



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

ГЛАЗКО В.И. (РФ)

РОСТАНЕЦ В.Г. (РФ)

АЛЕКСЕЕВ А.С. (РФ)

БАШКИРЦЕВА Н.Ю. (РФ)

БОБРОВ А.В. (РФ)

ГУЛИЕВ И.С. (АЗЕРБАЙДЖАН)

ЖДАНОВ М.С. (США)

ЗАКИРОВ Э.С. (РФ)

КАПЛУНОВ Д.Р. (РФ)

КЕРВАЛИШВИЛИ П.Д. (Грузия)

МАНДРИК И.Э. (РФ)

МИХАЙЛОВ Н.Н. (РФ)

МЫМРИН В.А. (Бразилия)

ПЕТРОСЯН В.С. (РФ)

ПЕТРОВ В.А. (РФ)

СУЛЕЙМАНОВ Б.А. (АЗЕРБАЙДЖАН)

ЧЕНЬ ЦЗЯНЬПИН (Китай)

ЧЖАО ПЕНДА (Китай)

ШЕВЧЕНКО Ю.А. (РФ)

ШЕСТОПАЛОВ Ю.В. (РФ)

ШОГЕНОВ Б.А. (РФ)

ЯННАКОПУЛОС П. (Греция)

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

АРЕНС В.Ж. (РФ)

БУРАК П.И. (РФ)

ВОЛОВИК А.М. (РФ)

ГЕЙХМАН И.Л. (РФ)

ЗОЛОТАРЕВ В.А. (РФ)

МЕДУА А.И. (РФ)

НОВИКОВ В.С. (РФ)

ПАНИН А.Н. (РФ)

ПАНОВ Ю.П. (РФ)

СТЕПАШИН С.В. (РФ)

ХАЙРУЛЛИН М.Х. (РФ)

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

Руководитель редакции

ИВАНИЦКАЯ Л.В.

Ответственный секретарь

ПОРОТНИКОВА М.В.

Технический секретарь

ГОРЕАКИНА 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. © РАН 2024 г.

☎ +7 495 954-26-11

Тираж 500 экз. Отпечатано в издательстве «Маска» Москва, ул. Малая Юшунская, д. 1, корп. 1



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



СОДЕРЖАНИЕ

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

НЕГАТИВНОЕ ВЛИЯНИЕ
ГИСТЕРЕЗИСНЫХ ЯВЛЕНИЙ
НА ПРОЦЕСС РАЗРАБОТКИ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ
НЕФТИ И ГАЗА
**А.Х. ШАХВЕРДИЕВ,
С.В. АРЕФЬЕВ** 3

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ДЕКОНВОЛЮЦИИ
В ИНЖЕНЕРНОЙ
СЕЙСМОРАЗВЕДКЕ
**В.В. РОМАНОВ,
А.А. ИВАНОВ** 20

К ВОПРОСУ ПОДГОТОВКИ
ВОДЫ, ИСПОЛЬЗУЕМОЙ
ДЛЯ СИСТЕМЫ
ЗАВОДНЕНИЯ, ПРИ
УСЛОВИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ЭКОЛОГИЧЕСКОГО
МОНИТОРИНГА ПРОЦЕССА
**М.Ю. КИЛЬЯНОВ,
Л.В. ИГРЕВСКИЙ,
В.А. ЛАВРЕНЧУК,
А.В. МУРАДОВ,
В.И. ДЕМИРОВ** 25

АНАЛИЗ ПАТЕНТНОЙ
И НАУЧНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
В ОБЛАСТИ ГИДРОРАЗРЫВА
ПЛАСТА
**Л.Б. ХУЗИНА,
С.В. ЛЮБИМОВА,
И.Г. ФАТТАХОВ** 35

ТЕХНОЛОГИИ

ПРИМЕНЕНИЕ
ИМИТАЦИОННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ
ДЛЯ ОЦЕНКИ
ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ
НАДЕЖНОСТИ
МОРСКИХ ПРОМЫСЛОВЫХ
ТРУБОПРОВОДОВ
В АРКТИКЕ
**Ю.А. ХАРЧЕНКО,
А.Н. ЧЕХЛОВ** 39

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
ТЕХНОЛОГИИ
ВНУТРИПЛАСТОВОЙ
ГЕНЕРАЦИИ CO₂
С КОМПЕНСАЦИЕЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПОТЕРЬ КОНЦЕНТРАЦИИ
ХИМРЕАГЕНТОВ
**С.В. АРЕФЬЕВ,
А.Ю. БРУСЛОВ,
А.В. ДЕНИСОВ** 47

РАЗРАБОТКА И
ТЕСТИРОВАНИЕ НЕЧЕТКОГО
ЛОГИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА
ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
БЕЗОПАСНОГО
СУДОХОДСТВА
АРКТИЧЕСКОГО
ТРАНСПОРТА В ПЕЧОРСКОМ
МОРСКОМ РАЙОНЕ
**Н.А. ЕРЕМИН,
Р.З. ГУЛИЕВ** 57

ВИБРОДИАГНОСТИКА
ЗДАНИЙ НА ПРИМЕРЕ
УЧЕБНО-ЛЕКЦИОННОГО
КОМПЛЕКСА МГРИ
**В.В. РОМАНОВ,
А.А. ИВАНОВ** 61

МОДЕРНИЗАЦИЯ
СТРОИТЕЛЬНО-
МОНТАЖНОГО
ПИСТОЛЕТА ДЛЯ ДОБЫЧИ
ПРИРОДНОГО КАМНЯ
**В.Т. ФЕДОРОВ,
М.Н. КОКОЕВ** 67

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
КОНСТРУКЦИЙ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО
ПОДВИЖНОГО СОСТАВА
НА ОСНОВЕ УЧЕТА
ДЕФОРМИРОВАНИЯ
ТРАНСПОРТИРУЕМОГО
ГРУЗА
**А.В. ПУТЯТО,
А.О. ШИМАНОВСКИЙ,
М.Г. ГЕГЕДЕШ,
П.М. АФАНАСЬКОВ** 75

ПРАВО

ДЕПРИВАТИЗАЦИЯ,
НАЦИОНАЛИЗАЦИЯ
ИЛИ ТЕНДЕНЦИЯ
BACK IN THE USSR?
РОСТ ОБРАЩЕНИЙ
ИМУЩЕСТВА В ДОХОД
ГОСУДАРСТВА
И.Л. ТРУНОВ 84

Хроника 93

Published since 2001
4 issues per year**EDITORIAL BOARD**Editor-in-Chief –
A.H. SHAHVERDIEV (RF)Deputy Editor-in-Chief –
V.I. GLAZKO (RF)
V.G. ROSTANETS (RF)**A.S. ALEKSEEV (RF)**
N.YU. BASHKIRTSEVA (RF)
A.V. BOBROV (RF)
I.S. GULIEV (AZERBAIJAN)
M.S. ZHDANOV (USA)
E.S. ZAKIROV (RF)
D.R. KAPLUNOV (RF)
P.D. KERVALISHVILI (GEORGIA)
I.E. MANDRIK (RF)
N.N. MIKHAILOV (RF)
V.A. MYMRIN (BRAZIL)
V.S. PETROSYAN (RF)
V.L. PETROV (RF)
B.A. SULEYMANOV (AZERBAIJAN)
CHEN JIANPING (CHINA)
ZHAO PENGDA (CHINA)
YU.L. SHEVCHENKO (RF)
YU.V. SHESTOPALOV (RF)
B.A. SHOGENOV (RF)
P. YANNAKOPOULOS (GREECE)**EDITORIAL COUNCIL****V.ZH. ARENS (RF)**
P.I. BURAK (RF)
A.M. VOLOVIK (RF)
I.L. GEYKHMAN (RF)
V.A. ZOLOTAREV (RF)
A.I. MELUA (RF)
V.S. NOVIKOV (RF)
A.N. PANIN (RF)
YU.P. PANOV (RF)
S.V. STEPASHIN (RF)
M.KH. KHAIRULLIN (RF)**EDITORIAL BOARD**Editorial Head
L.V. IVANITSKAYAExecutive Secretary
M.V. POROTNIKOVATechnical Secretary
E.I. GORELKINAAll 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 2024

ISSN 1682–1696

➔ **Editorial Board Address**
29/16, Sivcev Vrazhek, 119002,
Moscow, Russia, tel.: +7 (495) 954-26-11**CONTENTS****EARTH SCIENCE**NEGATIVE IMPACT OF
HYSTERESIS PHENOMENA
ON THE OIL AND GAS FIELD
DEVELOPMENT PROCESS
**A.KH. SHAKHVERDIEV,
S.V. AREFIEV 3**EXPERIENCE OF USING
DECONVOLUTION IN
ENGINEERING SEISMIC
EXPLORATION
**V.V. ROMANOV,
A.A. IVANOV 20**ON THE ISSUE OF WATER
TREATMENT USED FOR
THE WATERFLOODING
SYSTEM, PROVIDED
THAT ENVIRONMENTAL
MONITORING
OF THE PROCESS
IS ENSURED
**M.YU. KILYANOV,
L.V. IGREVSKY,
V.A. LAVRENUK,
A.V. MURADOV,
V.I. DEMIROV 25**ANALYSIS OF PATENT
AND SCIENTIFIC LITERATURE
IN THE FIELD OF HYDRAULIC
FRACTURING
**L.B. KHUZINA,
S.V. LYUBIMOVA,
I.G. FATTAKHOV 35****TECHNOLOGY**SIMULATION MODELING
APPLICATION FOR
OPERATIONAL RELIABILITY
ESTIMATION OF THE SUBSEA
PIPELINES IN THE ARCTIC
**YU.A. KHARCHENKO,
A.N. CHEKHLOV 39**IMPROVEMENT
OF IN-SITU CO₂ GENERATION
TECHNOLOGY WITH
COMPENSATION
OF CHEMICALS
CONCENTRATION
TECHNOLOGICAL LOSSES
**S.V. AREFIEV,
A.YU. BRUSLOV,
A.V. DENISOV 47**DEVELOPMENT AND
TESTING OF A FUZZY LOGIC
ALGORITHM TO ENSURE
SAFE ARCTIC TRANSPORT
IN THE PECHORA SEA
REGION
**N.A. EREMIN,
R.Z. GULIEV 57**VIBRATION DIAGNOSTICS
BASED ON THE EXAMPLE
OF THE MGRI TRAINING
AND LECTURE COMPLEX
**V.V. ROMANOV,
A.A. IVANOV 61**MODERNIZATION OF
CONSTRUCTION-
INSTALLATION OF A PISTOL
FOR MINING NATURAL STONE
**V.T. FEDOROV,
M.N. KOKOEV 67**IMPROVMENT OF THE
RAILWAY ROLLING
STOCK DESIGN ON THE
BASE OF TRANSPORTED
CARGO DEFORMATION
CONSIDERATION
**A.V. PUTSIATA,
A.O. SHIMANOVSKY,
M.G. GEGEDESH,
P.M. AFANASKOU 75****LAW**DEPRIVATION,
NATIONALIZATION,
OR THE TREND
OF BACK IN THE USSR?
THE GROWTH OF PROPERTY
TRANSFERS TO THE STATE
INCOME
I.L. TRUNOV 84**CURRENT
EVENTS 93**

УДК 622.276,4/553.982

DOI: 10.52531/1682-1696-2024-24-4-3-19

Научная статья

НЕГАТИВНОЕ ВЛИЯНИЕ ГИСТЕРЕЗИСНЫХ ЯВЛЕНИЙ НА ПРОЦЕСС РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ И ГАЗА

А.Х. ШАХВЕРДИЕВ¹,
С.В. АРЕФЬЕВ²

¹РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ (МГРИ),
МОСКВА, РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ
²ПАО «ЛУКОЙЛ», МОСКВА,
РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

Известно, что необратимости гистерезисной природы глобального или локального масштаба приводят к необходимости пересмотра методов решения основных задач гидродинамического моделирования и анализа динамических систем, поскольку могут радикальным образом повлиять на традиционные выводы и практические рекомендации.

Предполагается, что при установившемся режиме движения или фильтрации фазовые перемещения совершают всевозможные колебания в окрестности неустойчивого положения, обусловленного в первую очередь необратимыми гистерезисными явлениями и скачками, возникающими за счет неустойчивости фронта вытеснения нефти водой, проявления капиллярных эффектов, гистерезиса фазовых переходов, необратимости деформаций при чрезмерной нагрузке при больших перепадах давления, в том числе при гидроразрыве пласта.

С этой целью в теории катастроф исследуются динамические модели роста и подбираются управляющие параметры с расчетом прогнозировать ожидаемые локальные необратимости и неустойчивости до наступления момента бифуркации. Гистерезисное поведение в процессе фильтрации порождается литологическими разностями геофлюидодинамической среды, ее геолого-физическими характеристиками и свойствами насыщающих флюидов. И, как правило, провоцируется не всегда адекватной, чрезмерной внешней нагрузкой на испытываемую среду. Предложенные решения являются составной частью новой концепции нестационарного заводнения, предусматривающего ранний прогноз и принятие мер при проявлении неустойчивости фронта вытеснения и, как следствие, прорыва воды в добывающие скважины.

Большой интерес представляет предотвращение последствий этих негативных воздействий на количественные составляющие технологических и экономических показателей,

Original article

NEGATIVE IMPACT OF HYSTERESIS PHENOMENA ON THE OIL AND GAS FIELD DEVELOPMENT PROCESS

А.Х. ШАХВЕРДИЕВ¹, С.В. АРЕФЬЕВ²
¹RUSSIAN STATE GEOLOGICAL EXPLORATION
UNIVERSITY NAMED AFTER
S. ORDZHONIKIDZE (MGRI), MOSCOW,
RUSSIAN FEDERATION
²PJSC LUKOIL, MOSCOW, RUSSIAN
FEDERATION

It is known that irreversibilities of hysteresis nature of global or local scale, lead to the necessity to revise the methods of solving the main problems of hydrodynamic modelling and analysis of dynamic systems, as they can radically affect the traditional conclusions and practical recommendations.

It is assumed that in the steady-state mode of motion or filtration, phase displacements make all sorts of oscillations in the vicinity of the unstable position, due primarily to irreversible hysteresis phenomena and jumps arising from the instability of the front of oil displacement by water, the manifestation of capillary effects, hysteresis of phase transitions, irreversibility of deformations under excessive load at large pressure drops, including hydraulic fracturing.

With this purpose in the theory of catastrophes the dynamic models of growth are investigated and control parameters are selected with the calculation and the possibility to predict the expected local irreversibilities and instabilities before the onset of bifurcation.

Hysteresis behaviour in the filtration process is generated by lithological differences of geofluidodynamic medium and its geological and physical characteristics and properties of saturating fluids. And as a rule, it is provoked by not always adequate, excessive external load on the tested medium. The proposed solutions are part of a new concept of unsteady waterflooding, which provides for early prediction and taking measures in case of instability of the displacement front and, as a consequence, water breakthrough into production wells.

It is of great interest to prevent the consequences of these negative effects on the quantitative components of technological and economic indicators, in the case of oil field development we are talking about the final recovery factor of oil, gas and condensate.

в случае разработки нефтяных месторождений речь идет о конечном коэффициенте извлечения нефти, газа и конденсата.

Системная оптимизация разработки нефтяных месторождений рассчитана на определенный технологический и экономический эффект, в том числе на дополнительную добычу нефти, эффективную мобилизацию и экономию закачиваемой и отбираемой воды и газа.

Ключевые слова: потеря нефтеотдачи, прорыв воды и газа, динамические системы, гистерезисные явления, неустойчивость, упругопластические деформации, фазовый переход

System optimisation of oil field development is designed for a certain technological and economic effect, including additional oil production, effective mobilisation and saving of injected and withdrawn water and gas.

KEY WORDS: oil recovery loss, water and gas breakthrough, dynamic systems, hysteresis phenomena, instability, elastic-plastic deformations, phase transition

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность и важность представленной проблемы обусловлена тем, что внесение новых смыслов в "хорошо отлаженную" традиционную парадигму не всегда приветствуется и воспринимается однозначно. Зачастую нерешенные, точнее не корректно решенные проблемы с серьезными негативными последствиями, активно используемыми в повседневной научной, проектной и производственной деятельности в отрасли, "остаются за кадром".

Обсуждаемый интеллектуальный посыл связан с именами лауреатов Нобелевской премии, физико-химиков Ларса Онсагера и Ильи Пригожина, которые сыграли принципиально важную роль в фундаментальном развитии термодинамики необратимых процессов. Согласно И.Р. Пригожину, минимум производства энтропии справедлив только для линейной области необратимых явлений и процессов, к которой применимы известные соотношения Онсагера [35–37]. Следовательно, все эмпирически полученные законы, в том числе, закон Фурье, согласно которому величина потока тепла пропорциональна градиенту температуры, закон Фика, согласно которому скорость диффузии пропорциональна градиенту концентрации или закон Дарси, согласно которому скорость фильтрации потока жидкости пропорциональна градиенту давления, и ряд других законов и закономерностей справедливы для процессов, отклонение которых от равновесия незначительно, настолько незначительно, что феноменологические коэффициенты уравнений Онсагера принимаются постоянными величинами.

Но производство энтропии вдали от точки равновесия, инициированное флуктуациями, ведет к бифуркации и необратимости, которые становятся причиной как позитивных, так и негативных воздействий на динамические и термодинамические процессы. Основоположник термодинамики необратимых процессов И. Пригожин в послании будущим поколениям отмечает, что "Всякая бифуркация влечет за собой и позитивные сдвиги, и определенные жертвы" [37]. Ка-

чественная сторона проблемы, очевидно, сложность в количественной оценке «позитивных сдвигов и определенных жертв» на примерах конкретных процессов и природных явлений.

Интерес представляют те аспекты бифуркаций и необратимостей, которые негативно влияют на процессы, происходящие в пластовых условиях. Именно в точках бифуркации, в зоне неустойчивости, ожидаются необратимые новые пространственно-временные структуры процесса. Эти структуры, формируемые вдали от состояния равновесия или устойчивости, приводят благодаря неустойчивости и необратимости к новому типу динамических состояний процесса, названных И. Пригожиным «диссипативными структурами» [35, 37].

Следовательно, в силу необратимости и неравновесности процессов, происходящих в термобарических условиях нефтегазовой залежи, применение уравнений, основанных на принципах равновесия и обратимости, не могут быть признаны удовлетворительными, хотя широко используются при композиционном гидродинамическом моделировании нефтегазовых объектов разработки [1, 2, 5, 32, 34].

Известно, что необратимости гистерезисной природы глобального или локального масштаба, приводят к необходимости пересмотра методов решения основных задач гидродинамического моделирования и анализа динамических систем, поскольку могут радикальным образом повлиять на традиционные выводы и практические рекомендации.

Предполагается, что при установившемся и неустановившемся режиме движения или фильтрации фазовые перемещения совершают всевозможные колебания или флуктуации в окрестности неустойчивого положения, обусловленного в первую очередь необратимыми гистерезисными явлениями и скачками [1, 2, 5, 8, 32, 34–37]. Детерминированный подход к решению проблем неустойчивости не приводит к удовлетворительным результатам. Согласно проведенным исследованиям, модели роста в теории катастроф направлены на решения подобных задач, содержащих

сингулярности и бифуркации в зоне неустойчивости. Удачный подбор управляющего параметра мог бы решить возникшую проблему. При этом управляющие параметры процесса должны подбираться таким образом, чтобы иметь возможность прогнозировать локальные неустойчивости до наступления момента ожидаемой бифуркации.

Очевидно, что гистерезисное поведение в процессе фильтрации порождается литологическими разностями геофлюидодинамической среды и ее геолого-физическими характеристиками и свойствами насыщающих флюидов. И как правило, провоцируется не всегда адекватной, чрезмерной внешней нагрузкой на испытываемую среду. Опыт показывает, что гистерезисные явления крайне чувствительны к изменениям переменных и параметров процесса, и причин для подобного поведения более чем достаточно. Но большой интерес представляют последствия этих воздействий на количественные составляющие технологических процессов и, как следствие, на экономические показатели. В случае разработки нефтяных месторождений речь идет о негативном влиянии неустойчивости и бифуркаций на конечный коэффициент извлечения нефти, газа и конденсата.

Зачастую задается риторический вопрос: «Почему средний коэффициент нефтеотдачи по нефтяным месторождениям Российской Федерации имеет недопустимо низкое значение»? По умеренным оценкам экспертов разного уровня, в том числе, официальных контролирующих государственных органов, коэффициент извлечения нефти не превышает 30%, а по более оптимистичным оценкам 40%, т.е. в недрах в среднем остается от 60% до 70% нефти. Причинно-следственная связь потерь является предметом фундаментальных научных изысканий, лабораторных исследований, опытно-промышленных технологий. Многие нерешенные или не корректно решенные технологические задачи проблему повышения нефтеотдачи оставляют "за кадром".

К примеру, коллектор, состоящий из пород, проявляющих упругие, упругопластические или полностью пластические деформации, в процессе "нагрузки-разгрузки" образует петлю гистерезиса, и размер ее зависит от величины приложенной нагрузки, что подтверждается многочисленными полевыми и лабораторными экспериментами [1].

Различные модификации гидроразрыва пласта (ГРП) сопровождаются довольно значительным воздействием на породы коллектора в процессе "нагрузки-разгрузки", нацеленной на обширную зону нефтяной залежи и призабойной зоны, из-за которой, в свою очередь, испытывают существенные изменения ФЭС. При этом модель процесса ГРП рассчитывается из предположения упругости породы коллектора, что ограничивается оценкой модуля Юнга и коэф-

фициента Пуассона. Игнорируются коэффициенты частично необратимого или полностью необратимого изменения проницаемости и пористости от давления, что может отразиться на эффективности ГРП.

Процесс насыщения пористой среды влияет на распределение флюидов и, несомненно, формирует гистерезис капиллярной пропитки, что также влияет на образование петли гистерезиса в поведении относительной проницаемости при дренировании и впитывании или пропитке смачивающей фазы. Гистерезис капиллярной пропитки и относительной фазовой проницаемости особое значение приобретает при моделировании процесса, связанного с изменением направления фильтрации, точнее вытеснении, в процессе реализации технологий повышения нефтеотдачи пластов и интенсификации добычи нефти (ПНП и ИДН). На важность учета гистерезиса капиллярной пропитки и относительной проницаемости в физической модели и при численных расчетных моделях особое внимание обращено в работах [1, 2, 5, 32, 34].

Очевидно, что борьба двух фаз создает дополнительное сопротивление, благодаря которому относительные фазовые проницаемости не тождественны собственным насыщенностям, поскольку в роли барьера, в первую очередь, выступает капиллярное давление, формирующее петлю гистерезиса.

Фильтрация газированной жидкости при давлении выше и ниже давления насыщения нефти газом в недеформируемой и упругопластической деформируемой среде рассмотрена в работе [8].

Режим фильтрации ниже давления насыщения нефти газом также в условиях пласта формирует двухфазный поток и тем самым создает условие для образования гистерезиса капиллярного давления и относительной фазовой проницаемости. Рассмотрим ряд примеров, часто встречаемых в процессах нефтегазодобычи, особенно при моделировании и проектировании объектов разработки.

ПОСЛЕДСТВИЯ НЕОБРАТИМОСТИ ПРИ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ФРОНТА ВЫТЕСНЕНИЯ

Безусловно, наряду с большими достижениями, превратившими процесс заводнения в основную технологию во всем мире, имеют место и нерешенные проблемы, приводящие к преждевременному прорыву воды к добывающим скважинам при разработке и эксплуатации месторождений жидких и газообразных углеводородов [1, 2, 5, 32, 34].

Как известно с момента появления теории двухфазной фильтрации, предложенной Бакли-Левреттом, специалисты столкнулись с проблемой, связанной с многозначностью водонасыщения в одной и той же точке пространства и скачкообразным ее изменением. Комментарии и дополнения к этой проблеме ряда ученых и специалистов, вкратце сводятся к следующим

решениям [8, 10–17, 19, 22, 24, 31, 38, 41, 42, 43]:

$$f(S_B) = \frac{1}{1 + \frac{\mu_B \cdot k_H}{\mu_H \cdot k_B}}; \left(\frac{\partial L}{\partial t}\right)_{S_B} = \frac{q}{Am} \left(\frac{\partial f_B}{\partial S_B}\right)_t; \quad (1)$$

$$L = \frac{q \cdot t}{Am} \left(\frac{\partial f_B}{\partial S_B}\right).$$

где $f(S_B)$ – функция Бакли-Левретта, показывающая долю воды в потоке при двухфазной фильтрации; k_H, k_B – фазовая проницаемость нефти и воды; μ_H, μ_B – вязкость нефти и воды; S_B – водонасыщенность; A – площадь поперечного сечения; q – скорость закачки воды; m – пористость; L – направление фильтрации; t – время.

На рис. 2 представлено распределение водонасыщенности вдоль направления движения фронта вытеснения для различных моментов времени, полученное с помощью зависимости (1). Как видно из рис. 2, с определенного момента времени возникает скачкообразная многозначность водонасыщенности, и начальное поле насыщенности $S_0(x, 0)$ при $t=0$ и получившиеся из него $t>0$ последующее поле насыщенностей $S_1; S_2; S_3$ представляют зону неустойчивости.

Наиболее простая трансформация энергии, заключающаяся в слиянии и исчезновении минимума и максимума под действием скачка насыщенности, образует одну из элементарных катастроф (рис. 1), где область, обозначенная красной штрихованной линией и представляет зону неустойчивости фронта вытеснения нефти водой. Академик В.И. Арнольд отмечает следующее: «Если устойчивое положение равновесия описывает установившийся режим в какой-либо реальной системе, то при его слиянии с неустойчивым положением равновесия система должна совершить скачок, перескочив на совершенно другой режим: при изменении параметра равновесное состояние в рассматриваемой окрестности исчезает. Скачки этого рода и привели к термину «теория катастроф» [2].

Попытки формально аппроксимировать скачок водонасыщенности с введением дифференцируемых функций разрыва значило игнорирование физического механизма процесса заводнения и неверное решение проблемы, что было подмечено многими учеными и специалистами [1, 2, 5, 8, 10–17, 19, 22, 24, 31, 32, 34, 35, 36, 37, 38, 41–43]. Как и следовало ожидать, инженерные представления, упрощающие физический механизм процесса, и, как следствие, математическая формализация параметров процесса заводнения в условиях неустойчивости фронта вытеснения привели к известным традиционным теоретическим решениям. Подробности и сложности решений изложены в исследованиях известных ученых и специалистов, упомянутых в перечне литературы, приведенных в работах [10–17, 19, 22, 24, 31, 38, 41, 42, 43].

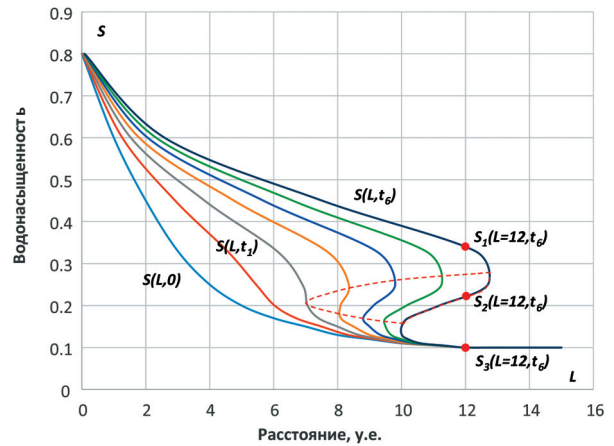


РИС. 1.

Зона неустойчивости, образованная скачком и тройственностью водонасыщенности

Неадекватность математической и физической моделей процесса заводнения на практике стала причиной негативных наблюдений, представленных специалистами в открытой печати как «вязкостная неустойчивость фронта вытеснения», «пальцеобразный фронт вытеснения», «капиллярные пальцы», «кинжальное обводнение скважин», «преждевременный прорыв воды в добывающих скважинах», «фрактальная геометрия движения фронта вытеснения» и прочая идентификация, свидетельствующая о несовершенстве процесса заводнения. Прогноз с целью предотвращения последствий этих катастрофических преждевременных прорывов воды из-за скачков и многозначности водонасыщенности стал трудно решаемой гидродинамической задачей.

Попытки решить проблему заводнения, игнорируя неустойчивость фронта вытеснения нефти водой, у многих известных специалистов формировали, если не единое, то очень близкое по содержанию критическое мнение о модели Бакли-Левретта, доходщее до того, что результаты называли «абсурдными», отсутствие исчерпывающего решения проблемы считали «интеллектуальным тупиком» [1, 5, 32, 34, 36].

Вопросы: «когда ожидать?», «где произойдет?», «как предотвратить?» последствия прорыва воды или газа к нефтедобывающим скважинам при заводнении – остаются открытыми. Безусловно, прогноз преждевременного прорыва воды к добывающим скважинам вызывает огромный интерес у ученых, специалистов во всех нефтегазодобывающих странах.

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ НОВОЙ ПАРАДИГМЫ

В век «цифровизации» с применением нового инструмента – геолого-гидродинамического моделирования пластовых систем – за последние сорок лет открыли новые возможности в управлении процессом

разработки и эксплуатации месторождений жидких и газообразных углеводородов. Большие надежды возлагались на численные методы и детерминированное математическое моделирование при решении задач многомерной и многофазной фильтрации.

Безусловно, геолого-гидродинамические многомерные модели многофазной фильтрации успешно решают основные долгосрочные и среднесрочные задачи разработки месторождений жидких и газообразных углеводородов, в том числе процесса нестационарного заводнения. При этом очень важные оперативные краткосрочные задачи не всегда удается решить с помощью детерминированных моделей, основное назначение которых – это расчет вариантов проекта рациональной разработки залежей для целей составления проектной технической документации, прогноз технологических показателей, оценка технологической успешности и экономической эффективности принятых проектных решений и их чувствительности за весь период разработки. Однако решение проблемы неустойчивости фронта вытеснения остается "за кадром", поскольку процесс формируется в сложных пластовых условиях при взаимодействии гидродинамических, капиллярных, молекулярных, инерционных и гравитационных и прочих сил.

В фундаментальной книге по математическому моделированию пластовых систем, авторы [6], довольно подробно освещая теорию фильтрации Бакли-Левретта, предпочитают решать возникшую известную проблему неустойчивости фронта вытеснения нефти водой более простыми математическими аппроксимациями, что не соответствует физическому механизму происходящего.

Методы численного решения позволяют добиться результатов, близких к решению Бакли-Левретта, если при аппроксимации игнорировать неустойчивость фронта вытеснения нефти водой. По этому поводу авторы [5] отмечают: «Хотя оба вида аппроксимации (проводимости), как будет показано ниже, аппроксимации второго порядка, они приводят к ошибочным

результатам. Это проиллюстрировано на рис. 3 для численного решения задачи Бакли-Левретта. При незначительных P_c (капиллярное давление) в уравнениях SS-метода получаем почти гиперболическую задачу с верным решением, очень близким к решению Бакли-Левретта (сплошная линия на рис. 3). Однако при измельчении сетки численные результаты, полученные по схеме со «взвешиванием», отличаются от реальных. Это происходит вследствие «гиперболической природы» уравнения. В чисто гиперболическом случае ($P_c=0$) дифференциальная задача поставлена некорректно и не имеет единственного решения. Решение со «средневзвешенной» аппроксимацией приводит к математически возможному, но физически неверному результату» [1].

