптимизации и т.д.

Далее в рамках концепции дискретных стратегических пространств будут рассмотрены различные этапы процесса СУР.

ЦЕЛЕПОЛАГАНИЕ

Постановка и структурирование целей являются центральным этапом СУР [21]. Считается, что верная постановка целей составляет треть решения любой проблемы, а определения «стратегии» обязательно включают «цели». Систему целей целесообразно строить с учетом четырех групп ограничений [17].

1. Выполнение стандартных требований к системам целей [10]: достаточность, полнота, непротиворечивость, непересекаемость, сбалансированность, согласованность, измеримость.

2. Учет общесистемных закономерностей целеполагания [10]: формирования целей, иерархии, эквифинальности.

3. Учет ограничений сложных систем:

– наличие аттракторов и точек бифуркации показывают, что не любая цель и траектория ее достижения (стратегия) могут быть реализованы, т.е. при целеполагании и формировании стратегий следует учитывать внутренние тенденции развития системы [6];

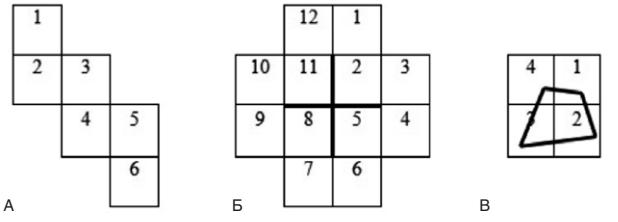


РИС. 3.

Различные модели связанных проекций: А – открытая модель; Б – симметричная модель; В – замкнутая неправильная модель

– знание и учет прогнозной циклической динамики развития системы дает возможность определять достижимые цели в соответствии с этой динамикой.

4. Учет специфики РСЭС: в отличие от фирмы, региональные власти не могут управлять напрямую всеми подсистемами РСЭС из-за огромной ее сложности, ограничений сложных систем и неподконтрольных субъектов интересов (федеральные власти, крупные корпорации, население). Поэтому требуется использование рефлексивного управления через СМИ, социальные сети, институты культуры и образования.

На наш взгляд, глобальной целью верхнего уровня региона не могут служить ни экономический рост, ни повышение качества жизни, ни даже устойчивое развитие. В основу целеполагания верхнего уровня предлагается положить триединую цель общесистемного характера, реализуемую, в частности, в поведении любого индивида или компании:

– цель надсистемы (цель существования) – выполнение миссии региона на уровне страны;
– цель самой системы (цели развития) – обеспечение устойчивого развития региона;
– цели подчиненных систем (цели функционирования) – экономический рост, выполнение экологических требований, повышение качества жизни населения региона и т.д.

АНАЛИЗ МАТРИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ

При использовании подхода «регион как квазикорпорация» [11] матричный анализ может быть перенесен на территориальный уровень. Например, в матрице МакКинси [5] для региона осями могут служить конкурентоспособность отраслевого комплекса и привлекательность федерального рынка. При анализе территориальной структуры матрицы также позволяют оценить положение районов и населенных пунктов, их перспективность и выбрать стратегии развития.

Несмотря на широкое распространение, матричные модели имеют существенные недостатки, снижающие эффективность их применения. В каждой модели объект исследуется лишь по двум параметрам, что затрудняет объективный анализ и сравнение объектов, а последовательный анализ по многим парам параметров малоэффективен из-за особенностей человеческого восприятия. Поэтому обычно используют ограниченный набор популярных моделей, что снижает качество анализа. Наконец, модели преимущественно статичны и не отражают динамику развития объектов.

Различные подпространства стратегического пространства H^n предлагается рассматривать как различные многомерные матричные модели – обобщения существующих матричных моделей, совмещающие одновременно несколько традиционных матриц. Отличия многомерных матричных моделей от традиционных приведены в табл. 2.

Можно говорить о построении целой системы взаимодействующих матричных моделей для региона, обеспечивающих позиционирование, анализ и выбор стратегий для объектов различных уровней РСЭС [8]. Например, в модели для региона объектами могут быть районы или отрасли региональной экономики.

Метод связанных проекций [13, 20] позволяет визуализировать многомерные матричные модели, и на одном экране исследовать сразу несколько традиционных матричных моделей; форма геометрического объекта будет определять тип стратегической позиции, «мощь» и «гармоничность» соответствующего регионального объекта.

На рис. 4 приведен пример достаточно конкурентоспособной отрасли региона, выводящей при среднем уровне рыночных угроз новый продукт на существующий рынок в состоянии спада. Параметры многомерной матричной модели: p_1 – привлекательность рынка, p_2 – положение на рынке (конкурентная позиция), p_3 – стадия развития рынка, p_4 – сила-слабость отрасли, p_5 – возможности-угрозы для отрасли, p_6 – новизна продукта, p_7 – новизна рынка.

АНАЛИЗ КОНКУРЕНЦИИ

Анализ конкуренции представляет собой обязательный этап стратегического управления в рыночной

ТАБЛИЦА 2.
Сравнение традиционных и многомерных матричных моделей

Характеристика	Традиционные модели	Многомерные модели
Число параметров	2	***n*** (объединённый набор)
Тип шкал	Порядковые (неявно)	Абсолютные, интервальные, порядковые
Дискретизация	Фиксированные квадранты	Декартово произведение ***Pi***
Динамика	Статическая картина	Траектории в ***P*** во времени
Сравнение объектов	По одной паре осей	По метрике в ***n***-мерном пространстве
Визуализация	Двумерная матрица	Метод связанных проекций
Применение в регионе	Отдельные матрицы	Система взаимосвязанных моделей

экономике. На корпоративном уровне широко применяют карты стратегических групп конкурентов (КСГ) [5, 7, 26]: конкурентов объединяют в стратегические группы, что изображается окружностями на двумерной плоскости по аналогии с матричными моделями. В одну группу попадают компании со схожими рыночными позициями, стратегическими условиями и стратегиями. Уровень конкуренции растет при увеличении конкурентов внутри группы, при увеличении сплоченности группы, увеличении числа групп и т.д.

Традиционные КСГ сохраняют ограничения двумерных матриц и субъективную оценку интенсивности конкуренции. Поэтому были предложены многомерные динамические КСГ [4, 6]: они строятся в стратегическом пространстве P с использованием динамической кластеризации, а уровень конкуренции вычисляется как взвешенная комбинация признаков роста конкуренции. При этом многомерные КСГ визуализируются при помощи метода связанных проекций и анализируются на заданном интервале времени, а не как статические объекты.

Единообразие конкурентных процессов на разных уровнях управления позволяет использовать аппарат КСГ при анализе конкуренции объектов РСЭС. При этом набор измерений пространства P может включать как рыночные показатели, так и территориальные характеристики (транспортная доступность, плотность населения, наличие свободных площадок), что отражает специфику региональной конкуренции за ресурсы развития.

Для каждого года t уровень конкуренции $K(t)$ определяется как взвешенная сумма различных характеристик; для характеристик, рост которых снижает конкурентное давление, нормированные весовые коэффициенты берутся со знаком минус:

$$K(t) = \alpha_1 q - \alpha_2 l^* - \alpha_3 l + \alpha_4 z + \alpha_5 n - \alpha_6 D - \alpha_7 R + \alpha_8 W .$$

Здесь l^* – среднее расстояние от объекта до центров тяжести всех групп, l – расстояние от центра тяжести группы до рассматриваемого объекта, z – тип данной группы (2 – объект входит в данную группу, 1 – данная группа является наиболее близкой к объекту, 0 – иначе), n – количество членов группы, D –дисперсия расстояний между членами группы, R – радиус группы, W – доля данной группы в общем объеме выпуска продукции среди всех конкурентов.

Конкуренция может рассматривается на самых различных уровнях – на уровне регионов, районов, отраслей, компаний, товаров и т.д.; при этом все уровни взаимосвязаны и влияют друг на друга. Для разных типов объектов РСЭС акценты различны: регионы (районы, населенные пункты) конкурируют не за разорение соперника, а за лучшие результаты и дополнительную выгоду; отрасли (подотрасли) могут конкурировать лишь как потребители ресурсов.

Для каждого объекта РСЭС может быть построена целая система КСГ: для анализа конкурентных сил по Портеру [5] (прямые и косвенные конкуренты, поставщики, потребители, товары-заменители) и для анализа конкуренции среди потребителей различных ресурсов – природных ресурсов, электроэнергии, инфраструктуры, инвестиций, дотаций, рабочей силы и т.д.

Тогда уровень конкуренции для каждого объекта РСЭС в динамике $L(t)$ предлагается определять [7, 8] как взвешенную сумму четырех видов конкуренции: за сбыт продукции, за доступ к ресурсам, а также конкуренции среди потребителей продукции и поставщиков ресурсов. Последние два вида конкуренции берутся с отрицательным знаком, поскольку рост конкуренции у потребителей (рост цен на продукцию) и у поставщиков ресурсов (снижение цен на ресурсы) уменьшает конкурентное давление. Полученная динамика позволяет отслеживать изменение конкурентной среды и корректировать стратегии объектов РСЭС.

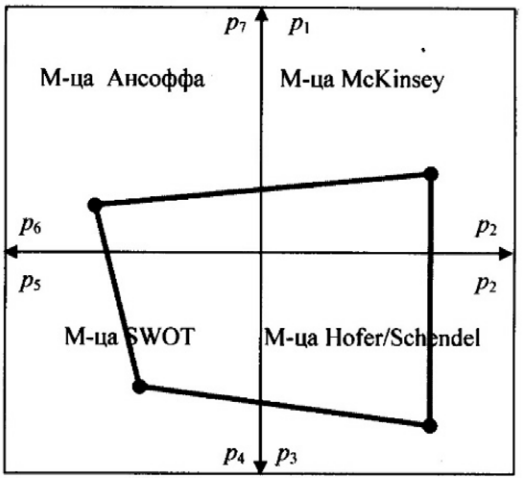


РИС. 4.
Пример многомерной матричной модели

ФОРМИРОВАНИЕ СТРАТЕГИЙ

Формирование стратегий представляет собой центральную задачу СУР. Стратегии обычно классифицируются по различным направлениям [5, 7, 26]:

- эталонные стратегии: стабильности, внутреннего и внешнего роста, сокращения, комбинированные стратегии;
- конкурентные стратегии Портера: низких издержек, широкой дифференциации, оптимальных издержек, сфокусированные стратегии низких издержек и дифференциации.
- стратегии по направлению действий компании: наступательные, оборонительные;
- стратегии в зависимости от этапа жизненного

цикла отрасли: стратегии для растущих отраслей, зрелых отраслей, отраслей в состоянии спада и для фрагментированных отраслей;
– стратегии в зависимости от положения предприятия: стратегии предприятий-лидеров, преследователей, предприятий на вторых ролях и аутсайдеров.

Далее, в каждом квадранте матричных моделей может быть применен свой набор стратегий, релевантных положению объекта в данном квадранте. Наконец, для регионов описаны свои дополнительные стратегии, отражающие региональную специфику: стратегии самообеспечения, мобилизации ресурсов, технологической ниши, локализации производства, концентрации и равномерного развития [1].

Поэтому для каждого положения регионального объекта в пространстве стратегических позиций P одновременно могут быть определены десятки частных стратегий из разных классификаций и матричных моделей. Они обычно описываются с различными характеристиками и на различных уровнях общности, что существенно затрудняет их практическое использование и формализацию для применения информационных технологий.

Нормализованный язык описания стратегий позволяет решить эту проблему: каждая стратегия кодируется фиксированным набором признаков [14, 18, 23], что дает возможность автоматизировать сборку единой итоговой стратегии из частных и более эффективно анализировать и сравнивать стратегии различного происхождения.

Например, для компаний типичными характеристиками для кодирования являются новизна продукта и рынка, объем рынка, доминирующая деятельность, способ организационного роста, уровень затрат и цен, массовость рынка, универсальность продукта, ресурсная база, доля рынка, объем продаж, качество, ассортимент, размер организации, сила конкурентной позиции, уровень конкуренции, эффект масштаба, направление денежных потоков и т.д.

Качественные значения характеристик стратегий упорядочиваются по критерию полезности, формируя порядковые шкалы, в результате каждая частная стратегия задается целочисленным вектором значений. При наличии m характеристик вводится m-мерное дискретное пространство стратегий S, точками которого будут описания отдельных стратегий. На S, как и на P, определяется расстояние, что позволяет аналогично ввести понятия шара, связного множества и расстояния от точки до множества. Введение порядковых шкал позволяет ввести на S отношение порядка на основе поэлементного сравнения значений точек из S.

Для агрегации частных стратегий $\{s^k\}$ в итоговую стратегию s^* в пространстве S вводятся три m-местные операции обобщения стратегий:
– операция g_1: значение каждого признака в s^* есть минимум значений этого признака для стратегий из $\{s^k\}$;
– операция g_2: значение каждого признака в s^* есть максимум значений этого признака для стратегий из $\{s^k\}$;
– операция g^3: значение каждого признака в s^* есть среднее значений этого признака для стратегий из $\{s^k\}$;

Выбор операции зависит от установки ЛПР: операция g_1 реализует пессимистичный подход, g_2 – оптимистичный, g_3 – прагматичный (рекомендуется).

В классических матричных моделях для каждой квадранта определены переходы в соседние квадранты – некоторые элементарные стратегии, отражающие специфику модели. Обобщая этот факт, можно считать, что каждая элементарная стратегия из $E \subset S$ переводит региональный объект из одной стратегической позиции в пространстве P в другую соседнюю позицию, не выводя из P.

Это позволяет определить универсальную стратегическую алгебру $A = \langle P, E \rangle$ с одноместными операциями из E. Тогда стратегия перехода из текущего состояния в целевое представима в виде композиции (последовательности) таких элементарных стратегий.

Задача синтеза стратегии [18, 23] формулируется как

$$\langle P, E, p_0, p_1, p_2, k_0, k_1 \rangle,$$

где p_0– текущая позиция регионального объекта, p_1 – целевая позиция, p_2 –позиция, экстраполирующая тренд развития, k_0, k_1 – текущее и прогнозное положение центра ближайшей группы конкурентов.

Требуется построить последовательность элементарных стратегий минимальной стоимости, переводящих объект из позиции p_0 в p_1 с учетом тенденции движения в p_2 и смещения центра конкурентной группы из k_0 в k_1. Синтез стратегии в дискретном пространстве можно интерпретировать как задачу поиска пути в графе, вершинами которого служат позиции в P, а ребрами – элементарные стратегии из E с весами, отражающими стоимость или риск перехода. Учет конкурентной динамики на основании позиций k_0 в k_1 позволяет избегать траекторий, ведущих в зону усиления конкурентного давления, даже если формально они ближе к целевой позиции p_1.

ГЕНЕРАЦИЯ ВАРИАНТОВ СТРАТЕГИЙ

Каждая из стратегических альтернатив, формируемых на основе качественного анализа, может порождать множество вариантов из-за вариантности исходных данных.

Был предложен метод и алгоритм генерации вариантов [12], основанный на методе морфологических ящиков. Алгоритм генерирует варианты как кортежи декартова произведения множеств вариантных исходных данных и тем самым перечисляет комбинации исходных данных в лексикографическом порядке (по аналогии со счетчиком такси), формируя описываю-

щие каждый вариант вектора состояний. Тем самым устанавливается взаимно-однозначное соответствие между номером варианта и комбинацией вариантных исходных данных для ее расчета.

Обратный алгоритм только по номеру выбранного варианта восстанавливает все исходные данные для его повторного расчета. Это позволяет не хранить исходные данные для расчета всех вариантов, т.е. объем памяти для информации о вариантах практически не зависит от их количества.

Предложенный подход особенно важен при сценарном моделировании региональных программ, когда число комбинаций варьируемых параметров (ставки налогов, объемы инвестиций, приоритеты отраслей и т.д.) исчисляется тысячами, а хранить полный набор исходных данных для каждой комбинации нецелесообразно.

ОЦЕНКА СТОИМОСТИ РЕГИОНАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Оценка стоимости представляет собой важнейший агрегированный показатель деятельности любой компании, позволяющий анализировать и выбирать стратегии развития бизнеса. Основу оценки стоимости составляет применение различных методов оценки, относящихся к различным подходам: доходный подход определяет текущую стоимость будущих доходов, затратный анализирует активы, сравнительный использует данные компаний-аналогов [9].