На рис. 2 согласно (А) аппроксимация приводит к ошибочным результатам, (Б): аппроксимация приводит к математически возможному, но физически неверному результату. Таким образом, авторы добиваются математической аппроксимации и сходимости численного решения фронтального вытеснения нефти водой, близкой к модели Бакли-Левретта, без учета последствий неустойчивости фронта вытеснения [1].

Так или иначе, на данном этапе не удастся добиться полноценной унификации технологии заводнения, поскольку теория фильтрации двухфазного потока, основанная на теории Бакли-Левретта, не позволяет учесть влияние неустойчивости фронта вытеснения и главное, своевременно предотвратить его негативные последствия, провоцирующие скачкообразное изменение водонасыщенности, что чревато катастрофическим прорывом воды к добывающим скважинам.

Вышеприведенная аргументация подчеркивает необходимость создания новой научной парадигмы – модели динамической системы многофазной фильтрации, рассчитанной на решение подобных краткосрочных оперативных задач, с возможностью прогнозировать преждевременный прорыв воды. Предлагаемые решения краткосрочных задач не являются альтернативой, наоборот, вполне могут быть

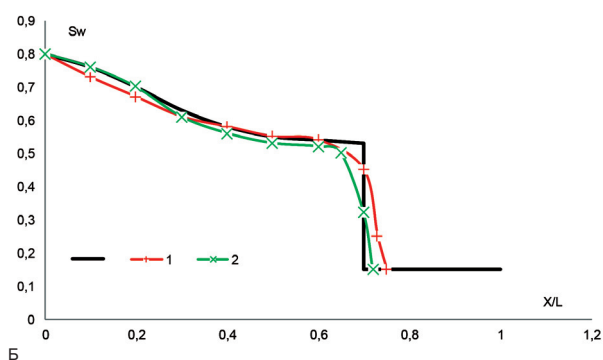
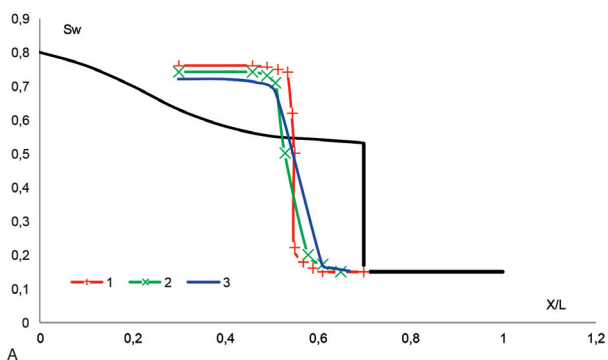


РИС. 2.

Результаты сходимости «средневзвешенной» схеме [1]

использованы в качестве дополнения к известным геолого-гидродинамическим моделям разработки месторождений жидких и газообразных углеводородов, рассчитанных на решение долгосрочных и среднесрочных задач.

Принципиально важным является постановка и решение задачи по прогнозированию скорости изменения нефтяной и водной фаз в единой структуре потока жидкости, приводящего к неустойчивости фронта вытеснения. Неустойчивость устанавливается на основе управляющего параметра, рассчитанного на базе оперативно получаемых фактических промышленных данных работы скважин. Детали предлагаемых решений можно найти в работах [10–17, 19, 22, 24, 31, 38, 41, 42, 43].

В этом случае необходима трансформация фактических данных в определенные новые знания – унифицированные управляющие параметры, позволяющие анализировать, осуществлять мониторинг и оптимизировать системы нестационарного заводнения, как это предусмотрено в теории катастроф для разрывных функций, меняющихся скачками [2, 8, 10–17, 19, 22, 24, 31, 38, 41, 42, 43].

Вышеприведенные теоретические предпосылки и аргументация указывают на необходимость самостоятельного исследования динамического поведения основных показателей процесса разработки во времени.

ТЕОРИЯ МНОГОФАЗНЫХ ПОЛИНОМИАЛЬНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Теория катастроф исследует динамические системы, составляющие широкий класс нелинейных уравнений, описываемых в том числе квадратичными полиномами [10, 13, 38].

$$\begin{aligned} \frac{dQ}{dt} &= a_o Q_o^2 + b_o Q_o + c_o \\ \frac{dQ_w}{dt} &= a_w Q_w^2 + b_w Q_w + c_w, \\ \frac{dQ_g}{dt} &= a_g Q_g^2 + b_g Q_g + c_g, \end{aligned} \quad (2)$$

$$D_o = b_o^2 - 4a_o c_o,$$

$$D_w = b_w^2 - 4a_w c_w,$$

$$D_g = b_g^2 - 4a_g c_g,$$

где $a_o, b_o, c_o, a_w, b_w, c_w, a_g, b_g, c_g$ – постоянные коэффициенты, характеризующие поведение соответствующих фаз, а Q_o, Q_w, Q_g – соответственно, накопленный отбор нефти, воды и газа.

Система (2) описывает эволюцию во времени на заданном интервале $t \in (t_0, t_1)$ при заданных по-

стоянных величинах параметров задачи $a_o, b_o, c_o, a_w, b_w, c_w, a_g, b_g, c_g$ и накопленную добычу нефти $Q_o(t)$, воды $Q_w(t)$ и газа $Q_g(t)$. На практике накопленные и текущие отборы скважин известны, что позволяет определить коэффициенты полиномов системы (2) в первом приближении как постоянные величины на заданном временном интервале.

С этой целью необходимо рассмотреть свойства общего решения каждого из уравнений системы на фазовой плоскости Q_o от t в зависимости от параметров задачи. Также необходимо рассматривать поведение и свойства решений системы на фазовой плоскости $Q_o - Q_w, Q_o - Q_g, Q_w - Q_g$ в зависимости от всех параметров задачи и от значений и знаков дискриминантов по фазам.

Ниже приводятся фрагменты серии фазовых портретов, которые характеризуют все важнейшие переходы между классами и сценарии развития катастроф в результате вариации одного из дискриминантов.

Приближение к переходу из класса D^{++} в класс D^{00} через класс D^{+0} , то есть сближение и слияние узловых и седловых особых точек, которые расположены на левой и правой сторонах прямоугольника на рис. 2А–2Д, происходит с уменьшением и стремлением к 0 дискриминанта D_w ($D_w = 1, 0.64, 0.36, 0.16, 0.04$ на рис. 2А–2Д, соответственно), так что при этом расстояние между Q_w – координатами особых точек стремится к 0. При $D_w = 0$ – в классе D^{+0} происходит слияние (а) двух узловых и седловых особых точек 1 и 3 (левых двух на рис. 2А–2Д), в результате чего образуется одна точка 1 (на рис. 2Е) – устойчивый “односторонний” узел, и (Б) двух узловых и седловых особых точек 2 и 4 (правых двух на рис. 2А–2Д), в результате чего образуется одна точка 2 – неустойчивый “односторонний” узел (рис. 2Е). Также образуется разрыв при $D_w = 0$ и разрывная “складка”, характерная для класса D^{+0} .

Приближение к переходу из класса D^{++} в класс D^{+} через класс D^{0+} , когда происходит сближение и слияние узловых и седловых особых точек, расположенных на верхней и нижней сторонах прямоугольника на рис. 3А–3Д, происходит с уменьшением и стремлением к 0 дискриминанта D_o ($D_o = 1, 0.64, 0.36, 0.16, 0.04$ на рис. 3А–3Д, соответственно), так что при этом расстояние между Q_o – координатами особых точек стремится к 0. При $D_o = 0$ в классе D^{0+} происходит слияние (а) двух узловых и седловых особых точек 1 и 2 (верхних двух на рис. 3А–3Д), в результате чего образуется одна точка 1 (на рис. 3Е) – неустойчивый “односторонний” узел, и (б) двух узловых и седловых особых точек 3 и 4 (нижних двух на рис. 3А–3Д), в результате чего образуется одна точка 2 – устойчивый “односторонний” узел (рис. 3Е) и образуется разрыв при $D_o = 0$ и разрывная “складка”, на рис. 3Е, характерная для класса D^{0+} .

Создание качественной теории, включающей описание всех особых и критических точек автоном-

Переход из класса D^{++} в класс D^{+0} через классы D^{+0} , D^{00} , D^{0-}
 А. Переход из класса D^{++} в класс D^{+0}

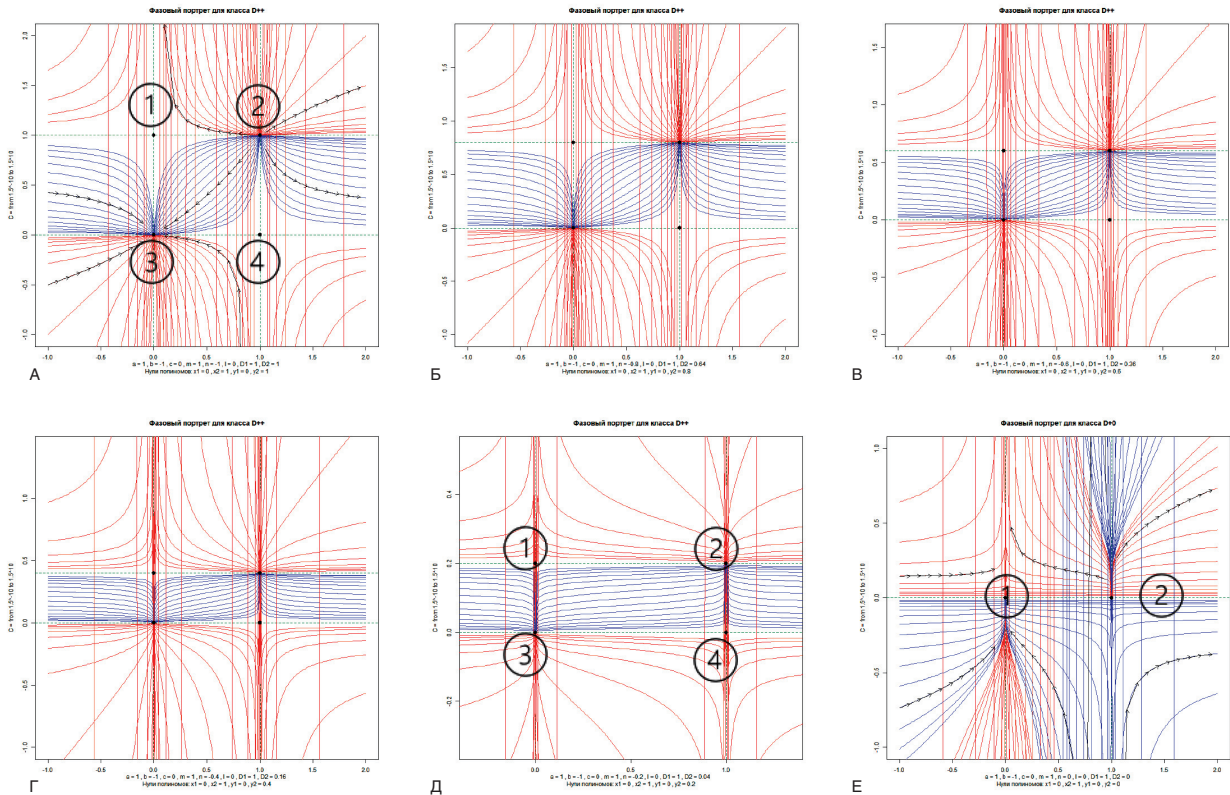


Рис. 3. Фазовые портреты при переходе из класса D^{++} в класс D^{+0}

ной полиномиальной динамической системы и построение всего многообразия ее фазовых портретов является достаточно сложной задачей. Для этого необходимо получить общие решения и решения задач Коши во всех возможных классах, определяемых различными типами факторизации, которые, как известно, определяются комбинацией знаков и абсолютных значений дискриминантов полиномов, а также для выявления их наиболее важных свойств. В данном случае доказано, что дискриминанты по нефти, воде и газу являются управляющими параметрами процесса и составной частью полученных решений уравнений (2). Ниже представлено одно из решений, представляющих важное практическое значение, так как характеризует условие неустойчивости, провоцирующее прорыв воды.

$$Q_w = -Q_w^0 + Pt a n \left(\frac{\rho}{2} \ln \left| \frac{Q_o - Q_{0,1}}{Q_o - Q_{0,2}} \right| + C \right);$$

$$P = \frac{\sqrt{-D_W}}{2a_W}; \quad \rho = \sqrt{-\frac{D_W}{D_0}} > 0, \quad (3)$$

где D_o , D_w – дискриминанты по нефти и воде, C – интегральная постоянная, a_w – коэффициент при полиноме для воды, $Q_{0,1}$, $Q_{0,2}$ – корни квадратичного полинома для нефти, Q_w^0 – отбор воды при начальных условиях, Q_o – текущий отбор нефти.

Проводя качественный анализ двумерных и трехмерных динамических систем, приведем описание и визуализацию различных сценариев моделей конкретных процессов. Полученные результаты обобщаются в компактной матричной и критериальной форме, позволяющей определить различные типы устойчивых и неустойчивых решений и их особых точек, зависящих от значений и знаков дискриминантов многочленов. Последнее имеет определяющее значение для практических применений результатов построенной в работе качественной теории [31, 38, 41, 42, 43].

Чтобы провести полное качественное исследование решений автономной системы, включая анализ всех ее возможных критических и особых точек и решений, рассмотрим поведение решений автономной системы (2) для двухфазного случая и соответствующего уравнения на фазовой плоскости (Q_o, Q_w) в зависимости от параметров задачи.

Переход из класса D^{++} в класс D^+ через классы D^{0+} , D^{00} , D^0 , D^- , D^{-0}
 А. Переход из класса D^{++} в класс D^{0+}

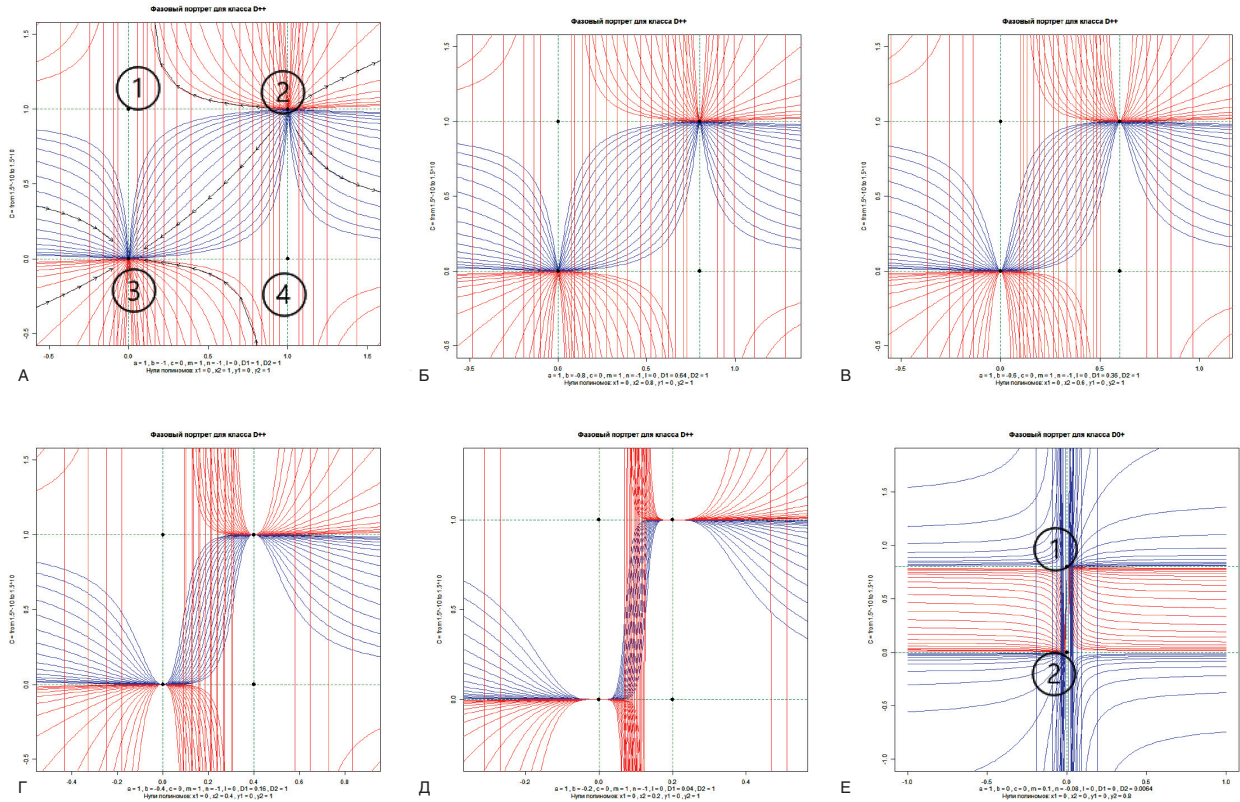


РИС. 4.
 Фазовые портреты перехода из класса D^{++} в класс D^{0+}

Применение результатов качественного анализа для решения обратной задачи необходимо определить соотношения между скоростью изменения измеряемых величин и самими этими величинами. Возможность проведенных выше классификации и качественного анализа решений уравнений основана на известных соотношениях между скоростью изменения измеряемых величин и самими этими величинами. Эти соотношения имеют вид обыкновенных дифференциальных уравнений (2), разрешенных относительно производной. Необходимость решения прямой задачи была вызвана для качественного анализа сингулярностей, определения свойств решений и ввода в решение управляющего параметра – дискриминант по каждой фазе.

Главной целью является решение обратной задачи. При помощи метода наименьших квадратов (МНК) можно приблизить квадратичным полиномом правую часть системы (2) для случая двух фаз, точнее величину изменения измеряемой величины за единицу времени (скорость),

$$v_{oi} = \frac{Q_{oi+1} - Q_{oi}}{t_{oi+1} - t_{oi}}, v_{wi} = \frac{Q_{wi+1} - Q_{wi}}{t_{wi+1} - t_{wi}},$$

$$v_{oi} \approx \frac{dQ_o}{dt}, v_{wi} \approx \frac{dQ_w}{dt},$$

чтобы решить обратную задачу. Далее определить коэффициенты $a_{Oj}, b_{Oj}, c_{Oj}, a_{Wj}, b_{Wj}, c_{Wj}$ при помощи МНК при условии, что значения $t, Q_{oi}(t)$ и $Q_{wi}(t), i=1, 2, \dots, n$ известны.

В связи с вышеизложенным можно сделать заключение о том, что множество катастроф уравнения роста определяется множеством решений, полученных из уравнения (2) для двухфазного и трехфазного случаев, известным методом наименьших квадратов (МНК), а полученная система алгебраических уравнений решается методом Гаусса, данное заключение подробно изложено в [22, 31, 38, 42, 43].

Фрагмент дискриминантного критерия для двухфазного потока и соответствующие стратегии выбора режима работы скважин можно сформулировать следующим образом:

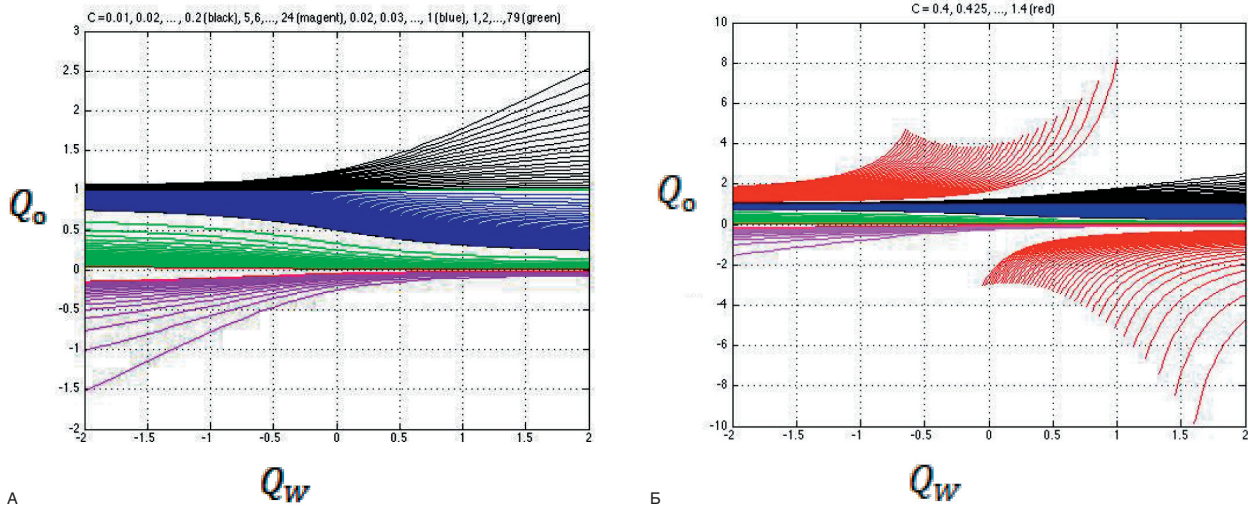


РИС. 5.
Общее решение класса D^+

– при $D_o < 0$ и $D_w > 0$ (семейство решений D^+) отбор нефти имеет тренд к росту, а воды к снижению, имеется возможность увеличения отбора жидкости из скважины, после изучения потенциальной возможности насосного оборудования и другие необходимые параметры;

– при $D_o > 0$ и $D_w < 0$ (семейство решений D^+) отбор нефти имеет тренд к снижению, а воды к росту, возможная неустойчивость фронта вытеснения может провоцировать прорыв воды, рекомендуется ограничить отбор жидкости из скважины или провести геолого-технические мероприятия по снижению притока в добывающей скважине и ограничения закачки воды в нагнетательные скважины и возможные ремонтно-изоляционные работы;

– при $D_o < 0$ и $D_w < 0$ (семейство решений D^-) отборы нефти и воды имеют тренд к росту, рекомендуется режим работы скважины сохранять и провести геолого-технические мероприятия по снижению водопритока, в том числе через соседние взаимодействующие нагнетательные скважины;

– при $D_o > 0$ и $D_w > 0$ (семейство решений D^{++}) отборы нефти и воды имеют тренд к снижению, следует рассматривать возможность проведения геолого-технических мероприятий по интенсификации притока жидкости в скважине и повышение нефтеотдачи пласта через взаимодействующие нагнетательные скважины. Безусловно, при этом анализируется традиционная промысловая информация.

Ниже приводится пример использования дискриминантного критерия к показателям разработки конкретных объектов. Как видно из рис. 6, произошел прорыв воды с 08.2013 г. и по дискриминантному критерию это подтверждается, $D_o > 0$, $D_w < 0$. Следовало

бы снизить отбор жидкости по скважине, определить причину обводнения и провести ГТМ по ограничению притока воды. Закачку воды по окружающим взаимодействующим нагнетательным скважинам необходимо было снизить.

По мере поступления новых данных необходимо проведение дальнейших расчетов дискриминантов для последующей корректировки и конкретизации практических рекомендаций. Показано, что дискриминанты полиномов являются управляющими параметрами, контролирующими существенные свойства решений; предложены, в частности, классификация решений в зависимости от значений и знаков дискриминантов и принадлежности к конкретному семейству D^{++} , D^+ , D^{+} или D^- , для трехфазного случая D^{+++} , D^{++} , D^{++} или D^{---} и так далее.

ПЕТЛЯ ГИСТЕРЕЗИСА ПРИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ

По сути, петли гистерезиса необратимых явлений и их размеры, наблюдаемые в процессе многофазной фильтрации, показывают масштабы необратимых потерь в добыче нефти и в конечной нефтеотдаче. Снижение пластового давления ниже давления насыщения в пластовых условиях требует основательного обоснования величин остаточной газонасыщенности, тип и гистерезис ОФП, в том числе для условий разгазирования нефти, условия обратного растворения газа в нефти и прочих характеристик процесса многофазной фильтрации, обязательных при моделировании объекта разработки. Это имеет непосредственное влияние на результаты прогнозирования технологических показателей разработки месторождения жидких и газообразных углеводородов.

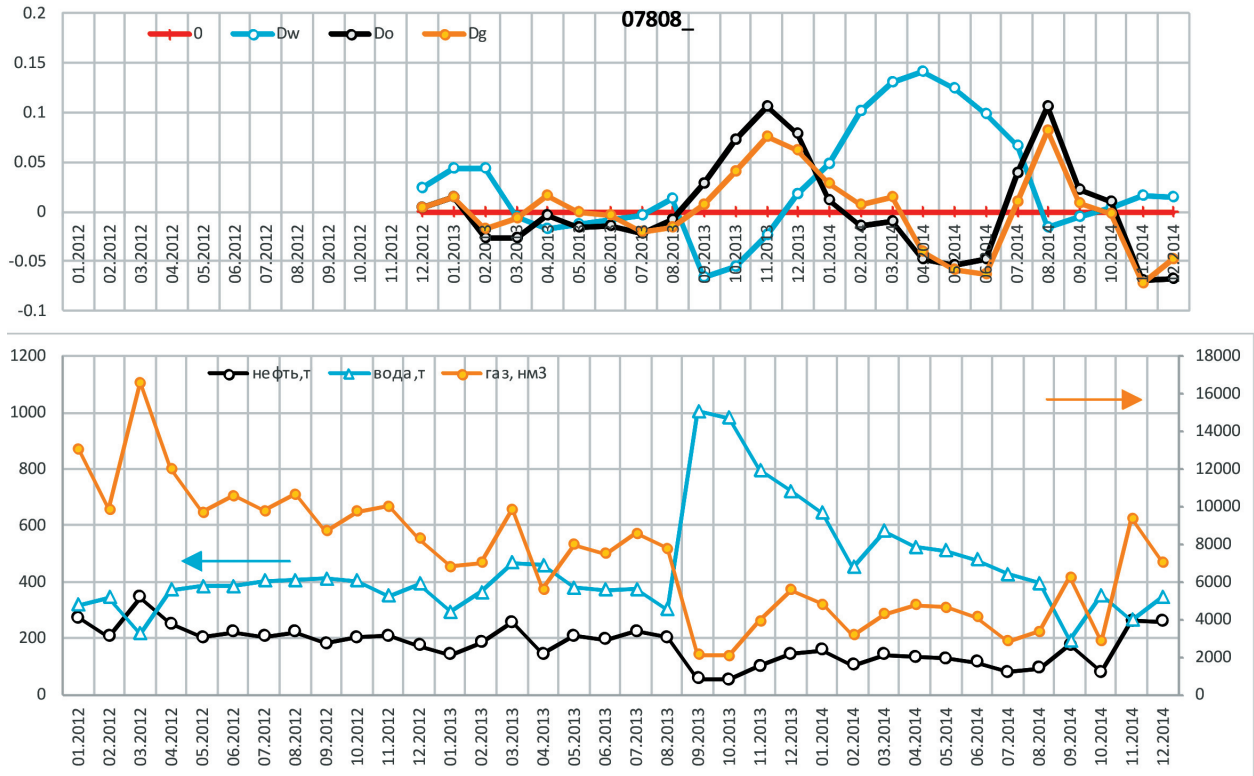


РИС. 6. Динамика добычи нефти, газа и воды и динамика дискриминанты трёхфазного потока на скважине №07808

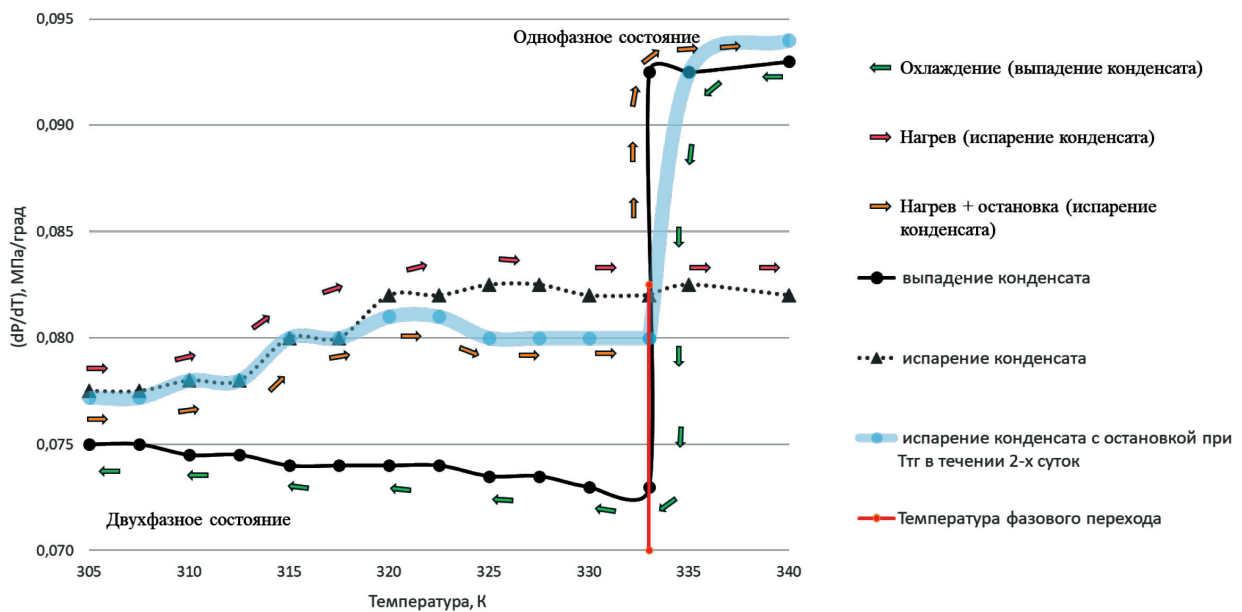


РИС. 7. Гистерезис, формируемый при температуре фазового перехода при выпадении и испарении жидкой фазы [37]

Как правило, из-за отсутствия протяженной межфазной границы раздела между жидкостью и газом или паром, неравновесный обратный переход в однофазное состояние посредством диффузионного переноса требует длительного времени и подогрева (рис. 7). Следовательно, образование петли гистерезиса будет способствовать выпадению конденсата и формированию двухфазного потока, что существенно снизит добычу конденсата [8, 38].

**ГИСТЕРЕЗИСНОЕ ПОВЕДЕНИЕ
 КАПИЛЛЯРНОЙ ПРОПИТКИ
 И ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ФАЗОВЫХ
 ПРОНИЦАЕМОСТЕЙ**

Построению физической модели по экспериментальным данным или численной модели гистерезиса капиллярного давления и относительных проницаемостей посвящены исследования многих авторов, но в основу наших рассуждений положены результаты, полученные в работах [1, 5, 32, 34]. В научной литературе капиллярное давление в средах, составленных преимущественно с гидрофобными или гидрофильными горными породами, насыщенными смачивающими и несмачивающими фазами, в частности, нефть-вода или нефть-газ, определяется как разность давлений в фазах.

На рис. 8 представлена гистерезисная природа капиллярного давления в системе со смачивающей

и несмачивающей фазами. Это последовательность трансформации гистерезисного поведения капиллярного давления из состояния (а) в состояние (б) в условиях, когда вытеснение в каждом из направлений осуществляется полностью до получения остаточного значения насыщенности рис. 8А, предельные кривые а, б, с. В последующем неоднократно обратив процесс вытеснения в точке А, на рис. 8Б, не достигая предельных значений насыщенности, можно добиться положения, существенно снижающего остаточную нефть. Это позволяет значительно снизить площадь петли гистерезиса и уменьшить остаточную нефтенасыщенность (зеленая и оранжевая заштрихованные линии на рис. 8Б).

Как считают авторы [1], «если процесс первичного вытеснения обратить, то промежуточная кривая пропитки пойдет к остаточной насыщенности $S_{nc}^* < S_{nc}$ рис. 8Б. Такое поведение согласуется с моделью гистерезиса относительной проницаемости». При этом происходит капиллярное удержание или “захват” несмачивающей фазы вытесняющейся смачивающей фазой, что приводит в конечном счете к образованию застойных зон и потере нефти. Таким образом, главной задачей становится поиск путей снижения размеров петли гистерезиса как для капиллярного давления, так и для относительной проницаемости.

В работе [34] на рис. 5 А, Б показано влияние петли гистерезиса капиллярной пропитки на относитель-

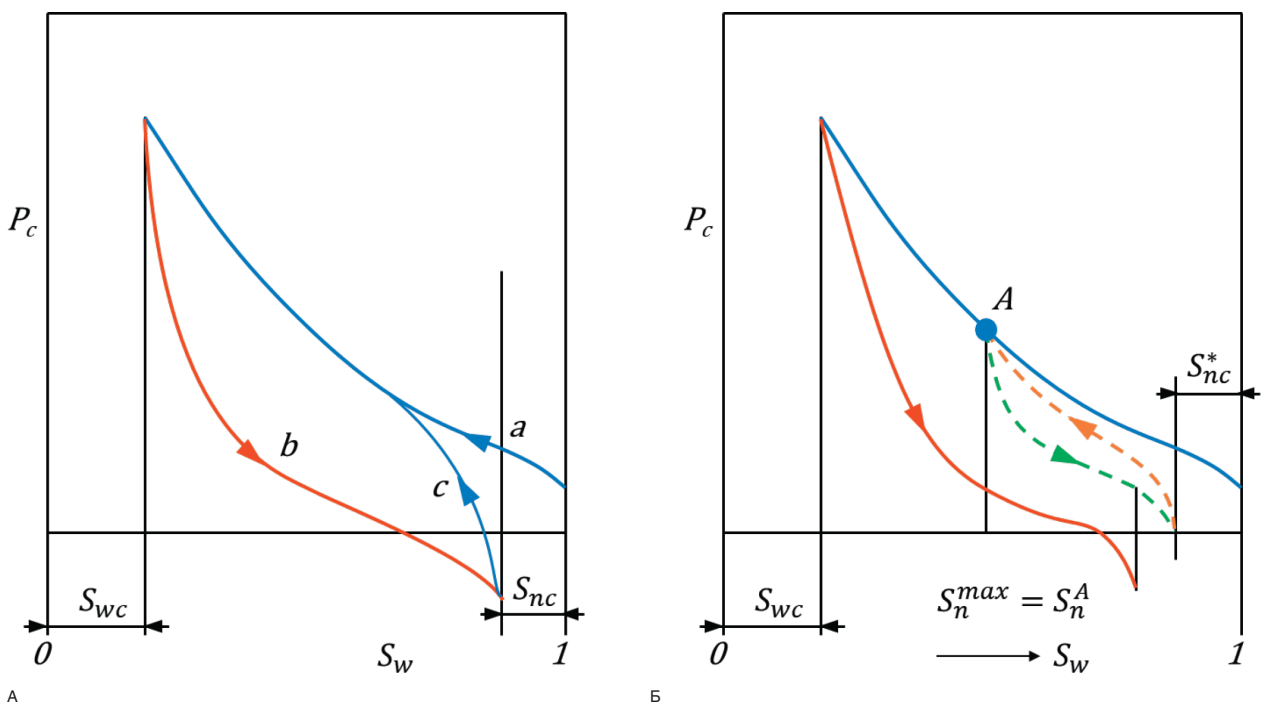


РИС. 8.
 Кривые гистерезиса капиллярного давления с возвратом на промежуточных кривых [1]

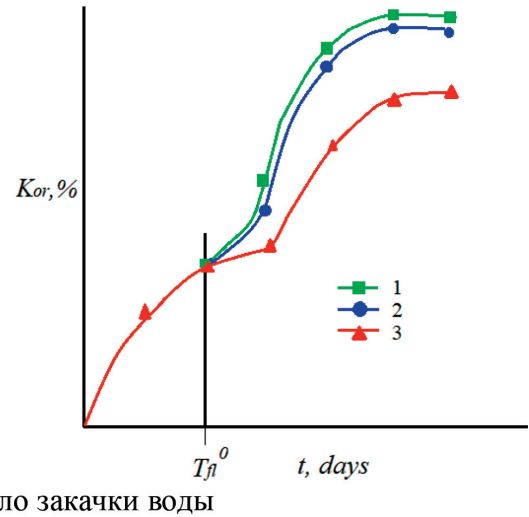
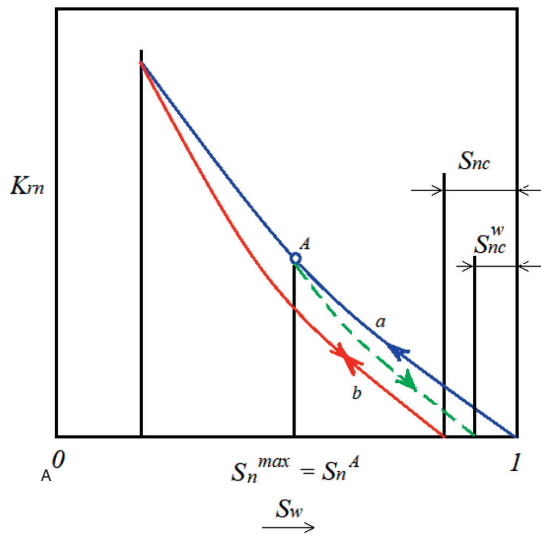


Рис. 9.

Влияние капиллярного давления на относительную фазовую проницаемость и нефтеотдачу [34]

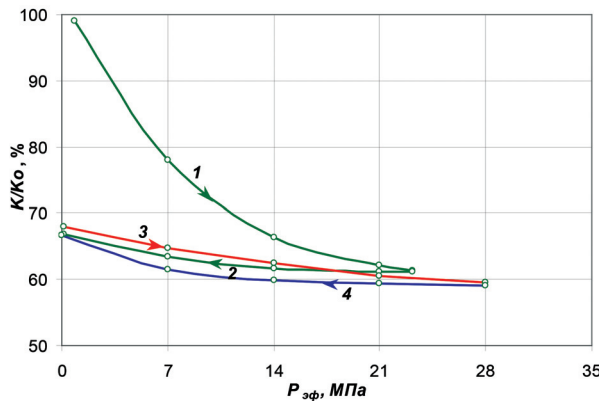


Рис. 10.

Изменение относительной проницаемости от эффективного давления при «нагрузке-разгрузке» для образца площади Чендлер [9]

ную фазовую проницаемость (а) и на нефтеотдачу (б) при вытеснении нефти водой [34]. Опыт показывает, что предотвратить или хотя бы прекратить увеличение роста гистерезисных явлений можно не только регулированием процесса заводнения, но активным применением химических технологий повышения нефтеотдачи и интенсификации добычи нефти [3, 4, 6, 7, 9, 18, 20, 21, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 33, 30, 39, 40].

ГИСТЕРЕЗИСНОЕ ПОВЕДЕНИЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ ДЕФОРМИРУЕМОГО КОЛЛЕКТОРА

Интерес представляют хорошо разработанные исследования, представляющие обратимые и необратимые изменения пористости и проницаемости пород коллекторов, подверженных упругим и пластическим деформациям под воздействием больших перепадов давлений в режиме нагрузки-разгрузки [8].

Уравнения фильтрации при упругопластическом режиме при наличии необратимых изменений проницаемости в условиях формирования зоны разгазирования нефти, при давлении ниже давления насыщения, представляется следующей системой уравнений:

$$\frac{1}{r} \frac{r}{d r} \left[\frac{K(P, a_k, \eta_k) F_H(S, P) \rho_H(P)}{\mu_H(P)} r \frac{d P}{d r} \right] = 0; \tag{4}$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{d r} \left\{ \left[\frac{K(P, a_k, \eta_k) F_H(S, P) \cdot P}{\mu_H(P)} + \frac{K(P, a_k, \eta_k) F_H(S, P) \cdot P S_1(P)}{\mu_H(P)} \right] r \frac{d P}{d r} \right\} = 0;$$

где

$$\uparrow \downarrow K(P, a_k, \eta_k) = K_0 [\phi_1(r) + \psi_1(r) (P - P_0)],$$

$$\phi_1(r) = \frac{\sqrt{\psi(r)}}{\sqrt{\psi(r)} + \frac{\eta_k}{a_k} [\sqrt{\psi(r)} - 1]^2},$$

$$\psi_1(r) = \frac{a_k \left\{ \frac{\eta_k}{a_k} [\sqrt{\psi(r)} - 1]^2 + \frac{\eta_k}{a_k} [\sqrt{\psi(r)} - 1] + \sqrt{\psi(r)} \right\}}{\sqrt{\psi(r)} + \frac{\eta_k}{a_k} [\sqrt{\psi(r)} - 1]^2},$$

$$P_+ < P_c < P_0,$$

$$a) \psi(r) = 1 - \{1 - [1 + a_k (P_i - P_0)]^2\} \frac{\ln R_0/r}{\ln R_0/R_+},$$

$$P_c < P_+ < P_0,$$

$$б) \quad \psi(r) = \Phi_+ - \frac{(\Phi_+ - \Phi_{ci})}{\ln(R_+/R_c)} \cdot \ln(R_+/r).$$

Здесь P_0 – начальное пластовое давление; P_c – забойное давление; P_+ – давление насыщения; R_0, R_c, R_+ – соответствующие радиусы при P_0, P_c, P_+ ; a_k – коэффициент изменения проницаемости; η_k – коэффициент необратимого изменения проницаемости; K – абсолютная проницаемость; S_1 – коэффициент, равный массе газа, растворяющегося в единице объема при повышении давления на 0,1 МПа; $\rho_H(P)$ – плотность нефти; μ_0, μ_2 – соответственно, вязкость нефти и газа; $F_H(S, P), F_G(S, P)$ – фазовые проницаемости для нефти и газа; m – пористость пласта; S – насыщенность; R – газовая постоянная; T – абсолютная температура; $Z(P)$ – коэффициент сверхсжимаемости газа; P – текущее давление; r – радиус.

Весь поток можно разбить на две области: область движения однофазной жидкости от контура питания ($r=R_k, P=P_+$) до линии, где пластовое давление равно давлению насыщения ($r=R_+, P=P_+$), и область движения двухфазной жидкости – от линии ($r=R_+, P=P_+$) до забоя скважины ($r=R_c, P=P_c$). При этом необходимо вводить функцию, аналогичную известной функции Христиановича:

$$\Phi = \int \frac{\rho_H(P) F_H(S, P) [1 + a_k (P - P_0)] dP}{\mu_H(P)} + C.$$

Тогда формулы притока однородной жидкости с дебитом G_1 к линии разгазирования жидкости с дебитом G_2 к стенке скважины R_c имеют вид:

$$G_1 = \frac{\pi h K_0 \rho_0 \{1 - [1 + a_k (P_+ - P_0)]^2\}}{\mu_0 a_k \ln(R_k/R_+)};$$

$$G_2 = \frac{2\pi h \rho_0 [1 + a_k (P_+ - P_0)] (\Phi_+ - \Phi_0)}{\mu_0 \ln(R_+/R_c)}.$$

В силу неразрывности потока $G_1 = G_2 = G$ получим

$$\downarrow G = \frac{\pi h K_0 \rho_0 [\mu_0 a_k]^{-1} \{1 - [1 + a_k (P_+ - P_0)]^2\} + \dots}{\ln(R_k/R_c)} \dots$$

$$\dots \frac{+ 2\pi h [1 + a_k (P_+ - P_0)] (\Phi_+ - \Phi_0)}{\dots}$$

Результаты расчетов по формуле (4) приведены на рис. 11 и 12. Как и в случае движения однородной жидкости, так и при движении газированной жидкости в упругой среде индикаторная линия сохраняет нелинейный характер, но при этом коэффициент продуктивности будет меньше, чем в случае движения однородной жидкости. Этот факт свидетельствует о

том, что при движении газированной жидкости сопротивление движению увеличивается.

Из сравнения рис. 11 и 12 становится очевидным, что при прочих равных условиях при увеличении безразмерного коэффициента обратимого изменения проницаемости со значения 1,5 до 2, безразмерное оптимальное давление следует снизить с 0,33 до значения 0,5, что соответствует снижению продуктивности скважины. Таким образом, ограничения, наложенные на создание больших депрессий для скважин и пластов и сохранения текущего давления выше давления насыщения, становятся актуальной задачей.

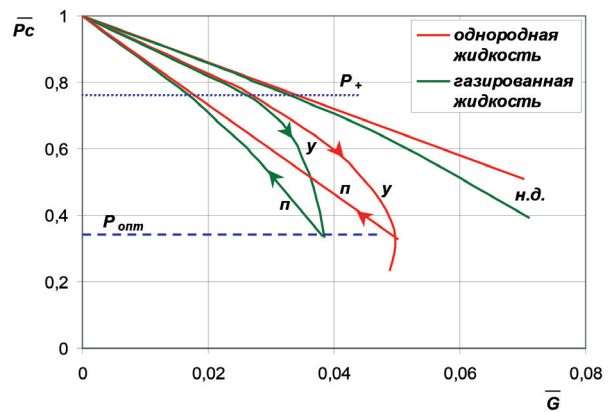


РИС. 11.

Индикаторные линии, полученные в условиях фильтрации однородной и газированной жидкости при недеформируемом (н.д.), упругом (у) и пластическом (п) режимах при коэффициенте изменения проницаемости равной при обратимом $a_k=1,5$; давлении насыщения $P_+ = 0,75$; $P_{opt}=0,33$

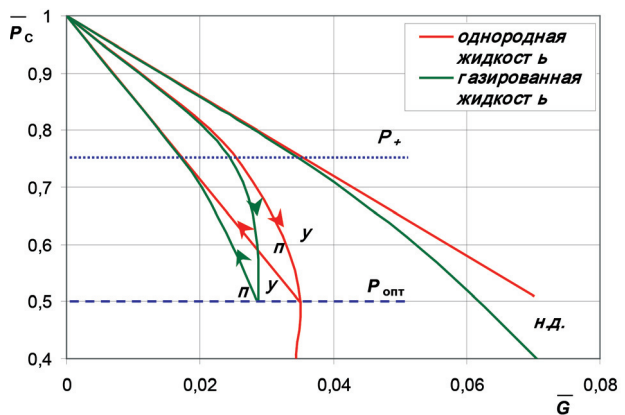


РИС. 12.

Индикаторные линии, полученные в условиях фильтрации однородной и газированной жидкости при недеформируемом (н.д.), упругом (у) и пластическом (п) режимах при коэффициенте изменения проницаемости равной при упругом $a_k = 2$; и необратимом изменении $1/(p-p_0)$ безразмерное давление насыщенности $P_+ = 0,75$; $P_{opt} = 0,5$ безразмерного перепада давления от значения 0,67 до значения перепада 0,5

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Возможными причинами усиления гистерезисных явлений, необратимостей и неустойчивостей в процессах нефтегазодобычи являются неадекватное применение форсированного отбора жидкости с применением недопустимо высоких перепадов давления, запредельная “нагрузка – разгрузка” на горные породы, вызывающие пластические деформации при проведении разновидностей ГРП и различные ГТМ, капиллярные эффекты и неустойчивости фронта вытеснения нефти водой.

На основе предложенных критериев сформулированы решающие критерии, позволяющие своевременно обнаружить и предотвратить последствия потери устойчивости фронта вытеснения нефти водой и адресно регулировать систему заводнения с помощью, в том числе, остановки, форсирования, ограничения режимов работы скважин, назначения ГТМ добывающих и нагнетательных скважин, смены насосного оборудования и других традиционных геологических мероприятий.

Мобилизацией закачиваемой воды и регулированием отбора жидкости на основе дискриминантного критерия удастся оперативно решить важные краткосрочные практические задачи, не прибегая к традиционной трудоемкой гидродинамической модели объекта разработки.

Системная оптимизация разработки нефтяных месторождений рассчитана на определенный технологический и экономический эффект, в том числе на дополнительную добычу нефти, эффективную мобилизацию и сокращению закачиваемой и отбираемой воды и газа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Азиз Х., Сеттари Э. Математическое моделирование пластовых систем. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований. 2004. 406 с.
2. Арнольд В.И. Теория катастроф. М.: Наука, 1990. 128 с.
3. Брезицкий С.В., Джафаров И.С., Панахов Г.М., Шахвердиев А.Х. Способ разработки нефтяной залежи. Патент RU 2142557 С1, 10.12.1999.
4. Горбунов А.Т., Москвин В.Д., Бруслов А.Ю., Старковский А.В., Рогова Т.С., Султанов Т.А., Баликоева М.А., Шахвердиева А.А.Х., Палий В.О. Способ обработки призабойной зоны добывающей скважины. Патент RU 2023143 С1, 15.11.1994.
5. Крейг Ф.Ф. Разработка нефтяных месторождений при заводнении. М.: Недра, 1974. 191с.
6. Мандрик И.Э., Шахвердиев А.Х., Сулейманов И.В. Оценка и прогноз нефтеотдачи на основе моделирования нейронными сетями // Нефтяное хозяйство. 2005. № 10. С. 36–39.

7. Чукчеев О.А., Шахвердиев А.Х., Мамедов Б.А., Минулин Х.К., Исангулов А.К., Бражник В.В. Устройство для очистки скважины / Патент на изобретение RU 2068079 С1, 20.10.1996. Заявка № 96103241/03 от 27.02.1996.
8. Шахвердиев А.Х. Системная оптимизация процесса разработки нефтяных месторождений. М.: Недра, 2004. 452с.
9. Шахвердиев А.Х. Потенциал повышения нефтеизвлечения на основе новых технологий стимулирования нефтяного пласта // Вестник РАЕН. 2007. Т. 7. №4. С. 14–19.
10. Шахвердиев А.Х. Еще раз о нефтеотдаче // Нефтяное хозяйство. 2014. № 1. С. 44–48.
11. Шахвердиев А.Х. Некоторые концептуальные аспекты системной оптимизации разработки нефтяных месторождений // Нефтяное хозяйство. 2017. № 2. С. 58–63. DOI: 10.24887/0028-2448-2017-2-58-63
12. Шахвердиев А.Х., Арефьев С.В. Влияние фактора времени на показатели процесса разработки нефтяных месторождений // Вестник РАЕН. 2021. Т. 21. № 4. С. 45–52.
13. Шахвердиев А.Х., Арефьев С.В. Концепция мониторинга и оптимизации процесса заводнения нефтяных пластов при неустойчивости фронта вытеснения // Нефтяное хозяйство. 2021. № 11. С. 104–109.
14. Шахвердиев А.Х., Денисов А.В. Проблемы рационального использования попутного нефтяного газа // Вестник РАЕН. 2011. № 5. С. 55–61.
15. 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.
16. Шахвердиев А.Х., Денисов А.В., Собаев А.Г., Шахвердиев Э.А. Оптимизация нестационарного заводнения нефтяных залежей с использованием модели роста // Вестник РАЕН. 2019. Т. 19. № 1. С. 21–25.
17. Шахвердиев А.Х., Максимов М.М., Рыбцкая Л.П. Моделирование залежей нефти с позиции системной оптимизации процессов // Нефтяное хозяйство. 2000. № 12. С. 19–23.
18. Шахвердиев А.Х., Максимов М.М., Рыбцкая Л.П., Галушко В.В. Способ определения местоположения застойных и слабодренлируемых зон нефтяной залежи. Патент RU 2105136 С1, 20.02.1998.
19. Шахвердиев А.Х., Мандрик И.Э. Оптимизация плотности сетки скважин и ее влияние на коэффициент извлечения нефти // Нефтяное хозяйство. 2007. № 12. С. 54–58.
20. Шахвердиев А.Х., Панахов Г.М. Способ разработки нефтяной залежи. Патент RU 2244110 С1,

- 10.01.2005.
21. ШАХВЕРДИЕВ А.Х., ПАНАХОВ Г.М., АББАСОВ Э.М. Синергетические эффекты при системном воздействии на залежь терморехимическими методами // Нефтяное хозяйство. 2002. № 11. С. 61–65.
 22. ШАХВЕРДИЕВ А.Х., ПАНАХОВ Г.М., АББАСОВ Э.М., АББАСОВ Г.М., ОМРАНИ А. Газодинамическая десорбция газа в условиях внутрислоистой генерации диоксида углерода // Вестник РАН. 2010. Т. 10. № 1. С. 25–28.
 23. ШАХВЕРДИЕВ А.Х., ПАНАХОВ Г.М., АББАСОВ Э.М., МАНДРИК И.Э., БАХТИЯРОВ С.И. Интегративная эффективность воздействия на пласт при внутрислоистой генерации газа // Нефтяное хозяйство. 2006. № 11. С. 76–80.
 24. ШАХВЕРДИЕВ А.Х., ПАНАХОВ Г.М., АББАСОВ Э.М., РАСУЛОВА С.Р. О возможности регулирования вязкостной аномалии в гетерогенных смесях // Вестник РАН. 2014. Т. 14. № 1. С. 28–33.
 25. ШАХВЕРДИЕВ А.Х., ПАНАХОВ Г.М., АББАСОВ Э.М., JIANG R., ВАКНТИЯРОВ S. Высокоэффективная технология повышения нефтеотдачи и интенсификации добычи нефти на основе внутрислоистой генерации CO₂ // Нефтяное хозяйство. 2014. № 5. С. 90–95.
 26. ШАХВЕРДИЕВ А.Х., ПАНАХОВ Г.М., СУЛЕЙМАНОВ Б.А., АББАСОВ Э.М., БЕРМАН А.В. Способ изоляции зон поглощения в скважине. Патент RU 2111337 С1, 20.05.1998.
 27. ШАХВЕРДИЕВ А.Х., ПАНАХОВ Г.М., СУЛЕЙМАНОВ Б.А., АББАСОВ Э.М., КУРБАНОВ Р.А., МАТВЕЕВ К.А. Способ разработки нефтяной залежи. Патент RU 2123586 С1, 20.12.1998.
 28. ШАХВЕРДИЕВ А.Х., ПАНАХОВ Г.М., СУЛЕЙМАНОВ Б.А., АББАСОВ Э.М., ЧУКЧЕЕВ О.А., ГАЛЕЕВ Ф.Х. Способ гидроразрыва пласта. Патент RU 2122111 С1, 20.11.1998.
 29. ШАХВЕРДИЕВ А.Х., ПАНАХОВ Г.М., СУЛЕЙМАНОВ Б.А., АББАСОВ Э.М., ЧУКЧЕЕВ О.А., ГАЛЕЕВ Ф.Х. Способ разработки нефтяной залежи. Патент RU 2125154 С1, 20.01.1999.
 30. ШАХВЕРДИЕВ А.Х., ПАНАХОВ Г.М., АББАСОВ Э.М., HUIMIN Z., YIGANG L., SHUNYAO L. Инновационная технология извлечения остаточных запасов углеводородов внутрислоистой генерацией диоксида углерода // Нефтяное хозяйство. 2010. № 6. С. 44–47.
 31. ШАХВЕРДИЕВ А.Х., ШЕСТОПАЛОВ Ю.В., МАНДРИК И.Э., АРЕФЬЕВ С.В. Альтернативная концепция мониторинга и оптимизации заводнения нефтяных пластов в условиях неустойчивости фронта вытеснения // Нефтяное хозяйство. 2019. № 12. С. 118–123.
 32. BUCKLEY S.E., LEVERETT M.C. Mechanism of Fluid Displacement in Sands // Society of Petroleum Engineers. 1942. doi:10.2118/942107-G.
 33. GUMERSKY KH.KH., DZHAFAROV I.S., SHAKHVERDIEV A.KH., MAMEDOV YU.G. In-situ generation of carbon dioxide: new way to increase oil recovery / Proceedings of the European Petroleum Conference. European Petroleum Conference (EUROPEC). Paris, France, 2000. P. 499–504.
 34. KILLOUGH J.E. Reservoir simulation with history-dependent saturation functions // Trans. SPE of AIME. 1976. Vol. 261. P. 37–48.
 35. NICOLIS G., PRIGOGINE I. Self-Organization in Non-equilibrium System. N.Y.: John Wiley&Sons, 1977.
 36. ONSAGER L. Reciprocal Relations in irreversible processes // I, Phys. Rev. 1931. Vol. 37. P. 405–426.
 37. PRIGOGINE I., STENGERS I. Order out of chaos. N.Y.: Bantam, 1984.
 38. SHAKHVERDIEV A.KH., MAKHETSKAYA E.V., DENISOV A.V. Prevention of hysteresis phenomena during filtration of carbonated oil in reservoirs with irreversible deformation of rocks in overlying fields // 7th Scientific Exploration Conference – Tyumen 2021: Natural Resources Management as a Cross-Functional Process. 2021. Vol. 2021. P. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202150060>.
 39. SHAKHVERDIEV A.KH., PANAKHOV G.M., ВАКНТИЯРОВ S.I., АББАСОВ E.M. Oil Recovery by In-Situ Gas Generation: Volume and Pressure Measurements // ASME Joint U.S.-European Fluids Engineering Summer Meeting, Miami, FL, July 17–20, 2006.
 40. SHAKHVERDIEV A.KH., PANAKHOV G.M., ВАКНТИЯРОВ S.I., АББАСОВ E.M., SIGINER D. In-Situ Carbon Dioxide Generation for Oil Recovery: Experimental Study of Pressure and Temperature Variations during Stoichiometric Reaction // Symposium on Advances in Materials Processing Science, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Chicago, IL, November 5-10, 2006, <https://doi.org/10.1115/IMECE2006-15708>.
 41. 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. DOI: 10.1134/S1995080219100226
 42. SHAKHVERDIEV A.KH., SHESTOPALOV Y. Qualitative theory of two-dimensional polynomial dynamical systems. Symmetry. 2021. Vol. 13(10). 1884. <https://doi.org/10.3390/sym13101884>,
 43. SHAKHVERDIEV A.KH., SHESTOPALOV Y.V., МАНДРИК I.E., АРЕФЬЕВ S.V. Optimization of Reservoir Waterflooding with Unstable Displacement Front // ANAS Transactions, Earth Sciences 2. 2023. P. 64–78. DOI: 10.33677/ggianas20230200103

REFERENCE

1. AZIZ H., SETTARI E. Mathematical modeling of reservoir systems. Moscow-Izhevsk: Institut komp'yuternykh issledovaniy. 2004:406.
2. ARNOLD V.I. Catastrophe theory. Moscow: Nauka, 1990:128.
3. BREZITSKY S.V., JAFAROV I.S., PANAKHOV G.M., SHAKHVERDIEV A.KH. Method for developing an oil deposit. Patent RU 2142557 C1, 12/10/1999.
4. GORBUNOV A.T., MOSKVIN V.D., BRUSLOV A.YU., STARKOVSKY A.V., ROGOVA T.S., SULTANOV T.A., BALIKOEVA M.A., SHAKHVERDIEV A.A.KH., PALIY V.O. A method for treating the bottomhole zone of a production well. Patent RU 2023143 C1, 11/15/1994.
5. CRAIG F.F. Development of oil fields using waterflooding. Moscow: Nedra, 1974:191.
6. MANDRIK I.E., SHAKHVERDIEV A.KH., SULEYMANOV I.V. Estimation and forecast of oil recovery based on neural network modeling. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2005;10:36–39.
7. CHUKCHEEV O.A., SHAKHVERDIEV A.KH., MAMEDOV B.A., MINULIN KH.K., ISANGULOV A.K., BRAZHNIK V.V. Well cleaning device / Patent for invention RU 2068079 C1, 10.20.1996. Application N 96103241/03 dated 02/27/1996.
8. SHAKHVERDIEV A.KH. System optimization of the oil field development process. Moscow: Nedra, 2004:452.
9. SHAKHVERDIEV A.KH. Potential for increasing oil recovery based on new technologies for stimulating the oil reservoir. *Vestnik RAYEN*. 2007;7;4:14–19.
10. SHAKHVERDIEV A.KH. Once again about oil recovery. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2014;1:44–48.
11. SHAKHVERDIEV A.KH. Some conceptual aspects of system optimization of oil field development. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2017;2:58–63. DOI: 10.24887/0028-2448-2017-2-58-63
12. SHAKHVERDIEV A.KH., AREFIEV S.V. Influence of the time factor on the indicators of the oil field development process. *Vestnik RAYEN*. 2021;21;4:45–52.
13. SHAKHVERDIEV A.KH., AREFIEV S.V. The concept of monitoring and optimizing the process of flooding oil reservoirs with instability of the displacement front. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2021;11:104–109.
14. SHAKHVERDIEV A.KH., DENISOV A.V. Problems of rational use of associated petroleum gas. *Vestnik RAYEN*. 2011;5:55–61.
15. SHAKHVERDIEV A.KH., DENISOV A.V. Modeling the evolution of geofluidodynamic hydrocarbon systems under conditions of instability of the displacement front. *Vestnik RAYEN*. 2020;20;3:50–55.
16. SHAKHVERDIEV A.KH., DENISOV A.V., SOBAEV A.G., SHAKHVERDIEV E.A. Optimization of non-stationary flooding of oil deposits using a growth model. *Vestnik RAYEN*. 2019;19;1:21–25.
17. SHAKHVERDIEV A.KH., MAKSIMOV M.M., RYBITSKAYA L.P. Modeling of oil deposits from the perspective of system optimization of processes. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2000;12:19–23.
18. SHAKHVERDIEV A.KH., MAKSIMOV M.M., RYBITSKAYA L.P., GALUSHKO V.V. A method for determining the location of stagnant and poorly drained zones of an oil deposit. Patent RU 2105136 C1, 02/20/1998.
19. SHAKHVERDIEV A.KH., MANDRIK I.E. Optimization of well pattern density and its impact on oil recovery factor. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2007;2:54–58.
20. SHAKHVERDIEV A.KH., PANAKHOV G.M. Method for developing an oil deposit. Patent RU 2244110 C1, 01/10/2005.
21. SHAKHVERDIEV A.KH., PANAKHOV G.M., ABBASOV E.M. Synergistic effects under systemic influence on a deposit using thermo-rheochemical methods. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2002;11:61–65.
22. SHAKHVERDIEV A.KH., PANAKHOV G.M., ABBASOV E.M., ABBASOV G.M., OMRANI A. Gas-dynamic desorption of gas under conditions of in-situ generation of carbon dioxide. *Vestnik RAYEN*. 2010;10;1:25–28.
23. SHAKHVERDIEV A.KH., PANAKHOV G.M., ABBASOV E.M., MANDRIK I.E., BAKHTIYAROV S.I. Integrative efficiency of impact on the reservoir during in-situ gas generation. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2006;11:76–80.
24. SHAKHVERDIEV A.KH., PANAKHOV G.M., ABBASOV E.M., RASULOVA S.R. On the possibility of regulating the viscosity anomaly in heterogeneous mixtures. *Vestnik RAYEN*. 2014;14;1:28–33.
25. SHAKHVERDIEV A.KH., PANAKHOV G.M., ABBASOV E.M., JIANG R., BAKHTIYAROV S. Highly efficient technology for enhancing oil recovery and intensifying oil production based on in-situ generation of CO₂. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2014;5:90–95.
26. SHAKHVERDIEV A.KH., PANAKHOV G.M., SULEYMANOV B.A., ABBASOV E.M., BERMAN A.V. A method for isolating absorption zones in a well. Patent RU 2111337 C1, 05/20/1998.
27. SHAKHVERDIEV A.KH., PANAKHOV G.M., SULEYMANOV B.A., ABBASOV E.M., KURBANOV R.A., MATVEEV K.L. Method for developing an oil deposit. Patent RU 2123586 C1, 12/20/1998.
28. SHAKHVERDIEV A.KH., PANAKHOV G.M., SULEYMANOV B.A., ABBASOV E.M., CHUKCHEEV O.A., GALEEV F.KH. Hydraulic fracturing method. Patent RU 2122111 C1, 11/20/1998.
29. SHAKHVERDIEV A.KH., PANAKHOV G.M., SULEYMANOV B.A., ABBASOV E.M., CHUKCHEEV O.A., GALEEV F.KH. Method for developing an oil deposit. Patent RU 2125154 C1, 01/20/1999.
30. SHAKHVERDIEV A.KH., PANAKHOV G.M., ABBASOV E.M., HUIMIN Z., YIGANG L., SHUNYAO L. Innovative technology for the extraction of residual hydrocarbon reserves by in-situ generation of carbon dioxide.