Чаще всего применяется метод дисконтированных денежных потоков (ДДП), когда стоимость компании определяется будущим денежным потоком за срок владения, приведенным к текущей стоимости по ставке дисконта.

В последние годы распространилась концепция управления, ориентированного на стоимость [9], когда целью стратегического управления становится будущий рост доходов и максимизация стоимости, а не текущая прибыльность. Стоимость рассматривается как самый эффективный критерий оценки бизнеса: критерий количественный (при расплывчатости качественных критериев), критерий долгосрочный (основанный на денежных потоках) и критерий интегрированный (зависящий от множества показателей внутренней и внешней среды компании).

Подходы к оценке и управлению стоимостью с определенными изменениями могут быть применимы и к объектам региональной экономики – отраслям, районам, населенным пунктам [23]. Меняется лишь содержание доходов и расходов, например, как поступлений в муниципальный бюджет из различных источников (налоги, прибыль муниципальных предприятий, дотации из федерального бюджета), так и бюджетных расходов.

Для объектов региональной экономики стоимостной подход может интерпретироваться как оценка совокупного экономического потенциала, включая суммарную стоимость активов, ожидаемые бюджетные поступления и эффект от реализации инвестиционных проектов. Такой критерий может использоваться при сравнении стратегических альтернатив, различающихся по масштабу освоения территории или по структуре отраслевого портфеля.

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТРАТЕГИЧЕСКИХ АЛЬТЕРНАТИВ

Стратегические решения могут содержать как количественные, так и качественные показатели, в т.ч. для слабо формализуемых социальной и экологической подсистем РСЭС. Поэтому критерии оценки стратегических альтернатив могут быть заданы в абсолютной, интервальной, ранговой шкалах, а также с нечетким и вероятностным описанием ситуации выбора. Кроме того, оценка может происходить по неформализованным критериям, например, отражающим субъективные предпочтения ЛПР.

В соответствии с [22] решение называется реальным, если оно является наилучшим в некотором (не обязательно формализованном) смысле среди всех допустимых с точки зрения данного ЛПР; реальное решение играет роль оптимального при наличии многокритериальности и неформализованных критериев. Алгоритм его поиска был разработан В.Р. Хачатуровым [22], причем алгоритм гарантирует нахождение реального решения и при наличии неформализованных критериев.

Анализ и выбор стратегических альтернатив выполняется стандартными методами многокритериальной оптимизации [23, 25], включая нахождение множества Парето, линейную свертку критериев, лексикографическое упорядочение альтернатив, поиск альтернатив, ближайших к идеальной точке и т.д.

Для анализа и выбора многокритериальных стратегических альтернатив также может быть использован метод связанных проекций. Соответствие между визуальными характеристиками геометрических объектов и свойствами альтернатив позволяет выбирать альтернативы по внешнему виду этих объектов. В замкнутой модели большая площадь многоугольника указывает на близость к идеальной точке, симметрия относительно начала координат – на сбалансированность по критериям; взаимное положение геометрических объектов в правильных моделях отражает также такие свойства как доминирование и принадлежность множеству Парето.

На рис. 5 для четырех критериев альтернатива a2 доминирует a3, альтернативы a1 и a2 принадлежат множеству Парето, идеальная точка выделена пунктиром.

При выборе стратегических альтернатив для РСЭС метод связанных проекций дополняет формальные процедуры многокритериального анализа: ЛПР может сопоставить геометрический образ аль-

тернативы с интуитивным представлением о «сбалансированности» социально-экономического развития. Это особенно важно, когда часть критериев задана качественно (уровень социальной напряженности, экологическая нагрузка и т.д.) и не поддается формальной оценке.

МОНИТОРИНГ РЕАЛИЗАЦИИ СТРАТЕГИЙ

Стратегический контроль представляет собой важнейший этап СУР, наиболее полно отражающий сущность управления, поскольку именно он замыкает контур обратной связи. В процессе стратегического контроля предлагается одновременно производить три вида мониторинга: отклонений, состояния внешней среды и кризисных явлений [19, 23].

1. Мониторинг отклонений обеспечивает оценку отклонений динамики прогнозируемых показателей. Для каждого из ключевых показателей эффективности (KPI) производится сравнение реальной и прогнозной (исходя из реализуемой стратегии) динамики показателя с формированием соответствующих оценок.

2. Нестабильность внешней среды анализируется по методике Градова [26]. Сигналы среды оцениваются по частоте, амплитуде, неравномерности, близости к пороговым значениям, дисперсии и производным соответствующей функции.

3. Для мониторинга кризисных явлений перспективно использование аппарата теории катастроф, что позволяет заранее фиксировать признаки приближения к критическим режимам функционирования РСЭС. Предлагается измерять не только динамику отклонений некоторого показателя $D(t)$, но и такие характеристики, как первая производная (скорость отклонения) и вторая производная. Аналогично на основе динамики уровня нестабильности среды $N(t)$ можно определить показатели интенсивности роста нестабильности среды – первую и вторую производные. В теории катастроф к флагам катастроф относятся нарастание амплитуды и частоты колебаний, а

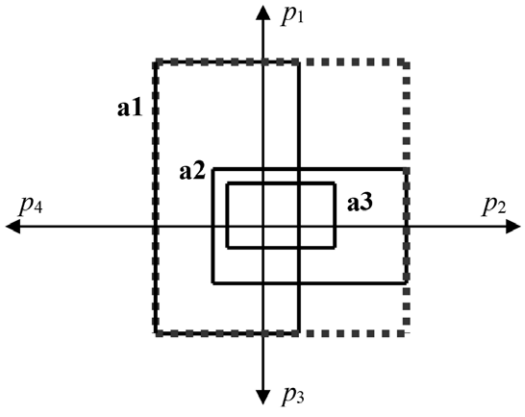


РИС. 5.
Пример визуализации многокритериальных альтернатив

показателями неустойчивости служат дисперсии динамики отклонений и возмущений среды.

Интегрированный алгоритм стратегического контроля объединяет мониторинги отклонений, среды и кризисных явлений, корректировку и адаптацию стратегий на основе единых данных и единой динамической модели. Его применение предполагает регулярный ввод фактических KPI и пересчет прогнозных траекторий в стратегическом пространстве P.

1. Определить цели развития РСЭС и относительную важность каждой из целей.

2. Разработать систему контролируемых KPI и определить важность (вес) каждого показателя с точки зрения достижения целей РСЭС.

3. Для каждого показателя определить допустимый размер отклонений от установленных стандартов и/или критические (пороговые) значения.

4. Начать реализацию стратегии, положив номер текущего года периода реализации t равным 1.

5. Определить фактическое значение каждого ключевого показателя в году с номером t.

6. Рассчитать оценку близости кризисных явлений в текущем году $C(t)$.

7. Если $C(t)$ превосходит заданный уровень либо вторая производная $C(t)$ положительна, то перейти к антикризисному управлению.

8. Рассчитать уровень нестабильности внешней среды в текущем году $N(t)$.

9. Если $N(t)$ превосходит заданный уровень либо вторая производная $N(t)$ положительна, то перейти к управлению на основе гибких решений [26].

10. Рассчитать степень отклонения от реализации стратегических целей $D(t)$.

11. Если $D(t)$ превосходит заданный уровень либо вторая производная $D(t)$ положительна, то обеспечить устранение отклонений.

12. Иначе перейти к шагу 5 для следующего года t.

В процессе динамического проектирования [22, 24] дополнительно решаются следующие задачи.

1. Определить момент корректировки стратегий – когда объект при реализации стратегии впервые попадает в квадрант многомерной стратегической матрицы, отличный от траектории ранее построенной стратегии.

2. Обеспечить оптимальность новой стратегии - требуется построить наиболее эффективную новую стратегию, переводящую объект в целевое положение с учетом тенденции его фактического движения в новое положение и к прежней цели.

3. Определить момент достижения целевого состояния. Чтобы траектория движения объекта не «прошла мимо» цели, момент достижения выбирается так, чтобы после него расстояние от траектории до цели в выбранной метрике начинало возрастать.

Корректирующая обратная связь по результатам мониторинга позволяет решать две задачи:

– в благоприятных случаях формируется корректирующее воздействие для возврата объекта РСЭС на курс реализуемой стратегии без опасного нарастания значений параметров до предельных величин;
– при существенных изменениях среды и самой региональной системы может потребоваться пересмотр стратегии или даже системы целей; в этом случае весь цикл СУР повторяется в новых условиях.

СТРАТЕГИЧЕСКИЕ АЛГЕБРЫ

Как итог, в [15, 18] была предложена обобщенная модель процесса СУР в виде тройки

$$<P^*, E, F>,$$

где P^* – допустимые позиции объектов РСЭС из P, E – элементарные стратегии, изменяющие позиции объектов, F – инвариантные операторы над стратегиями, соответствующие различным этапам процесса СУР, таким как целеполагание, стратегический анализ, анализ конкуренции, формирование и выбор стратегий, мониторинг реализации и т.д.

Каждый элемент k-го (k = 2, 3) множества тройки выступает оператором для элементов множества k-1. Поэтому другим представлением модели стратегического управления может быть пара стратегических алгебр $<A_c, A_p>$,
где: A_c – алгебра стратегий (алгебра функционирования), $A_c = (P^*, E)$;
A_p – двухосновная алгебра процессов обработки стратегий (алгебра стратегического управления, алгебра развития), $A_p = ((P^*, E), F)$.

Тройки связанных множеств встречаются и в других областях: в программировании («данные – программы – инструментальные средства»), в промышленности («продукция – система производства – система развития производства») и т.д. [7]. Возможно, что наличие таких троек является общим свойством окружающего мира.

Каждый инвариантный оператор из F может быть выражен в терминах ограниченного числа концептов, таких как некоторый объект действительности R, внешняя среда объекта E, субъект действительности S, модель объекта, сформировавшаяся у субъекта M^*, компьютерная модель объекта M, оценка модели M', варианты модели $\{M_i\}$, динамика развития модели $\{M_t\}$. Например, мониторинг отклонений как средство выявления рассогласования между плановым и реальным поведением объекта описывается как $(M, R) \to M$.

Другими инвариантными операторами являются целеполагание, анализ, формирование, генерация, оценка, выбор, реализация, управление, диагностика, коррекция и т.д.

Инвариантные операторы над стратегиями в целом соответствуют различным этапам процесса СУР, поэтому систему автоматизации СУР можно строить как средство реализации приведенных инвариантных операторов.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ СТРАТЕГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Автоматизация поддержки СУР требует разработки специализированных систем, ориентированных на руководителей высшего звена. На рынке программных продуктов РФ имеется определенное число систем, обеспечивающих решение задач стратегического уровня. Эти системы обычно содержат такие возможности, как сегментация рынка, SWOT-анализ, портфельный анализ, GAP-анализ, метод 4P, работа со сбалансированной системой показателей и т.д.

Проведенный анализ выявил ряд недостатков существующих инструментов стратегического управления: специализированные системы поддержки СУР практически отсутствуют; поддержка стратегического управления разбросана по маркетинговым пакетам и корпоративным системам (типа SAP SEM); не поддерживается полный цикл СУР; количественные модели и методы используются слабо, а формализованные модели – фрагментарно.

Поэтому можно определить следующие основные требования к системе автоматизации процесса СУР:
– разработка системы автоматизации как специализированной системы, ориентированной на использование в процессе стратегического управления руководителями высшего звена;
– поддержка полного цикла стратегического управления – от постановки целей и до мониторинга реализации стратегий;
– интеграция с системами, предоставляющими реальные числовые данные – с системами долгосрочного планирования и с корпоративными информационными системами;
– максимально полное использование специализированных моделей и методов стратегического планирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложен математический аппарат для формализации процесса стратегического управления регионом – дискретные стратегические пространства. Эти пространства формируются в результате перевода характеристик региональных объектов, заданных в различных шкалах, в ранговые шкалы, в том числе за счет дискретизации интервалов значений.

Это открывает возможности для формализации стратегического управления на различных уровнях региональной системы, в ее различных аспектах (территориальный, отраслевой, корпоративный), для различных этапов процесса СУР, и позволяет единообразно описывать текущие и целевые позиции региональных объектов (матричные модели стратегического анализа), их взаимодействие (карты стратегических

групп конкурентов, модели портфельного анализа) и развитие этих объектов (формирование стратегий и мониторинг их реализации).

Использование целочисленных векторов (точек стратегических пространств) как унифицированного представления любых характеристик региональных объектов существенно упрощает процессы обработки информации и визуального анализа, расширяя возможности применения информационных технологий в процессе СУР.

Предложенный подход может быть использован для формализации и анализа сложных систем в различных областях и, прежде всего, в общественных науках.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Васильева З.А., Лихачева Т.П., Филимоненко И.В.** Стратегическое развитие территорий: методические подходы и инструментарий. Красноярск: КрасГТУ, 2005. 272 с.
2. **Воеводин В.В.** Линейная алгебра: 2-е изд. М.: Мир, 1986. 423 с.
3. **Гранберг А.Г.** Основы региональной экономики: 2-е изд. М.: ГУ ВШЭ, 2001. 495 с.
4. **Дородницын А.А.** Математика и описательные науки / Избранные научные труды. М.: ВЦ РАН. 1997. Т. 2. С. 330–336.
5. **Зуб А.Т.** Стратегический менеджмент: теория и практика: 4-е изд. М.: Юрайт, 2014. 375 с.
6. **Князева Е.Н., Курдюмов С.П.** Основания синергетики. М.: КомКнига, 2005. 240 с.
7. **Круглова Н.Ю., Круглов М.И.** Стратегический менеджмент. М.: Изд-во РДЛ, 2003. 464 с.
8. **Кузнецов О.Л., Щеулин А.С., Девяткин С.В. и др.** Методологические аспекты обеспечения устойчивого развития регионов: монография. Дубна, 2001. 197 с.
9. Оценка бизнеса. Под ред. А.Г. Грязновой, М.А. Федотовой. М.: Финансы и статистика, 2009. 733 с.
10. **Прангишвили И.В.** Системный подход и общесистемные закономерности. М.: СИНТЕГ, 2000. 528 с.
11. **Сангадиева И.Г.** Методология стратегического управления регионом. Красноярск, 2006. 260 с.
12. **Соломатин А.Н.** Генерация, визуализация и выбор многокритериальных альтернатив. М.: ВЦ РАН, 2005. 44 с.
13. **Соломатин А.Н.** Метод связанных проекций и его использование для визуализации многомерных данных // Проблемы управления. 2019. № 6. С. 41–51. DOI: 10.25728/pu.2019.6.5.
14. **Соломатин А.Н.** Модели и средства автоматизации стратегического управления газодобывающими предприятиями. М.: ВЦ РАН, 2005. 40 с.
15. **Соломатин А.Н.** Разработка многомерных многоуровневых моделей стратегического управления регионом // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2009) / Труды Третьей межд. конф. (5-7 окт. 2009 г., Москва). М.: ИПУ РАН, 2009. С. 104–116.
16. **Соломатин А.Н.** Разработка формализованных моделей стратегического регионального управления / Труды ИСА. 2025. № 4. С. 20–27. DOI: 10.14357/20790279250403.
17. **Соломатин А.Н.** Формирование структуры целей в стратегическом управлении регионом / Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2015). Мат-лы Восьмой межд. конф. Москва, 29 сент.–1 окт. 2015 г. М.: ИПУ РАН, 2015. Т. 2. С. 158–161.
18. **Соломатин А.Н., Хачатуров В.Р.** Математическое моделирование в стратегическом управлении регионом. М.: ВЦ РАН, 2007. 60 с.
19. **Соломатин А.Н., Хачатуров В.Р.** Методы контроля реализации стратегий регионального развития // Проблемы управления. 2015. №6. С. 53–61.
20. **Solomatin A.N.** Visualization of multidimensional data: method of connected projections / Eleventh International Conference "Management Of Large-Scale System Development" (MLSD) / Moscow (October 2018). IEEE Conference Publications, IEEE Xplore Digital Library. DOI: 10.1109/MLSD.2018.8551769.
21. Стратегическое управление. Регион, город, предприятие: монография / Под ред. Д.С. Львова и др., 2-е изд. М.: Экономика, 2005. 603 с.
22. **Хачатуров В.Р.** Математические методы регионального программирования. М.: Наука, 1989. 304 с.
23. **Хачатуров В.Р., Соломатин А.Н., Злотов А.В. и др.** Планирование и проектирование освоения нефтегазодобывающих регионов и месторождений: Математические модели, методы, применение / Под ред. В.Р. Хачатурова. М.: УРСС: ЛЕНАНД, 2015. 304 с.
24. **Хачатуров В.Р., Хачатуров Р.В.** Математическое моделирование и динамическое проектирование в нефтегазодобывающей промышленности // Наука и техника в газовой промышленности. 2008. №2. С. 3–22.
25. **Штойер Р.** Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения / Пер. с англ. Под ред. А.В.Лотова. М.: Радио и связь, 1992. 504 с.
26. Экономическая стратегия фирмы / Под ред. Градова А.П., 3-е изд. СПб.: СпецЛит, 2000. 589 с.
27. **Юсупов К.Н.** Региональная экономика. М.: КНОРУС, 2006. 232 с.