- Neftyanoye khozyaystvo*. 2010;6:44–47.
31. SHAKHVERDIEV A.KH., SHESTOPALOV YU.V., MANDRIK I.E., AREFIEV S.V. An alternative concept for monitoring and optimizing the flooding of oil reservoirs in conditions of instability of the displacement front. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2019;12:118–123.
 32. BUCKLEY S.E., LEVERETT M.C. Mechanism of Fluid Displacement in Sands. *Society of Petroleum Engineers*. 1942. doi:10.2118/942107-G.
 33. GUMERSKY KH.KH., DZHAFAROV I.S., SHAKHVERDIEV A.KH., MAMEDOV YU.G. In-situ generation of carbon dioxide: new way to increase oil recovery. Proceedings of the European Petroleum Conference. European Petroleum Conference (EUROPEC). Paris, France, 2000:499–504.
 34. KILLOUGH J.E. Reservoir simulation with history-dependent saturation functions. *Trans. SPE of AIME*. 1976;261:37–48.
 35. NICOLIS G., PRIGOGINE I. Self-Organization in Nonequilibrium System. New York: John Wiley&Sons, 1977.
 36. ONSAGER L. Reciprocal Relations in irreversible processes. I, *Phys. Rev*. 1931;37:405–426.
 37. PRIGOGINE I., STENGERS I. Order out of chaos. New York: Bantam, 1984.
 38. SHAKHVERDIEV A.KH., MAKHETSKAYA E.V., DENISOV A.V. Prevention of hysteresis phenomena during filtration of carbonated oil in reservoirs with irreversible deformation of rocks in overlying fields. *7th Scientific Exploration Conference – Tyumen 2021: Natural Resources Management as a Cross-Functional Process*. 2021;2021:1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202150060>.
 39. SHAKHVERDIEV A.KH., PANAKHOV G.M., BAKHTIYAROV S.I., ABBASOV E.M. Oil Recovery by In-Situ Gas Generation: Volume and Pressure Measurements. ASME Joint U.S.-European Fluids Engineering Summer Meeting, Miami, FL, July 17–20, 2006.
 40. SHAKHVERDIEV A.KH., PANAKHOV G.M., BAKHTIYAROV S.I., ABBASOV E.M., SIGINER D. In-Situ Carbon Dioxide Generation for Oil Recovery: Experimental Study of Pressure and Temperature Variations during Stoichiometric Reaction. Symposium on Advances in Materials Processing Science, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Chicago, IL, November 5–10, 2006, <https://doi.org/10.1115/IMECE2006-15708>.
 41. 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. DOI: 10.1134/S1995080219100226
 42. SHAKHVERDIEV A.KH., SHESTOPALOV Y. Qualitative theory of two-dimensional polynomial dynamical systems. *Symmetry*. 2021;13(10):1884. <https://doi.org/10.3390/sym13101884>.
 43. SHAKHVERDIEV A.KH., SHESTOPALOV Y.V., MANDRIK I.E., AREFYEV S.V. Optimization of Reservoir Waterflooding with Unstable Displacement Front. *ANAS Transactions, Earth Sciences 2*. 2023:64–78. DOI: 10.33677/ggianas20230200103

Шахвердиев Азизага Ханбаба Оглы,
 д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «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: ah_shah@mail.ru

Арефьев Сергей Валерьевич,
 к.г.-м.н., начальник управления разработки нефтяных и газовых месторождений Западно-Сибирского и Пермского регионов ПАО «Лукойл»

✉ 101000, г. Москва, Сретенский бульвар, д. 11,
 101000, Moscow, Sretensky Boulevard, 11,
 тел: +7 (495) 627-44-44, e-mail: lukoil@lukoil.com,

УДК 550.3

DOI: 10.52531/1682-1696-2024-24-1-20-24

Научная статья

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЕКОНВОЛЮЦИИ В ИНЖЕНЕРНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКЕ

В.В. Романов, А.А. ИвановРОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ, МОСКВА,
РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

В статье приводится обоснование возможности применения деконволюции в инженерной сейсморазведке с целью выделения неглубоких границ и слоев небольшой мощности, например кровли скальных грунтов, прослеживании уровня грунтовых вод, выделении проявлений карстово-суффозионного процесса. Несмотря на несколько скептическое отношение геофизиков в области малоглубинных исследований к некоторым стандартным процедурам обработки нефтегазовой сейсморазведки, деконволюция может применяться при исследовании малых глубин без каких-то специальных условий. В статье этот тезис доказывается на примере подборки достаточно разнородного по качеству материала.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: инженерная сейсморазведка, метод отраженных волн, обратная фильтрация, дековолюция

ВВЕДЕНИЕ

В середине прошлого века сейсморазведка стала активно применяться на акваториях, где резкие отражающие границы «вода–воздух» и «вода–дно» создавали множество интенсивных кратных волн–помех [2]. В инженерной сейсморазведке основными кратнопобуждающими границами являются поверхность Земли, кровля скальных [12], многолетнемерзлых и водонасыщенных дисперсных грунтов [7], подошва приповерхностного слоя повышенной скорости [5]. Наибольшее влияние перечисленные границы оказывают на результаты сейсморазведки при глубине залегания до 10 м. Кроме большого количества кратных волн, при исследовании верхней части разреза сейсморазведкой, значительное влияние оказывает нелинейность грунтов [4], благодаря чему импульсы сейсмических волн растягиваются и падает разрешающая способность.

© 2024, В.В. Романов, А.А. Иванов
Поступила в редакцию 15.10.2023

Original article

EXPERIENCE OF USING DECONVOLUTION IN ENGINEERING SEISMIC EXPLORATION

V.V. Romanov, A.A. IvanovSERGO ORDZHONIKIDZE RUSSIAN STATE
UNIVERSITY FOR GEOLOGICAL PROSPECTING,
MOSCOW, RUSSIAN FEDERATION

The article provides a rationale for the possibility of using deconvolution in engineering seismic exploration in order to identify shallow boundaries and layers of low thickness, for example, the roof of rocky soils, tracking groundwater levels, and identifying manifestations of the karst-suffusion process. Despite the somewhat skeptical attitude of geophysicists in the field of shallow-depth studies to some standard procedures for processing oil and gas seismic exploration, deconvolution can be applied to the study of shallow depths without any special conditions. In the article, this thesis is proven using the example of a selection of sufficiently heterogeneous in quality surveys.

KEYWORDS: engineering seismic exploration, reflected wave method, reverse filtration, deconvolution

Эффективным способом компенсации сжатия импульсов волн стали предложенные Э.А. Робинсоном алгоритмы обратной фильтрации, применение которых называется деконволюцией [3, 11, 16, 18]. Основная идея деконволюции – уменьшение длительности сигнала за счет подавления его побочных экстремумов (рис. 1).

В основном применяются, выделяются два алгоритма обратной фильтрации — деконволюция сжатия и предсказывающая деконволюция. Деконволюция сжатия (spiking deconvolution) основана на приведении импульсов сейсмических волн к бесконечно короткому всплеску — дельта-импульсу. На практике деконволюция сжатия просто уменьшает длину импульса. Предсказывающая деконволюция (predictive deconvolution) также применяется для сокращения сейсмических импульсов за счет вычитания спрогнозированных значений в «хвосте» импульса [20]. Важным параметром предсказывающей деконволюции является интервал предсказания α — количество отсчетов, на которое прогнозируются значения импульса. С увеличением интервала предсказания растет

устойчивость обратной фильтрации к случайным колебаниям, но уменьшается степень сжатия импульсов (рис. 2). Если интервал предсказания выбрать равным единице, то действие обоих алгоритмов будет одинаковым. За счет возможности управлять параметром предсказания, предсказывающая деконволюция имеет большую гибкость настройки, ее результаты более устойчивы к уровню обрабатываемых данных [15].

В наземной инженерной сейсморазведке форма импульса до проведения полевого эксперимента обычно неизвестна, поэтому оператор обратного фильтра вычисляется на основе значений автокорреляционной функции (АКФ), определяемой по самим сейсмическим данным [6].

Целью работы является обобщение опыта по эффективному применению деконволюции при обработке данных методов отраженных и преломленных волн инженерной сейсморазведки. С этой целью алгоритмы деконволюции были адаптированы для системы обработки SeisShall (разработчик В.В. Романов, Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2016613644, 01.04.2016.) и апробированы на большом количестве полевых сейсмических данных, полученных в Московском регионе.

**МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ
И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**

Так как эффективность деконволюции во многом зависит от уровня сейсмического шума в исходных данных [19], для тестирования выбирались записи

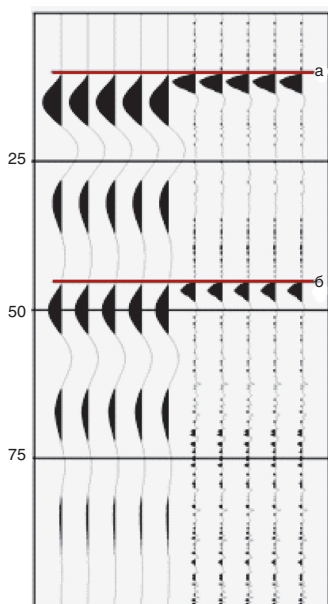


Рис. 1.

Сжатие импульсов сейсмических волн деконволюцией на примере модельных данных, полученных авторами. Первые 5 трасс – исходные, последующие – обработанные. По вертикальной оси – время вступления, мс; по горизонтальной – номер трассы. а, б – вступления волн

с достаточно высоким уровнем полезных регулярных волн. К таким волнам относились однократные и кратные отражения, а также преломленные волны, сформированные на резких сейсмических границах. На территории Московского региона — это уровень грунтовых вод для продольных волн, кровля каменноугольных, реже юрских отложений, при использовании поперечных волн. После регулировки амплитуд и полосовой фильтрации рассчитывалась автокорреляционная функция сейсмограмм и вычислялся оператор обратного фильтра [1]. Длина оператора фильтра ЛОП выбиралась равной длине импульса (60–120 мс), а интервал предсказания $\alpha=1-5$ отсчетов, выбор конкретных оптимальных значений осуществлялся путем анализа результатов обработки. Наилучшим считался набор параметров, обеспечивающих максимальное сжатие импульсов и минимальный уровень шума после деконволюции. На рисунке 3 показаны результаты тестирования параметров деконволюции. Разделение двух отраженных волн, приуроченных к каменноугольным отложениям, стало возможным только после выполненной предсказывающей деконволюции с правильно выбранными параметрами. Приведенный пример показывает важность применения деконволюции при обработке данных метода отраженных для решения задач поиска и разделения целевых волн [8].

Также деконволюция продемонстрировала свои возможности при обработке данных в вертикальном сейсмическом профилировании (ВСП) [9], где за счет сжатия импульсов повышалась точность корреляции и улучшалось прослеживание волн в последующих вступлениях [17], в первую очередь – отраженных. На рисунке 4 представлены результаты деконволюции данных ВСП, полученные по схеме наблюдений Y-Y, оптимальной для возбуждения и регистрации поперечных волн [10], на востоке Москвы. На необработанных данных в области последующих вступлений наблюдаются длительные паразитные колебания, вызванные плохим прижимом зонда ВСП к обсадке

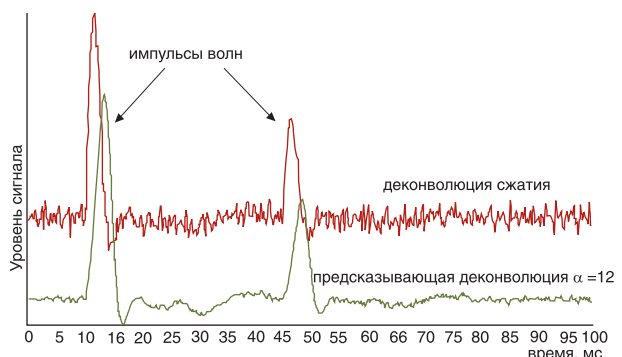


Рис. 2.

Сравнение действия двух видов деконволюции на примере модельных данных, полученных авторами

скважины или(и) обсадной колонны к горным породам [14]. Для подавления подобных мешающих колебаний длина оператора обратного фильтра увеличилась до 120–200 мс. После деконволюции уровень паразитных колебаний уменьшился.

Деконволюция применялась также при обработке уже сформированных сейсмических изображений – временных разрезов методов отраженных и преломленных волн. На просуммированных трассах форма импульса отличается большей стабильностью, поэтому обратная фильтрация на этом этапе обработки более эффективна, чем до суммирования [13]. На рисунке 5 показано применение деконволюции к временному разрезу метода отраженных волн. Разрез был получен на площадке в районе метро Шелепиха (Москва), выделенная отражающая граница приурочена к кровле каменноугольных известняков касимовского яруса. За счет сжатия импульсов была уточнена форма отражения, было выделено больше мелких деталей в рельефе границы.

ВЫВОДЫ

В результате анализа полученных результатов удалось доказать высокую эффективность включения предсказывающей деконволюции в граф обработки данных инженерной сейсморазведки. Благодаря сжатию импульсов повышается надежность выделения волн на сейсмических записях и определения их типа, точность определения времени вступления и скорости волн, глубин прослеживаемых границ. Данный алгоритм обработки рекомендуется применять при обработке данных метода отраженных волн и вертикального сейсмического профилирования.

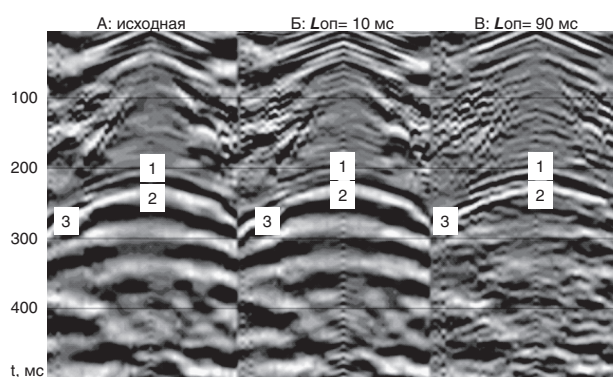


РИС. 3.

Сжатие импульсов сейсмических волн деконволюцией на примере полевых данных метода отраженных волн, полученных авторами в районе метро Таганская (Москва) в зимнее время. А – исходная сейсмограмма, Б – после предсказывающей деконволюции (длина оператора 10 мс, интервал предсказания – 1 отсчет), В – после предсказывающей деконволюции (длина оператора 90 мс, интервал предсказания – 1 отсчет) По горизонтали отложено удаление, м; по вертикали – время вступления, мс; 1 – первая отраженная волна, 2 – вторая отраженная волна, 3 – дифрагированная волна

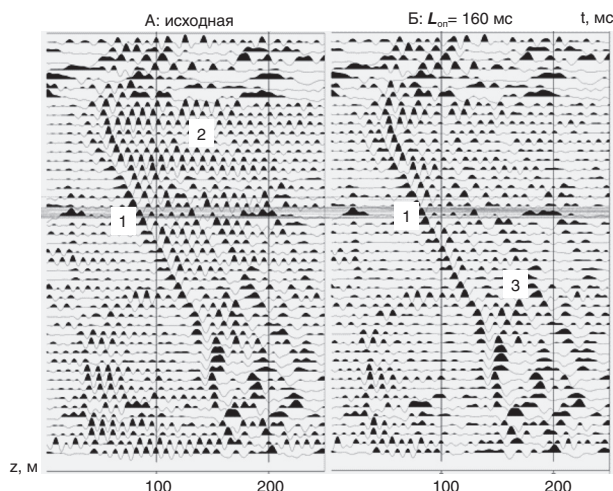


РИС. 4.

Сжатие импульсов сейсмических волн деконволюцией на примере полевых данных ВСП (поперечные волны), полученных на северо-востоке Москвы. А – исходная сейсмограмма, Б – после предсказывающей деконволюции (длина оператора 160 мс, интервал предсказания – 1 отсчет). По горизонтали отложено время вступления, мс; по вертикали – глубина, м; 1 – прямая волна, 2 – паразитные резонансные колебания, 3 – отраженные волны

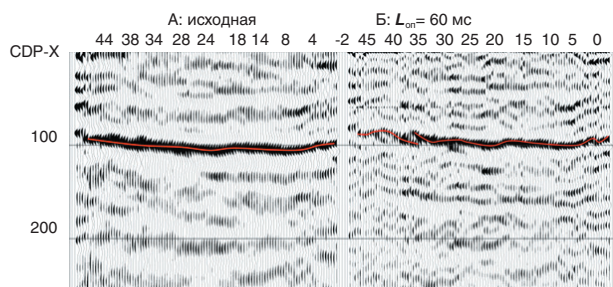


РИС. 5.

Сжатие импульсов сейсмических волн деконволюцией на примере временных разрезов метода отраженных волн (поперечные волны), полученных в районе метро Шелепиха (Москва) на асфальтовом покрытии. А – исходный разрез, Б – после предсказывающей деконволюции (длина оператора 60 мс, интервал предсказания – 1 отсчет). По горизонтали отложены координаты пунктов профиля, по вертикали – время вступления, мс, красной линией показано отражение от кровли известняков касимовского яруса

ЛИТЕРАТУРА

1. БЕЛОУСОВ А.В., СЕРГЕЕВ К.С. Особенности обработки данных инженерной сейсморазведки // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики. 2015. С. 16–18.
2. БОНДАРЕНКО В.И., РАШИДОВ В.А. Строение вулканического массива Ушишир (центральные Курилы) // Вулканология и сейсмология. 2018. № 1. С. 18–34. DOI 10.7868/S0203030618010029. EDN YOFVLE.
3. ВЕРПАХОВСКАЯ А.О. Эффективность обработки данных морской сейсморазведки с применением

- конечно-разностной миграции // Геология и полезные ископаемые мирового океана. 2017. № 3 (49). С. 73–85.
4. **Владов М.Л., Капустин В.В.** О проблемах инженерной сейсморазведки // Технологии сейсморазведки. 2014. № 2. С. 104–112. EDN STFSUT.
 5. **Гинодман А.Г., Гранит Б.А.** Инженерно-геофизические исследования карста на территории Москвы и московского региона методом многоволновой сейсморазведки // Вестник МГСУ. 2010. № 4–2. С. 120–127.
 6. **Копчиков А.В., Баев А.В., Табаков А.А.** Метод решения обратной динамической задачи ВСП с применением автокорреляционных функций // Технологии сейсморазведки. 2004. №1.
 7. **Крылатков С.М., Крылаткова Н.А., Нещеткин О.Б.** Исследование карстоопасных участков железных дорог с помощью сейсморазведки // Известия Уральского государственного горного университета. 2003. № 18. С. 177–185.
 8. **Ли В.О., Владов М.Л.** Анализ эффективности 2D сейсморазведки методом ОГТ при изучении приповерхностной части разреза // Вестник Московского университета. 2012. № 3. Серия 4: Геология. С. 52–60.
 9. **Ошкин А.Н., Хуснулина Г.Ф.** Возможности и перспективы сейсмоакустических исследований скважин // Технологии сейсморазведки. 2015. Т. 1. С. 92–98.
 10. **Рагозин Н.А., Миндель И.Г., Трифонов Б.А.** Опыт сравнения программ обработки данных МОБ-ОГТ // 6th EAGE International Scientific and Practical Conference and Exhibition on Engineering and Mining Geophysics. European Association of Geoscientists & Engineers, 2010. С. ср-193-00051.
 11. **Романов В.В., Иванов А.А., Матюшенко А.А.** Опыт обратной фильтрации данных георадиолокации, полученных при исследовании автодорог / Инженерная сейсморазведка и сейсмология-2020. Георадар-2020. Теперь вместе: сборник тезисов научно-практической конференции, Москва, 16–22 октября 2020 г. Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН. М.: Издательский Дом «Академия Естествознания», 2020. С. 25–29.
 12. **Романов В.В., Шнеерсон М.Б.** Инженерная сейсморазведка методом отраженных волн в Москве // Геофизика. 2018. № 6. С. 75–81. EDN SRACOD.
 13. **Холмянская Н.Ю.** Оптимизация методики обработки сейсморазведочных данных МОГТ с целью изучения верхнеюрских отложений Широного Приобья // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2001. № 7. С. 42–49. EDN HZMWMB.
 14. **Шехтман Г.А., Нарский Н.В.** Факторы, влияющие на качество данных вертикального сейсмического профилирования // Технологии сейсморазведки. 2011. № 2. С. 59–69.
 15. **JURKEVICIS A., WIGGINS R.** A critique of seismic deconvolution methods // Geophysics. 1984. Vol. 49. № 12. P. 2109–2116.
 16. **SILVIA M.T., ROBINSON E.A.** Deconvolution of Geophysical Time Series in the Exploration for Oil and Natural Gas. Developments in petroleum science. 10. Amsterdam: Elsevier. 1957. 251 p.
 17. **KENNETT P., IRESON R.L., CONN P.J.** Vertical seismic profiles: Their applications in exploration geophysics // Geophysical Prospecting. 1980. Vol. 28. № 5. P. 676–699.
 18. **MILLER R.D., BRADFORD J.H., HOLLIGER K. ET AL.** Advances in near-surface seismology and ground-penetrating radar. Society of Exploration Geophysicists, American Geophysical Union, Environmental and Engineering Geophysical Society, 2010.
 19. **POLOM U. ET AL.** High-resolution SH-wave seismic reflection for characterization of onshore ground conditions in the Trondheim harbor, central Norway // Advances in near-surface seismology and ground-penetrating radar. Society of Exploration Geophysicists, American Geophysical Union, Environmental and Engineering Geophysical Society, 2010. P. 297–312.
 20. **Yilmaz Ö** Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data. Society of exploration geophysicists, 2001.

REFERENCES

- Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta.* 2003;18:177–185. (In Russian).
8. LEE V.O., VLADOV M.L. Analysis of the effectiveness of 2D seismic exploration using the CDP method when studying the near-surface part of the section. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Geologiya.* 2012;3;4:52–60. EDN PCXNXD. (In Russian).
 9. OSHKIN A.N., KHUSNULLINA G.F. Possibilities and prospects of seismoacoustic well research. *Tekhnologii seysmorazvedki.* 2015;1:92–98. (In Russian).
 10. RAGOZIN N.A., MINDEL I.G., TRIFONOV B.A. Experience in comparing MOV-CDP data processing programs. *6th EAGE International Scientific and Practical Conference and Exhibition on Engineering and Mining Geophysics. European Association of Geoscientists & Engineers.* 2010:cp-193-00051. (In Russian).
 11. ROMANOV V.V., IVANOV A.A., MATYUSHENKO A.A. Experience of reverse filtering of ground penetrating radar data obtained during the study of highways. Engineering seismic exploration and seismology-2020. GPR 2020. Now together: collection of abstracts of a scientific and practical conference, Moscow, October 16–22, 2020. Institute of the Earth's Cryosphere of the Tyumen Scientific Center SB RAS. Moscow: Izdatel'skiy Dom «Akademiya Yestestvoznaniya». 2020:25–29. (In Russian).
 12. ROMANOV V.V., SHNEERSON M.B. Engineering seismic exploration using the reflected wave method in Moscow. *Geophysica.* 2018;6:75–81. (In Russian).
 13. KHOLMYANSKAYA N.YU. Optimization of the methodology for processing CDP seismic data for the purpose of studying the Upper Jurassic deposits of the latitudinal Ob region. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy.* 2001;7:42–49. (In Russian).
 14. SHEKHTMAN G.A., NARSKY N.V. Factors influencing the quality of vertical seismic profiling data. *Tekhnologii seysmorazvedki.* 2011;2:59–69. (In Russian).
 15. JURKEVICS A., WIGGINS R. A critique of seismic deconvolution methods. *Geophysics.* 1984;49;12:2109–2116.
 16. SILVIA M.T., ROBINSON E.A. Deconvolution of Geophysical Time Series in the Exploration for Oil and Natural Gas. *Developments in petroleum science.* 10. Amsterdam: Elsevier. 1957:251.
 17. KENNETT P., IRESON R.L., CONN P.J. Vertical seismic profiles: Their applications in exploration geophysics. *Geophysical Prospecting.* 1980;28;5:676–699.
 18. MILLER R.D., BRADFORD J.H., HOLLIGER K. ET AL. Advances in near-surface seismology and ground-penetrating radar. Society of Exploration Geophysicists, American Geophysical Union, Environmental and Engineering Geophysical Society, 2010.
 19. POLOM U. ET AL. High-resolution SH-wave seismic reflection for characterization of onshore ground conditions in the Trondheim harbor, central Norway. *Advances in near-surface seismology and ground-penetrating radar.* Society of Exploration Geophysicists, American Geophysical Union, Environmental and Engineering Geophysical Society, 2010:297–312.
 20. Yilmaz Ö Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data. Society of exploration geophysicists. 2001.

Романов Виктор Валерьевич,
к.т.н., доцент кафедры геофизики Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе (МГРИ)

Иванов Андрей Александрович,
к.г.-м.н., доцент кафедры геофизики Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе (МГРИ)

✉ 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23,
тел: +7 (495) 433-62-56, доб. 2152
117997, Moscow, Miklouho-Maclay St., 23

УДК 502/504+55

DOI: 10.52531/1682-1696-2024-24-1-25-34

Научная статья

К ВОПРОСУ ПОДГОТОВКИ ВОДЫ, ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ДЛЯ СИСТЕМЫ ЗАВОДНЕНИЯ, ПРИ УСЛОВИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПРОЦЕССА

М.Ю. КИЛЬЯНОВ¹,
Л.В. ИГРЕВСКИЙ¹,
В.А. ЛАВРЕНЧУК¹, А.В. МУРАДОВ¹,
В.И. ДЕМИРОВ²

¹ФГАОУ ВО «РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ НЕФТИ И ГАЗА

(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ) ИМЕНИ И.М. ГУБКИНА»,
МОСКВА, РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

²УПРАВЛЕНИЕ РАКЕТНОГО ТОПЛИВА
И ГОРЮЧЕГО ДЕПАРТАМЕНТА РЕСУРСНОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ
РФ, МОСКВА, РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

Приведенные в статье результаты исследований показали, что при использовании различных типов воды для поддержания пластового давления технологические схемы установок водоподготовки имеют существенные различия. Воздействие процессов заводнения продуктивного пласта на состояние территории, непостоянство и сложность состава вод, применяемых для поддержания пластового давления, обуславливают необходимость проведения непрерывного экологического мониторинга в зоне влияния нефтегазового месторождения.

Ключевые слова: система поддержания пластового давления, непрерывный экологический мониторинг, подготовка воды для системы ППД

В целях достижения максимальных показателей отбора нефти из пласта при разработке нефтегазовых месторождений применяются меры по поддержанию пластового давления (ППД). При этом в пласт закачиваются различные типы воды.

Как показывает опыт разработки отечественных и зарубежных месторождений, заводнение является довольно эффективным методом воздействия для под-

Original article

ON THE ISSUE OF WATER TREATMENT USED FOR THE WATERFLOODING SYSTEM, PROVIDED THAT ENVIRONMENTAL MONITORING OF THE PROCESS IS ENSURED

M.YU. KILYANOV¹, L.V. IGREVSKY¹,
V.A. LAVRECHUK¹, A.V. MURADOV¹,
V.I. DEMIROV²

¹FGAOU VO "RUSSIAN STATE UNIVERSITY
OF OIL AND GAS (NATIONAL RESEARCH
UNIVERSITY) NAMED AFTER I.M. GUBKIN",
MOSCOW, RUSSIAN FEDERATION

²DIRECTORATE OF ROCKET FUEL AND
FUEL, DEPARTMENT OF RESOURCE SUPPLY,
MINISTRY OF DEFENSE OF THE RUSSIAN
FEDERATION, MOSCOW, RUSSIAN FEDERATION

The research results presented in the article have shown that when using different types of water to maintain reservoir pressure, the technological schemes of water treatment plants have significant differences. The impact of the processes of reservoir flooding on the state of the territory, the inconstancy and complexity of the composition of the waters used to maintain reservoir pressure, necessitate continuous environmental monitoring in the area of influence of the oil and gas field.

KEYWORDS: reservoir pressure maintenance system, continuous environmental monitoring, water treatment for reservoir pressure maintenance system

держания пластового давления, но при строгом соблюдении необходимых требований к технологии его осуществления.

Согласно классификации А.М. Овчинникова все природные воды по минерализации классифицируются по 6 типам (табл. 1).

Согласно академику В.И. Вернадскому (1933), все воды (в том числе и поверхностные) по величине минерализации подразделяются на четыре класса (табл. 2).

Для поддержания пластового давления в залежь можно нагнетать как природные (пресные или слабо-

ТАБЛИЦА 1.

Классификация природных вод по величине минерализации по А.М. Овчинникову [10]

Тип вод	Минерализация, г/дм ³
ультрапресные	> 0,2
пресные	0,2–0,5
воды с относительно повышенной минерализацией	0,5–1
солончатые	1–3
солёные	3–10
воды повышенной солёности	10–35

минерализованные), так и сточные (дренажные) воды, состоящие в основном, из пластовых (~ 85%), пресных (~ 10%) и ливневых (~ 5%) вод. В пласт обычно закачивается более 1 млрд м³ воды в год, в том числе 700–750 млн м³ пресной.

Природные и сточные воды весьма разнообразны по своему химическому составу, содержат различное количество примесей органического и неорганического происхождения. В природных водах могут содержаться различные газы, механические примеси, гидроокись Fe(OH)₂ и гидроокись Fe(OH)₃ железа, а также микроорганизмы, в той или иной степени влияющие на процесс заводнения пластов. В сточных водах нефтегазовых месторождений присутствует нефть, ПАВ, а также большое количество солей, достигающее до 300 г/л.

НЕОБХОДИМОСТЬ НЕПРЕРЫВНОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДА ЗАВОДНЕНИЯ ПРОДУКТИВНЫХ ПЛАСТОВ

Жидкость, циркулирующая по системе ППД, как правило, представляет собой агрессивную смесь вод, состав которой, резко отличается от природных фоновых концентраций поверхностных вод, и различных горизонтов подземных вод.

С точки зрения экологии нефтегазовые месторождения в общем рассматриваются как источники комплексного и концентрированного негативного воздействия на окружающую среду [3]. В целях снижения негативного воздействия экологический мониторинг состояния компонентов природной среды нефтегазовых месторождений осуществляется в рамках производственного экологического контроля.

В результате смешения промышленных вод разного генезиса (природных вод нефтесодержащих пластов, поверхностных вод, технических вод нефтегазопромыслов, в том числе, с примесью буровых растворов, хозяйственно-бытовых вод, производственных вод, поверхностного стока, а также вод межпластовых пе-

М.Ю. КИЛЬЯНОВ, А.В. ИГРЕВСКИЙ, В.А. ЛАВРЕНЧУК, А.В. МУРАДОВ, В.И. ДЕМИРОВ
К ВОПРОСУ ПОДГОТОВКИ ВОДЫ, ИСПОЛЪЗУЕМОЙ ДЛЯ СИСТЕМЫ ЗАВОДНЕНИЯ, ПРИ УСЛОВИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПРОЦЕССА

ТАБЛИЦА 2.

Классификация вод по величине минерализации по В.И. Вернадскому [2]

Класс вод	Минерализация, г/л
пресные	< 1
солончатые (слабоминерализованные)	1–10
солевые (минерализованные)	10–50
рассолы	> 50

ретоков), происходит их химическое взаимодействие. Пластовая жидкость воздействует на окружающую среду комплексно, одновременно загрязняя почвы и воды нефтью и водорастворимыми солями.

При применении промышленных вод для ППД необходимым условием является замкнутость цикла водоподготовки. В зависимости от химического состава нефтепромысловые сточные воды обладают различной агрессивностью по отношению к металлу, бетону и другим материалам. Основными коррозионными агентами сточных вод являются растворенные соли различного состава, кислород, сероводород. Утечка вод через обсадные колонны эксплуатационных и нагнетательных скважин по заглубленному пространству из-за просадки цемента или из-за некачественного цементного раствора вызывает загрязнение подземных водоносных горизонтов.

Поступление в почву больших объемов минерализованных вод, в случае аварийных ситуаций, вызывает усиление восстановительных процессов и засоление территории. Преимущественно наблюдается хлоридно-натриевое засоление. Утечки пластовой жидкости из скважин, прежде всего, обнаруживаются по увеличению концентрации хлоридов (наиболее подвижных соединений) и люминесцентной пленке в воде.

Частицы водорослей, ила и соединения железа, содержащиеся в нагнетаемой воде, могут закупоривать поровые каналы продуктивного пласта, снижая прирост нагнетательных скважин. Присутствующие же в закачиваемой воде микроорганизмы могут образовать нежелательные соединения. Так, например, сульфатвосстанавливающие бактерии при своей жизнедеятельности вырабатывают сероводород в количестве до 100 мг/л. В последующем этот коррозионно-активный газ вместе с нефтью извлекается на поверхность и подвергается разрушению трубопроводы, аппараты и оборудование. Данное обстоятельство обуславливает потребность принятия дополнительных мер по повышению промышленной безопасности и предотвращению экономического и

экологического ущерба. Таким образом, регулирование биологического состава вод, используемых для ППД выступает важной противоаварийной мерой.

Закачка вод в глубокие горизонты в целях ПДД, может стать причиной, повышения гидростатического давления, наведенной сейсмичности и опускания территории. В связи с неизбежным повреждением гидро- и газонепроницаемости отдельных пород возможно появление просадок или оползней грунтов, спровоцированных локальными землетрясениями [4].

Заводнение продуктивных пластов повышает риск подтопления территории месторождений, что дополнительно усиливает процессы возникновения оползней, просадок, провалов и набухания грунтов. При этом также активизируются коррозионные процессы подземных инженерных конструкций. Кроме того, подтопление увеличивает возможность подъема жидких и газообразных углеводородов к поверхности земли, что создает взрыво- и пожароопасную обстановку.

Важным аспектом в процессе циркуляции пластовых вод также выступает возможность загрязнения оборудования естественными радионуклидами и в целом локальное повышение радиационного фона. Сброс нефтяных суспензий и пластовых вод может привести к повышению радиационного фона от 20-40 мкР/ч до 1000 мкР/ч и более. Зараженность радионуклидами наполнителей фильтров, нефтешлама, отходов от очистки резервуаров и оборудования может достигать до 3000 и 5600 мкР/ч. При общем фоне 8 – 12 мкР/ч. При наличии урано-битумных образований сопутствующими элементами могут выступать радий, молибден, ванадий, фосфор, ртуть, селен, никель, кобальт, серебро [4]. Соответственно, при ведении работ обязательным условием является соблюдение мер радиационной безопасности.

Негативное воздействие на окружающую среду в процессе заводнения продуктивных пластов происходит по разным причинам: вследствие нарушения технологии, износа оборудования, аварийных ситуаций, изменения режима пластов и т.д. Повышенный риск возникновения аварийных ситуаций, обусловленный применением метода заводнения пластов, влечет за собой необходимость повышенных мер предосторожности.

Решение поставленных выше задач осуществляется с помощью различных видов контроля за недрами, техническим состоянием скважин и промышленных объектов и обуславливает необходимость осуществления экологического мониторинга компонентов окружающей среды. Контроль необходимо осуществлять непрерывно: фиксируются технические параметры функционирования объектов и их соответствие регламентным нормам. Постоянный контроль осуществляется за теми показателями химического состава, физическими и динамическими характеристиками, от

которых, прежде всего, зависит надежность и устойчивость эксплуатации скважин.

Организация экологического мониторинга нефтегазодобывающего комплекса, включающего природные, природно-техногенные и чисто техногенные факторы, довольно серьезная задача [4], которая, кроме того, осложняется неоднородностью природных условий различных месторождений.

Нормы федерального закона от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» по вопросу экологического мониторинга реализованы в национальном стандарте Российской Федерации ГОСТ Р 56059-2014 «Производственный экологический мониторинг. Общие положения» (Переиздание) (в ред. 1 сентября 2019).

Непрерывность экологического мониторинга обеспечивается за счет наблюдения за динамикой состояния компонентов окружающей среды на разных стадиях функционирования объекта. В качестве базовой информации используются данные о состоянии природных сред до начала геологоразведочных работ, полученные в процессе проведения ОВОС или оценки фонового состояния территории.

Экологический мониторинг разрабатываемых нефтегазовых месторождений должен охватывать все компоненты природной среды. Необходимость этого объясняется не только спецификой производственного процесса по добыче углеводородного сырья, связанной с применением системы ППД, но и с наличием тесных общеэкологических связей между природными компонентами, когда изменения одного из них неизбежно влекут изменения следующего. Пример ежегодного план-графика отбора проб и наблюдений в пунктах экологического мониторинга территории, приведенный по данным Программы локального экологического мониторинга на территории Южно-Песцового лицензионного участка ООО «Газпром добыча Уренгой» на период 2019–2023 гг., представлен в табл. 3.

Как следует из примеров мониторингу подвергаются следующие компоненты природной среды: атмосферный воздух, снеговые выпадения, поверхностные воды, донные отложения, почвы.

При использовании метода заводнения для ППД отдельно хотелось бы подчеркнуть необходимость мониторинга грунтовых вод различных водоносных горизонтов. Подобный мониторинг обычно применяется на объектах наблюдательной сети в районах расположения скважин питьевого водоснабжения. Безусловно, такой мониторинг связан с дополнительными расходами, однако дает возможность получения более полной картины воздействия на окружающую среду.

Качество промысловых сточных вод различных нефтяных месторождений изменяется в широких пределах и зависит от геологических свойств месторождения, времени его разработки, технической

ТАБЛИЦА 3.

Ежегодный план-график отбора проб и наблюдений в пунктах экологического мониторинга территории Южно-Песцового лицензионного участка в 2019–2023 гг. [9]

Компонент	Сроки наблюдения											
	ян-варь	фев-раль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сен-тябрь	окт-ябрь	но-ябрь	де-кабрь
Атмосферный воздух						+						
Снежный покров				+					+			
Поверхностные воды					+			+				
Донные отложения								+				
Почвы								+				

оснащенности и методов очистки стоков. Поскольку воды, закачиваемые в систему ППД, это, как правило, продукт смешения различных типов вод, то возникает острая необходимость их правильной диагностики. Современные системы автоматизации позволяют централизованно управлять качеством применяемой воды с помощью систем дистанционного мониторинга. Особенно это актуально для небольших месторождений, расположенных в труднодоступных районах.

К настоящему времени создано множество методик и приборов для экологического мониторинга. Однако с точки зрения экологии нельзя считать закрытым вопрос о разработке наиболее оптимальных методов, поскольку у каждого из них есть свои преимущества и недостатки. В целях организации систематического наблюдения разрабатывается соответствующая программа исследований, проводится статистическая обработка данных по отбору проб. Методики, точки отбора проб и периодичность отбора устанавливаются в соответствии с программой исследования.

В связи с практически круглогодичной работой систем ППД важным условием выступает необходимость непрерывной обработки полученных данных и применении поточных измерительных приборов.

Таким образом, повышенный риск возникновения различных аварийных ситуаций при применении метода заводнения для ППД, обуславливает необходимость организации непрерывного экологического мониторинга нефтегазовых месторождений.

ПОДГОТОВКА ВОДЫ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СИСТЕМЕ ППД

При установлении необходимой степени подготовки вод, используемых для системы ППД, учитываются петрофизические свойства нефтяного пласта (пористость, проницаемость), состав пород, диапазон изменения основных свойств коллекторов, слагающих

пласт, качественный состав и количество в горной породе глин, физико-химические свойства пластовой и нагнетаемой воды [7].

Наряду с высокими нефтевытесняющими свойствами важными аспектами являются обеспечение высокой степени фильтрации и экологическая приемлемость состава. Характер снижения приемистости нагнетательных скважин даже в пределах одного месторождения отличается своим разнообразием и зависит от качества применяемых вод.

Ухудшение коллекторских свойств зоны, примыкающей к скважине, может происходить в результате:

- сужения поровых каналов и полной закупорки части из них за счет проникновения твердых частиц дисперсной фаз (промывочной жидкости или загрязненной закачиваемой воды);
- набухания глинистых минералов пласта при контакте с закачиваемой водой;
- образования нерастворимых осадков при взаимодействии закачиваемых вод с пластовыми;
- образования стойких водонефтяных эмульсий, уменьшающих подвижность пластовой жидкости в зоне контакта;
- отрицательного влияния капиллярных и поверхностных явлений.

Основными нормируемыми параметрами при подготовке воды для системы ППД являются количество взвешенных частиц и содержание остаточных нефтепродуктов. Данные показатели должны соответствовать требованиям действующего отраслевого стандарта ОСТ 39-225-88 «Вода для заводнения нефтяных пластов. Требования к качеству» (табл. 4).

При единой системе организации ППД нагнетаемая вода должна по качеству соответствовать нормативам для самых низкопроницаемых пластов.

Таким образом, согласно ОСТ 39-225-88 используемая для системы ППД вода должна соответствовать ниже перечисленным требованиям.

ТАБЛИЦА 4.

Допустимое содержание механических примесей и нефти в закачиваемой воде в зависимости от проницаемости продуктивного коллектора

Проницаемость пористой среды коллектора, мкм	Коэффициент относительной трещиноватости коллектора*	Допустимое содержание в воде, мг/л	
		механические примеси	нефти
до 0,1 вкл. свыше 0,1	– –	до 3 до 5	до 5 до 10
до 0,35 вкл. свыше 0,35	от 6,5 до 2 вкл. менее 2	до 15 до 30	до 15 до 30
до 0,6 вкл. свыше 0,6	от 35 до 3,6 вкл. менее 3,6	до 40 до 50	до 40 до 50

* – коэффициент относительной трещиноватости определяется в соответствии с РДС 39-01-041-81 «Методика прогнозного определения норм качества сточных вод для внутриконтурного заводнения новых нефтяных месторождений платформенного типа. Содержание механических примесей и нефти в сточной воде»

Механические примеси присутствуют в воде как «изначально» (песок, частицы слагающих породу минералов, глин, гидроокиси железа, малорастворимых солей, агрегаты асфальтенов, кристаллики парафинов), так и образуются в результате различных химических реакций, протекающих при контакте закачиваемых вод с пластовой водой, нефтью и породой, химическими реагентами.

При использовании для заводнения продуктивных пластов подтоварной воды ощутимое снижение приемистости скважины (вплоть до полного прекращения закачки) вызывает присутствие остаточного количества нефтепродуктов. Это чаще всего нефть со значительным содержанием асфальтосмолапарафиновых отложений, диспергированных в водной фазе. Глобулы остаточной нефти имеют диаметр от 0,1 до 10,0 мкм. Остаточная нефть, проникая в более крупные капиллярные каналы призабойной зоны пласта, постепенно коалесцируя и накапливаясь, может снизить приемистость скважины до полного прекращения закачки.

Закачиваемые воды должны быть совместимы с пластовыми. Наличие механических примесей иногда связано с нарушением стабильности вод. Данное обстоятельство может быть следствием необратимых химических реакций, сопровождающихся выпадением твердых солей из пересыщенных растворов. Происходит это обычно при смешении вод разного состава, химически несовместимых друг с другом. Для предотвращения образования и осаждения солей, не следует допускать смешения вод различного состава.

Ограничение или исключение возможности смешения вод различного состава является технологическим приемом предотвращения солеотложения и в нефтепромысловом оборудовании.

Набухаемость глин коллекторов в закачиваемой воде не должна превышать значения их набухаемости в воде конкретного месторождения. Возможность использования различных вод для заводнения нефтяных

месторождений в значительной степени определяется взаимодействием этих вод с породой коллектора.

Для подготовки смеси вод с заранее заданными свойствами в состав системы ППД входит станция водоподготовки, которая в наиболее общем варианте представлена различного типа емкостями-смесителями, резервуарами-отстойниками, фильтрами, системой трубопроводов и насосов.

Таким образом, основными целями водоподготовки являются:

- достижение необходимых эксплуатационных свойств (способность к нефтевытеснению, вязкость, способность обеспечивать заданный коэффициент охвата пласта), и удаление компонентов, вызывающих снижение коэффициента приемистости, а также компонентов, вызывающих ухудшение качества нефти;

- доведение закачиваемой воды до кондиций (по составу, физико-химическим свойствам, содержанию механических примесей, кислорода, микроорганизмов), удовлетворяющих требованиям проектных документов к качеству в соответствии с указанным отраслевым стандартом.

В зависимости от требований к закачиваемой воде, а также экологических и технико-экономических условий, воды наземных источников подготавливаются двумя способами – с подрусловым и с открытым отбором воды. Принципиальная схема подготовки воды открытых водоемов и грунтовых вод представлена на рис. 1.

В качестве вытесняющего агента для разработки продуктивных пластов нефтяных месторождений предпочтительно выглядят собственно пластовые и подтоварные воды.

Подтоварные воды образуются при очистке сырой нефти от пластовой воды перед ее товарной обработкой и транспортировкой способом гравитационного отстаивания в резервуарах-отстойниках. Благодаря разной плотности нефтяная эмульсия разделяется на

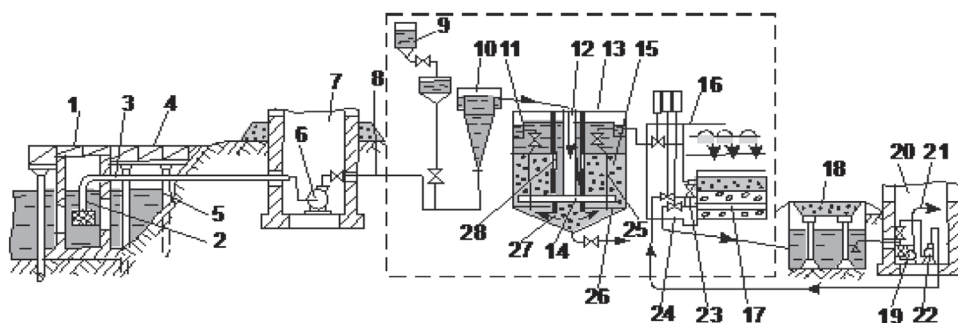


РИС. 1.

Принципиальная схема подготовки воды открытых водоемов и грунтовых вод [2].

1 – колодезь; 2 – приемная сетка; 3, 8, 21 – водоводы; 4 – мостик; 5 – сваи; 6, 19 – насосы; 7, 20 – насосные станции I и II подъема; 9 – дозатор; 10 – смеситель; 11 – лоток; 12 – центральная труба; 13 – осветитель; 14 – раздаточный коллектор; 15 – пространство для хлопьеобразования; 16 – гравийно-песчаные фильтры; 17 – коллектор; 18 – подземный резервуар; 19, 22 – насос для промывки песчаных фильтров; 23 – задвижка; 24 – лоток; 25 – трубки для отбора воды; 26 – глухое днище; 27 – конус отстойника; 28 – окна

воду, которая оседает на дно как более плотная среда, и нефть, поднимающуюся на поверхность.

В состав подтоварных вод входят:

- тонкоэмульгированная нефть;
- механические примеси;
- остаточное количество химических реагентов, используемых при добыче и транспортировке нефти.

Подтоварные воды по химическому составу схожи с пластовыми водами месторождения и могут содержать ионы натрия, хлора, сульфаты, хлориды, карбонаты, гидрокарбонаты, катионы кальция и магния, железо.

Подготовка подтоварной воды, для закачки в пласт, предусматривает:

- 1) осветление мутных вод коагулированием;
- 2) декарбонизацию;
- 3) обезжелезивание;
- 4) ингибирование.

Типовая схема установки подготовки подтоварных вод представлена на рис. 2.

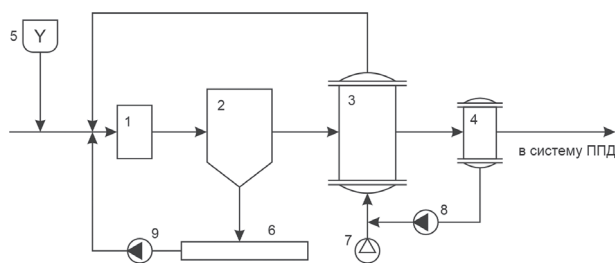


РИС. 2.

Принципиальная схема установки подготовки подтоварных вод [8].

1 – усреднитель, 2 – отстойник, 3 – фильтры (ФМ-1,2 и ФА-1,2), 4 – резервуар чистой воды, 5 – реагентное хозяйство, 6 – шламовая площадка, 7 – компрессор, 8 и 9 – насосные станции

Осветление мутных вод коагулированием осуществляется с целью удаления очень мелких взвешенных частиц, которые практически не осаждаются под действием силы тяжести. В результате реакции коагуляции происходит укрупнение взвешенных частиц и образуются хлопьевидные соединения, которые оседают в воде.

Декарбонизация выполняется с целью удаления из воды бикарбонатов кальция и магния. В противном случае, отлагаясь в пласте, соли кальция и магния могут существенно затруднить фильтрацию нефти и газа. Сущность декарбонизации состоит в подщелачивании воды гашеной известью с тем, чтобы вызвать коагуляцию ненужных примесей.

Обезжелезиванием называется удаление солей железа из воды с целью предотвращения загрязнения фильтрующих поверхностей скважин железистыми осадками. Для этого применяют аэрацию, известкование и другие методы.

В ходе аэрации, процесса обогащения воды кислородом воздуха, из солей железа образуется нерастворимый гидрат окиси железа, оседающий в воде в виде хлопьев. Однако при аэрации из воды удаляются не все соли железа, а сам процесс требует использования весьма громоздкого и сложного оборудования. Кроме того, аэрация повышает коррозионную активность воды.

При известковании в воду добавляют известковое молоко, что также приводит к образованию нерастворимого осадка гидрата окиси железа. Ингибированием называется обработка воды ингибиторами – веществами, замедляющими процесс коррозии. По направленности действия различают ингибиторы сероводородной, кислородной и углекислотной коррозии.

Реагенты-бактерициды используют для подавления жизнедеятельности сульфатовосстанавливающих бактерий. Одним из наиболее эффективных реагентов является формалин.

Таким образом, учитывая средненабухающий тип цемента, можно сказать, что использование подтоварной воды для системы ППД не будет иметь значительного отрицательного влияния. Применение же пресной речной воды может привести к увеличению набухания цемента продуктивных коллекторов.

Применение производственной воды нефтедобывающих предприятий в системе заводнения позволяет сократить расход дефицитной пресной воды для закачки в пласты и предотвратить загрязнение водоемов. Кроме того, производственные воды нефтедобывающих предприятий имеют повышенную температуру и низкое поверхностное натяжение и благодаря этому обладают большей по сравнению с речной водой нефтевымывающей способностью.

Однако, производственные воды имеют особенно сти по характеру загрязнений, в связи с тем, что они образуются при промывке резервуаров и емкостей, а также к таким водам относятся и вода, собираемая с территории нефтедобывающих предприятий в основном в весенне-осенний период.

В производственных водах основными видами загрязнений являются:

- твердые механические примеси,
- различные виды бактерий и водорослей,
- нефтепродукты.

Принципиальная схема подготовки воды приведена на рис. 3.

Хозяйственно-бытовые сточные воды мало прозрачны, имеют слабощелочную реакцию и большое содержание взвешенных веществ. Немалая доля загрязнений представляет собой органику, почти 45–58%. Неорганическая часть представлена кварцевым песком, глиной. Присутствуют соли (фосфаты, гидрокарбонаты, аммонийные соли), соединения азота, фосфор.

Принципиальная схема подготовки хозяйственно-бытовой сточной воды для закачки в систему ППД приведена на рис. 4.

Таким образом, используемая для ППД вода не должна вызывать образование нерастворимых соединений при контакте с пластовой водой, что может привести к закупорке пор, или, как говорят, должна обладать химической совместимостью с пластовой [1].

Грунтовые воды характеризуются значительным многообразием химического состава (минерализация 100–200 мг/л), небольшим содержанием взвешенных частиц.

Воды открытых водоемов значительно уступают по качеству для применения в системе ППД, содержат большое количество механических примесей (глины или песка), особенно в период ливней и паводков, снеготаяния, способны вызвать набухание глин.

Воды глубинных водоносных горизонтов в большей степени минерализованы и часто требуют минимальной дополнительной подготовки.

Сточные воды, состоящие в основном из пластовых, добываемых вместе с нефтью, высоко минерализованы (15–3000 г/л) и обладают хорошими нефтевытесняющими свойствами, что способствует увеличению нефтеотдачи пласта. Однако содержат большое количество эмульгированной нефти, механических примесей, а также диоксида углерода и сероводорода [3].

КРИТЕРИИ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО ИСТОЧНИКА ВОДЫ

Основной задачей системы водоснабжения для поддержания пластового давления является получение необходимого количества воды, пригодной для закачки в пласт, распределение ее между нагнетательными скважинами и закачивание в пласт. Конкретный

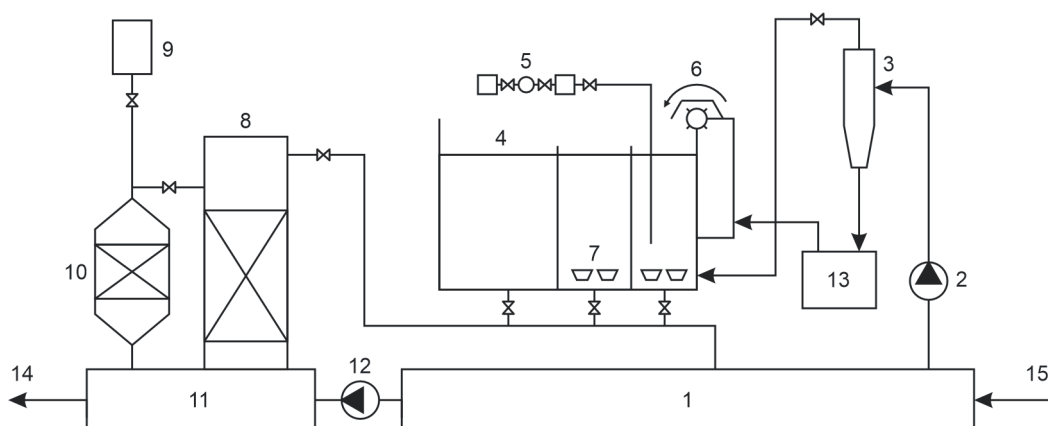


Рис. 3.

Принципиальная схема подготовки производственной воды [8].

1 – бак усреднитель, 2 – грязевой насос, 3 – гидроциклон, 4 – флотатор, 5 – блок подготовки и подачи флокулянта, 6 – лопастной пеносборник, 7 – система фильтрования, 8 – фильтр с текстильно-волоконистой загрузкой, 9 – блок приготовления и подачи гипохлорида натрия, 10 – адсорбер, 11 – бак чистой воды, 12 – насос подачи очищенных стоков, 13 – шламакопитель, 14 – в систему ППД, 15 – стоки с территории предприятия

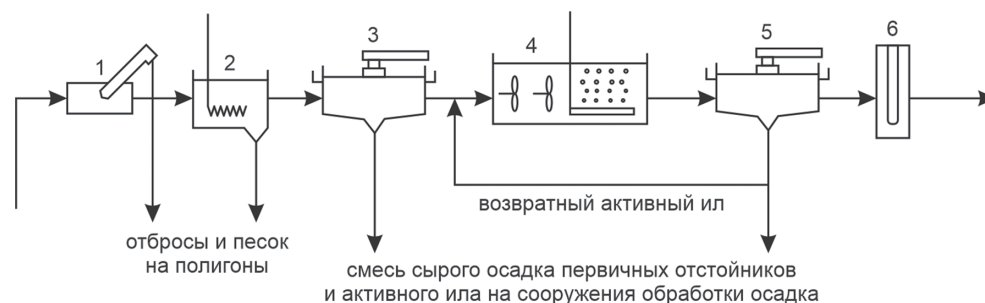


РИС. 4.

Принципиальная схема подготовки хозяйственно-бытовой сточной воды для закачки в систему ППД: 1 – решетки, 2 – песколовки, 3 – первичные отстойники, 4 – аэротенки с технологией удаления биогенных элементов, 5 – вторичные отстойники, 6 – УФ-обеззараживание.

выбор системы водоснабжения также зависит от того, на какой стадии разработки находится данное месторождение.

На первоначальном этапе разработки месторождения необходимо большое количество (практически 100%) пресной воды. Это связано с тем, что добывающие скважины на этой стадии дают практически безводную продукцию. Затем скважины все больше обводняются, появляется больше попутной воды, которая должна быть утилизирована. В связи с этим системы водоснабжения должны видоизменяться и приспособляться к конкретным этапам разработки месторождения. Система водоснабжения должна предусматривать рост обводненности продукции скважин и необходимость утилизации всех, промышленных сточных вод, включая ливневые, попутные, воды установок по подготовке нефти и другие.

Для снижения негативного воздействия на окружающую среду важно предусматривать 100%-ную утилизацию сточных вод и работу всей системы ППД по замкнутому технологическому циклу.

Это усложняет систему водоснабжения, обуславливает необходимость специальной подготовки сточных вод, очистки их от нефтепродуктов и взвеси, борьбы с возрастающей коррозией технологического оборудования и водоводов.

Конкретный выбор системы водоснабжения зависит от потенциально доступных источников воды для закачки в пласт, которыми могут быть:

- открытые поверхностные источники (реки, водохранилища, озера, моря);
- грунтовые, к которым относятся подрусловые воды;
- подтоварная вода, вода, добытая вместе с нефтью;
- производственные сточные воды, которые образуются в результате использования воды в различных технологических процессах;
- хозяйственно-бытовые сточные воды, которые образуются при эксплуатации душевых, санузлов,

прачечных и столовых на территории предприятия;

- атмосферные (ливневые) сточные воды (поверхностный сток с территорий предприятий: дождевая, талая и поливочная вода).

Воды различного генезиса значительно отличаются друг от друга химическим составом и физико-химическими свойствами и, следовательно, эффективностью воздействия на пласт не только для повышения давления, но и повышения нефтеотдачи. Источник воды для системы ППД выбирают на основе данных технико-экономического анализа с учетом технологии водоподготовки.

Основными качественными показателями вод, делающими возможным их применение, являются:

- 1) содержание взвешенных частиц: оценивается характеристикой заводняемого пласта;
- 2) содержание кислорода;
- 3) содержание железа;
- 4) концентрация водородных ионов (рН);
- 5) содержание нефти.

Эти данные различны для каждого месторождения и должны быть пересмотрены при организации ППД в каждом конкретном районе [11].

Выводы

Рассмотренные схемы подготовки различных типов вод, используемых для поддержания пластового давления, имеют как сходные черты, так и существенные различия. Важным фактором является совместимость закачиваемой воды с пластовыми водами. Выбор источника зависит от целого комплекса факторов. В ряде случаев в различные периоды в процессе эксплуатации нефтегазовых месторождений целесообразно применение вод различных типов.

Вне зависимости от типа применяемых вод необходимым условием является защита окружающей среды. Воздействие процессов заводнения пласта на состояние территории, непостоянство и сложность

состава и свойств вод, применяемых для поддержания пластового давления, повышенный уровень риска возникновения аварийных ситуаций – обуславливают необходимость проведения непрерывного экологического мониторинга в зоне влияния нефтегазового месторождения. В целях минимизации негативного воздействия на окружающую среду необходимыми требованиями выступают строгое соблюдение технологии, а также соответствующий контроль технического состояния всего комплекса оборудования системы поддержания пластового давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Водоснабжение систем ППД. https://studopedia.ru/2_36047_vodosnabzhenie-sistem-ppd.html (дата обращения: 10.10.2022).
2. Добыча и подготовка нефти. Подготовка вод наземных источников. <https://oilloot.ru/80-dobycha-i-promyslovaya-podgotovka-nefti/423-podgotovka-vod-nazemnykh-istochnikov?ysclid=14xzmdbvo522602001> (дата обращения: 01.10.2022).
3. Источники закачиваемой воды в пласт. <http://oilloot.ru/77-geologiya-geofizika-razrabotka-neftyanykh-i-gazovykh> (дата обращения: 10.10.2022).
4. Краткий отчет о результатах производственного экологического мониторинга в границах участков недр ПАО «Сургутнефтегаз» на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры за 2021 г. <https://www.surgutneftegas.ru/upload/medialibrary/f55/Краткий%20отчет%20ПЭМ%20ЯНАО%202021.pdf> (дата обращения: 01.12.2022).
5. **КУДИНОВ В.И.** Основы нефтегазопромышленного дела. М., Иж.: Институт компьютерных исследований; Удмуртский госуниверситет, 2005. 720 с.
6. **НАЗАРОВ В.Д. и др.** Подготовка подтоварных вод для использования в системе ППД низкопроницаемых коллекторов нефти, Сетевое издание «Нефтегазовое дело», 2017. № 6. С. 35–56.
7. **ПАШКЕВИЧ М.А., ПЕТРОВА Т.А.** Мониторинг и оценка воздействия экологически опасных объектов ТЭК на компоненты природной среды // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 4. С. 176–180.
8. **ПИКОВСКИЙ Ю.И., ИСМАИЛОВ Н.М., ДОРОХОВА М.Ф.** Основы нефтегазовой геоэкологии. Учебное пособие. М.: ИНФРА-М, 2017. 400 с.
9. Программа локального экологического мониторинга на территории Южно-Песцового лицензионного участка ООО «Газпром добыча Уренгой» на период 2019–2023 годы, утвержденная зам. ген. директора – главным геологом ООО «Газпром добыча Уренгой» Жариковым М.Г. 2018.
10. **РОЕВА Н.Н., РОВИНСКИЙ Ф.Я., КОНОНОВ Э.Я.** Специфические особенности поведения тяжелых металлов в различных природных средах // Журнал аналитической химии. 1996. Т. 51. № 4. С. 384–397.
11. Характеристика закачиваемых в пласт вод. // <https://infopedia.su/> URL: <https://infopedia.su/10xbfe7.html> (дата обращения: 10.10.2022).