REFERENCES

1. **Vasilyeva Z.A., Likhacheva T.P., Filimonenko I.V.** Strategic development of territories: methodological approaches and tools. Krasnoyarsk: KrasGTU. 2005: 272. (In Russian).

2. **Voevodin V.V.** Linear algebra: 2nd ed. Moscow: Mir. 1986: 423. (In Russian).
3. **Granberg A.G.** Fundamentals of regional economics: 2nd ed. Moscow: State University Higher School of Economics. 2001: 495. (In Russian).
4. **Dorodnitsyn A.A.** Mathematics and descriptive sciences. Selected scientific works. Moscow: Computing Center RAS. 1997; (2): 330–336. (In Russian).
5. **Tooth A.T.** Strategic management: theory and practice: 4th ed. Moscow: Yurayt. 2014: 375. (In Russian).
6. **Knyazeva E.N., Kurdyumov S.P.** Foundations of synergetics. Moscow: KomKniga. 2005: 240. (In Russian).
7. **Kruglova N.Yu., Kruglov M.I.** Strategic management. Moscow: RDL. 2003: 464. (In Russian).
8. **Kuznetsov O.L., Shcheulin A.S., Devyatkin S.V. et al.** Methodological aspects of ensuring sustainable development of regions: monograph. Dubna. 2001: 197. (In Russian).
9. Business valuation / Ed. A.G. Gryaznova, M.A. Fedotova. Moscow: Finance and Statistics. 2009: 733. (In Russian).
10. **Prangishvili I.V.** Systematic approach and system-wide patterns. Moscow: SINTEG. 2000: 528. (In Russian).
11. **Sangadieva I.G.** Methodology of strategic management of the region. Krasnoyarsk. 2006: 260. (In Russian).
12. **Solomatin A.N.** Generation, visualization and selection of multicriteria alternatives. Moscow: Computing Center RAS. 2005: 44. (In Russian).
13. **Solomatin A.N.** The method of coupled projections and its use for visualizing multidimensional data. *Problemy upravleniya.* 2019; (6): 41–51. DOI: 10.25728/pu.2019.6.5. (In Russian).
14. **Solomatin A.N.** Models and automation tools for strategic management of gas production enterprises. Moscow: VTS RAN. 2005: 40. (In Russian).
15. **Solomatin A.N.** Development of multidimensional multi-level models of strategic management of the region. Management of the development of large-scale systems (MLSD'2009): Proceedings of the Third International. conf. (October 5–7, 2009, Moscow). Moscow: IPU RAS. 2009: 104–116. (In Russian).
16. **Solomatin A.N.** Development of formalized models of strategic regional management. Trudy ISA. 2025; (4):20–27. DOI: 10.14357/20790279250403. (In Russian).
17. **Solomatin A.N.** Formation of the structure of goals in the strategic management of the region. Management of the development of large-scale systems (MLSD'2015): Mater. Eighth Intl. conf. (Moscow, September 29 – October 1, 2015). Moscow: IPU RAS. 2015; 2: 158–161. (In Russian).
18. **Solomatin A.N., Khachaturov V.R.** Mathematical modeling in strategic management of the region. Moscow: Computing Center RAS. 2007: 60. (In Russian).
19. **Solomatin A.N., Khachaturov V.R.** Methods for monitoring the implementation of regional development strategies. *Problemy upravleniya.* 2015; (6): 53–61. (In Russian).
20. **Solomatin A.N.** Visualization of multidimensional data: method of connected projections. Eleventh International Conference "Management Of Large-Scale System Development" (MLSD). Moscow (October 2018). IEEE Conference Publications, IEEE Xplore Digital Library. DOI: 10.1109/MLSD.2018.8551769.
21. Strategic management. Region, city, enterprise: monograph. Ed. By D.S. Lvov et al., 2nd ed. Moscow: Economics, 2005: 603. (In Russian).
22. **Khachaturov V.R.** Mathematical methods of regional programming. Moscow: Nauka. 1989: 304. (In Russian).
23. **Khachaturov V.R., Solomatin A.N., Zlotov A.V. et al.** Planning and design of development of oil and gas producing regions and fields: Mathematical models, methods, application. Ed. by V.R. Khachaturov. Moscow: URSS: LENAND. 2015: 304. (In Russian).
24. **Khachaturov V.R., Khachaturov R.V.** Mathematical modeling and dynamic design in the oil and gas industry. *Nauka i tekhnika v gazovoj promyshlennosti*. 2008; (2): 3–22. (In Russian).
25. **Steuer R.** Multicriteria optimization. Theory, calculations and applications. Ed. by A.V. Lotov. Moscow: Radio and communication. 1992: 504. (In Russian).
26. Economic strategy of the company / Ed. by Gradov A.P., 3rd ed. St. Petersburg: SpetsLit. 2000: 589. (In Russian).
27. **Yusupov K.N.** Regional economics. Moscow: KNORUS. 2006: 232. (In Russian).

Соломатин Александр Николаевич,
к.ф.-м.н., доцент, ведущий научный сотрудник, рук. отдела Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» РАН (ФИЦ ИУ РАН)

119333, г. Москва, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2,
119333, Moscow, st. Vavilova, 44, bldg. 2,
тел.: +7 (916) 659-30-63, e-mail: a.n.solomatin@bk.ru

УДК 338.43(575.1)
DOI: 10.52531/1682-1696-2026-26-3-121-126
Научная статья

EDN: UBTJNQ

МОДЕРНИЗАЦИЯ АГРАРНОГО ПРОИЗВОДСТВА РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

Н.К. Юлдашев[1]
ORCID ID: 0000-0003-4243-1215, Author ID:531937
К.В. Некрасов[2]
ORCID ID: 0000-0002-7189-7922, Author ID: 648439,
В.И. Набоков[3]
ORCID ID: 0000-0001-8789-6062, Author ID:391586
[1] Ташкентский институт менеджмента и экономики (г. Ташкент, Республика Узбекистан)
[2] Уральский государственный университет путей сообщения (г. Екатеринбург, Россия)
[3] Уральский государственный аграрный университет (г. Екатеринбург, Россия)

В статье показано, что в Республике Узбекистан быстрыми темпами растёт численность населения, что создает риски продовольственной безопасности. Это потребовало принятие в 2023 г. Стратегии «Узбекистан – 2030». Стратегия реализуется. Вместе с тем проявившиеся в последние годы проблемы и вызовы потребовали принятия дополнительных серьезных мер по модернизации аграрной сферы: освоение и ввод в эксплуатацию земельных площадей, укрепление технической оснащённости данного производства, совершенствование системы подготовки кадров и развитие аграрной науки, а также – соответствующей корректировки Стратегии и реализации принятых в последние годы в Республике Узбекистан документов.

Ключевые слова: *аграрное производство, Республика Узбекистан, модернизация аграрного производства, техническое оснащение предприятий, освоение новых земель, подготовка кадров*

Original article

MODERNIZATION OF AGRICULTURAL PRODUCTION IN THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN

N.K. Yuldashev[1],
K.V. Nekrasov[2], **V.I. Nabokov**[3]
[1] Tashkent Institute of Management and Economics (Tashkent, Republic of Uzbekistan)
[2] Ural State University of Railway Transport (Yekaterinburg, Russia)
[3] Ural State Agrarian University (Yekaterinburg, Russia)

The article demonstrates that the population of the Republic of Uzbekistan is growing rapidly, which poses potential risks to food security. This situation necessitated the adoption of the Uzbekistan–2030 Strategy in 2023. At the same time, the problems and challenges that have emerged in recent years have required additional comprehensive measures aimed at modernizing the agricultural sector, including the development and commissioning of new land areas, strengthening the technical capacity of agricultural production, improving the personnel training system, and advancing agricultural science. These developments also necessitate appropriate adjustments to the Uzbekistan–2030 Strategy and its implementation mechanisms.

Key words: *agricultural production, Republic of Uzbekistan, modernization of agricultural production, technical equipment of enterprises, development of new land, personnel training*

ВВЕДЕНИЕ

По данным Исполкома Содружества Независимых Государств, в 2025 г. все страны – члены Содружества продемонстрировали положительную динамику валового внутреннего продукта (+ 2,1%). При этом наиболее высокие темпы реального роста данного показателя были зафиксированы в государствах Средней Азии – в Кыргызстане (+ 10,0%), Таджикистане (+ 8,2%) и Узбекистане (+ 7,7 %). В Республике Узбекистан реальный рост объемов производства продукции сельского хозяйства в 2025 году составил 6,3% [7].

Вместе с тем активно растет и численность населения Узбекистана (рис. 1). В связи с этим в республике остается низким жизненный уровень населения, что приводит к активной трудовой миграции жителей и создает высокие риски продовольственной безопасности страны.

С учетом этого 11 сентября 2023 г. Президент Узбекистана Ш.М. Мерзиеев утвердил Стратегию «Узбекистан – 2030» [10]. Ею были определены важнейшие задачи на период до 2030 г.:

– увеличение доходов в расчете на душу населения страны – до 4 тыс. долларов США;

– увеличение валового внутреннего продукта Республики Узбекистан – до 160 млрд долларов США.

© 2026, Н.К. Юлдашев, К.В. Некрасов, В.И. Набоков
Поступила в редакцию 14.07.2026

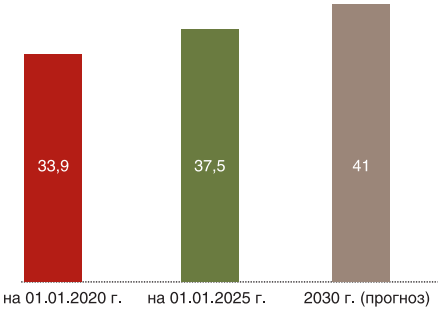


РИС. 1.

Численность населения Республики Узбекистан, млн чел. Составлено по материалам Национального информационного агентства Республики Узбекистан https://uza.uz/ru/posts/kanal-kosh-tepa-kak-taliby-mogut-ostavit-bez-vody-centralnuyu-aziyu_559536 [6]

ТАБЛИЦА 1.

Основные показатели развития аграрной сферы Республики Узбекистан до 2030 г.

Показатели	2023 г.	2030 г.
Средняя урожайность зерновых культур, ц/га	70,5	80–85
Средняя урожайность хлопчатника, ц/га	34	45–50
Экспорт продукции сельского хозяйства, млрд долларов	2,5	10
Обеспеченность отечественными семенами овощей, бахчевых и картофеля, %	42,2	50
Уровень промышленной переработки сельскохозяйственной продукции, %	15,5	25
Доход (средний) с 1 гектара сельскохозяйственной земли, тыс. долларов	4,4	5

Важнейшая роль в решении данных задач была отведена традиционной для страны аграрной сфере.

В таблице 1 приведены основные, содержащиеся в Стратегии, задачи, определяющие развитие аграрной сферы [15]. Из данных таблицы видно, что стратегия предусматривает интенсификацию аграрного производства, переход от использования преимущественно экстенсивных технологий ведения сельского хозяйства на активное использование интенсивных технологий [10]. За счет этих мер предполагается существенное повышение урожайности хлопчатника, зерновых и других культур, значительное увеличение объемов производства сельскохозяйственной продукции. Стратегия реализуется.

СОДЕРЖАНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В последние годы усилились проблемы и вызовы в развитии аграрного производства Республики Узбекистан. Важнейшие из них – дефицит и нерациональное использование воды, деградация почв, устаревание технологий.

Так, сейчас Узбекистан и его сельское хозяйство испытывают острый недостаток в воде. Причем, с изменением климата ресурсы воды в стране ежегодно снижаются, а потребности в ней сельского хозяйства растут. Из-за этого в 2030 г. дефицит водных ресурсов составит около 15 млрд кубометров [9]. Это значительно усложняет аграрное производство Узбекистана.

Основные источники водных ресурсов Узбекистана – реки Сырдарья и Амударья. Некоторые объемы воды дают такие источники, как возвратные и подземные воды (сточные, дренажные). Не более 20% водных ресурсов находится в пределах территории страны, большая часть рек находится по территории стран-соседей.

Важнейший источник воды – Амударья, которая течет по территории нескольких стран (табл. 2), и это требует согласования действий по эффективному использованию данных ресурсов.

Однако Амударья берет начало в соседней Республике Афганистан, который имеет преимущества в применении указанных водных ресурсов. Кроме того, Афганистан строит канал Кош-Тепа как ответвление от указанной реки, и это поглощает ее ресурсы. Ситуацию усугубляет то, что строительство ведется примитивно – канал роют экскаваторами в песчаной почве, без укрепления берегов и дна бетоном, поэтому значительная часть воды уходит в песок [2, 9].

Важный шаг к решению жизненно важный для государств Средней Азии проблемы – рационального использования воды Амударьи и других рек – многостороннее сотрудничество заинтересованных государств. Однако Афганистан никакого желания к диалогу в данной сфере до сих пор не проявил [3].

Несмотря на это Республика Узбекистан ищет пути к цивилизованному решению проблемы совместного эффективного использования общих водных ресурсов и соответствующих водохозяйственных объектов.

В реальной жизни Узбекистан вынужден активно принимать все возможные меры по эффективному использованию данных ресурсов своим сельским и иным хозяйством, применять для этого современные инновационные технику и технологии, предусмотренные Стратегией, а именно:

– внедрять сберегающие воду технологии по поливу сельхозкультур. Увеличить к 2030 г. площади земель, охваченных данными технологиями, до 2 млн га, в том числе капельным орошением – не менее 600 тыс. га;

– обеспечить с помощью новых технологий КПД (коэффициент полезного действия) систем орошения не менее 0,73;

– повысить мощности локальных предприятий, которые производят водосберегающие технологии, не менее чем до 300 тыс. гектаров в год;

– используя инновационные технологии, уменьшить на 1,7 млн гектаров площади орошаемых засоленных земель;

– в 14 областях Республики Узбекистан внедрить режим, традиционно называемый чистой экологией;

ТАБЛИЦА 2.

Земли, которые орошаются водами Амударьи, млн га

Страны	Орошаемые земли
Узбекистан	2,3
Туркменистан	1,7
Афганистан	1,15

– внедрить в 100 хозяйствующих субъектах, осуществляющих водохозяйственную деятельность, специальные автоматизированные системы;

– увеличить на 300 тыс. гектаров сельскохозяйственные земли за счет применения сберегающих воду технологий, осуществить посадку на них масленичных, кормовых, бахчевых, и иных культур, овощей, организовать интенсивные виноградники и т.д.

Все это дает возможность уменьшить дефицит водных ресурсов на предприятиях сельского хозяйства страны [4, 5]. Вместе с тем данные мероприятия ведут к большему, чем ранее, потреблению электрической энергии. Это, в свою очередь, требует внедрения и использования соответствующего энергосберегающего инновационного оборудования и технологий, введения режима экономии энергии, прежде всего:

– перевода абсолютно всех насосных станций на альтернативную энергию;

– монтажа энергосберегающего оборудования;

– модернизации почти всех насосных станций;

– замены многих традиционных электродвигателей и насосов на сберегающие энергию технические средства [6, 8].