REFERENCES

1. Water supply of PPD systems. https://studopedia.ru/2_36047_vodosnabzhenie-sistem-ppd.html (data obrashcheniya: 10.10.2022). (In Russian).
2. Oil production and treatment. Treatment of water from surface sources. <https://oilloot.ru/80-dobycha-i-promyslovaya-podgotovka-nefti/423-podgotovka-vod-nazemnykh-istochnikov?ysclid=14xzmdbvo522602001> (accessed: 01.10.2022). (In Russian).
3. Iсточniki zavkazayu voda v plast. <http://oilloot.ru/77-geologiya-geofizika-razrabotka-neftyanykh-i-gazovykh> (data obrashcheniya: 10.10.2022). (In Russian).
4. Brief report on the results of industrial environmental monitoring within the boundaries of the subsoil plots of PJSC "Surgutneftegas" in the territory of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra for 2021. <https://www.surgutneftegas.ru/upload/medialibrary/f55/Краткий%20отчет%20ПЭМ%20ЯНАО%202021.pdf> (accessed: 01.12.2022). (In Russian).
5. **KUDINOV V.I.** *Osnovy neftegazopromyslovogo delo* [Fundamentals of oil and gas industry]. Moscow–Izhevsk: Institute for Computer Research; Udmurt State University, 2005:720. (In Russian).
6. **NAZAROV V.D. ET AL.** Preparation of produced water for use in the reservoir pressure maintenance system of low-permeability oil collectors, *Neftegazovoe delo Network*. 2017;6:35–56. (In Russian).
7. **PASHKEVICH M.A., PETROVA T.A.** Monitoring and Assessment of the Impact of Ecologically Dangerous Objects of the Fuel and Energy Complex on the Components of the Natural Environment. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2008;4:176–180. (In Russian).
8. **PIKOVSKIY Y.I., ISMAILOV N.M., DOROKHOVA M.F.** *Osnovy neftegazovoy geoekologii*. Tutorial. Moscow:INFRA-M Publ., 2017:400. (In Russian).
9. Program of Local Environmental Monitoring in the Yuzhno-Pestsovoye License Area of Gazprom Dobycha Urengoy LLC for the period 2019–2023, approved by Deputy Director General – Chief Geologist of Gazprom Dobycha Urengoy M.G. Zharikov, 2018. (In Russian).
10. **ROEVA N.N., ROVINSKIY F.YA., KONONOV E.Y.** Specific features of heavy metal behavior in various natural environments. *Zhurnal analiticheskoy khimii*. 1996;51;4:384–397. (In Russian).
11. Characteristics of water pumped into the plast: // <https://infopedia.su/> URL: <https://infopedia.su/10xbfe7.html> (accessed: 10.10.2022). (In Russian).

**М.Ю. КИЛЬЯНОВ, А.В. ИГРЕВСКИЙ,
В.А. ЛАВРЕНЧУК, А.В. МУРАДОВ, В.И. ДЕМИРОВ**
К ВОПРОСУ ПОДГОТОВКИ ВОДЫ, ИСПОЛЪЗУЕМОЙ
ДЛЯ СИСТЕМЫ ЗАВОДНЕНИЯ, ПРИ УСЛОВИИ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА
ПРОЦЕССА

Кильянов Михаил Юрьевич,

к.х.н., преподаватель ВУЦ ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина»

➔ 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 65, к. 1,
119991, Moscow, Leninsky Prospekt, 65, 1
тел.: +7 (903) 562-05-20, e-mail: m.kilyanov@mail.ru

Игревский Леонид Витальевич,

к.т.н., доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных месторождений ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина»

➔ 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 65, к. 1,
119991, Moscow, Leninsky Prospekt, 65, 1

Лавренчук Варвара Анатольевна,

специалист Управления организации подготовки научных и научно-педагогических кадров ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина»

➔ 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 65, к. 1,
119991, Moscow, Leninsky Prospekt, 65, 1

Мурадов Александр Владимирович,

д.т.н., профессор ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина», директор международного учебно-научного центра «Антикор»

➔ 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 65, к. 1,
119991, Moscow, Leninsky Prospekt, 65, 1

Демиров Владимир Иванович,

начальник Управления ракетного топлива и горючего Департамента ресурсного обеспечения Министерства обороны РФ

➔ 105175, г. Москва, пер. Б. Козловский, д. 6
1 05175, Moscow, per. B. Kozlovsky, 6

УДК 622.234.573

DOI: 10.52531/1682-1696-2024-24-1-35-38

Научная статья

АНАЛИЗ ПАТЕНТНОЙ И НАУЧНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ В ОБЛАСТИ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА

А.Б. Хузина¹, С.В. Любимова¹,
И.Г. Фаттахов²

¹ ГБОУ ВО «Альметьевский
государственный нефтяной
институт», г. Альметьевск,
Республика Татарстан

² Татарский научно-исследовательский
и проектный институт нефти
(ТатНИПИнефть) ПАО «Татнефть»
им. В.Д. Шашина, г. Альметьевск,
Республика Татарстан

Статья освещает поиск и анализ патентной и научной литературы в области применения технологий гидроразрыва пласта (ГРП). Представлен обзор и анализ публикаций из открытых источников, в которых были напечатаны статьи и тезисы по технологиям, применяемым при проведении ГРП. В результате были выявлены лидеры-журналы, в которых представлены публикации по применяемым технологиям ГРП. Лидерами при публикации статей, связанных с технологиями ГРП являются: Вестник науки и Экспозиция «Нефть, Газ». Также был проведен поиск и анализ патентной документации технологий ГРП, которые непосредственно применяются на территории Российской Федерации. Патентный анализ показал, что основным патентообладателем по технологиям, применяемым при проведении ГРП в РФ является Публичное акционерное общество «Татнефть» им. В.Д. Шашина. Данный анализ позволит оценить потенциал предлагаемых научными и производственными коллективами решений в области ГРП.

Ключевые слова: гидроразрыв пласта, публикации, патенты, патентообладатели

Основные нефтегазовые месторождения России находятся в длительной эксплуатации, наблюдается ухудшение структуры запасов и истощение высокопродуктивных залежей, возрастание доли трудноиз-

Original article

ANALYSIS OF PATENT AND SCIENTIFIC LITERATURE IN THE FIELD OF HYDRAULIC FRACTURING

L.B. KHUZINA¹, S.V. LYUBIMOVA¹,
I.G. FATTAKHOV²

¹ STATE BUDGETARY EDUCATIONAL
INSTITUTION OF HIGHER EDUCATION
«ALMETYEVSK STATE PETROLEUM
INSTITUTE», ALMETYEVSK, REPUBLIC
OF TATARSTAN

² TATAR RESEARCH AND DESIGN INSTITUTE
OF OIL (TATNIPINEFT) OF THE PUBLIC JOINT-
STOCK COMPANY «TATNEFT» NAMED AFTER
V.D. SHASHIN, ALMETYEVSK, REPUBLIC
OF TATARSTAN

The article searches and analyzes patent and scientific literature in the field of application of hydraulic fracturing technologies. A review and analysis of publications from open sources is presented, in which articles and abstracts on technologies used during hydraulic fracturing were published. As a result, leading journals were identified that presented publications on applied hydraulic fracturing technologies. The leaders in the publication of articles related to hydraulic fracturing technologies are: Bulletin of Science, Exposition "Oil, Gas". A search and analysis of patent documentation for hydraulic fracturing technologies that are directly used in the Russian Federation was also carried out. Patent analysis showed that the main patent holder for technologies used during hydraulic fracturing in the Russian Federation is the Public Joint Stock Company Tatneft named after V.D. Shashin. This analysis will allow us to assess the potential of solutions proposed by scientific and industrial teams in the field of hydraulic fracturing.

KEY WORDS: hydraulic fracturing, publications, patents, patent holders

влекаемых запасов с низкими дебитами скважин. При этом успешность геолого-технических мероприятий снижается, что особенно проявляется в связи с обводнением скважин. Гидравлический разрыв пласта (ГРП) является одним из наиболее эффективных средств интенсификации работы нефтяных, газоконденсатных, газовых скважин и увеличения приеми-

стости нагнетательных скважин, повышения дебитов, поскольку не только интенсифицирует выработку запасов, находящихся в зоне дренирования скважины, но и при определенных условиях существенно расширяет эту зону. Метод позволяет «оживить» простаивающие скважины, на которых добыча нефти или газа традиционными способами уже невозможна или малорентабельна [4].

Начало коммерческой реализации гидроразрыва пласта в добывающей промышленности относят к США 1947 г. [11]. В отечественной практике метод ГРП начали применять с 1952 г., достигнув пика применения в 1959 г., после чего количество операций снизилось, а затем эта практика и вовсе прекратилась. Возрождение практики применения ГРП в России началось только в конце 1980-х. В настоящее время лидирующие позиции по количеству проводимых ГРП занимают США и Канада, за ними следует Россия [3].

Рассмотрим основные тенденции мирового рынка гидроразрыва пласта основываясь на открытые источники информации, в частности исследования Mordor Intelligence Research & Advisory. Основные сегменты рынка основаны на типе скважины (горизонтальная и вертикальная), типе жидкости (жидкость на водной основе, жидкость на пенной основе, жидкость на основе гелеобразного масла и другие базовые жидкости) и географии (Северная Америка, Европа, Азия, Тихий океан, Южная Америка, Ближний Восток и Африка) [9].

Основные ожидания связаны с предполагаемым среднегодовым темпом роста более 8,55% в течение прогнозируемого периода 2022–2027 гг. Ввиду вспышки пандемии COVID-19 в 2020 году больше всего пострадал сектор сланцевой нефти и газа, который являлся одним из крупнейших секторов, где используются различные методы гидроразрыва пласта. Кроме того, спрос на нефть и газ упал более чем на 30 млн баррелей в сутки в апреле 2020 г., что, в свою очередь, повлияло на рынок. Такие факторы, как технологические достижения с внедрением лучших методов, вероятно, будут стимулировать рынок гидроразрыва пласта в течение прогнозируемого периода. Однако ожидается, что волатильность цен на сырую нефть будет сдерживать рост рынка гидроразрыва пласта в ближайшие годы.

Второе предполагаемое направление развития ожидается в сегменте пеноматериалов, который может показать значительный рост из-за увеличения их использования и роста разведки и разработки в мировых нефтегазовых операциях. Сегмент жидкостей на пенной основе демонстрирует значительный рост. Для чувствительных к воде пластов и сред с дефицитом воды пены долгое время считались одной из лучших жидкостей для гидроразрыва, в частности, для коллекторов сланцевого газа.

В 2019 г. рынок гидроразрыва пласта оценивался в 35 млрд долларов США, в 2028 г. в 61 млрд. Рынок

гидроразрыва пласта по прогнозу вырастет со среднегодовым темпом роста более 8,55% в течение следующих 5 лет. Значительный рост ожидается в сегменте жидкостей на основе пены. Азиатско-Тихоокеанский регион продемонстрирует самый высокий среднегодовой темп роста в 2019–2028 гг.

Основными мировыми нефтесервисными компаниями, работающими на рынке гидроразрыва пласта являются: Schlumberger Limited, Basic Energy Services, Calfrac Well Services Ltd, Baker Hughes Co., NexTier Oilfield Solutions Inc.

Учитывая, что региональная экономика интегрируется в мировое экономическое пространство и основные мировые тенденции могут оказать существенную роль на развитие рынка нефтесервисных услуг в области гидроразрыва пласта, был проведен патентный поиск по российским источникам, применяемых технологий ГРП с глубиной поиска 41 год, начиная с 1981 года и заканчивая 2022 годом, используя статьи, патенты. Технологии ГРП развиваются достаточно стремительно, необходимо оценить потенциал предлагаемых научными и производственными коллективами решений. Особо выделить патенты, которые поддерживаются в силе, вероятно, имеют производственный потенциал и реализуются.

Проведя обзор публикаций выявлены основные журналы, в которых напечатаны статьи и тезисы по технологиям, применяемым при проведении ГРП [1, 2, 5, 6, 7, 10]. На рис. 1 приведена диаграмма по лидерам-журналам, в которых представлены публикации по применяемым технологиям ГРП.

Можно сделать вывод, что лидерами при публикации статей, связанных с технологиями ГРП являются: Вестник науки – 32%; Экспозиция «Нефть, Газ» – 30%; Известия высших учебных заведений. Нефть и Газ – 22%; Территория Нефтегаз – 16%.

Патентный поиск позволил выявить основных патентообладателей по технологиям, применяемым при проведении ГРП в РФ. Рассмотрим их более подробно, без учета частных лиц. На рисунке 2 пред-

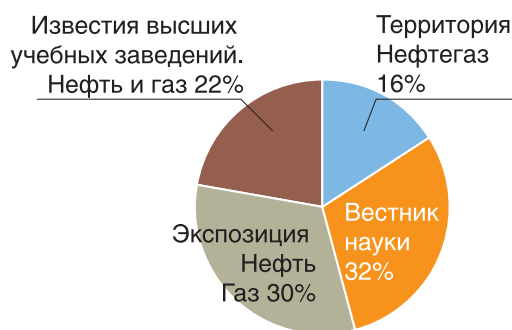


РИС. 1.

Диаграмма по лидерам-журналам по числу публикаций в области технологий ГРП

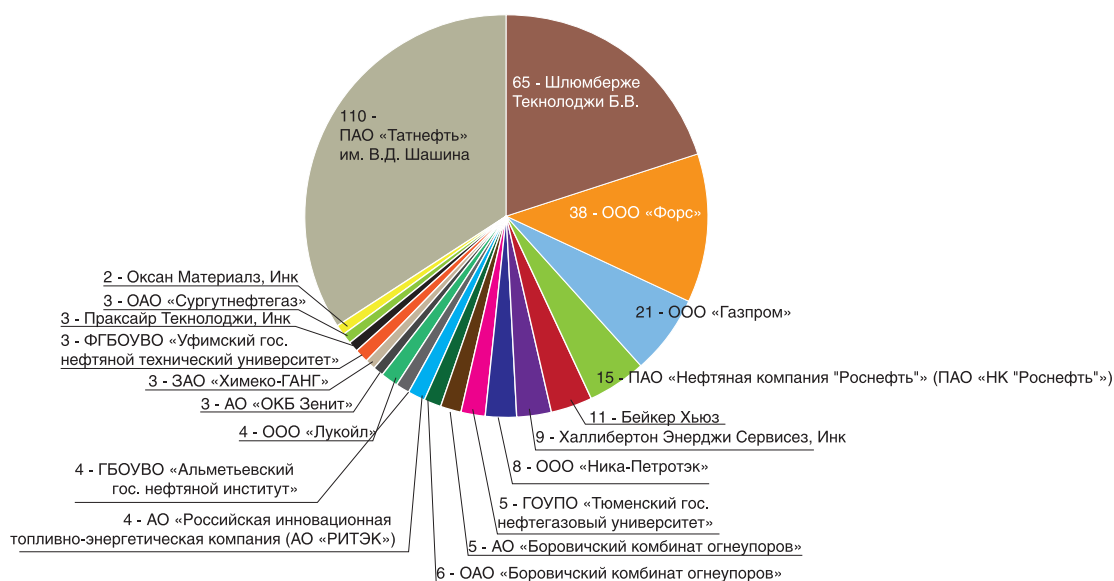


Рис. 2.

Компании-патентообладатели с количеством более трех патентов

ставлены компании-патентообладатели, применяющие технологии при проведении ГРП, из которого можно сделать вывод, что основными компаниями-патентообладателями технологий при проведении ГРП в РФ являются: ПАО «Татнефть» – 110 патентов, Шлюмберже Текнолоджи – 65 патентов, ООО «Форэс» – 38 патентов. Лидером является ПАО «Татнефть» с количеством патентов 110, что говорит о значимом инновационном потенциале компании [8].

Также, исходя из патентного анализа по применяемым технологиям при проведении ГРП, наиболее перспективными, по нашему мнению, являются следующие:

- способ многократного гидравлического разрыва пласта в горизонтальном стволе скважины, патентообладатель ПАО «Татнефть», Патент РФ 2708747, дата публикации 26.03.2019 г.;

- способ разработки нефтяной залежи горизонтальными скважинами с проведением многостадийного гидроразрыва пласта, патентообладатель ПАО «Татнефть», Патент РФ 2672292; дата публикации 10.01.2018 г.

Согласно проведенного патентного анализа было выявлено, что из 516 патентов:

- действующих – 251 патент;
- могут прекратить свое действие – 24 патента;
- не действуют – 178 патентов;
- прекратили свое действие – 63.

Таким образом, согласно прогнозам мирового рынка гидроразрыва пласта ожидается среднегодовой темп роста более 8,55% в течение следующих 5 лет (2022–2027). Проведенный обзор открытых источни-

ков выявил лидеров при публикации статей, связанных с технологиями ГРП: Вестник науки; Экспозиция «Нефть, Газ»; Известия высших учебных заведений; Нефть и Газ; Территория Нефтегаз. Патентный поиск позволил определить основные компании-патентообладатели технологий при проведении ГРП и оценить потенциал предлагаемых научными и производственными коллективами решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бархатов Э.А., Яркеева Н.Р.** Эффективность применения многозонного гидроразрыва пласта в горизонтальных скважинах // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. №10. С. 50–58.
2. **Буренина И.В., Авдеева Л.А., Соловьева И.А., Халикова М.А., Герасимова М.В.** Совершенствование методического подхода к планированию мероприятий по гидроразрыву пласта на нефтяных месторождениях // Записки Горного института. 2019. Т. 237. С. 344–353.
3. **Каневская Р.Д.** Зарубежный и отечественный опыт применения гидроразрыва пласта. М.: ВНИИОЭНГ. 1998. С. 3.
4. **Кудряшов С.И., Бачин С.И., Афанасьев И.С., Латыпов А.Р. и др.** Гидроразрыв пласта как способ разработки низкопроницаемых коллекторов на месторождениях НК «Роснефть» // Вестник ЦКР Роснедра. 2006. № 2. С. 72–84.
5. **Медведев К.С.** Обзор современных методов проведения многозонного гидроразрыва пласта на нефтяных месторождениях Сибири // Вестник науки и образования. 2019. Ч. 2. С. 14–19.

6. ЦИВЕЛЕВ К.В., СМИРНОВ К.В., МИХАЙЛОВ Д.Н. Анализ применимости повторного многостадийного гидроразрыва пласта в горизонтальных скважинах // Вести газовой науки. 2018. №1. С. 21–25.
7. ЮРОВА М.П. Роль горизонтальных скважин при разработке низкопроницаемых, неоднородных коллекторов // Георесурсы. 2017. Т. 19. №3. Ч. 1. С. 209–215.
8. HUBBERT M.K., WILLIS D.G. Mechanics of hydraulic fracturing. Trans. AIME, 1957. Vol. 210. P. 153–168.
9. <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/hydraulic-fracturing-market-industry>.
10. <https://cyberleninka.ru/search>.
11. <https://www.fips.ru>.

REFERENCES

1. BARKHATOV E.A., YARKEEVA N.R. Efficiency of using multi-zone hydraulic fracturing in horizontal wells. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov*. 2017;328;10:50–58.
2. BURENINA I.V., AVDEEVA L.A., SOLOVYOVA I.A., KHALIKOVA M.A., GERASIMOVA M.V. Improving the methodological approach to planning hydraulic fracturing activities in oil fields. *Zapiski Gornogo instituta*. 2019;237:344–353.
3. KANEVSKAYA R.D. Foreign and domestic experience in the use of hydraulic fracturing. Moscow: VNIIOENG. 1998:3.
4. KUDRYASHOV S.I., BACHIN S.I., AFANASYEV I.S., LATYPOV A.R. ET AL. Hydraulic fracturing as a method for developing low-permeability reservoirs at the fields of NK Rosneft. *Vestnik TSKR Rosnedra*. 2006;2:72–84.
5. MEDVEDEV K.S. Review of modern methods of multi-zone hydraulic fracturing in Siberian oil fields. *Vestnik nauki i obrazovaniya*. 2019;2:14–19.
6. TSIVELEV K.V., SMIRNOV K.V., MIKHAILOV D.N. Analysis of the applicability of repeated multi-stage hydraulic fracturing in horizontal wells. *Vesti gazovoy nauki*. 2018;1:21–25.
7. YUROVA M.P. The role of horizontal wells in the development of low-permeability, heterogeneous reservoirs. *Georesursy*. 2017;19;3;(1):209–215.
8. HUBBERT M.K., WILLIS D.G. Mechanics of hydraulic fracturing. *Trans. AIME*, 1957;210:153–168.
9. <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/hydraulic-fracturing-market-industry>.
10. <https://cyberleninka.ru/search>.
11. <https://www.fips.ru>.

Хузина Лилия Булатовна,
д.т.н., профессор ГБОУ ВО «Альметьевский государственный нефтяной институт»

☎ 423452, Респ. Татарстан, г. Альметьевск, ул. Ленина, д. 2,
423452, Rep. Tatarstan, Almetyevsk, st. Lenina, 2
тел.: +7(917) 428-47-97, e-mail: lbhuzina@agni-rt.ru

Любимова Светлана Владимировна,
к.т.н., доцент ГБОУ ВО «Альметьевский государственный нефтяной институт»

☎ 423452, Респ. Татарстан, г. Альметьевск, ул. Ленина, д. 2,
423452, Rep. Tatarstan, Almetyevsk, st. Lenina, 2
тел.: +7(987) 216-46-22, e-mail: lsv@agni-rt.ru

Фаттахов Ирик Галиханович,
д.т.н., профессор, директор по науке в области повышения продуктивности скважин и синтеза химических реагентов для нефтедобычи Татарского научно-исследовательского и проектного института нефти (ТатНИПИнефть) ПАО "Татнефть" им. В.Д. Шашина

☎ 423452, Респ. Татарстан, г. Альметьевск, ул. Советская, д. 210,
423452, Rep. Tatarstan, Almetyevsk, Sovetskaya st., 210
тел.: +7 (917) 283-03-19, e-mail: fattakhovig@tatneft.ru

УДК 622.692.4

DOI: 10.52531/1682-1696-2024-24-1-39-46

Научная статья

ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ МОРСКИХ ПРОМЫСЛОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ В АРКТИКЕ

Ю.А. Харченко, А.Н. ЧехловРОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ, МОСКВА,
РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

При проектировании трубопроводов, предназначенных для эксплуатации в арктических условиях, в дополнение к использованию традиционных критериев надежности предлагается учитывать способность сооружения сопротивляться повреждениям и развитию локальных отказов в глобальную аварию, которая в технике получила название «живучесть». В статье с применением метода Монте-Карло выполнена оценка живучести морского трубопровода, эксплуатируемого в арктических условиях с длительными периодами автономности, к воздействию внутренней коррозии. Определена степень влияния параметров технических и организационных барьеров безопасности на значения критериев живучести.

Ключевые слова: Арктический шельф, морские трубопроводы, живучесть, риск, барьеры безопасности, имитационное моделирование, метод Монте-Карло, коррозия

ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатация морских трубопроводов в условиях арктического шельфа наряду с типовыми проблемами трубопроводного транспорта осложняется наличием дополнительных факторов, связанных с экстремальными природно-климатическими условиями Арктики. Например, из-за наличия ледовых образований в течение длительного периода трубопроводы работают автономно без возможности доступа к ним для проведения осмотра, технического обслуживания, текущего и аварийного ремонта. Такая ситуация требует тщательной проработки вопросов безопасности и эксплуатационной надежности данных сооружений на этапе проектирования. Если внешние природные воздействия как правило учитываются в проектных

Original article

SIMULATION MODELING APPLICATION FOR OPERATIONAL RELIABILITY ESTIMATION OF THE SUBSEA PIPELINES IN THE ARCTIC

YU.A. KHARCHENKO, A.N. CHEKHOVRUSSIAN STATE GEOLOGICAL EXPLORATION
UNIVERSITY THEM. SERGO ORDZHONIKIDZE,
MOSCOW, RUSSIAN FEDERATION

When designing pipelines intended for operation in Arctic conditions, in addition to the use of traditional reliability criteria, it is proposed to take into account the ability of the structure to resist damage and the development of local failures into a global accident, which in technology is called «robustness». The article uses the Monte-Carlo method to assess the robustness of an offshore pipeline operating in Arctic conditions with long periods of autonomy to the effects of internal corrosion. The degree of influence of the parameters of technical and organizational safety barriers on the values of robustness criteria is determined.

KEYWORDS: Arctic shelf, subsea pipelines, robustness, risk, safety barriers, simulation modeling, Monte-Carlo method, corrosion

решениях, то внутренние «запроектные» воздействия (нарушения технологических режимов) при детерминированном подходе могут быть учтены только через введение дополнительных коэффициентов, как правило, не имеющих достоверного обоснования. Фактически, таким образом делается попытка ввести показатель способности трубопровода сопротивляться разрушению при получении повреждений от запроектных нагрузок, а также препятствовать перерастанию локальных отказов в глобальную аварию. Такая способность сложной конструкции или технического средства реагировать на «запроектные» нагрузки получила название «живучесть» [8]. Поскольку значения большинства параметров воздействия опасных факторов носят вероятностный характер, то для более обоснованной оценки живучести трубопровода необходимо применять вероятностные методы, например методы имитационного моделирования.

Так как определение живучести состоит из двух составляющих, для ее оценки рассмотрено два дополняющих друг друга критерия. Критерий G характеризует способность системы выдерживать повреждения от запроектных воздействий, сохраняя работоспособное состояние (функционирование без отказов).

$$G = \sum_{i=1}^l \sum_{k=1}^p P\langle D_i | H_k \rangle \times P\langle H_k \rangle, \quad (1)$$

где G – первый критерий живучести; $P\langle H_k \rangle$ – вероятность экстремального воздействия на систему; $P\langle D_i | H_k \rangle$ – вероятность i -го сценария развития дефекта; l – сценарии, в которых не происходит отказ.

Способность системы препятствовать перерастанию локального отказа в глобальную аварию определяется соотношением рисков локальных и глобальных последствий и характеризуется критерием G_R . Чем больший вклад в общий риск вносят локальные риски, тем выше степень живучести системы.

$$G_R = \frac{\sum_{i=1}^m R_{\text{локи}}}{\sum_{i=1}^m R_{\text{локи}} + \sum_{j=1}^n R_{\text{глоб}}}, \quad (2)$$

где G_R – второй критерий живучести; $R_{\text{локи}}$ – риск локальной аварии (инцидента), т.е. аварии, которая не приводит к остановке работы трубопровода; $R_{\text{глоб}}$ – риск глобальной аварии, которая приводит к прекращению эксплуатации трубопровода.

$$R_{\text{локи}} = \sum_{k=1}^p U_{\text{локи}}(D_i) \times P\langle D_i | H_k \rangle \times P\langle H_k \rangle, \quad (3)$$

где $P\langle H_k \rangle$ – вероятность экстремального воздействия на систему; $P\langle D_i | H_k \rangle$ – вероятность i -го сценария развития дефекта; $U_{\text{локи}}(D_i)$ – локальный ущерб от i -го сценария развития дефекта.

$$R_{\text{глоб}} = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^p U_{\text{глоб}}(F_j) \times P\langle F_j | D_i | H_k \rangle \times P\langle D_i | H_k \rangle \times P\langle H_k \rangle, \quad (4)$$

где $P\langle F_j | D_i | H_k \rangle$ – вероятность j -го сценария эскалации аварии при отказе; $U_{\text{глоб}}(F_j)$ – глобальный ущерб от j -го сценария эскалации аварии.

Для повышения живучести системы, значения критериев должны стремиться к 1. Из представленных выше формул очевидно, что предлагаемые критерии носят вероятностный характер, и это позволяет оценить живучесть трубопровода в условиях высокого уровня неопределенности в понимании возможной степени интенсивности воздействий. Применение методов имитационного моделирования, в частности метода Монте-Карло, позволяет исследовать различные сценарии развития дефектов и последующей эскалации аварий при отсутствии полного перечня досто-

верных исходных данных о характере и параметрах воздействия иницирующих арктических факторов на морской трубопровод [1].

ВОЗДЕЙСТВИЕ ИНИЦИИРУЮЩЕГО ФАКТОРА

На морской промысловый трубопровод в Арктике могут оказывать воздействия множество иницирующих факторов, способных стать причиной отказа с последующим нарушением функционирования сооружения [10–12]. Для демонстрации возможностей имитационного моделирования в рамках оценки живучести, в качестве примера рассмотрено воздействие внутренней коррозии на морской промысловый нефтегазосборный трубопровод, для которого в течение длительного периода в году может быть ограничен доступ для проведения работ по обслуживанию и ремонту. В качестве экстремального воздействия на систему принято отклонение скорости коррозии от проектных значений из-за ошибок при оценке степени агрессивности флюида.

Внутренняя коррозия морских трубопроводов обусловлена химическим взаимодействием металла труб с агрессивными компонентами перекачиваемой продукции, такими как CO_2 , H_2S , пластовая вода. В результате этого взаимодействия происходит потеря металла, которая приводит к общему утонению стенки (при поверхностной коррозии) или образованию свищей (при точечной коррозии). Скорость данных процессов бывает различной, и при неблагоприятных условиях коррозия может стать причиной нарушения герметичности трубопровода до окончания проектного срока эксплуатации [3, 10].

Функциональным назначением рассматриваемого сооружения является транспортировка заданного объема углеводородов, следовательно, нарушением функциональных свойств является снижение расхода из-за утечки или остановки (снижения объемов) перекачки. Если коррозионный дефект, проявляющийся в виде локальной потери металла, не будет своевременно выявлен при проведении внутритрубной диагностики и ликвидирован методами текущего ремонта [4–6], то возможно его развитие до отказа, заключающегося в разгерметизации трубопровода и утечке углеводородов через образовавшийся свищ. Для сценария, при котором опасный дефект оперативно обнаруживается и устраняется, принято, что функциональные свойства системы сохранены и учитывается только локальный ущерб в виде затрат на проведение ремонтных работ. Все прочие варианты развития рассмотрены в качестве аварийных с учетом глобального ущерба.

Возможные сценарии эскалации аварии включают в себя риски глобального ущерба по следующим причинам:

- снижение пропускной способности трубопровода из-за ограничения рабочего давления на период до устранения дефекта;

- длительная остановка перекачки на период проведения ремонтных работ;
- длительная остановка перекачки в случае обнаружения утечки в период, когда отсутствует возможность проведения ремонтных работ;
- длительная неконтролируемая утечка в случае несрабатывания системы обнаружения утечек.

Для последнего из перечисленных сценариев актуальна угроза для технологической платформы и судов в случае реализации риска по воспламенению газовой смеси.

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ БАРЬЕРОВ БЕЗОПАСНОСТИ

Барьеры безопасности – это технические решения, организационно-технические или организационно-управленческие мероприятия, направленные на предотвращение или снижение влияния на безопасность морского трубопровода природных и техногенных факторов, способных оказать негативное воздействие на работоспособность сооружения. Перечень типовых методов борьбы с внутренней коррозией для промыслового трубопровода представлен в таблице 1.

Логика функционирования группы барьеров, препятствующих возникновению коррозионного дефекта при экстремальном воздействии и развитию дефекта до отказа, описывается деревом отказов (рис. 1), барьеров безопасности, препятствующих эскалации отказа до глобальной аварии со значительными ущербами, – деревом событий (рис. 2).