Другая проблема аграрной сферы страны – деградация почв Узбекистана: постепенная потеря почвами полезных свойств – плодородия, способности удерживать влагу, поддерживать соответствующую растительность.

Основные процессы, ведущие к деградации почв Республики:

– опустынивание, то есть расширение пустынных ландшафтов и уменьшение растительного покрова;

– уплотнение почвы из-за активного выпаса скота или интенсивной работы сельскохозяйственной техники;

– загрязнение почвы промышленными отходами или избыточными пестицидами и минеральными удобрениями;

– уменьшение содержания органического вещества (гумуса);

– эрозия почвы, то есть потеря ею из-за ветров и воды плодородного слоя;

– засоление почвы из-за неэффективного орошения или естественных причин в засушливых условиях.

Деградация почв Узбекистана ведет к:

– снижению урожайности культур;

– усилению солевых и пыльных бурь;

– снижению продовольственной безопасности.

Показатель доли деградированных земель в Узбекистане – один из самых высоких в Центральной Азии (около 26%). Указанные проблемы потребовали корректировки Стратегии, принятие новых дополнительных мер по модернизации сельского хозяйства Республики. В связи с этим Кабинет министров Республики Узбекистан 19 августа 2024 г. принял постановление (№ 515) «Об утверждении положения об освоении и реализуемых государством мерах повторного ввода в эксплуатацию новых земельных площадей в сельском хозяйстве, а также порядке финансирования данных мероприятий».

Под освоением земельных участков, в соответствии с данным документом Кабинета министров, понимается отнесение к категории орошаемых земель (путем освоения богарных земель, пастбищ и земель сероземного типа); земель, находящихся в состоянии мелиоративного строительства и не используемых в сельском хозяйстве; земель, относящихся к категории неорошаемых. Указанным постановлением предусмотрена система соответствующих актуальных мер. Так, до 2030 г. в Республике Узбекистан предусмотрено освоить и улучшить 938 тыс. гектаров пастбищ. Уже в 2026–2027 гг. предполагается восстановить 620 тыс. гектаров пастбищ. В частности, на 300 тыс. гектарах высадить пастбищные культуры, на 130 тыс. га – установить водозаборные скважины. В результате этого появится возможность для выпаса 960 тыс. голов мелкого рогатого скота, для увеличения объемов производства мяса и шерсти.

Следует заметить, что за пять последних лет в республике в результате ирригационно- мелиоративных работ в сельскохозяйственный оборот введено 826,5 тысяч га земель. Из них 409 тысяч га – орошаемые земли. 418 тыс. га земель были освоены благодаря использованию подземных вод на богарных и пастбищных территориях, а также выращиванию культур с низким уровнем водопотребления. В республике предпринимаются весьма энергичные меры по развитию садоводства и виноградарства. Так, в 2025 г. на 44 тыс. га неэффективных земель были организованы интенсивные и индустриализованные сады и виноградники, при этом создано 37 тыс. современных рабочих мест.

Сады и виноградники, созданные на этих землях, начнут давать урожай с 2027 г., что позволит экспортировать плодоовощную продукцию на 660 млн долларов США в год. Так, в Сохском районе уже на 500 гектарах посажены яблони, малина и абрикосы, в Термезском районе на 164 га – абрикосы и персики. Виноград сорта «Аватар» выращивают в Ахангаранском районе на 309 гектарах, в Бумунгурском районе на 550 га и в Кувинском районе – на 60 га. В Папском районе на 504 га созданы плантации персиков и сливы.

Следует заметить, что при осуществлении этой работы уже в 2026 г. будет создано 25,5 тыс. га фруктовых садов и 5 тыс. – виноградников. При этом будет

создано 48 тыс. постоянных и сезонных рабочих мест, что важно для занятости все возрастающей численности трудового населения Республики.

Важным направлением модернизации аграрной сферы Республики Узбекистан являются меры по укреплению технической оснащенности сельскохозяйственного производства, внедрению новых, прогрессивных технологий [11].

В настоящее время уровень механизации сельскохозяйственного производства республики составляет 81%. В последние годы хозяйствами Республики приобретено 1756 хлопкоуборочных машин, за счет чего уровень механизации хлопкоуборочных работ достиг 52%. В сезон прошлого года с помощью машин собрано 2,1 млн тонн хлопка. Благодаря этому за пять последних лет ручной труд в хлопководстве сократился в 1,8 раза. Важная задача – существенно увеличить долю машинного сбора хлопка – до или более 70%, для этого в 2026 г. планируется закупить не менее 800 современных хлопкоуборочных машин.

В текущем году предприятиями сельского хозяйства страны предполагается приобрести 6 тыс. тракторов и комбайнов. Всего намечено приобрести 10 тыс. единиц сельхозтехники, за счет этого предполагается довести общий парк сельскохозяйственной техники в Республике до 292 тыс. единиц.

Для предоставления новой техники фермерам Республики Узбекистан в лизинг на привлекательных условиях планируется привлечь не менее 400 млн долларов США средств международных финансовых институтов. Техника при этом будет предоставляться всем сельхозпроизводителям в лизинг на срок до 10 лет под ставку 18% в национальной валюте с двухлетним льготным периодом, при этом 8% кредитной ставки будет компенсироваться за счет государственного бюджета.

Приоритетное значение приобретает развитие в республике сельскохозяйственного машиностроения, расширение отечественного производства и обслуживания сельскохозяйственной техники. Так, в 2026–2028 гг. объемы производства отечественной техники и агрегатов увеличатся в пять раз, а уровень локализации производства техники на отечественных предприятиях – на 10%. Уже в 2026 г. предполагается довести объем производства в стране сельскохозяйственной техники до 6 тыс. единиц. К 2028 г. предполагается увеличить показатель локализации производства до 30–35% для самоходной техники и до 60–65% – для навесной и прицепной техники.

Совершенствуется сложившаяся система субсидирования приобретения техники и агрегатов. В настоящее время она применяется только по отношению к техническим средствам с уровнем локализации производства выше 25%. Предполагается субсидировать приобретение также трех самых востребованных видов импортной техники [14]. На возмещение 15% стоимости приобретаемый предприятиями сельского хозяйства Республики техники в этом году предусмотрено направить 660 млрд сумов.

В этих целях рассматриваются предложения по оздоровлению и поддержке деятельности Ташкентского тракторного завода. Принимаются также меры по расширению спектра банковских услуг сельхозпроизводителям, по внедрению решений на основе цифровых технологий и искусственного интеллекта.

В 2025 г. АКБ «Агробанк» предоставил сельхозпроизводителям кредиты на сельскохозяйственную технику на 1,6 трлн сумов, в этом году планируется довести данный показатель до 3,9 трлн сумов. При этом автоматизация процессов кредитования позволит сократить срок предоставления кредитов с 3 дней до 3 часов. Кроме того, клиентам будут предоставляться комплексные сельскохозяйственные услуги. В каждом регионе республики будет создано по одной зоне агрообслуживания, где будет работать сельскохозяйственный агент. В этих зонах фермеры смогут получать в одном месте банковские и консалтинговые услуги, консультации агрономов, информацию об учебных курсах, о приобретении молодняка скота и саженцев растений и кустарников, а также пользоваться сервисами мониторинга состояния сельского хозяйства, анализа почв [15].

Указанным банком разработаны планы по реализации пилотных проектов с использованием искусственного интеллекта в животноводстве, садоводстве и умном управлении водными ресурсами, по учреждению новой венчурной компании с уставным капиталом 100 млрд сумов для финансирования стартапов в сельском хозяйстве.

Таким образом, в республике осуществляются серьезные меры по дальнейшему внедрению средств механизации сельского хозяйства, развитию отечественного сельскохозяйственного производства, сервисному обслуживанию техники, улучшению мониторинга аграрной сферы, а также расширению спектра финансовых услуг с помощью цифровых платформ.

Модернизация аграрной сферы республики потребовала совершенствования системы подготовки кадров для сельского хозяйства [1].

Так, в настоящее время в Ташкентском государственном аграрном университете обучаются 13,6 тыс. студентов. Однако по причине слабой связи учебного процесса с практикой лишь 55% его выпускников работают по получаемой в вузе специальности.

В связи с этим поставлены задачи по созданию системы, которая органично свяжет образование, научные исследования и производство, а также по подготовке квалифицированных специалистов, соответствующих требованиям аграрного производства и современного рынка труда.

В частности, 6,8 тыс. студентов университета будут ежегодно проходить практику в производственных организациях, на предприятиях и в агрокластерах,

а более 2,6 тыс. – в 22 НИИ системы Министерства сельского хозяйства Республики Узбекистан.

Кроме того, предполагается зачислять в университет детей фермеров и их работников, которые не набрали в ходе вступительных тестов необходимого для поступления в вуз количества баллов, по специальному контракту, а также – сократить срок обучения по семи образовательным направлениям с 4 до 3 лет.

Студенты учебных заведений аграрного профиля будут обучаться на права тракториста-машиниста и оператора по эксплуатации агродронов.

Руководством республики принимаются дополнительные меры по развитию сельскохозяйственной науки. Так, совершенствуется сложившаяся организационная структура управления аграрной наукой. С этой целью принято решение об объединении 22 научных центров, 260 лабораторий и более 2,5 тыс. ученых и научных сотрудников в единую структуру – Академию сельскохозяйственных наук. Предполагается, что это позволит вывести аграрные исследования на новый уровень.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Республика Узбекистан имеет весьма низкий жизненный уровень населения. При этом ситуация усугубляется быстрыми темпами роста численности населения, связанными с высокой рождаемостью. С учетом этого 11 сентября 2023 г. Президент Республики утвердил Стратегию «Узбекистан – 2030», которой предусмотрено к 2030 г. существенно увеличить валовой внутренний продукт страны и доходы в расчете на душу населения. Важное место в этом отводится аграрному производству.

Вместе с тем, в последние годы появились проблемы и вызовы в развитии аграрной сферы, в обеспечении все прибывающего населения республики продовольствием. Это потребовало дополнительных мер по модернизации аграрного производства, корректировке с учетом этого Стратегии, введению в нее целевых показателей объемов производства наиболее важных видов продукции сельского хозяйства [12, 13], принятия всех необходимых мер по выполнению намеченного.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Волков В.И., Набоков В.И., Юлдашев Н.К.** Обеспечение квалифицированными кадрами предприятий аграрной сферы агропромышленного комплекса региона // Аграрный вестник Урала. 2020. № 6 (197). С. 81–88.
2. **Воронин Б.А., Воронина Я.В., Кузнецова А.Р. и др.** Перспективы развития сельскохозяйственного производства на Урале / Екатеринбург: Уральский государственный аграрный университет, 2025. 152 с. ISBN 978-5-87203-589.
3. **Газетдинов Ш.М., Коваленко Е.Г., Якимова О.Ю., Зиганшин Б.Г.** Развитие координационных форм организации территориально-отраслевых взаимодействий в сельских территориях // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2023. № 1(69). С. 94–101. DOI: 10.12737/2073-0462-2023-94-101.
4. **Кириллов Р.А., Чибиркина Е.А., Комаров С.И.** Анализ стратегического планирования землепользования в субъектах Российской Федерации на современном этапе // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2024. Т. 17. № 3(82). С. 240–251. DOI: 10.53914/issn2071-2243-2024-3-240-251.
5. **Лукьянова М.Т., Залилова З.А.** Методические подходы к комплексной экономической оценке эффективности кормопроизводства в регионе // Достижения науки и техники АПК. 2023. Т. 37. № 1. С. 51–56. DOI: 10.53859/02352451-2023-37-151.
6. **Набоков В.И., Скворцов Е.А., Кухарь В.С.** Роботизация сельскохозяйственного производства и заработная плата в отрасли // Экономика сельского хозяйства России. 2021. № 9. С. 47–52.
7. Национальное информационное агентство Узбекистана. Канал Кош-Тепа: как талибы могут оставить без воды Центральную Азию. URL: https://uza.uz/ru/posts/kanal-kosh-tepa-kak-taliby-mogut-ostavit-bez-vody-centralnuyu-aziyu_559536 (дата обращения: 15.10.2025).
8. **Соловьев И.В., Кущ С.П., Маликов Т.Р.** Влияние ориентированности компаний на кооперацию на развитие межорганизационных инноваций // Вестник Московского университета. Серия 6. Экономика. 2025. Т. 60. № 1. С. 107–128. DOI: 10.55959/MSU0130-0105-6-60-1-6.
9. Стратегия – 2030 Узбекистана. Ташкент, 2023. ООО «Финансово-экономическая консалтинг группа». URL: https://lex.uz/ru/docs/6600404#6605092 (дата обращения: 15.10.2025).
10. Указ Президента Республики Узбекистан ПФ–158 от 11.09.2023 «О стратегии Узбекистан – 2030». URL: https://lex.uz/ru/docs/6600404 (дата обращения: 15.10.2025).
11. **Djurabaev O.** Formation of model beekeeping facilities and modernized interindustrial communications in human bearing management. Архив научных исследований. 2020. № 11.
12. **Eskerkhanova L.T., Beloglazova L.B., Masyutina N.M., Romanishina T.S., Turishcheva T.B.** Increasing the competitiveness of future economists for work in industry 4.0. Perspectives of Science and Education. 2023. Vol. 62. N 2. P. 158–173. DOI: 10.32744/pse.2023.2.9.
13. **Glebova I., Berman S., Khafizova L., Biktimirova A., Alhasov Z.** Digital divide of regions: Possible growth points for their digital maturity. International Journal of Sustainable Development and Planning. 2023. Vol. 18. N 5. P. 1457–1465. DOI: 10.18280/ijsdp.180516.

14. **Nabokov V.I., Semin A.N., Pryadilina N.K., Gusev A.S., Nekrasov K.V.** The density of robotization of agriculture in Russia and its regions. WSEAS Transactions on Systems and Control. 2020. Vol. 15. P. 549–554. DOI: 10.37394/23203.2020.15.53.
15. **Yuldashev N.K., Nabokov V.I., Nekrasov K.V.** Industrial and agricultural production in the makhallas of Uzbekistan. E3S Web of Conferences. International Scientific and Practical Conference "Priority Directions of Complex Socio-Economic Development of the Region" (PDSED 2023). EDP Science, 2023. P. 09005.

REFERENCES

1. **Volkov V.I., Nabokov V.I., Yuldashev N.K.** Providing qualified personnel for enterprises in the agricultural sector of the agro-industrial complex of the region. *Agrarnyi vestnik Urala.* 2020;(6):81–88. (In Russian).
2. **Voronin B.A., Voronina Ya.V., Kuznetsova A.R. et al.** Prospects for the development of agricultural production in the Urals. Yekaterinburg: *Ural'skii gosudarstvennyi agrarnyi universitet,* 2025:152. ISBN 978-5-87203-589-. (In Russian).
3. **Gazetdinov Sh.M., Kovalenko E.G., Yakimova O.Yu., Ziganshin B.G.** Development of coordination forms of organizing territorial-sectoral interactions in rural areas. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta.* 2023;1;(69):94–101. (In Russian). DOI: 10.12737/2073-0462-2023-94-101.
4. **Kirillov R.A., Chibirkina E.A., Komarov S.I.** Analysis of strategic land-use planning in the constituent entities of the Russian Federation at the present stage. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2024;17;3(82):240–251. (In Russian). DOI: 10.53914/issn2071-2243-2024-3-240-251.
5. **Lukyanova M.T., Zalilova Z.A.** Methodological approaches to comprehensive economic assessment of feed production efficiency in the region. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK.* 2023;37(1):51–56. (In Russian). DOI: 10.53859/02352451-2023-37-151.
6. **Nabokov V.I., Skvortsov E.A., Kukhar V.S.** Robotization of agricultural production and wages in the industry. *Ekonomika sel'skogo khozyaistva Rossii.* 2021;(9):47–52. (In Russian).
7. National Information Agency of Uzbekistan. Kosh-Tepa Canal: How the Taliban May Leave Central Asia Without Water. 2025. Available at: https://uza.uz/ru/posts/kanal-kosh-tepa-kak-taliby-mogut-ostavit-bez-vody-centralnuyu-aziyu_559536 (accessed: 15.10.2025). (In Russian).
8. **Soloviev I.V., Kushch S.P., Malikov T.R.** The influence of companies' orientation toward cooperation on the development of interorganizational innovations. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 6. Ekonomika.* 2025;60(1):107–128. (In Russian). DOI: 10.55959/MSU0130-0105-6-60-1-6.
9. Strategy Uzbekistan–2030. Tashkent: Finansovo-ekonomicheskaya konsalting gruppa, 2023. Available at: https://lex.uz/ru/docs/6600404#6605092 (accessed: 15.10.2025). (In Russian).
10. Decree of the President of the Republic of Uzbekistan No. PF-158 dated September 11, 2023, "On the Uzbekistan – 2030 Strategy." URL: https://lex.uz/ru/docs/6600404 (accessed: October 15, 2025). (In Russian).
11. **Djurabaev O.** Formation of model beekeeping facilities and modernized interindustrial communications in human bearing management. Arkhiv nauchnykh issledovanii. 2020;(11). (In Russian).
12. **Eskerkhanova L.T., Beloglazova L.B., Masyutina N.M., Romanishina T.S., Turishcheva T.B.** Increasing the competitiveness of future economists for work in industry 4.0. Perspectives of Science and Education. 2023;62(2):158–173. DOI: 10.32744/pse.2023.2.9.
13. **Glebova I., Berman S., Khafizova L., Biktimirova A., Alhasov Z.** Digital divide of regions: Possible growth points for their digital maturity. *International Journal of Sustainable Development and Planning.* 2023;18(5):1457–1465. DOI: 10.18280/ijsdp.180516.
14. **Nabokov V.I., Semin A.N., Pryadilina N.K., Gusev A.S., Nekrasov K.V.** The density of robotization of agriculture in Russia and its regions. WSEAS Transactions on Systems and Control. 2020;15:549–554. DOI: 10.37394/23203.2020.15.53.
15. **Yuldashev N.K., Nabokov V.I., Nekrasov K.V.** Industrial and agricultural production in the makhallas of Uzbekistan. E3S Web of Conferences. International Scientific and Practical Conference "Priority Directions of Complex Socio-Economic Development of the Region" (PDSED 2023). EDP Science, 2023. P. 09005.

Юлдашев Нуритдин Курбанович, д.э.н., профессорТашкентского института менеджмента и экономики,
100121, Респ. Узбекистан, г. Ташкент, Яккасарайский р-н, ул. Шота Руставели, д. 114.
100121, Rep. Uzbekistan, Tashkent, Yakkasaray district, st. Shota Rustaveli, 114
e-mail: Yuldoshev51@inbox.ru
ORCID ID: 0000-0003-4243-1215, Author ID:531937

Некрасов Константин Викторович, к.э.н., доцент кафедры мировой экономики и логистики ФГБОУ ВО Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС)
620034, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, д. 66,
620034, Sverdlovsk Region, Yekaterinburg, Kolmogorova Street, Building 66
e-mail:ekonn@bk.ru
ORCID ID: 0000-0002-7189-7922, Author ID: 648439

Набоков Владимир Иннокентьевич, д.э.н., профессор кафедры менеджмента и экономической теории Уральского государственного аграрного университета
620075, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Карла Либкнехта, д. 42,
620075, Yekaterinburg, Sverdlovsk Region, Karla Libknekhta St., 42
e-mail: nv1472@yandex.ru
ORCID ID: 0000-0001-8789-6062, Author ID:391586,

УДК 378.147
DOI: 10.52531/1682-1696-2026-26-3-127-137
Обзорная статья

EDN: XJTOYB

ИСТОРИЯ СТАНОВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ ШКОЛЫ «КОНФИГУРАТИВНАЯ ДИДАКТИКА ИНЖЕНЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ» КОНЦЕРНА ВКО «АЛМАЗ–АНТЕЙ»

С.Е. Ерошин[1], С.К. Савельев[2,3], А.Г. Сайбель[3, 2], Д.А. Фёдоров[3, 2], Д.К. Щеглов[3, 2, 1]

[1] АНО ДПО «НОЦ ВКО «Алмаз – Антей» им. акад. В.П. Ефремова (Москва, Россия)
[2] ФГОУ ВО БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (Санкт-Петербург, Россия)
[3] АО «НПО «Обуховский завод» (Санкт-Петербург, Россия)

Статья посвящена становлению и развитию научно-педагогической школы «Конфигуративная дидактика инженерного образования» Концерна ВКО «Алмаз – Антей» и разработанной в ее рамках технологии междисциплинарного проектного обучения на основе метода инженерных кейсов. Показана эволюция образовательной модели от концептуальных инженерных сценариев и формализованных задач к цифровому моделированию и комплексным инженерным проектам. Методологической основой подхода является представление обучающегося как конфигурируемой системы профессионального развития, а образовательного процесса – как аналога процесса управления конфигурацией сложных технических систем в соответствии с ГОСТ Р 59193-2020 «Управление конфигурацией. Основные положения». Рассматривается система непрерывной подготовки кадров, включающая профориентацию школьников, обучение студентов и повышение квалификации инженерно-технических работников. Обоснована роль конфигуративной дидактики как перспективного направления развития инженерной подготовки, обеспечивающего интеграцию науки, образования и промышленности.

Ключевые слова: *образовательные технологии, проектное обучение, инженерные кейсы, цифровые инженерные проекты, подготовка инженерных кадров, интеграция образования и промышленности*

© 2026, С.Е. Ерошин, С.К. Савельев, А.Г. Сайбель, Д.А. Фёдоров, Д.К. Щеглов
Поступила в редакцию 02.04.2026

Original article

HISTORY OF FORMATION AND DEVELOPMENT OF THE SCIENTIFIC AND PEDAGOGICAL SCHOOL «CONFIGURATIVE DIDACTICS OF ENGINEERING EDUCATION» OF THE ALMAZ–ANTEY VKO CONCERN

S.E. Eroshin[1], S.K. Savelyev[2,3], A.G. Saibel[3,2], D.A. Fyodorov[3,2], D.K. Shcheglov[3, 2, 1]

[1] ANO DPO «NOC VKO «Almaz – Antey» named after acad. V.P. Yefremov, (Moscow, Russia)
[2] FGOOU VO BSTU «VOENMEKH» named after D.F. Ustinov (Saint Petersburg, Russia)
[3] JSC Obukhov Plant (Saint Petersburg, Russia)

This article explores the development of the «Configurative Didactics of Engineering Education» scientific and pedagogical school at the Almaz – Antey VKO Concern and the interdisciplinary project-based learning technology developed within it, based on the engineering case method. The article explores the evolution of the educational model from conceptual engineering scenarios and formalized tasks to digital modeling and complex engineering projects. The methodological basis of this approach is to conceptualize the student as a configurable system of professional development, and the educational process as analogous to configuration management for complex technical systems in accordance with GOST R 59193-2020. It examines a continuous training system that includes career guidance for schoolchildren, undergraduate training, and advanced training for engineering and technical personnel. The role of configurative didactics as a promising area for the development of engineering training, facilitating the integration of science, education, and industry, is substantiated.

Key words: *educational technologies, project-based learning, engineering cases, digital engineering projects, training of engineering personnel, integration of education and industry*

ВВЕДЕНИЕ

В условиях проведения Российской Федерацией специальной военной операции (СВО) предприятия оборонно-промышленного комплекса (ОПК) функционируют в режиме предельной технологической и организационной мобилизации, обеспечивая обороноспособность страны [2]. Разработка, модернизация и серийное освоение производства вооружения и военной техники осуществляются в сверхсжатые сроки мультикомпетентностными (многопрофильными) командами, где инженер должен обладать не только глубокой профессиональной подготовкой, но и системным мышлением, навыками проектного управления, пониманием производственной кооперации, логистических цепочек и технологий полного жизненного цикла изделия [4, 17].

Одновременно предприятия ОПК оказались в условиях жестких санкционных ограничений на поставку материалов, комплектующих, оборудования и программного обеспечения [2]. Это потребовало ускоренного импортозамещения, пересмотра конструкторских решений, разработки новых технологий, логистических маршрутов и создания отечественных аналогов критически важных элементов. Промышленность, обеспечивающая потребности СВО, перешла к режиму опережающей разработки и оперативной модернизации техники, что сформировало качественно новые требования к кадровому обеспечению отрасли.

Предприятия ОПК сформировали запрос к системе образования на инженеров нового типа – специалистов, способных эффективно действовать в условиях технологической неопределенности, быстро принимать инженерные решения, работать в мультикомпетентностных (многопрофильных) проектных командах и включаться в решение производственных задач без длительного периода профессиональной адаптации [5, 9]. Возникла необходимость подготовки инженера, обладающего не только профессиональными знаниями, но и развитым инновационным мышлением, способностью к быстрому формированию наиболее рациональных проектных решений в изменяющейся технологической среде [7, 10].

Таким образом, перед системой технического образования встала стратегическая задача обеспечения кадровой устойчивости ОПК и достижения технологического суверенитета страны. Решение данной задачи требует системной трансформации образовательной модели – перехода от преимущественно дисциплинарной подготовки к интегрированной системе проектно-ориентированного обучения, синхронизированной с актуальными инженерными задачами промышленности.

Одним из ответов на данный вызов стало развитие технологии междисциплинарного проектного обучения на основе метода инженерных кейсов, реализуемой в рамках научно-педагогической школы «Конфигуративная дидактика инженерного образования» Концерна ВКО «Алмаз – Антей». Данная технология рассматривает образовательный процесс как последовательное развитие инженерного мышления обучающихся – от освоения концептуальных сценариев как начального уровня инженерного проектирования, через решение формализованных инженерных задач и использование инструментов цифрового моделирования, к выполнению комплексных цифровых инженерных проектов.

Предлагаемая образовательная технология обеспечивает непрерывность подготовки и повышения квалификации специалистов на различных этапах инженерного образования, включая профессиональную ориентацию школьников старших классов, подготовку студентов технических университетов, а также повышение квалификации и профессиональную переподготовку инженерно-технических работников предприятий ОПК. В результате формируется единое образовательное пространство, ориентированное на кадровые потребности ОПК и обеспечивающее преемственность инженерной подготовки.

Целью статьи является анализ становления и развития научно-педагогической школы «Конфигуративная дидактика инженерного образования», включая выявление ее научных, инженерных и педагогических оснований, рассмотрение концепции обучения, а также исследование этапов институционального и методологического развития школы и вклада ее представителей в формирование современной модели инженерного образования.

НАУЧНЫЕ, ИНЖЕНЕРНЫЕ И ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ ШКОЛЫ КАК ОСНОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ «КОНФИГУРАТИВНОЙ ДИДАКТИКИ ИНЖЕНЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ»

Развитие техники и технологий исторически сопровождается формированием научных школ, обеспечивающих преемственность знаний, методологических подходов и инженерных традиций [6]. Научная школа понимается как устойчивое профессиональное сообщество исследователей и педагогов, объединенных научной проблематикой, методологическими основаниями и системой подготовки кадров, обеспечивающее воспроизводство специалистов, способных развивать исходные научные идеи в новых условиях.

В отличие от временных исследовательских коллективов, научная школа характеризуется длительностью существования, наличием концептуального ядра и собственной исследовательской повестки. Существенным признаком школы является ее особая образовательная среда, в которой передаются не только знания, но и способы профессионального мышления, ценностные установки и нормы научной деятельности. Ключевым условием устойчивости школы выступает преемственность – подготовка учеников, способных

к самостоятельному развитию и распространению научных взглядов и традиций.

В научной литературе сохраняется дискуссия о том, определяется ли существование школы преимущественно личностью научного лидера или сообществом его последователей. Анализ практики развития научных и инженерных направлений показывает, что становление школы обусловлено взаимодействием обоих факторов. С одной стороны, формирование школы инициируется носителями научной идеи, задающими методологические ориентиры и исследовательскую программу. С другой – именно ученики, применяя и развивая эти подходы в новых институциональных и профессиональных направлениях, обеспечивают устойчивость и историческую динамику школы. В этом смысле научная школа может рассматриваться как развивающаяся система взаимодействия наставников и обучающихся, объединенных общими профессиональными интересами.

Особую разновидность представляют инженерные школы, становление которых непосредственно связано с практическими задачами промышленности и технологического развития государства. В отличие от академических научных школ, ориентированных преимущественно на производство нового знания, инженерные школы формируются для решения прикладных технических задач и характеризуются высокой степенью интеграции науки, образования и производства. Деятельность таких школ направлена одновременно на создание инженерных решений и подготовку специалистов, способных работать в условиях реального производственного цикла.

Инженерная школа возникает в тех случаях, когда образовательный процесс становится продолжением инженерной практики, а профессиональная деятельность – источником постановки научных и педагогических задач. Обучение при этом приобретает проектный характер, а передача опыта осуществляется через совместную работу над инженерными проектами, конструкторскими задачами и технологическими разработками.

Педагогическая школа формируется вокруг определенных образовательных концепций и дидактических моделей, задающих цели, содержание и организацию обучения. Их основной задачей является разработка эффективных образовательных технологий, обеспечивающих воспроизводство заданного типа профессионального мышления и деятельности. Для инженерного образования особое значение приобретают педагогические школы, способные соединять фундаментальную подготовку с практико-ориентированным обучением и развитием инженерного мышления.

Современное развитие высокотехнологичной промышленности, особенно ОПК, требует интеграции указанных типов школ, поскольку подготовка инженеров нового поколения оказывается недостаточно эффективной как в рамках исключительно академической науки, так и исключительно производственной среды [16]. В этих условиях возникает потребность в научно-педагогических школах, объединяющих исследовательскую деятельность, инженерную практику и образовательные технологии в единую систему подготовки кадров.

В данной логике сформировалась научно-педагогическая школа «Конфигуративная дидактика инженерного образования» Концерна ВКО «Алмаз – Антей». Ее становление связано с интеграцией инженерного опыта предприятий ОПК, научных исследований в области организации инженерной деятельности и разработки технологий междисциплинарного проектного обучения [14]. Школа ориентирована на формирование образовательной модели, обеспечивающей последовательное развитие способности обучающихся к созданию инженерных решений при разработке сложных технологических систем в условиях ускоряющегося научно-технического развития.

Тем самым научно-педагогическая школа выступает механизмом воспроизводства инженерной культуры и обеспечивает непрерывную подготовку кадров – от профессиональной ориентации школьников до повышения квалификации специалистов промышленности.

КОНЦЕПЦИЯ «КОНФИГУРАТИВНОЙ ДИДАКТИКИ ИНЖЕНЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ»: ОБУЧАЮЩИЙСЯ КАК КОНФИГУРИРУЕМАЯ СИСТЕМА

Современные задачи подготовки инженерных кадров для высокотехнологичных отраслей промышленности требуют переосмысления традиционных дидактических моделей, основанных преимущественно на передаче совокупности знаний и формировании отдельных профессиональных компетенций [9]. Практика инженерной деятельности показывает, что эффективность специалиста определяется не столько объемом усвоенной информации, сколько способностью интегрировать знания из различных областей, адаптировать их к изменяющимся условиям и конфигурировать инженерные решения при разработке сложных технических систем [14].

Методологической основой формирования научно-педагогической школы «Конфигуративная дидактика инженерного образования» стала аналогия с принципами управления конфигурацией, закрепленными в ГОСТ Р 59193–2020 «Управление конфигурацией. Основные положения». В инженерной практике управление конфигурацией рассматривается как системная деятельность по идентификации, описанию, контролю изменений и обеспечению согласованности элементов сложного изделия на протяжении его жизненного цикла. Ключевой задачей является сохранение целостности системы при ее непрерывном развитии и модернизации.

Перенос данной логики в образовательную область позволил сформулировать принципиально иной взгляд на процесс обучения: обучающийся рассматривается как развивающаяся конфигурируемая система, состояние которой определяется структурой знаний, навыков, способов деятельности, инженерного опыта и сформированного типа мышления. Образовательный процесс при этом выступает аналогом процессов управления конфигурацией, направленных на последовательное изменение и согласование элементов данной системы.