Качественно опишем один из самых негативных сценариев с наибольшими значениями глобального ущерба [9]: скорость коррозии превышает проектные значения; точность системы мониторинга коррозии не позволяет принять верные решения по корректировке расхода ингибитора; эффективности ингибитора недостаточно для снижения интенсивности разрушения до требуемых значений; дефект не обнаружен методами диагностики; происходит разгерметизация трубопровода; нарушение целостности зафиксировано системой обнаружения утечек; отсутствует возможность ликвидировать отказ сразу после обнаружения, требуется остановка перекачки; ликвидация

отказа осуществляется методами аварийного ремонта в сезон открытой воды.

Аналогичным образом могут быть описаны и все прочие сценарии развития дефектов и отказов. Для определения степени живучести сооружения по рассматриваемому иницирующему фактору необходимо количественно оценить вероятности реализации каждого из возможных сценариев. Чтобы выполнить данные вычисления требуется знать вероятности срабатывания/несрабатывания рассматриваемых барьеров безопасности. В зависимости от наличия и полноты информации вероятности предлагается задавать одним из следующих способов:

- по значению коэффициента готовности/эффективности материала или оборудования;
- по известному закону распределения вероятности воздействия опасного фактора или срабатывания барьера безопасности;
- методами моделирования.

Для повышения достоверности результатов вероятностного анализа при формировании исходных данных следует опираться на статистические данные, полученные по результатам эксплуатации аналогичных объектов на шельфе незамерзающих морей или на суше, с учетом наблюдаемых на практике отклонений параметров от проектных значений, фактической эффективности оборудования и материалов.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

С целью оценки влияния отдельных барьеров безопасности на степень живучести всей системы были выполнены расчеты с учетом различных сочетаний значений их основных параметров (табл. 2).

Имитационное моделирование методом Монте-Карло воздействия внутренней коррозии на морской трубопровод осуществлялось с использованием генератора случайных чисел. Было смитировано 10000 сочетаний следующих параметров:

- отклонение скорости внутренней коррозии от проектного значения (нормальное распределение);
- время возникновения отказа (равномерное распределение);

ТАБЛИЦА 1.

Барьеры безопасности для борьбы с внутренней коррозией [2, 10]

Иницирующий фактор	Возможные дефекты	Барьеры безопасности		
		Технические	Организационно-технические	Организационно-управленческие
Внутренняя коррозия	Потеря металла	– Внутреннее антикоррозионное покрытие – Коррозионностойкие стали – Увеличенная толщина стенки труб	– Ингибирование	– Мониторинг скорости коррозии – Периодический внешний осмотр, обслуживание и ремонт – Периодическая диагностика

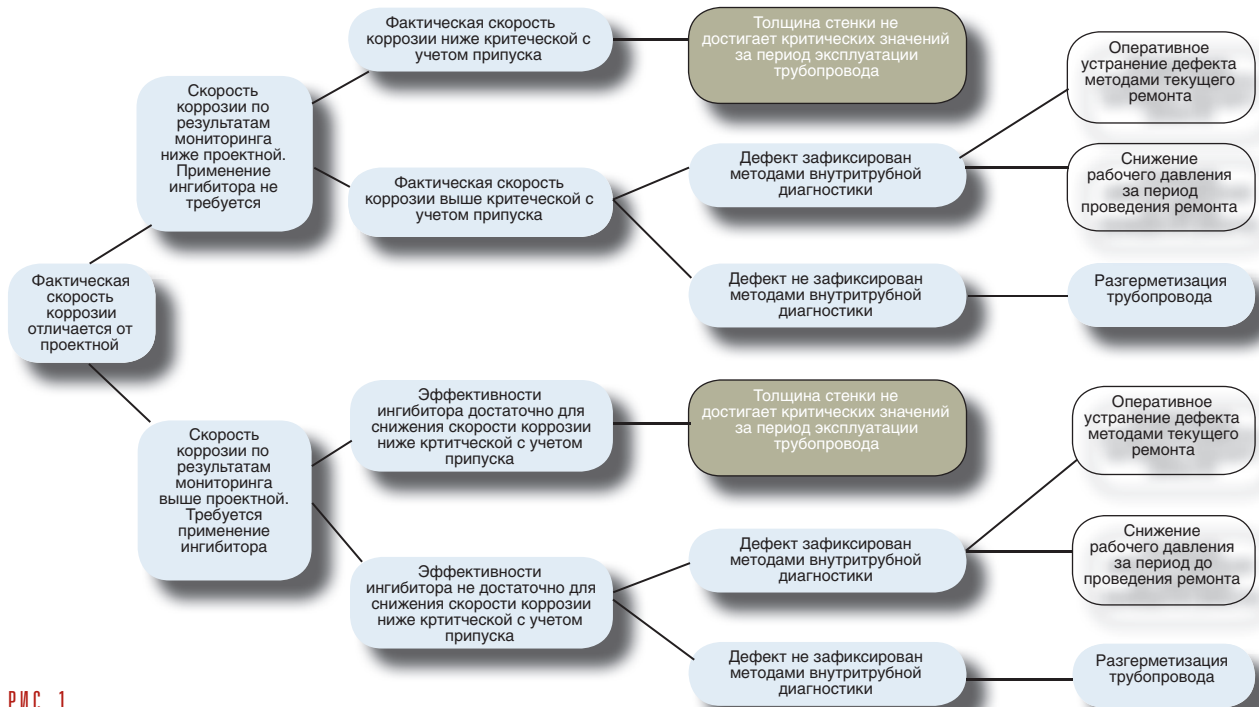


Рис. 1.
 Дерево отказов



Рис. 2.
 Дерево событий

ТАБЛИЦА 2.
 Параметры барьеров безопасности

№	Барьер безопасности	Параметр	Значение		
			1	2	3
1	Увеличенная толщина стенки трубы	Припуск на коррозию, мм	5	10	15
2	Мониторинг скорости коррозии	Погрешность, %	50	30	10
3	Ингибирование	Эффективность, %	50	75	90
4	Внешний осмотр	Периодичность, раз в год	3	6	12
5	Система обнаружения утечек	Чувствительность обнаружения, % от расхода	1,5	1,0	0,5
6	Диагностика	Период между диагностиками, лет	3	2	1
7		Минимальный размер обнаруживаемого дефекта, мм	1,5	1,0	0,5
8		Погрешность, %	30	20	10
9	Ремонтная система	Период функционирования	Круглогодично / сезон открытой воды		

- расход флюида (нормальное распределение);
- размер дефекта (нормальное распределение).

Каждому сочетанию соответствует определенный сценарий развития дефекта и отказа с конкретными численными значениями вероятностей срабатывания барьеров безопасности. Поэтому, двигаясь по ветвям дерева отказов и дерева событий, возможно определить значения локальных и глобальных ущербов, характерных для данного сценария, и соответствующие значения вероятностей. Получив результаты моделирования всей совокупности сценариев, появляется возможность оценки живучести трубопровода с рассматриваемым набором барьеров безопасности к экстремальным воздействиям как по способности сохранять функциональные свойства (G), так и по критерию G_R , характеризующему соотношение рисков локальных и глобальных ущербов.

Было рассмотрено несколько сочетаний значений параметров барьеров безопасности морского промыслового трубопровода, что позволяет провести анализ влияния различных защитных мер на значения критериев живучести трубопровода и сделать выводы о наиболее перспективных направлениях повышения данных показателей. Для оценки влияния на критерии основных исходных данных также было рассмотрено несколько вариантов их значений (табл. 3) при фиксированных параметрах барьеров безопасности.

Результаты имитационного моделирования представлены на рис. 3–5. Анализ полученных результатов указывает на наличие следующих основных закономерностей:

- исключительно на критерий G оказывает влияние изменение параметров ингибирования и мониторинга скорости коррозии (только при малых значениях припуска на коррозию);
- исключительно на критерий G_R оказывает влияние изменение параметров системы обнаружения утечек, периодичности проведения внешнего осмотра и системы проведения ремонтных работ (влияние крайне существенное), а также расхода транспортируемого продукта и продолжительности ледового сезона;

- на критерии G и G_R оказывает влияние изменение толщины стенки труб и параметров диагностики, а также средних значений скорости внутренней коррозии и размера дефектов;
- для параметра периодичности диагностики зафиксирована некорректная зависимость: уменьшение значения критерия G_R при более частом проведении работ, что связано с принятым правилом по выполнению ремонтных работ в случае, если расчетная толщина стенки на момент следующей диагностики достигнет критических значений. Таким образом, предложенный метод имитационного моделирования позволяет не только выбрать оптимальные значения параметров барьеров безопасности, но и принять обоснованные решения по корректировке эксплуатационных процедур.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный в статье метод имитационного моделирования показал свою эффективность применительно к оценке эксплуатационной надежности морского промыслового трубопровода в условиях длительной автономной работы, поскольку позволил выявить важные закономерности, интуитивно не очевидные, но позволяющие целенаправленно управлять степенью надежности сооружения на этапе проектирования путем регулирования параметров барьеров безопасности. Более широкое применение вероятностных методов при проектировании морских трубопроводов позволяет количественно оценить эксплуатационные риски, а также обеспечить высокую степень способности сооружения сохранять работоспособность при экстремальных воздействиях в условиях арктического шельфа за счет обоснованного подбора соответствующих барьеров безопасности.

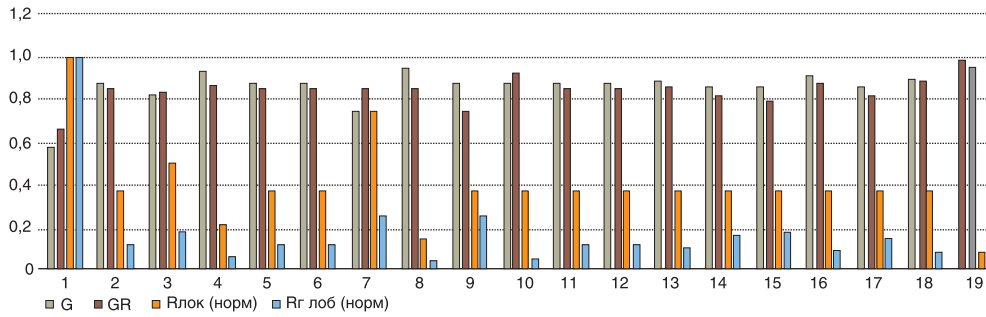
ЛИТЕРАТУРА

1. БЕККЕР А.Т., САВОДАШ О.А. Имитационная модель воздействия дрейфующих торосов на морское дно и подводные трубопроводы // Труды Дальневосточного государственного технического университета. 2004. № 137. С. 84–93.
2. Жуков И.С. Барьеры безопасности: понятие, классификация, проектирование. М.: Недра, 1987.

ТАБЛИЦА 3.

Варианты основных исходных данных

№	Исходные данные	Значение		
		1	2	3
1	Среднее значение отклонения фактической скорости коррозии от проектного значения, мм/год	0,8	0,5	0,3
2	Среднее значение расхода жидкости, м³/год	1800000	1200000	600000
3	Продолжительность сезона открытой воды, мес.	2	5	7
4	Среднее значение диаметра дефекта, мм	0,5	1	1,5



G	0,58325	0,87810	0,83048	0,93300	0,87810	0,87810	0,75620	0,95124	0,87810	0,87810	0,87810	0,87810	0,87810	0,88543	0,85890	0,84440	0,91393	0,85923	0,89883	0,98536
GR	0,66670	0,85453	0,84290	0,86699	0,85453	0,85453	0,85453	0,85453	0,74563	0,92181	0,85451	0,85567	0,85569	0,82259	0,80477	0,88139	0,82385	0,83949	0,95524	
Rлок (норм.)	1,00000	0,37675	0,50000	0,22163	0,37675	0,37675	0,75349	0,15070	0,37675	0,37675	0,37675	0,37675	0,37675	0,37675	0,37675	0,37675	0,37675	0,37675	0,37675	0,08365
Rг лоб (норм.)	1,00000	0,12829	0,18541	0,06801	0,12829	0,12829	0,25659	0,05132	0,25709	0,06393	0,12831	0,12711	0,11592	0,16253	0,18282	0,10142	0,16113	0,09353	0,00831	

Круглогодичный ремонт	Увеличенная толщина стенки трубы	1	1	2	1	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	
	Мониторинг скорости коррозии	2	1	2	2	2	1	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3
	Ингибирование	3	1	2	2	2	2	2	1	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3
	Внешний осмотр	4	1	2	2	2	2	2	2	2	1	3	2	2	2	2	2	2	2	2	3
	Система обнаружения утечек	5	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3
	Диагностика	6	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	3	2	2	2	2	2	3
		7	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	3	2	2	2	3
		8	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	3	2	3
	Параметры барьеров безопасности	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	3	3
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19

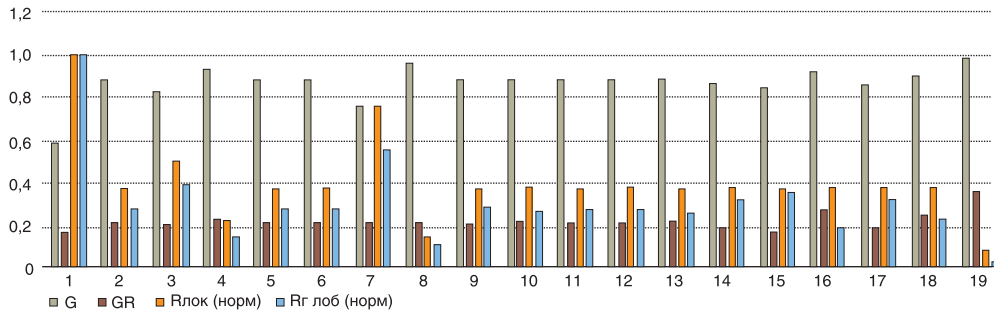
Сочетания параметров барьеров безопасности

Рис. 3.

Результаты имитационного моделирования для различных значений параметров барьеров безопасности при круглогодичной системе ремонта

сификация, концепции // Журнал безопасность труда в промышленности. 2017. № 5. С. 49–56.

3. ЗАПЕВАЛОВ Д.Н., ВАГАПОВ Р.К., МЕЛЬСИДИНОВА Р.А. Оценка коррозионных условий и решений по защите морских объектов от внутренней коррозии // Вести газовой науки. 2018. № 4(36). С. 79–86.
4. ЛЕЩЕНКО В.В. Анализ актуальных угроз и рисков целостности и безопасной эксплуатации МПТ применительно к деятельности МЭС // Морская наука и техника. 2023. Спец. выпуск № 6. С. 44–47.
5. ЛЕЩЕНКО В.В. Особенности диагностирования и ремонта морских подводных нефтегазопроводов // Offshore [Russia]. 2013. № 1 (1). С. 65–67.
6. МАНСУРОВ М.Н., ЛАПТЕВА Т.И. Проблемы надежности и ремонта морских подводных трубопроводов для транспорта нефти и газа при освоении континентального шельфа // Территория Нефтегаз. 2013. № 6. С. 72–80.
7. МАРКИН А.Н., КАЛАШНИКОВ В.И., СУХО-
8. МАХУТОВ Н.А., РЕЗНИКОВ Д.О., ПЕТРОВ В.П., КУКОВА В.И. Оценка живучести сложных технических систем // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2009. №3. С. 47–66.
9. Руководство по безопасности «Методика анализа риска аварий на опасных производственных объектах морского нефтегазового комплекса», утвержденное приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 16 сентября 2015 г. № 364.
10. ХАРЧЕНКО Ю.А., ЧЕХЛОВ А.Н. Морские трубопроводы на шельфе Арктики: идентификация опасностей и барьеры безопасности // Деловой журнал Neftegaz.RU. 2022. № 1(121). С. 42–49.
11. Патент на изобретение RU 2075356 С1. Состав для очистки внутренней полости трубопроводов /



G	0,58325	0,87810	0,83048	0,93300	0,87810	0,87810	0,75620	0,95124	0,87810	0,87810	0,87810	0,87810	0,87810	0,87810	0,88543	0,85890	0,84440	0,91393	0,85923	0,89883	0,98536
GR	0,16773	0,21506	0,20712	0,22946	0,21506	0,21506	0,21506	0,21506	0,20751	0,21903	0,21506	0,21513	0,22653	0,19111	0,17609	0,27959	0,19113	0,24787	0,36055	0,36055	0,36055
Рлок (норм.)	1,00000	0,37675	0,50000	0,22163	0,37675	0,37675	0,75349	0,15070	0,37675	0,37675	0,37675	0,37675	0,37675	0,37675	0,37675	0,37675	0,37675	0,37675	0,37675	0,37675	0,08865
Рглоб (норм.)	1,00000	0,27712	0,38573	0,14998	0,27712	0,27712	0,55424	0,11085	0,28996	0,27072	0,27712	0,27700	0,25924	0,32136	0,35524	0,19563	0,32132	0,23039	0,03169	0,03169	0,03169

Ремонт в сезон открытой воды	Увеличенная толщина стенки трубы	1	1	2	1	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	
	Мониторинг скорости коррозии	2	1	2	2	2	1	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	
	Ингибирование	3	1	2	2	2	2	2	1	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	
	Внешний осмотр	4	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	3	
	Система обнаружения утечек	5	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	
	Диагностика	6	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	3	2	2	2	2	2	2	3
		7	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	3	2	2	2	2	3
		8	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	3	2	2	3
	Параметры барьеров безопасности	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	3	3
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	

Сочетания параметров барьеров безопасности

РИС. 4.

Результаты имитационного моделирования для различных значений параметров барьеров безопасности при возможности проведения ремонта только в сезон открытой воды

Мирзаджанзаде А.Х., Шахвердиев А.Х., Ибрагимов Р.Г., Заирный Д.В., Чукчесев О.А., Панахов Г.М., Сулейманов Б.А., Аббасов Э.М. 20.03.1997. Заявка № 96115909/12 от 22.08.1996.

12. Патент на изобретение RU 2174879 С1. Способ очистки внутренней полости газопровода / Панахов Г.М., Шахвердиев А.Х., Аббасов Э.М. 20.10.2001. Заявка № 2000125929/12 от 17.10.2000.

13. Патент на изобретение RU 2176568 С1. Способ очистки внутренней полости газопровода / Шахвердиев А.Х. 10.12.2001. Заявка № 2000125928/12 от 17.10.2000.

REFERENCE

1. BECKER A.T., SABODASH O.A. Simulation model of the impact of drifting hummocks on the seabed and underwater pipelines. *Trudy Dal'nevostochnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2004;137:84–93. (In Russian).

2. ZHUKOV I.S. Safety barriers: idea, classification, con-

cepts. *Zhurnal bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2017;5:49–56. (In Russian).

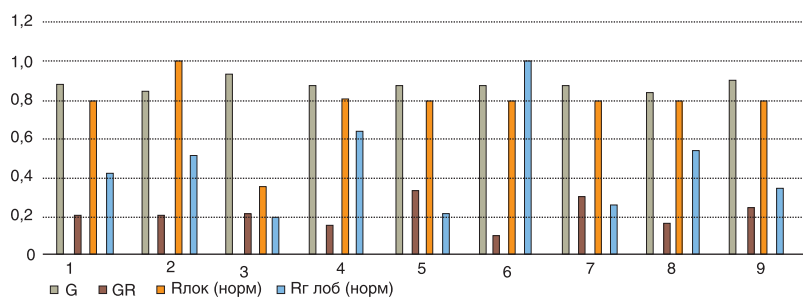
3. ZAPEVALOV D.N., VAGAPOV R.K., MELTSITDINOVA R.A. Assessing corrosion environment and internal corrosion remedies for offshore objects. *Vesti gazovoy nauki*. 2018;4(36):79–86. (In Russian).

4. LESHCHENKO V.V. Analysis of current threats and risks to the integrity and safe operation of MPT in relation to the activities of MES. *Morskaya nauka i tekhnika*. 2023;6:44–47. (In Russian).

5. LESHCHENKO V.V. Features of diagnostics and repair of offshore underwater oil and gas pipelines. *Offshore [Russia]*. 2013;1(1):65–67. (In Russian).

6. MANSUROV M.N., LAPTEVA T.I. Problems of reliability and repair of buried subsea pipelines for oil and gaz transport at continental shelf development. *Territoriya Neftegaz*. 2013;6:72–80. (In Russian).

7. MARKIN A.N., KALASHNIKOV V.I., SUKHOVERKHOV S.V., ZADOROZHNY P.A. Corrosion protection of multiphase pipelines of the Sakhalin-2



G	0,87810	0,85283	0,94327	0,87810	0,87810	0,87810	0,87810	0,84098	0,90510
GR	0,21506	0,22009	0,21930	0,15502	0,34120	0,10614	0,30751	0,17868	0,25120
Рлок (норм.)	0,80184	1,00000	0,36392	0,80184	0,80184	0,80184	0,80184	0,80184	0,80184
Рглоб (норм.)	0,43342	0,52477	0,19186	0,64725	0,22928	1,00000	0,26741	0,54583	0,35397

Ремонт в сезон открытой воды	Увеличенная толщина стенки трубы	1	2	2	2	3	2	2	2	2	2
	Мониторинг скорости коррозии	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2
	Ингибирование	3	2	2	2	2	2	2	2	3	2
	Внешний осмотр	4	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Система обнаружения утечек	5	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Диагностика	6	2	2	2	2	2	2	2	2	2
		7	2	2	2	2	2	2	2	2	2
		8	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Скорость коррозии	9	2	1	3	2	2	2	2	2	2
	Расход	10	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Сезон открытой воды	11	2	2	2	1	3	2	2	2	2
	Диаметр дефекта	12	2	2	2	2	2	1	3	2	2
Параметры барьеров безопасности		1	2	2	2	2	2	2	1	3	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	

Сочетание исходных данных

Рис. 5.

Результаты имитационного моделирования для различных значений основных исходных данных

project. *Territoriya Neftegaz*. 2011;12:30–33. (In Russian).

- МАХУТОВ N.A., РЕЗНИКОВ D.O., ПЕТРОВ V.P., КУКОВА V.I. Assessment of the survivability of complex technical systems. *Problemy bezopasnosti i chrezvychajnyh situacij*. 2009;3:47–66. (In Russian).
- Safety Guide «Methodology for analyzing the risk of accidents at hazardous production facilities of the offshore oil and gas industry». 2015:364. (In Russian).
- ХАРЧЕНКО Ю.А., СНЕХЛОВ А.Н. Offshore pipelines on the Arctic shelf: hazard identification and safety barriers. *Delovoj zhurnal Neftegaz. RU*. 2022; 1(121):42–49. (In Russian).
- Patent for invention RU 2075356 C1. Composition for cleaning inner space of pipelines. Mirzajanzade A.Kh., Shakhverdiev A.Kh., Ibragimov R.G., Zazirny D.V., Chukcheev O.A., Panakhov G.M., Suleymanov B.A., Abbasov E.M. 03/20/1997. Application N96115909/12 dated 08/22/1996.
- Patent for invention RU 2174879 C1. Gas pipeline inner space cleaning method. Panakhov G.M., Shakhverdiev A.Kh., Abbasov E.M. October 20, 2001. Application N 2000125929/12 dated 10/17/2000.
- Patent for invention RU 2176568 C1. Method for cleaning gas pipeline inner cavity. Shakhverdiev A.Kh. 12/10/2001. Application No. 2000125928/12 dated 10/17/2000.

Харченко Юрий Алексеевич, д.т.н., профессор кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений РГГРУ имени Серго Орджоникидзе

Чехлов Александр Николаевич, аспирант кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений РГГРУ имени Серго Орджоникидзе

✉ 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23
 117997, Moscow st. Miklouho-Maklaya, 23

УДК 622.276.43

DOI: 10.52531/1682-1696-2024-24-1-47-56

Научная статья

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВНУТРИПЛАСТОВОЙ ГЕНЕРАЦИИ CO₂ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ КОНЦЕНТРАЦИИ ХИМРЕАГЕНТОВ

С.В. АРЕФЬЕВ¹, А.Ю. БРУСЛОВ²,
А.В. ДЕНИСОВ²¹ПАО «ЛУКОЙЛ», МОСКВА,
РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ²РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ, МОСКВА,
РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

Исследование посвящено технологии повышения нефтеотдачи пластов на основе внутрипластовой генерации двуокиси углерода, полученного в качестве продукта стехиометрической реакции газовыделяющего и газообразующего реагентов. Рассмотрены два направления совершенствования: обеспечение более равномерной генерации двуокиси углерода и повышение безопасности работ при закачке реагентов. Оба направления требуют существенного увеличения объемов закачки буферной воды, разделяющей растворы карбоната натрия и соляной кислоты, которые реагируют между собой при прямом контакте. Буферная вода при закачке в больших объемах, при смешении с растворами этих реагентов, существенно снижает концентрации, заданные на этапе приготовления растворов. Это также снижает концентрацию двуокиси углерода в водном растворе. В конечном итоге, снижаются концентрации реагентов и двуокиси углерода, требуемые для эффективной внутрипластовой генерации и распределения CO₂. Для предотвращения такого падения концентраций необходимо, на этапе приготовления объемов реагентов, корректировать, увеличивать их концентрации так, чтобы учитывать смешение с буферной водой и обеспечить концентрации, необходимые для стехиометрии в пластовых условиях. Такого увеличения концентраций достигают также и за счет уменьшения объемов растворов реагентов. В работе даны количественные оценки увеличения объемов буферной воды, влияния этого увеличения на снижение исходных концентраций реагентов и концентрацию двуокиси углерода в водных растворах. Предложены рабочие формулы для расчетов объемов буферной воды, скорректированных повышенных концентраций и уменьшенных объемов растворов реагентов на этапе их приготовления.

Ключевые слова: повышение нефтеотдачи, технология, внутрипластовой генерации двуокиси углерода, химические реагенты, пластовые условия

Original article

IMPROVEMENT OF IN-SITU CO₂ GENERATION TECHNOLOGY WITH COMPENSATION OF CHEMICALS CONCENTRATION TECHNOLOGICAL LOSSES

S.V. AREFIEV¹,
A.YU. BRUSLOV², A.V. DENISOV²¹PAO «LUKOIL», MOSCOW, RUSSIAN
FEDERATION²RUSSIAN STATE GEOLOGICAL EXPLORATION
UNIVERSITY AFTER SERGO ORDZHONIKIDZE,
MOSCOW, RUSSIAN FEDERATION

The paper is about the enhanced oil recovery technology, based on in-situ carbon dioxide generation, after stoichiometric reaction between gas releasing chemical agent and gas producing one. Two ways of technology improvement are considered: for more uniform in-situ CO₂ generation and for more safety when chemicals injection. Both ways require sufficient increase of buffer water, which divides reactive chemicals. Larger buffer water volumes, when being mixed with chemicals water solutions, sufficiently drop down chemical concentration. It also decreases CO₂ concentration in water solution. Finally, chemicals and CO₂ concentrations, for in-situ generation, decrease. To prevent such decrease, it is necessary to adjust, increase chemicals concentration, when preparing chemical water solution, so to consider further dilution in buffer water and to ensure required stoichiometric concentration in reservoir conditions. Increase of chemicals concentration can be also from decrease of chemicals solutions volumes. Quantitative estimates are given for increase of buffer water volumes, for impact of such increase on decrease of initial chemicals concentrations and decrease of CO₂ concentration, in water solutions, as well.

Working formulas are provided for calculations on buffer water volumes, adjusted, increased concentrations and decrease volumes of chemicals water solutions, at their preparation stage.

KEY WORDS: enhancement of oil recovery, technology, in-situ carbon dioxide generation, formation conditions, chemical reagents

© 2024, С.В. Арефьев, А.Ю. Бруслов, А.В. Денисов
Поступила в редакцию 16.11.2023

ВВЕДЕНИЕ

Современное состояние проблемы низких значений коэффициента нефтеотдачи «зрелых» месторождений, увеличение доли трудноизвлекаемых запасов в активах нефтегазодобывающих предприятий подтверждает актуальность задачи селекции и выбора эффективных технологий повышения нефтеотдачи пластов и интенсификации добычи нефти, в том числе, с использованием двуокиси углерода [1–16]. Технология внутрипластовой генерации двуокиси углерода с применением газовыделяющего и газообразующего агентов [10, 14] включает поочередную закачку порций газовыделяющего водного карбоната натрия и газообразующего водного раствора соляной кислоты в нагнетательные скважины, с закачкой разделяющих порций буферной воды. Порции буферной воды предназначены для исключения смешения перечисленных реагентов в нагнетательных скважинах и наземных коммуникациях. На практике объем закачиваемых порций буферной воды, как правило, не превышает двух-трех кубометров. Суммарные объемы порций реагентов достигают сотен кубометров. Число порций реагентов равного объема – в основном две.

Буферная вода, попадая в пласт и размещаясь между порциями реагентов, разбавляет эти порции и приводит к снижению концентраций реагентов и количества генерируемой двуокиси углерода на единицу объема закачаных реагентов. Тем не менее расчеты количеств, концентраций, приготовление и закачку реагентов до последнего времени вели без учета их разбавления в порциях буферной воды. Это было связано с тем, что общее число закачиваемых порций реагентов в основном не превышало двух и объемы закачиваемых порций буферной воды были несопоставимо малы по отношению к общим объемам порций реагентов.

Технология внутрипластовой генерации двуокиси углерода, с применением газовыделяющего и газообразующего агентов (реагентов), может быть усовершенствована. Одним из направлений совершенствования может быть обеспечение большего, более равномерного охвата зоны смешения реагентов генерируемой двуокисью углерода. Более равномерный охват сможет обеспечить лучшее распределение двуокиси углерода в жидком продукте реакции (водном растворе хлорида натрия) и исключить возможные спонтанные выбросы и потери свободной фазы двуокиси углерода в зоне реакции. Для обеспечения более равномерного охвата наиболее доступным решением представляется дробление порций реагентов на более мелкие. В этом случае создается не одна две обширных зоны смешения и реакций, генерации двуокиси углерода, а большее число более мелких зон. Такое увеличение числа зон смешения потребует увеличения числа порций реагентов и, соответственно, увеличения числа разделяющих порций буферной воды. Например, при

С. В. АРЕФЬЕВ,
А. Ю. БРУСЛОВ, А. В. ДЕНИСОВ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
ВНУТРИПЛАСТОВОЙ ГЕНЕРАЦИИ СО₂ С
КОМПЕНСАЦИЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПОТЕРЬ КОНЦЕНТРАЦИИ ХИМРЕАГЕНТОВ

общем числе порций реагентов четыре, понадобится не одна, а три разделяющие порции буферной воды. При общем числе порций реагентов шесть или восемь понадобится соответственно закачка уже пяти или восьми порций буферной воды. При общем числе 12 порций реагентов понадобится закачка 11 порций разделяющей буферной воды.

Смешение реагентов, при их прямом контакте в поверхностных условиях, сопровождается интенсивным пенообразованием с участием углекислого газа. Прямые контакты водных растворов карбоната натрия и соляной кислоты в закрытых коммуникациях будут сопровождаться повышением давления в зонах реакции, потерями и выбросами углекислого газа, представляющими опасность для здоровья работающего персонала.

С учетом максимального соблюдения требований промышленной безопасности, охраны здоровья и окружающей среды, необходимо предотвращать и исключать риски локального повышения давления и выбросов углекислого газа во всех местах, кроме прискважинных частей пласта, куда осуществляется закачка реагентов, предусмотренных технологией внутрипластовой генерации СО₂. Кроме того, возможные выбросы двуокиси углерода в наземных коммуникациях и/или стволе скважин приведут к потерям двуокиси углерода, предназначенной для генерации в пластовых условиях.