В рамках конфигуративной дидактики образовательный процесс рассматривается авторами как управляемое формирование совокупности профессиональных компетенций, приобретаемых обучающимся в ходе проектной деятельности. Каждая образовательная активность – учебная дисциплина, инженерный кейс, проектная задача или деловая игра –выполняет функцию дидактического воздействия, направленного на развитие профессионального мышления и расширение спектра применяемых инженерных решений.

С учетом изложенного образовательный процесс может быть сопоставлен с процессами управления конфигурацией технического изделия (рис. 1), что позволяет структурировать этапы формирования профессиональных компетенций:

– идентификация конфигурации – определение текущего уровня подготовки обучающихся и структуры освоенных знаний и навыков;

– фиксация базовой конфигурации – закрепление достигнутого уровня подготовки на определенном этапе обучения;

– управление изменениями – целенаправленное включение в образовательный процесс новых инженерных задач и проектных ситуаций, требующих пересмотра и развития способов решения;

– верификация и валидация – оценка способности обучающегося применять полученные знания и навыки на практике и при решении нестандартных инженерных задач;

РИС. 1.
Основные процессы конфигуративной дидактики

– прослеживаемость конфигурации – анализ индивидуальной образовательной траектории и формирование обоснованных решений по ее дальнейшему развитию.

Реализация данной концепции позволила разработать технологию междисциплинарного проектного обучения на основе метода инженерных кейсов, предусматривающую поэтапное усложнение образовательных задач. Процесс обучения при этом предусматривает последовательный переход от концептуальных инженерных сценариев, выступающих начальным этапом формирования инженерного мышления, к выполнению комплексных цифровых инженерных проектов, охватывающих основные стадии жизненного цикла создаваемых изделий.

В результате, образовательная среда последовательно приближается к условиям реальной инженерной деятельности, приобретая характеристики управляемой профессионально-ориентированной системы обучения.

Конфигуративная дидактика позволяет преодолеть противоречие между дисциплинарной структурой образовательных программ и междисциплинарным характером современной инженерной деятельности [15]. В данной модели отдельные учебные дисциплины рассматриваются не изолированно, а как взаимосвязанные элементы единой образовательной траектории, формируемой в процессе решения инженерных задач.

Особую значимость конфигуративная дидактика приобретает при подготовке кадров для ОПК, где инженерная деятельность характеризуется высокой сложностью разрабатываемых и модернизируемых систем и необходимостью устойчивого междисциплинарного взаимодействия. Предложенный подход обеспечивает согласование образовательных процессов с логикой современной инженерной разработки и способствует подготовке специалистов, способных включаться в проектную деятельность без длительного периода профессиональной адаптации.

ЭТАПЫ ФОРМИРОВАНИЯ НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ ШКОЛЫ

Становление научно-педагогической школы «Конфигуративная дидактика инженерного образования» Концерна ВКО «Алмаз – Антей» связано с поэтапным развитием проектно-ориентированных образовательных практик – от экспериментальных форм профессиональной ориентации школьников до формирования целостной системы междисциплинарной инженерной подготовки. Сформированная модель обучения охватывает все уровни подготовки специалистов: профессиональная ориентация, высшее инженерное образование, а также программы повышения квалификации и профессиональной переподготовки специалистов ОПК.

Развитие научно-педагогической школы носило поступательный характер и сопровождалось расширением круга ее участников, усложнением содержания инженерных кейсов и переходом от решения задач концептуального проектирования к реализации комплексных цифровых инженерных проектов (рис. 2).

Этап I (2016 г.) – возникновение методики: концептуальные инженерные сценарии.

Отправной точкой формирования школы стал 2016 г., когда молодые кандидаты технических наук Д.К. Щеглов и Д.А. Федоров по поручению Концерна ВКО «Алмаз – Антей» приняли участие в форуме профессиональной ориентации школьников «ПроеКТОриЯ» (ранее – «Будущие интеллектуальные лидеры России», г. Ярославль) по направлению «Космические технологии».

Перед специалистами промышленности была поставлена принципиально новая задача – помочь школьникам научно и технически обосновать собственные футуристические идеи. В рамках форума был разработан и реализован инженерный кейс «Добыча полезных ископаемых, освоение объектов ближнего и дальнего космоса» [1, 3].

Кейс был ориентирован на формирование начального уровня инженерного мышления. Участники разрабатывали концепцию национальной программы промышленного освоения астероидов с использованием планеты Марс в качестве транспортно-добывающей базы, рассматривая технические, правовые, инфраструктурные и социально-экономические аспекты космической деятельности.

Данный этап характеризовался формированием базовых компетенций: инженерного творчества, междисциплинарного мышления, постановки технических задач, эскизного проектирования и поиска решений.

Именно в этот период была заложена ключевая идея будущей школы – использование инженерного кейса как инструмента формирования мышления, а не только передачи знаний.

Этап II (2017 г.) – переход к формализованным инженерным задачам.

Следующий этап развития методики связан с реализацией в 2017 г. инженерного кейса «Синтез концептуального облика инфраструктуры и перспективных средств доставки для освоения ближнего космоса», также представленного на форуме «ПроеКТОриЯ».

В отличие от предыдущего опыта, кейс был ориентирован на решение конкретных инженерно-технических задач, объединенных единым проектным результатом. К работе присоединились кандидат технических наук С.Е. Ерошин (НОЦ ВКО «Алмаз – Антей» им. акад. В.П. Ефремова) и доктор технических наук, профессор кафедры «Ракето-

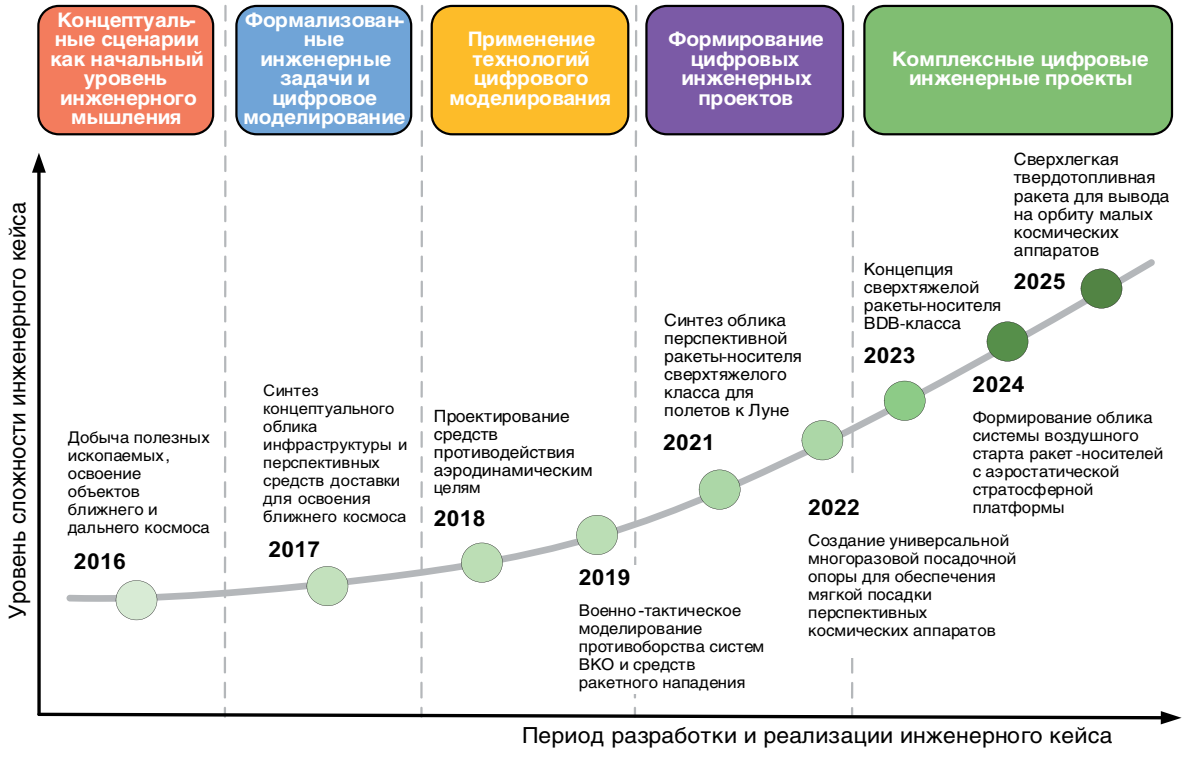


РИС. 2.
Эволюция тематики и формата инженерных кейсов авторов

строение» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова В.И. Погорелов.

Участники кейса изучали структуру ракет-носителей, создавали массогабаритные модели, применяли базовые уравнения теории полета, разрабатывали программные модули расчета траекторий [1].

Использование средств компьютерной математики позволило перейти от декларативных идей к количественно обоснованным инженерным решениям. Данный этап ознаменовал формирование принципа инженерной верификации образовательных результатов.

Этап III (2018–2019 гг.) – применение технологий цифрового моделирования.

В 2018 г. был разработан инженерный кейс «Проектирование средств противодействия аэродинамическим целям», направленный на моделирование задач оборонного назначения.

Кейс включал анализ конструкций беспилотных летательных аппаратов, построение математических моделей поражаемости, оптимизационные расчеты, применение суперкомпьютерных вычислений для многовариантного анализа. Впервые в образовательный процесс системно были внедрены технологии высокопроизводительных вычислений, что позволило приблизить обучение к современным цифровым инженерным практикам [11, 12].

В 2019 г. развитие подхода продолжилось созданием кейса «Военно-тактическое моделирование противоборства систем ВКО и средств ракетного нападения». Проект представлял собой формализованную игровую модель, основанную на цифровом моделировании стратегических сценариев. Обучающиеся решали задачи системного анализа, теории игр и принятия решений, моделирования сложных организационно-технических систем [1].

В этот период ранее разработанные кейсы были интегрированы в образовательную деятельность кафедры «Средства ВКО и ПВО» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова и программы НОЦ ВКО «Алмаз – Антей» им. акад. В.П. Ефремова, что стало первым шагом институционализации школы.

Этап IV (2021–2022 гг.) – формирование цифровых инженерных проектов.

Качественно новый этап начался в 2021 г. с участием коллектива в научно-технологической программе «Большие вызовы» Образовательного центра «Сириус» и в образовательном процессе БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова.

В 2021 г. был реализован кейс «Синтез облика перспективной ракеты-носителя сверхтяжелого класса для полетов к Луне». К коллективу присоединились кандидат технических наук, доцент кафедры «Ракетостроение» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова С.К. Савельев и руководитель клуба ракетомоделистов БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова А.Г. Шлядинский.

Проект включал численное моделирование траекторий, параметрическое проектирование, прочностной анализ методом конечных элементов, элементы топологической оптимизации, разработку 3D-модели и технической документации [1].

В 2022 г. был реализован кейс «Создание универсальной многоразовой посадочной опоры», связанный с разработкой элементов пилотируемого транспортного корабля «Орел». Впервые образовательный проект включал полный цикл инженерного обоснования – от цифрового моделирования до физической экспериментальной верификации [1].

С этого же периода доктор технических наук А.Г. Сайбель начал активное внедрение разработанных подходов в образовательную деятельность научно-образовательного центра НПО «Обуховский завод», включая работу со школьниками, целевыми студентами БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова и аспирантами, что обеспечило переход к модели непрерывной инженерной подготовки.

Этап V (2023–2025 гг.) – комплексные цифровые инженерные проекты.

Современный этап развития школы характеризуется переходом к комплексным цифровым инженерным проектам, максимально приближенным к реальной промышленной разработке.

В 2023 г. реализован кейс «Концепция сверхтяжелой ракеты-носителя BDB-класса», к которому присоединился ведущий инженер-конструктор НПО «Обуховский завод» Т.В. Сидоренко. Проект объединил техническое проектирование, экономические расчеты, анализ надежности и создание физического макета с экспериментальным стендом водного старта [1].

В 2024 г. реализован кейс «Формирование облика системы воздушного старта ракет-носителей с аэростатической стратосферной платформы», дополненный моделированием жизненного цикла изделия и экономическим анализом. Использование цифровых двойников позволило исследовать эксплуатационные сценарии и подтвердить реализуемость решений [13].

Логическим развитием подхода стал кейс 2025 г. «Сверхлегкая твердотопливная ракета для вывода на орбиту малых космических аппаратов», представляющий собой полноценный цифровой инженерный проект коммерческого уровня. В рамках проекта выполнялся полный цикл работ – от синтеза облика ракеты и внутрибаллистических расчетов до экспериментальных исследований топлива и технико-экономического анализа конкурентоспособности.

Эта эволюция отражает формирование конфигуративной дидактики инженерного образования как устойчивой методологической системы, интегрирующей образование, науку и промышленность и обеспечивающей подготовку инженерных кадров нового поколения для предприятий ОПК.

КЛЮЧЕВЫЕ ПРЕДСТАВИТЕЛИ НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ ШКОЛЫ

Становление и развитие научно-педагогической школы «Конфигуративная дидактика инженерного образования» Концерна ВКО «Алмаз – Антей» связано с деятельностью коллектива исследователей, инженеров и преподавателей, объединивших научно-методическую работу, инженерную практику и образовательную деятельность. Особенностью школы является распределенный характер научного лидерства, при котором развитие методологии обеспечивалось взаимодействием специалистов, представляющих одновременно промышленность, высшее образование и систему дополнительного профессионального обучения.

Коллектив школы сформировал целостную методологию междисциплинарного проектного обучения на основе метода инженерных кейсов, обеспечив ее научное обоснование, педагогическую адаптацию и практическое внедрение на различных уровнях подготовки инженерных кадров – от профессиональной ориентации школьников до повышения квалификации специалистов предприятий ОПК [15]. Ниже представлена информация об основных представителях научно-педагогической школы (рис. 3).

С.Е. Ерошин – научно-аналитическое обоснование метода инженерных кейсов

С.Е. Ерошин внес значительный вклад в научно-аналитическое и методологическое развитие школы, выполнив комплексные исследования требований предприятий ОПК, включая организации Концерна ВКО «Алмаз – Антей», к результатам подготовки инженерно-технических работников.

РИС. 3.

Ключевые представители научно-педагогической школы «Конфигуративная дидактика инженерного образования» Концерна ВКО «Алмаз – Антей»

На основе проведенного анализа им сформулирована система критериев, отражающая современный промышленный запрос к профессиональным компетенциям, практическим навыкам и личностным качествам молодых специалистов. Аналогичные исследования были проведены в сфере повышения квалификации и переподготовки инженерно-технических и научных кадров, что позволило определить направления совершенствования программ дополнительного профессионального образования.

С.Е. Ерошин разработал методику формирования промышленно-экономической составляющей инженерных кейсов, обеспечившую их соответствие реальным условиям деятельности предприятий ОПК. Включение экономических и производственных аспектов позволило расширить функциональные возможности кейсов и приблизить образовательные проекты к задачам полного жизненного цикла изделий.

С.Е. Ерошин – один из основных идеологов внедрения разработанной образовательной технологии в деятельность НОЦ ВКО «Алмаз – Антей» им. акад. В.П. Ефремова (г. Москва), осуществляющего переподготовку и повышение квалификации инженерно-технических работников предприятий Концерна.

С.К. Савельев – формирование концептуальных и методологических основ метода инженерных кейсов

С.К. Савельев является одним из ключевых авторов концептуальных положений и методологических решений метода инженерных кейсов, определивших стратегическое направление развития научно-педагогической школы. Им сформулирована проблематика совершенствования инженерного образования в технических вузах с учетом современных потребностей предприятий ОПК и обоснована необходимость перехода к проектно-ориентированной модели подготовки инженерных кадров.

При его непосредственном участии определены структура и логика реализации инженерных кейсов, обеспечившие научное единство и методическую целостность разработки.

Существенным вкладом С.К. Савельева стало формирование принципов проектной формы обучения, отражающих полный цикл инженерной деятельности – от постановки задачи до анализа производственно-экономических результатов. Предложенные решения позволили максимально приблизить образовательный процесс к условиям реальной инженерной практики предприятий ОПК.

Им осуществлялось научное и организационное руководство внедрением разработанных подходов в образовательный процесс БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, где была сформирована целостная

система проектно-ориентированного инженерного образования. Значимым направлением деятельности стала также апробация разработок в рамках научно-технологических образовательных программ «Большие вызовы» Образовательного центра «Сириус».

А.Г. Сайбель – педагогическая адаптация и непрерывная модель подготовки инженерных кадров

А.Г. Сайбель внес значительный вклад в разработку педагогических и методологических оснований применения метода инженерных кейсов, обеспечив его адаптацию к образовательной практике различных уровней подготовки инженерных кадров.

Совмещая работу в научно-образовательном центре НПО «Обуховский завод» с преподавательской деятельностью в БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, он обеспечил внедрение проектно-ориентированного подхода в систему подготовки студентов по программам бакалавриата, специалитета и магистратуры. Под его руководством проводилась апробация инженерных кейсов, а также формировалась учебно-методическая база комплексных учебных проектов, ориентированных на решение актуальных задач предприятий ОПК.

На основе опыта работы с целевыми студентами НПО «Обуховский завод», а также многолетней деятельности по организации инженерных кружков для школьников по направлениям «космическая техника» и «робототехника» им разработаны педагогические принципы и дидактические модели формирования инженерного мышления и профессиональной мотивации обучающихся.

Существенным результатом его деятельности стало развитие научно-образовательного центра НПО «Обуховский завод» как интеграционной площадки взаимодействия образования, науки и производства, обеспечивающей реализацию непрерывной модели подготовки инженерных кадров.

Д.А. Федоров – разработка содержательной и методической базы инженерных кейсов

Д.А. Федоров внес значительный вклад в научно-методическое и практическое обеспечение разработки и внедрения инженерных кейсов в образовательный процесс, охватывающий обучение школьников старших классов, студентов технических вузов и программы повышения квалификации инженерно-технических работников.

Им реализовывался полный цикл разработки инженерных кейсов – от анализа научно-технических источников и постановки инженерной задачи до формирования структурно-логических схем, подготовки методических материалов. Выполненная работа по созданию образовательных модулей и дидактического обеспечения способствовала усилению прикладной направленности проектных форм обучения.

В составе авторского коллектива он участвовал в разработке образовательных программ и учебных планов, ориентированных на междисциплинарную подготовку студентов и интеграцию теоретических знаний с практической инженерной деятельностью. Его работа включала методическое сопровождение внедрения инженерных кейсов в образовательный процесс и анализ эффективности проектного обучения.

Апробация разработанных им подходов осуществлялась, в том числе, в рамках программ «Большие вызовы» Образовательного центра «Сириус».

Д.К. Щеглов – организационно-педагогическое и институциональное развитие школы

Д.К. Щеглов внес существенный вклад в научно-методическое и организационное развитие научно-педагогической школы, обеспечив внедрение метода инженерных кейсов в образовательный процесс высших учебных заведений и организаций дополнительного профессионального образования.

Им сформированы организационно-педагогические основы проектной формы обучения, включающие механизмы формирования проектных команд, распределения функциональных ролей участников и использование цифровых инструментов инженерного моделирования. Разработаны системные подходы к внедрению проектного обучения в образовательные практики организаций различных типов – от технических университетов до учреждений дополнительного профессионального образования.

В период 2014–2024 гг., возглавляя базовую кафедру «Средства ВКО и ПВО» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, он обеспечил ее развитие как пилотной площадки внедрения инженерных кейсов. Под его руководством образовательный процесс был максимально приближен к реальным задачам предприятий Концерна ВКО «Алмаз – Антей».

В дальнейшем деятельность была направлена на масштабирование проектной формы обучения и ее интеграцию в программы подготовки инженерных кадров, а также на профессиональную ориентацию абитуриентов, включая участие в программах «Большие вызовы».

Важно отметить, что на этапах I-III формирования научно-педагогической школы заметный и важный вклад в формирование принципов и методологических подходов ее работы внесли заместитель генерального конструктора по перспективным проектам Концерна ВКО «Алмаз – Антей» кандидат технических наук А.П. Коновальчик и руководитель направления корпоративных кадровых процедур отдела корпоративной кадровой политики департамента кадровой политики Концерна ВКО «Алмаз – Антей» кандидат психологических наук Ю.А. Башкатова.

В результате совместной деятельности указанных представителей сформировалась научно-педагогическая школа, объединяющая методологию

инновационного мышления, педагогические технологии проектного обучения и практические задачи промышленности. Их вклад обеспечил переход от отдельных образовательных инициатив к целостной системе конфигуративной дидактики инженерного образования, реализуемой на всех уровнях подготовки высококвалифицированных кадров для ОПК.

В рамках научно-педагогической школы «Конфигуративная дидактика инженерного образования» более 300 работников предприятий Концерна ВКО «Алмаз – Антей» прошли программы повышения квалификации и переподготовку с получением дипломов и удостоверений государственного образца, в том числе в рамках программы «Выявление лидеров трудовых коллективов Концерна ВКО «Алмаз – Антей» [17]. Школьники, принимавшие участия в инженерных кейсах научно-педагогической школы в настоящее время поступили в ведущие вузы страны, такие как МФТИ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, МАИ и др. в том числе на базовые кафедры Концерна и его дочерних обществ. Некоторые из этих ребят уже работают в Концерне. Двое из воспитанников школы – Кирилл Васильев и Даниил Тимохин – будучи студентами, продолжают активную работу в качестве стажеров инженерных кейсов Концерна на научно-технологической программе «Большие вызовы» Образовательного центра «Сириус».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ становления и развития научно-педагогической школы «Конфигуративная дидактика инженерного образования» Концерна ВКО «Алмаз – Антей» позволяет рассматривать ее как результат синергии научных исследований, производственной практики и педагогических инноваций, направленных на решение стратегической задачи подготовки кадров для предприятий высокотехнологичных отраслей промышленности, прежде всего ОПК.

В условиях современных технологических вызовов и необходимости поддержания высокого кадрового потенциала предприятий ОПК страны авторами сформулирована образовательная парадигма, ориентированная на подготовку инженера, способного эффективно работать в междисциплинарной проектной среде при создании сложных эргатических систем. В отличие от традиционных моделей инженерного образования, преимущественно основанных на дисциплинарной организации образовательного процесса, предложенный подход опирается на проектную деятельность как ключевой механизм формирования инженерного мышления и профессиональных компетенций.

Методологическую основу школы составляет концепция конфигуративной дидактики, рассматривающая образовательный процесс как управляемое формирование профессиональных компетенций обучающегося в ходе проектного обучения. Данный процесс соотносится с принципами управления конфигурацией сложных технических систем, что позволяет совместить образовательные практики с логикой современной инженерной разработки и обеспечить преемственность подготовки специалистов на различных этапах их профессионального становления.

Разработанная в рамках школы технология междисциплинарного проектного обучения, основанная на применении метода инженерных кейсов, обеспечила переход от решения концептуальных инженерных задач к реализации комплексных инженерных проектов.

Существенным результатом деятельности школы стало формирование системы непрерывной подготовки кадров, включающей профессиональную ориентацию обучающихся старших классов, подготовку студентов технических вузов, а также повышение квалификации и профессиональную переподготовку инженерно-технических работников предприятий ОПК. При этом научно-педагогическая школа выступает элементом единой образовательной экосистемы, обеспечивающей воспроизводство инженерной культуры и развитие кадрового потенциала ОПК.

Вклад представителей школы заключается в научном обосновании, методологическом развитии и практическом внедрении разработанных образовательных решений в академической и промышленной образовательной среде. Реализация подхода на базе вузов, научно-образовательных центров и промышленных предприятий подтвердила его применимость и эффективность при подготовке инженерных кадров нового поколения.

Полученные результаты позволяют рассматривать конфигуративную дидактику инженерного образования как перспективное направление развития инженерной педагогики, ориентированное на интеграцию образования, науки и промышленности. Дальнейшее развитие школы связано с расширением практики цифровых инженерных проектов и развитием сетевого взаимодействия образовательных организаций и промышленных предприятий.

Таким образом, научно-педагогическая школа «Конфигуративная дидактика инженерного образования» представляет собой сформировавшуюся образовательную систему, вносящую значимый вклад в решение задачи подготовки высококвалифицированных инженерных кадров для ОПК России.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ерошин С.Е., Савельев С.К., Сайбель А.Г., Федоров Д.А., Щеглов Д.К.** Дидактические материалы инженерных кейсов: учебно-методическое пособие. АНО ДПО «НОЦ ВКО «Алмаз – Антей». Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025. 312 с.

2. **Ерошин С.Е., Савельев С.К., Сайбель А.Г., Федоров Д.А., Щеглов Д.К.** Проблемные вопросы и пути совершенствования подготовки инженерных кадров для промышленных предприятий // Радионавигация и время: труды СЗРЦ Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2025. №18(26). С. 106–116. EDN: ENSVWW.
3. **Ерошин С.Е., Щеглов 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.
4. **Зеер Э.Ф., Уткина С.Н.** Проективная дидактика: монография / Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2017. 131 с.
5. **Коломиец Т.С., Князева О.О.** Применение проектных технологий в вузах для формирования у студентов профессиональных навыков и компетенций // Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки. 2025. №6. С. 48–52. DOI: 10.24412/2220-2404-2025-6-39. EDN: MMUKTF.
6. **Подвязников М.Л., 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: WHAHPE.
7. **Попов А.И.** Механизм развития коммуникативных компетенций у преподавателей инженерных дисциплин // Социальная компетентность. 2023. Т. 8. №1. С. 88–100. EDN: IFGZNY.
8. Программа выявления лидеров трудовых коллективов Концерна ВКО «Алмаз – Антей» // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2017. №1(20). С. 4–47. EDN: ZRPRMX.
9. **Смирнов В.А.** Типология проектного обучения в университетских стратегиях // Университетское управление: практика и анализ. 2025. №29(2). С. 10–23. DOI: 10.15826/umpa.2025.02.011. EDN: MOZDMK.
10. **Смирнова А.А.** Модернизация инженерного образования в условиях цифровой трансформации и глобальных вызовов // Вестник педагогических наук. 2025. № 10. С. 158–165. EDN: XWYPBX.
11. **Щеглов Д.К., Федоров Д.А.** Опыт внедрения суперкомпьютерных технологий в образовательный процесс технического вуза // Инновации. 2018. №1(231). С. 72–78. EDN: YQKNNI.
12. **Щеглов Д.К., Федоров Д.А., Коновальчик А.П.** Решение прикладных организационно-технических задач методом инженерных кейсов: учебное пособие БГТУ «ВОЕНМЕХ». СПб., 2019. 63 с.
13. **Щеглов Д.К., Федоров Д.А., Савельев С.К., Сайбель А.Г., Ерошин С.Е.** Инженерный кейс как инструмент формирования инновационных концепций на примере проекта по созданию стратосферного ракетно-космического комплекса // Вестник Российской академии естественных наук. 2025. Т. 25. №3. С. 111–120. DOI: 10.52531/1682-1696-2025-25-3-111-120. EDN: SQGVJK.
14. **Щеглов 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 Российской академии естественных наук. 2025. Т. 25. №2. С. 198–209. DOI: 10.52531/1682-1696-2025-25-2-198-209. EDN: XXMQTK.
15. **Щеглов Д.К., Федоров Д.А., Сайбель А.Г., Савельев С.К., Ерошин С.Е.** Концепция проектного обучения на основе метода инженерных кейсов и ее практическая реализация // Современная высшая школа: инновационный аспект. 2025. Т. 17. №3. С. 83–91. EDN: HUNIWA.
16. **Щеглов Д.К., Федоров Д.А., Сайбель А.Г., Савельев С.К., Ерошин С.Е.** Проектное обучение на основе метода инженерных кейсов: история и перспективы развития // ВОЕНМЕХ. Вестник БГТУ. 2025. №4. С. 98–109. EDN: XQARNN.
17. **Юрченко М.А.** Дидактика проектного обучения в формировании гражданственности разных категорий обучающихся // Вестник ЮУрГУ. Серия: Образование. Педагогические науки. 2024. №4. С. 64–81. DOI: 10.14529/ped240406. EDN: AWNPRT.

REFERENCES

1. **Eroshin S.E., Savelyev S.K., Saibel A.G., Fedorov D.A., Shcheglov D.K.** Teaching materials for engineering cases: A teaching aid. ANO DPO «NOC VKO «Almaz – Antej». Moskva: Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Baumana, 2025:312. (In Russian).
2. **Eroshin S.E., Savelyev S.K., Saibel A.G., Fedorov D.A., Shcheglov D.K.** Problematic issues and ways to improve the training of engineering personnel for industrial enterprises. *Radionavigaciya i vremya: trudy SZRC Koncerna VKO «Almaz – Antej»*. 2025;18(26):106–116. EDN: ENSVWW. (In Russian).
3. **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).
4. **Zeer E.F., Utkina S.N.** Projective didactics: monograph. Ekaterinburg: Izd-vo Ros. gos. prof.-ped. un-ta. 2017:131. ISBN 978-5-8050-0630-3. (In Russian).

5. **Kolomiets T.S., Knyazeva O.O.** Application of project technologies in universities for the development of professional skills and competencies in students. *Gumanitarnye, social'no-ekonomicheskie i obshchestvennye nauki.* 2025;6:48–52. DOI: 10.24412/2220-2404-2025-6-39. EDN: MMUKTF. (In Russian).
6. **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).
7. **Popov A.I.** Mechanism for developing communicative competencies in engineering teachers. *Social'naya kompetentnost'.* 2023;8(1):88–100. EDN: IFGZNY. (In Russian).
8. Program for identifying leaders of work teams of the «Almaz – Antey» VKO Concern. *Vestnik Koncerna VKO «Almaz – Antej».* 2017;1(20):4–47. EDN: ZRPRMX. (In Russian).
9. **Smirnov V.A.** Typology of project-based learning in university strategies. *Universitetskoe upravlenie: praktika i analiz.* 2025;29(2):10-23. DOI: 10.15826/umpa.2025.02.011. EDN: MOZDMK. (In Russian).
10. **Smirnova A.A.** Modernization of engineering education in the context of digital transformation and global challenges. *Vestnik pedagogicheskih nauk.* 2025;10:158–165. EDN: XWYPBX. (In Russian).
11. **Shcheglov D.K., Fedorov D.A.** Experience of implementing supercomputer technologies in the educational process of a technical university. *Innovacii.* 2018;1(231):72–78. EDN: YQKNNI. (In Russian).
12. **Shcheglov D.K., Fedorov D.A., Konovalchik A.P.** Solving applied organizational and technical problems using the engineering case method. Saint Petersburg: BGTU «VOENMEKH». 2019:63. ISBN 978-5-907054-83-7. (In Russian).
13. **Shcheglov D.K., Fedorov D.A., Savelyev S.K., Saibel A.G., Eroshin S.E.** An engineering case as a tool for developing innovative concepts, using the example of a project to create a stratospheric rocket and space complex. *Vestnik Rossijskoj akademii estestvennyh nauk.* 2025;25(3):111–120. DOI: 10.52531/1682-1696-2025-25-3-111-120. EDN: SQGVJK. (In Russian).
14. **Shcheglov D.K., Fedorov D.A., Saibel A.G., Eroshin S.E., Savelyev S.K.** Analysis of the experience of implementing a project-based learning approach based on engineering case studies in the training of engineering personnel for defense industry enterprises in Moscow and St. Petersburg. *Vestnik Rossijskoj akademii estestvennyh nauk.* 2025;25(2):198–209. DOI: 10.52531/1682-1696-2025-25-2-198-209. EDN: XXMQTK. (In Russian).
15. **Shcheglov D.K., Fedorov D.A., Savelyev S.K., Saibel A.G., Eroshin S.E.** The concept of project-based learning based on the engineering case method and its practical implementation. *Sovremennaya vysshaya shkola: innovacionnyj aspekt.* 2025;17(3):83–91. EDN: HUNIWA. (In Russian).
16. **Shcheglov D.K., Fedorov D.A., Savelyev S.K., Saibel A.G., Eroshin S.E.** Project-Based Learning Based on the Engineering Case Study Method: History and Development Prospects. VOENMEKH. *Vestnik BGTU.* 2025;4:98–109. EDN: XQARNN. (In Russian).
17. **Yurchenko M.A.** Didactics of project-based learning in the context of civic consciousness of different categories of students. *Vestnik YUUrGU. Seriya: Obrazovanie. Pedagogicheskie nauki.* 2024;4:64–81. DOI: 10.14529/ped240406. EDN: AWNPRT. (In Russian).

Ерошин Сергей Евгеньевич,
д.э.н., к.т.н., зам. директора АНО ДПО «НОЦ ВКО «Алмаз – Антей» им. акад. В.П. Ефремова

121357, г. Москва, Верейская ул., 41, с. 2,
121357, Moscow, Vereiskaya st., 41, building 2,
тел.: +7 (495) 231-70-40, e-mail: info@nocvko.ru

Савельев Сергей Константинович,
к.т.н., доцент, доцент ФГОУ ВО БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, ведущий 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

Сайбель Алексей Геннадиевич,
д.т.н., доцент, профессор научно-образовательного центра АО «НПО «Обуховский завод», профессор ФГОУ ВО БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Фёдоров Дмитрий Александрович,
к.т.н., начальник лаборатории АО «НПО «Обуховский завод», доцент АНО ДПО «НОЦ ВКО «Алмаз – Антей» им. акад. В.П. Ефремова

Щеглов Дмитрий Константинович,
к.т.н., доцент, научный руководитель АО «НПО «Обуховский завод», доцент ФГОУ ВО БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, доцент АНО ДПО «НОЦ ВКО «Алмаз – Антей» им. акад. В.П. Ефремова

192012, г. Санкт-Петербург, пр-т Обуховской Обороны, д. 120,
192012, St. Petersburg, Obukhovskaya Oborony Ave., 120,
тел.: +7 (921) 448-59-58, e-mail: _dk@bk.ru

ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЛУЖБА – РАБОТА В СЛУЖЕНИИ

Алексей Игоревич Большаков
Управление делами аппарата Совета Федерации
к.э.н., чл.-корр. РАЕН

Современный мир, стремительно несущийся вперед под натиском технологического прогресса, ставит перед нами все новые вызовы. Одной из наиболее тревожных тенденций нашего времени является повсеместная атрофия духовных и нравственных начал. Эта деградация, усугубляемая беспрецедентной скоростью и искаженностью информационных потоков, представляет собой реальную угрозу для индивидуального и общественного благополучия.

Информация, подобно крови, циркулирующей в организме, несет в себе как жизненно важные питательные вещества, так и токсины.

Для человека, не обладающего «иммунитетом» и «антителами» к этому информационному потоку, последствия могут быть губительными. Что же представляет собой этот «иммунитет» в контексте духовности и нравственности? Это, прежде всего, способность критически мыслить, отличать правду от лжи, добро от зла, ценное от пустого. Это сформированные моральные ориентиры, основанные на глубоком понимании человеческих ценностей, эмпатии и ответственности.

Духовное развитие требует времени, усилий и погружения. В условиях постоянной информационной суеты, когда каждая свободная минута заполнена потреблением контента, у людей остается все меньше времени и желания для самопознания, чтения литературы и размышлений.

Мгновенное перемещение информации часто предполагает ее поверхностное восприятие. Мы потребляем заголовки, короткие видео, мемы, не углубляясь в суть, не анализируя контекст. Это приучает наш мозг к быстрой, но неглубокой обработке данных, что затрудняет формирование устойчивых нравственных убеждений.

Информация в современном мире часто подвергается намеренному искажению и манипуляциям. Фейковые новости, пропаганда, кликбейтные заголовки – все это создает искаженную картину реальности.

Человек, не имеющий критического мышления, легко становится жертвой этих манипуляций, принимая ложь за истину, а деструктивные идеи за норму, продвигая их дальше.

В погоне за сиюминутными удовольствиями, материальными благами и виртуальным признанием, многие теряют связь с более глубокими, вечными ценностями – любовью, добротой, честностью, самопожертвованием. Общество, ориентированное на потребление и индивидуализм, способствует этому размыванию.

Постоянный поток шокирующих новостей, сцен насилия, негатива может привести к эмоциональной перегрузке и, как следствие, к десенсибилизации. Люди перестают реагировать на страдания других, теряют способность к сопереживанию, что является потерей основ духовности и нравственности.

Все это направленно на дискредитацию России как единого многонационального государства, внедрение в сознание ее граждан негативного образа страны, разрушение системы традиционных для народов России ценностей, разрушение человека и гражданина. И главными мишенями становятся как раз основы публичной власти и люди, отстаивающие эти ценности – государственные служащие.

Несмотря на все вызовы, государственная служба сохраняет свою притягательность. Она является приоритетом для молодых специалистов, окончивших вузы, где каждый третий из них рассматривает для себя возможную карьеру чиновника.

В свете этого важно обеспечить у будущих специалистов государственной службы формирование духовно-нравственных основ и морально-этических принципов.

«Государственный человек более других сограждан должен быть одушевлен, движим и руководствован любовью к Отечеству», – говорил русский поэт эпохи Просвещения, государственный деятель Российской империи Гавриил Романович Державин.

Государственная служба – это не только профессия, это должно быть призвание. Люди, посвятившие себя служению обществу, занимают особое положение в социуме, являясь связующим звеном между гражданами и государством. От их решений, действий и, что не менее важно, морального облика напрямую зависит эффективность государственного управления, доверие к власти. Именно поэтому развитие этических качеств и формирование высоких духовно-нравственных стандартов у государственных служащих является задачей первостепенной важности. И этому во

многом служат богатые традиции нашего Отечества, историческая память.

В эпоху перемен и неопределенностей обращение к традициям – это не шаг в прошлое, а осознанное движение вперед.

Обращение к традициям – мощный инструмент структурирования современности, задающий точку отчета, формирующий эталон оценки современных феноменов и позволяющих ответить на фундаментальные вопросы: кто мы, какова историческая миссия России, ее предназначение и место в формирующемся новом контуре многополярного цивилизационного пространства.

Сегодня особенно актуальным становится осмысление понятия «служение». Возвращение к традициям в контексте государственной службы означает осмысление и возрождение идеи служения как ее первоначальной фундаментальной основы.

Исторически государственная служба всегда была связана с понятием долга, ответственности перед обществом и стремлением к общему благу. Это было не просто занятие, а призвание, требующее самоотверженности, честности и преданности делу.

В глубинах русской философской мысли, где вопросы о бытии и предназначении человека занимают центральное место, особое значение приобретает понятие «служение», как его осмыслил во второй половине XIX века великий русский философ, мыслитель Владимир Сергеевич Соловьев. В его монументальном труде «Оправдание добра» эта категория становится краеугольным камнем нравственной философии, предлагая глубокий ответ на вечный вопрос о смысле человеческого существования.

В. Соловьев утверждает, что истинный нравственный смысл жизни человека неразрывно связан со служением Добру. Это не просто абстрактное понятие, а активная, деятельная позиция, направленная на воплощение высших ценностей в мире. Однако такое служение, по его мнению, обретает подлинную ценность и достоинство только тогда, когда проходит через призму человеческого сознания и становится добровольным.

Именно в добровольности заключается ключевой аспект служения. Не принуждение, не слепое следование догмам, а осознанный выбор, продиктованный внутренним убеждением, делает акт служения по-настоящему человечным и достойным. Это означает, что человек не просто выполняет внешние предписания, но и внутренне принимает их, осмысливает, делает частью собственной жизни.

В. Соловьев отмечает, что личность, погруженная в самосознание или стремящаяся к материальным благам, часто оказывается в тупике. Самодостаточность, замкнутость на себе или погоня за преходящими удовольствиями не приносят окончательного удовлетворения. Человек ощущает внутреннюю пустоту, неполноту бытия.

В этом контексте философ предлагает единственно верный, по его мнению, выход: осознание себя не как изолированной особи, а как части собирательного целого. Именно в этом понимании кроется ключ к обретению истинного благополучия и положительного интереса к жизни. Служение общему благу, общей пользе становится не жертвой, а наоборот, путем к реализации своего подлинного «я».

Когда человек направляет свои силы и таланты на благо других, на развитие общества, на воплощение идеалов добра, он выходит за пределы своей эгоистической природы. Он обретает чувство причастности, значимости и глубокого удовлетворения, которое не может дать ни одно материальное приобретение или самолюбование. Служение становится мостом между индивидуальным и всеобщим, между личным счастьем и гармонией мира.

Таким образом, Владимир Соловьев в своем учении о служении предлагает не просто этическую норму, а глубокую онтологическую концепцию. Он призывает нас увидеть в служении не бремя, а высшее предназначение, путь к обретению подлинного смысла жизни, способности к созиданию и любви. Это служение, осознанное и добровольное, является оправданием самого существования человека, только через связь с добром может происходить становление и формирование человеческой личности.

В современном мире, пронизанном идеями индивидуализма и самовыражения, мы часто слышим утверждение «человек должен жить так, как хочет», которое стало почти аксиомой. Оно звучит привлекательно, обещая безграничную свободу, самореализацию и отказ от навязанных «извне» ограничений. Однако при ближайшем рассмотрении, эта, казалось бы, самоочевидная истина, оказывается не просто ложной, но губительной и деструктивной. Ведь истинная свобода – это не отсутствие ограничений, а способность осознанно выбирать свои «ограничения», свою ответственность, исходя из приобретенных духовно–нравственных норм. В этой системе координат ответственность оказывается не наказанием, а силой, которая дисциплинирует, сосредотачивает и вдохновляет человека. Ведь, тщательно следя за физическим здоровьем, соблюдая правила гигиены, чтобы избежать болезни и сохраняя бодрость тела, задумываемся ли мы о «гигиене духовно-нравственной?». О тех невидимых, но мощных силах, которые формируют наше «я», нашу свободу и бытие в нравственном

измерении? А ведь игнорирование этих сигналов ведет к разрушению самого себя как человека.

Духовно-нравственное сознание побуждает нас действовать не только в рамках прагматичного обмена услугами, продиктованного личным эгоизмом, страхом наказания или желанием награды, но из чувства долга, понимания своей ответственности перед другими – обществом и государством. Только такое сознание может сформировать в людях доверие, уважение, солидарность и другие базовые ценности, которые являются фундаментом любого здорового общества.

Большую и важную роль в формировании духовно-нравственного облика, гармоничной личности государственного служащего, его патриотизма и высокой гражданской зрелости играют ежегодно проводимые Советом Федерации и Русской православной церковью Рождественские чтения, а также многие мероприятия и акции, направленные на культурно-гуманитарную и патриотическую работу с населением, молодежью.

Этика и нравственность – две категории духовной культуры общества в целом. Это не просто набор правил, регулирующих поведение работников в современном мире, а глубоко укоренившаяся система ценностей и принципов, истоки которой уходят в глубокую древность.

Уже тысячи лет назад люди осознавали важность добросовестного труда, честность и ответственность для построения успешной карьеры и благополучия общества. Ярким свидетельством этого является древнеегипетский манускрипт «Наставления начальника города и визиря Птаххетепа», датируемый третьим тысячелетием до нашей эры.

Этот уникальный документ, написанный визирем Птаххетепом для своего сына, представляет собой не просто сборник житейских советов, а настоящий трактат о том, как быть достойным человеком и, что особенно важно, как успешно строить свою профессиональную карьеру. Визирь, занимавший одну из высших должностей в государстве, прекрасно понимал, что для эффективного управления и служения обществу необходимы не только знания и навыки, но и определенные моральные качества.

В своих «Наставлениях» он уделяет особое внимание следующим аспектам, которые сегодня можно смело отнести к основам профессиональной и моральной этики: добросовестность и ответственность, честность и справедливость, уважение к старшим и подчиненным, скромность и самообладание, стремление к знаниям и самосовершенствованию.

Хотя цивилизация шагнула далеко вперед, а профессиональная деятельность стала более сложной и разнообразной, но основные принципы, заложенные в «Наставлениях», остаются актуальными и в наше время.

Служение государству и обществу следует воспринимать прежде всего, как этическую норму и доминирующую ценность, что созвучно словам Президента России В.В. Путина: «Беречь Россию и служить народу. Это огромная честь, обязанность и священный долг. Служение Отечеству – это особое счастье и честь».

В этом предназначении и есть главный смысл деятельности государственного служащего – его служение.

МУХАМЕДУ НУРГАЛИЕВИЧУ КОКОЕВУ – 75 ЛЕТ

16 сентября 2026 г. исполнилось 75 лет доктору технических наук, профессору, действительному члену РАЕН, генеральному директору АО «Каббалкагропромстрой» Мухамеду Нургалиевичу Кокоеву.

В 1974 г. Мухамед Нургалиевич окончил инженерно-технический факультет Кабардино-Балкарского госуниверситета по специальности «Промышленное и гражданское строительство», получив квалификацию «инженер-строитель». В 1985 г. окончил учетно-экономический факультет КБГУ с квалификацией «экономист». М.Н. Кокоев прошел трудовой путь от инженера ПТО до генерального директора АО «Каббалкагропромстрой».

В 1996 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата экономических наук по теме «Совершенствование организации производства строительных материалов на базе энерго- и ресурсосберегающих технологий».

В 2005 г. защитил диссертацию в Московском государственном университете путей сообщения по теме «Разработка энерго- и ресурсосберегающих строительных изделий, зданий и сооружений», стал доктором технических наук по специальностям «Строительные конструкции, здания и сооружения» и «Строительные материалы и изделия».

М.Н. Кокоев – доктор технических наук, профессор, советник Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), а также действительный член трех общественных академий: Российской академии инвестиций и экономики строительства, Международной академии инвестиций и экономики строительства, Российской инженерной академии, генеральный директор АО «Каббалкагропромстрой», вице-президент АО «Центрсельстрой» России, вице-президент Союза сельских строителей России.

За высокие достижения в научной и производственной деятельности в области строительства М.Н. Кокоев удостоен званий: «Заслуженный строитель Российской Федерации», «Почетный строитель России», «Почетный строитель Росагропромстроя», «Почетный строитель АПК России», «Почетный строитель Юга и Северного Кавказа России», имеет правительственные награды. Участвовал в выставках ВДНХ по производству строительных материалов и изделий. Награжден Золотой медалью ВДНХ, орденом «За заслуги в строительстве» и Почетным знаком «Строительная Слава» Российского союза строителей», золотой медалью и знаком лауреата премии им. А.И. Гришманова в области науки, техники и организации производства промышленности строительных материалов, почетным знаком Союза журналистов России «За заслуги перед профессиональным сообществом». Мухамед Нургалиевич удостоен Президиумом РАЕН почетного звания и знака «Рыцарь науки и искусства», а также знака «За заслуги в развитии науки и экономики России».

В настоящее время руководит исследованиями по научным направлениям «Исследование местных строительных материалов, изделий и конструкций на их основе», «Разработка энерго- и ресурсосберегающих технологий, материалов, изделий, зданий и сооружений». Член двух диссертационных советов.

По результатам НИР и НМР опубликовал 385 работ, в т.ч. 18 книг-монографий, 9 книг серии «Созидатели», 260 научных статей (140 – в ВАКовских журналах), автор 6 патентов на изобретения и 7 учебно-методических работ.

Мухамед Нургалиевич принимал активное участие в более 100 съездов, конференций и семинаров различного уровня. М.Н. Кокоев является профессором кафедры строительного производства с 1992 г.

Президиум РАЕН, редколлегия журнала и коллеги поздравляют Мухамеда Нургалиевича с юбилеем, желают здоровья и творческих успехов.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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)

Велиев Эльчин Фикрет оглы — д.т.н., директор Института геологии Министерства науки и образования Азербайджанской Республики (Азербайджан)

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 геоэлектромагнитных 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)

Кервалишвили Паата Джамлетович — 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 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)

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 Бетал 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 ТССР (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.

ОТПРАВКА СТАТЬИ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ ОЗНАЧАЕТ СОГЛАСИЕ АВТОРА НА ОБРАБОТКУ ПЕРСОНАЛЬНЫХ ДАННЫХ И РАЗМЕЩЕНИЕ СТАТЬИ В ОТКРЫТЫХ ИНТЕРНЕТ-ИСТОЧНИКАХ

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 нефтегазопромысловая 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).