С учетом этого, для безопасной и полноценной реализации технологии внутрипластовой генерации СО₂, объем каждой порции буферной воды должен включать суммарный объем коммуникаций по приготовлению и закачке реагентов, начиная от емкостей с реагентами, продолжая насосным оборудованием, запорно-регулирующей арматурой и заканчивая соединяющими трубопроводами и трубами в нагнетательных скважинах, от устья и до интервала закачки реагентов в пласт. В этом случае объемы каждой порции буферной воды, в зависимости от глубин скважин, схем расстановки оборудования и коммуникаций для закачки реагентов, будут значительно превышать дватри кубометра, в том числе превышать объем в 10 м³.

С учетом всего этого, оптимизация технологии внутрипластовой генерации двуокиси углерода, с увеличением числа порций реагентов и повышением безопасности их закачки, потребует большего числа порций буферной воды и объемов каждой порции буферной воды. В таком случае общий объем буферной воды будет многократно превышать практикуемые объемы и составлять существенную величину от общего объема порций реагентов.

Концентрации приготовленных на поверхности реагентов, за счет разбавления в больших объемах разделяющей буферной воды, будут снижаться. В пластовых условиях смешения концентрации разбавленных растворов реагентов могут стать существенно меньше

тех, что предусмотрены технологией внутривластовой генерации двуокиси углерода.

С учетом этого, при приготовлении растворов реагентов их концентрации нужно увеличивать по отношению к расчетным для реакции, таким образом, чтобы, с учетом падения концентраций при разбавлении в буферной воде, концентрации в пластовых условиях соответствовали расчетным стехиометрическим для реакции.

В случае, если общий объем порций буферной воде существенен, от 10% и более от общего объема порций реагентов корректировка в сторону уменьшения нужна и для объемов реагентов при их приготовлении. За счет добавления буферной воды, общий объем реагентов и буферной воды будет больше общего расчетного объема реагентов для реакции. Поэтому общий объем растворов реагентов в условиях приготовления нужно уменьшать на величину общего объема буферной воды.

Более подробно вопросы оценки влияния объемов буферной воды на снижение концентраций приготовленных растворов реагентов, за счет разбавления буферной водой, а также вопросы коррекции концентраций и объемов растворов реагентов при их приготовлении, с учетом разбавления приготовленных растворов буферной водой, рассмотрены ниже.

Рассмотрены различные варианты закачки порций реагентов и буферной воды, при разном числе циклов закачки порций реагентов равного объема. Одноцикловая закачка включает один цикл последовательной закачки одной порции водного раствора карбоната натрия, одной порции буферной воды и одной порции водного раствора соляной кислоты, при равенстве объемов порций реагентов. Двухцикловая закачка включает два цикла последовательной закачки одной порции водного раствора карбоната натрия, одной порции буферной воды и одной порции водного раствора соляной кислоты, при равенстве объемов порций реагентов и общем их объеме, равном общему объему при одноцикловой закачке. При двухцикловой закачке общее количество чередующихся порций водных растворов карбоната натрия и соляной кислоты составляет четыре (два раза по две), а общее количество разделяющих порций буферной воды составляет три. Трехцикловая закачка включает три цикла последовательной закачки одной порции водного раствора карбоната натрия, одной порции буферной воды и одной порции водного раствора соляной кислоты при равенстве объемов порций реагентов и общем их объеме, равном общему объему при одноцикловой закачке. При трехцикловой закачке общее количество чередующихся порций водных растворов карбоната натрия и соляной кислоты составляет шесть (три раза по две), а общее количество разделяющих порций буферной воды составляет пять. Четырехцикловая закачка включает че-

тыре цикла последовательной закачки одной порции водного раствора карбоната натрия, одной порции буферной воды и одной порции водного раствора соляной кислоты, при равенстве объемов порций реагентов и общем их объеме, равном общему объему при одноцикловой закачке. При четырехцикловой закачке общее количество чередующихся порций водных растворов карбоната натрия и соляной кислоты составляет восемь (четыре раза по две), а общее количество разделяющих порций буферной воды составляет девять.

При контакте водные растворы карбоната натрия и соляной кислоты активно вступают в реакцию с выделением двуокиси углерода, образованием хлорида натрия и воды. Хорошо известная реакция и стехиометрические соотношения компонентов – на примере карбоната натрия Na₂CO₃ с молекулярной массой 106, соляной кислоты HCl с молекулярной массой 35,5 – при таком контакте представлены ниже.



Продуктами реакции здесь являются хлорид натрия NaCl с молекулярной массой 58,5, двуокись углерода CO₂ с молекулярной массой 44 и вода.

При полном расходовании на реакцию соотношения количеств реагентов и продуктов реакции будет равно соотношению их молекулярных масс с учетом уравнивающих коэффициентов в формуле реакции, то есть будет стехиометрическим соотношением. Здесь из 106 т Na₂CO₃ и 2×35,5=73 т HCl получится 44 т CO₂, 2×58,5=117 т хлорида натрия и 18 т воды. Если эти количества привести к 1 т Na₂CO₃, то из 1 т Na₂CO₃ и 2×35,5/106=73/106=0,689 т HCl получится 44/106=0,415 т CO₂, 2×58,5/106=1,104 т хлорида натрия и 18/106=0,170 т воды. В реакции на 44 т двуокиси углерода приходится 106 т карбоната натрия и 73 т соляной кислоты. На одну тонну двуокиси углерода будет приходиться соответственно 106/44=2,41 т карбоната натрия и 73/44=1,66 т соляной кислоты.

Для максимально безопасной закачки реагентов в скважину общий объем буферной воды V_{вб} будет определяться внутренним объемом V_{ку} линий закачки до устья скважины (от емкости приготовления до насоса, далее от насоса до устья скважины) и внутренним объемом V_{тс} труб скважины, от устья скважины до интервала закачки химреагентов и на длине h_{тс} труб закачки с их внутренним диаметром D_{тв}. Это условие можно выразить в виде:

$$V_{вб} = V_{ку} + V_{тс} = V_{ку} + \frac{\pi \times (D_{тв}^2) \times h_{тс}}{4} \quad (2)$$

Например, в случае закачки химреагентов в НКТ диаметром 89 мм, внутренним диаметром 73 мм на длине труб 3400 м, внутренним объемом V_{тс} труб НКТ в 14,2 м³ и суммарным объемом линий устьевых

коммуникаций $V_{ку}$ в $2,3 \text{ м}^3$, объем одной порции буферной воды составит $16,5 \text{ м}^3$.

Если в расчетах требуемых количеств и концентраций реагентов (растворов водных растворов карбоната натрия и соляной кислоты) объемы, количества буферной воды не учитывать, то общее количество растворов, с добавкой буферной воды, будет больше расчетного для раствора минерализованной воды, насыщенной CO_2 , на величину объема буферной воды. При этом конечные концентрации реагентов, за счет разбавления в буферной воде, будут меньше расчетных.

При фактическом снижении концентрации реагентов, за счет их разбавления в буферной воде, концентрация генерируемой двуокиси углерода в водном растворе также снижается. Это уменьшает способность водного раствора с CO_2 вытеснять нефть.

В общем случае, для оценки относительного снижения $\Delta C_{рс}^*$ массовой концентрации реагента в водном растворе, при абсолютном снижении $\Delta C_{рс}$ от расчетной C_r для реакции до $C_{рр}$ после разбавления объема V_p реагента, приготовленного для реакции, объемом $V_{вб}$ буферной воды можно использовать формулу в объемных величинах:

$$\Delta C_{рс}^* = \frac{\Delta C_{рс}}{C_r} = \frac{C_r - C_{рр}}{C_r} \approx 1 - \frac{V_p}{V_p + V_{вб}} \quad (3)$$

Например, в случае одноциклового последовательной закачки одной 250 м^3 порции водного раствора карбоната натрия Na_2CO_3 , одной 250 м^3 порции соляной кислоты HCl , общем объеме химреагентов в 500 м^3 для Na_2CO_3 с начальной стехиометрической концентрацией $12,4 \%$ и условной плотностью 1 т/м^3 , его стехиометрическая масса составит $250 \times 0,124 = 31 \text{ т}$. При одноциклового закачке применяют только одну порцию разделяющей буферной воды. При объеме одной порции буферной воды в $16,5 \text{ м}^3$ этот объем составит $0,033$, или $3,3\%$ от общего объема закачиваемых реагентов в 500 м^3 .

При объеме одной порции буферной пресной воды в $16,5 \text{ м}^3$ масса карбоната натрия в 31 т растворится не в 250 м^3 а в $250 + 16,5 = 266,5 \text{ м}^3$ раствора. Конечная концентрация Na_2CO_3 с учетом разбавления в одном объеме порции буферной воды будет $31/266,5 = 0,116 = 11,6\%$. Снижение концентрации относительно стехиометрической будет $12,4 - 11,6 = 0,8\%$. Это снижение относительно начальной концентрации составит $0,8/12,4 = 0,065 = 6,5\%$.

Для двухциклового закачки, с двумя циклами чередующейся закачки четырех порций реагентов по 125 м^3 , раствор Na_2CO_3 будет разбавляться уже в трех объемах порций буферной воды с общим объемом $3 \times 16,5 = 49,5 \text{ м}^3$, или $49,5 \text{ т}$. Объем буферной воды составит уже $0,099$, или $9,9\%$ от общего объема

С. В. АРЕФЬЕВ,
А. Ю. БРУСЛОВ, А. В. ДЕНИСОВ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
ВНУТРИПЛАСТОВОЙ ГЕНЕРАЦИИ CO_2 С
КОМПЕНСАЦИЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПОТЕРЬ КОНЦЕНТРАЦИИ ХИМРЕАГЕНТОВ

закачиваемых реагентов. В этом случае конечная концентрация в разбавленном растворе Na_2CO_3 будет $31/(250+49,5) = 31/299,5 = 0,104$, или $10,4\%$. Снижение концентрации относительно расчетной стехиометрической будет $12,4\% - 10,4\% = 2,0\%$. Это снижение относительно начального составит уже $2,0/12,4 = 0,161 = 16,1\%$. Такое снижение выше порогового в 10% , которое считается нижним порогом существенного. Это требует коррекции в расчетах начальной стехиометрической концентрации карбоната натрия в водном растворе.

Для трехциклового закачки с шестью порциями реагентов по $83,3 \text{ м}^3$, где приготовленный на поверхности раствор Na_2CO_3 , закачанный в виде трех порций, будет разбавляться уже в пяти объемах буферной воды с массой $5 \times 16,5 = 82,5 \text{ т}$. Объем буферной воды составит уже $0,165$, или $16,5\%$ от общего объема закачиваемых реагентов. В этом случае общий конечный объем водного раствора карбоната натрия составит $250 + 82,5 = 332,5 \text{ т}$, конечная концентрация карбоната натрия будет $31/332,5 = 0,093 = 9,3\%$. Потери концентрации на разбавление составят уже $12,4 - 9,3 = 3,1\%$. Относительные потери составят $3,1/12,4 = 25\%$.

При четырехциклового закачки с восьмью порциями реагентов по $62,5 \text{ м}^3$, разбавлении четырех порций раствора Na_2CO_3 в семи порциях буферной воды в количестве по $16,5 \text{ м}^3$, или $16,5 \text{ т}$ каждая, общее количество буферной воды составит $7 \times 16,5 = 115,5 \text{ м}^3$ или тонн при условной плотности раствора в 1 т/м^3 . Объем буферной воды составит $0,231$, или $23,1\%$ от общего объема реагентов. В этом случае общий конечный объем водного раствора карбоната натрия составит $250 + 115,5 = 365,5 \text{ т}$, конечная концентрация карбоната натрия будет $31/365,5 = 0,085 = 8,5\%$.

Снижение концентрации за счет разбавления в буферной воде будет $12,4 - 8,5 = 3,9\%$. Это снижение относительно начальной концентрации составит $3,9/12,4 = 0,315 = 31,5\%$.

Аналогичные данные получены по снижению расчетной стехиометрической $8,8\%$ концентрации для водного раствора соляной кислоты объемом 250 м^3 и стехиометрической массой соляной кислоты в $21,5 \text{ т}$. Для одноциклового закачки реагентов концентрация соляной кислоты в разбавленном растворе составляет $8,1\%$ при снижении $0,7$ относительно $8,8\%$ без учета разбавления и относительном снижении $0,7/8,8 = 0,0795$, или $7,95\%$. Для двухциклового закачки концентрация соляной кислоты в разбавленном растворе составляет $7,2\%$ при снижении $1,6$ относительно $8,8\%$ без учета разбавления и относительном снижении $1,6/8,8 = 0,1818$ или $18,2\%$. Для трехциклового закачки реагентов концентрация соляной кислоты в разбавленном растворе составляет $6,5\%$ при снижении $2,3$ относительно $8,8\%$ без учета разбавления и относительном снижении $2,3/8,8 = 0,1818$, или $26,1\%$. Для четырехциклового закачки реагентов концентрация

ция соляной кислоты в разбавленном растворе составляет 5,9% при снижении 2,9 относительно 8,8% без учета разбавления и относительном снижении $2,9/8,8 = 0,3295$, или 33,0%.

Снижение концентраций реагентов приводит и к общему снижению концентрации CO₂, генерируемой и распределенной в продукте реакции, водном растворе хлорида натрия (NaCl). Для рассматриваемого примера в пластовых условиях 1 м³ раствора NaCl полностью насыщается CO₂ в объеме 13 нм³. 500 м³ раствора NaCl вместит $500 \times 13 = 6500$ нм³ двуокиси углерода.

Плотность двуокиси углерода при нормальных условиях составляет 1,977 кг/м³. Тогда масса CO₂ для объема 6500 нм³ составит $6500 \times 1,977 = 12850,1$ кг = 12,85 т. Без учета незначительного количества воды как продукта реакции реагентов и без учета добавления буферной воды к раствору хлорида натрия, это количество должно распределиться в объеме 500 м³ и массой 500 т (при допущении о плотности раствора в 1 т/м³). Общее количество раствора NaCl с растворенным CO₂ составит $500 + 12,85 = 512,85$ т. В этом случае концентрация CO₂ в растворе составит $12,85/512,85 = 0,025 = 2,5\%$ мас.

При одноцикловогой закачке реагентов, с учетом разбавления в объеме одной порции буферной воды 16,5 м³ и массой 16,5 т, это количество распределится в $512,85 + 1 \times 16,5 = 512,85 + 16,5 = 529,35$ т. Концентрация CO₂ в разбавленном растворе NaCl составит $12,85/529,35 = 0,0242 = 2,4\%$. Снижение концентрации CO₂ за счет разбавления будет $2,5 - 2,4 = 0,1\%$. Снижение относительно начальной расчетной концентрации будет $0,1/2,5 = 0,04 = 4\%$.

При двухцикловогой закачке реагентов, и разбавлении в трех буферных объемах в количестве $3 \times 16,5 = 49,5$ м³, или 49,5 т, общем количестве раствора $512,85 + 49,5 = 562,35$ т, итоговая концентрация CO₂ будет $12,85/562,35 = 0,0228 = 2,3\%$. Снижение концентрации CO₂ за счет разбавления будет $2,5 - 2,3 = 0,2\%$. Снижение относительно начальной расчетной концентрации будет $0,2/2,5 = 0,08 = 8\%$.

При трехцикловогой закачке реагентов и разбавлении в пяти объемах буферной воды двуокись углерода в количестве 12,85 т распределится в массе разбавленного раствора $512,85 + 5 \times 16,5 = 512,85 + 82,5 = 595,35$ т. Концентрация CO₂ в разбавленном растворе составит $12,85/595,35 = 0,022 = 2,2\%$. Снижение концентрации от разбавления будет $2,5 - 2,2 = 0,3\%$. Снижение относительно исходной расчетной величины концентрации будет $0,3/2,5 = 0,12 = 12\%$.

При четырехцикловогой закачке реагентов и разбавлении в семи объемах буферной воды двуокись углерода в количестве 12,85 т распределится в массе разбавленного раствора $512,85 + 7 \times 16,5 = 512,85 + 115,5 = 628,35$ т. Концентрация CO₂ в разбавленном растворе составит $12,85/628,35 = 0,0204 = 2,0\%$. Снижение концен-

трации от разбавления будет $2,5 - 2,0 = 0,5\%$. Снижение относительно исходной расчетной величины концентрации будет $0,5/2,5 = 0,20 = 20\%$.

Сводные данные по снижению концентраций реагентов и двуокиси углерода от разбавления буферной водой, для общего объема порций закачиваемых реагентов в 500 м³, и объеме каждого в 250 м³, представлены в табл. 1 и на рис. 1.

Как видно из табл. 1 и графиков, разбавление буферной водой реагентов и раствора хлорида натрия с двуокисью углерода приводит к ощутимому, 7–32% снижению концентраций относительно расчетных для реакции. Поэтому реагенты перед закачкой нужно готовить с учетом снижения концентраций в связи с разбавлением буферной водой.

С учетом разбавления буферной водой, количества, концентрации закачиваемых водных растворов карбоната натрия и соляной кислоты нужно корректировать. Буферная вода будет разбавлять как сами порции водных растворов карбоната натрия и соляной кислоты, так и сформированную систему из водного раствора хлорида натрия, насыщенного двуокисью углерода.

В общем случае, для расчета скорректированных объемов V_{рк} реагентов на этапе их приготовления, при известных общем объеме V_{ро} реагентов и объеме буферной воды V_{вб} в пластовых условиях, можно пользоваться выражением:

$$V_{рк} = V_{ро} - V_{вб}. \quad (4)$$

Для расчета скорректированных равных объемов V_{рк} реагентов, при известных общем объеме V_{ро} реагентов для реакции и объема V_{вб} буферной воды, можно пользоваться выражением:

$$V_{рк} = \frac{V_{рок}}{2} = \frac{V_{ро} - V_{вб}}{2}. \quad (5)$$

Оценку снижения $\Delta V_{рк}$ скорректированных объемов реагентов V_{рк} на этапе приготовления, относительно расчетных равных объемов V_р для реакции можно вести из выражения

$$\Delta V_{рк} = V_{р} - V_{рк} = \frac{V_{ро}}{2} - \frac{V_{ро} - V_{вб}}{2} = \frac{V_{вб}}{2}. \quad (6)$$

Оценку относительного снижения $\Delta V_{рк}^*$ скорректированных объемов реагентов V_{рк} на этапе приготовления, относительно расчетных объемов V_р для реакции, можно вести из выражения:

$$\Delta V_{рк}^* = \frac{\Delta V_{рк}}{V}. \quad (7)$$

Оценивать скорректированную C_{рк} массовую концентрацию реагента на этапе приготовления, с учетом материального баланса, известных расчетной C_р массовой концентрации реагента для реакции, скор-

ТАБЛИЦА 1.

Снижение концентраций реагентов и растворенной двуокиси углерода при разбавлении буферной водой

№	Технология закачки	Снижение концентраций в растворах за счет разбавления буферной водой					
		Водный раствор Na ₂ CO ₃		Водный раствор HCl		CO ₂ в водном растворе хлорида натрия	
		Концентрация, % мас.	Относительное снижение, %	Концентрация, % мас.	Относительное снижение, %	Концентрация, % мас.	Относительное снижение, %
1	1-цикловая, без учета разбавления в буферной воде	12,4	0	8,8	0	2,5	0
2	1-цикловая, с учетом разбавления, 1 порция буферного объема воды	11,6	6,5	8,1	8,0	2,4	4
3	2-цикловая, с учетом разбавления, 3 порции буферных объема воды	10,4	16,1	7,2	18,2	2,3	8
4	3-цикловая, с учетом разбавления, 5 порций буферных объемов воды	9,3	25,0	6,5	26,1	2,2	12
5	4-цикловая, с учетом разбавления, 7 порций буферных объемов воды	8,5	31,5	5,9	33,0	2,0	20

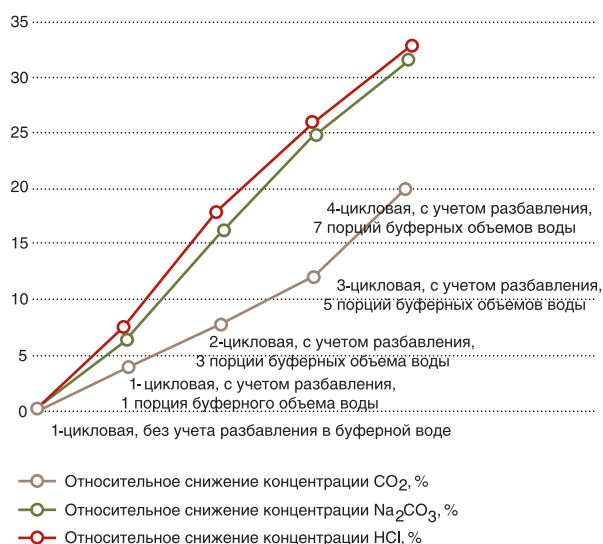


РИС. 1.

Снижение концентраций реагентов в растворах за счет разбавления буферной водой

ректированного объема каждого реагента $V_{рк}$ как половины объема $V_{рок}$ при общем объеме системы $V_{ро}$ и объеме буферной воды $V_{вб}$, можно из выражения:

$$C_{рк} \approx C_p \times \frac{V_p}{V_{рк}} \approx 2 C_p \times \frac{V_p}{V_{ро} - V_{вб}} \quad (8)$$

Оценивать абсолютное увеличение $\Delta C_{рк}$ скорректированной концентрации $C_{рк}$ реагентов на этапе приготовления, относительно расчетной концентрации C_p для реакции в пластовых условиях можно по формуле:

$$\Delta C_{рк} = C_{рк} - C_p = C_p \times \frac{V_p}{V_{рк}} - 1 \quad (9)$$

Оценивать относительное увеличение $\Delta C_{рк}^*$ скорректированной концентрации $C_{рк}$ реагентов на этапе приготовления, относительно расчетной концентрации C_p для реакции в пластовых условиях можно по формуле:

$$\Delta C_{рк}^* = \frac{\Delta C_{рк}}{C_p} = \frac{C_{рк}}{C_p} \times \left(\frac{V_p}{V_{рк}} - 1 \right) = \frac{V_p}{V_{рк}} - 1 \quad (10)$$

В случае одноциклового закачки, из рассмотренного выше примера, общий объем системы из реагентов и буферной воды должен составить 500 м^3 . С учетом объема одной порции буферной воды в $16,5 \text{ м}^3$, на общий объем для приготовления порций реагентов будет приходиться $500 - 16,5 = 483,5 \text{ м}^3$. Относительное уменьшение объема реагентов для приготовления в относительных единицах составит $16,5/500 = 0,033 = 3,3\%$.

Для реагентов (водный раствор Na_2CO_3 и водный раствор HCl) в равных объемах и стехиометрических количествах общий объем каждого реагента – это половина объема для смешения. Поэтому объем общей порции каждого реагента для приготовления составляет $483,5/2 = 241,8 \text{ м}^3$. При условной плотности растворов в 1 т/м^3 массы этих порций также составляют $241,8 \text{ т}$ по каждому реагенту.

Для системы объемом в 500 м^3 , сгенерированной равными порциями реагирующих водных растворов карбоната натрия Na_2CO_3 с концентрацией 12,4% и соляной кислоты HCl с концентрацией 8,8%, понадобится $31 \text{ т Na}_2\text{CO}_3$ и $21,5 \text{ т HCl}$. С учетом снижения концентрации за счет разбавления в одной порции буферной воды, $31 \text{ т Na}_2\text{CO}_3$ должна раствориться во время приготовления раствора на поверхности не в 250 м^3 , а в $241,8 \text{ м}^3$, или $241,8 \text{ т}$ раствора. В этом случае массовая концентрация карбоната натрия долж-

на быть $31/241,8=0,128=12,8\%$. Аналогично, 21,5 т соляной кислоты нужно растворить в 241,8 м³, или 241,8 т раствора. Для этого массовая концентрация HCl должна быть $21,5/241,8=0,089=8,9\%$. Сравнение таких концентраций реагентов с теми, что не учитывали потери концентраций на разбавление в буферной воде (соответственно 12,4% для Na₂CO₃ и 8,8% для HCl), показывает, что откорректированное значение концентрации раствора Na₂CO₃, на этапе приготовления, превышает начально планируемое (без учета разбавления в буферной воде) на $12,8-12,4=0,4\%$ с относительным значением этого превышения в $0,4/12,4=0,032=3,2\%$. Аналогично, откорректированное значение концентрации раствора HCl, на этапе приготовления, превышает начально планируемое (без учета разбавления в буферной воде) на $8,9-8,8=0,1\%$ с относительным значением этого превышения в $0,1/8,8=0,008=1,0\%$.

Для двухциклового закачки понадобится три порции буферной воды объема $3 \times 16,5=49,5$ м³. С учетом общего объема системы из реагентов и буферной воды в 500 м³ в пластовых условиях, общий объем для приготовления реагентов будет $500-49,5=450,5$ м³ и с массой, при условной плотности растворов в 1 т/м³, в 450,5 т. Относительное уменьшение общего объема для приготовления реагентов, с учетом дополнительных 49,5 м³ буферной пресной воды в пластовых условиях, составит $49,5/500=0,099=9,9\%$. Общий объем каждого реагента (раствора Na₂CO₃ и раствора HCl) для смешения будет составлять $450,5/2=225,3$ м³, или 225,3 т. В 225,3 т раствора Na₂CO₃ понадобится растворить 31 т этого вещества. Растворение обеспечит массовую концентрацию раствора в $31/225,3=0,138=13,8\%$. Здесь откорректированное значение концентрации раствора Na₂CO₃, на этапе приготовления, превышает начально планируемое (без учета разбавления в буферной воде) на $13,8-12,4=1,4\%$ с относительным значением этого превышения в $1,4/12,4=0,113=11,3\%$. Аналогично, в 225,3 т раствора HCl понадобится растворить 21,5 т этого вещества. Растворение обеспечит массовую концентрацию раствора в $21,5/225,3=0,0954=9,5\%$. Откорректированное значение концентрации раствора HCl, на этапе приготовления, превышает начально планируемое (без учета разбавления в буферной воде) на $9,5-8,8=0,7\%$ с относительным значением этого превышения в $0,7/8,8=0,0795=8,0\%$.

Для трехциклового закачки понадобится 5 объемов буферной воды объема $5 \times 16,5=82,5$ м³. С учетом общего объема системы из реагентов и буферной воды в 500 м³ в пластовых условиях, общий объем для приготовления реагентов будет $500-82,5=417,5$ м³ с массой, при условной плотности растворов в 1 т/м³, в 417,5 т. Относительное уменьшение общего объема для приготовления реагентов, с учетом разбавления в 82,5 м³ буферной воды, составит $82,5/500=0,165=16,5\%$. Общий объем порций каждого реагента водного раствора

Na₂CO₃ и водного раствора HCl, для приготовления будет составлять $417,5/2=208,8$ м³ с массой 208,8 т. В 208,8 т раствора Na₂CO₃ понадобится растворить 31 т этого вещества. Растворение обеспечит массовую концентрацию раствора в $31/208,8=0,148=14,8\%$. Здесь откорректированное значение концентрации раствора Na₂CO₃, на этапе приготовления, превышает начально планируемое (без учета разбавления в буферной воде) на $14,8-12,4=2,4\%$ с относительным значением этого превышения в $2,4/12,4=0,194=19,4,0\%$. Аналогично в 208,8 т раствора HCl понадобится растворить 21,5 т этого вещества. Растворение обеспечит массовую концентрацию раствора в $21,5/208,8=0,103=10,3\%$. Откорректированное значение концентрации раствора HCl, на этапе приготовления, превышает начально планируемое (без учета разбавления в буферной воде) на $10,3-8,8=1,5\%$ с относительным значением этого превышения в $1,5/8,8=0,171=17,1\%$.

Для четырехциклового закачки понадобится семь объемов буферной воды общего объема $7 \times 16,5=115,5$ м³. С учетом общего объема системы из реагентов и буферной воды в 500 м³ в пластовых условиях, общий объем для приготовления реагентов будет $500-115,5=384,5$ м³ с массой, при условной плотности растворов в 1 т/м³ в 384,5 т. Относительное уменьшение общего объема для приготовления реагентов, с учетом разбавления в 115,5 м³ буферной воды, составит $115,5/500=0,231=23,1\%$. Общий объем порций каждого реагента (раствора Na₂CO₃ и раствора HCl) для приготовления будет $384,5/2=192,3$ м³, или 192,3 т. В 192,3 т раствора Na₂CO₃ понадобится растворить 31 т этого вещества. Растворение обеспечит массовую концентрацию раствора в $31/192,3=0,161=16,1\%$. Здесь откорректированное значение концентрации раствора Na₂CO₃, на этапе приготовления, превышает начально планируемое (без учета разбавления в буферной воде) на $16,1-12,4=3,7\%$ с относительным значением этого превышения в $3,7/12,4=0,298=29,8\%$. Аналогично в 192,3 т раствора HCl понадобится растворить 21,5 т этого вещества. Растворение обеспечит массовую концентрацию раствора в $21,5/192,3=0,112=11,2\%$. Откорректированное значение концентрации раствора HCl, на этапе приготовления, превышает начально планируемое (без учета разбавления в буферной воде) на $11,2-8,8=2,4\%$ с относительным значением этого превышения в $2,4/8,8=0,273=27,3\%$.

Полученные результаты оценочных расчетов приведены в табл. 2 и на рис. 2.

Как видно из табл. 2, коррекция объемов и концентраций водных растворов карбоната натрия и соляной кислоты может достигать 3–23% в сторону уменьшения для объемов и 7–30% в сторону увеличения для концентраций.

Таким образом, с целью сокращения потерь количеств, концентраций закачиваемых реагентов и генерируемой в пласте двуокиси углерода, необхо-

ТАБЛИЦА. 2.

Откорректированные объемы и концентрации реагентов на этапе приготовления

№	Технология закачки	Откорректированные значения количеств и концентраций реагентов (с учетом участия буферной воды в формировании газонасыщенной оторочки и разбавления растворов реагентов, приготовленных на поверхности)							
		Раствор Na ₂ CO ₃				Раствор HCl			
		Объем для приготовления, м ³		Концентрация для приготовления, % мас		Объем для приготовления, м ³		Концентрация для приготовления, % мас	
		Откорректированная величина	Относительное уменьшение за счет коррекции, %	Откорректированная величина	Относительное увеличение за счет коррекции, %	Откорректированная величина	Относительное уменьшение за счет коррекции, %	Откорректированная величина	Относительное увеличение за счет коррекции, %
1	1-цикловая, без учета буферных объемов	250	0	12,4	0	250	0	8,8	0
2	1-цикловая, с учетом разбавления, 1 порция буферных объемов воды	241,8	3,3	12,8	3,2	241,8	3,3	8,9	1,0
3	2-цикловая, с учетом разбавления, 3 порции буферных объема воды	225,3	9,9	13,8	11,3	225,3	9,9	9,5	8,0
4	3-цикловая, с учетом разбавления, 5 порций буферных объемов воды	208,8	16,5	14,8	19,4	208,8	16,5	10,3	17,1
5	4-цикловая, с учетом разбавления, 7 порций буферных объемов воды	192,3	23,1	16,1	29,8	192,3	23,1	11,2	27,3

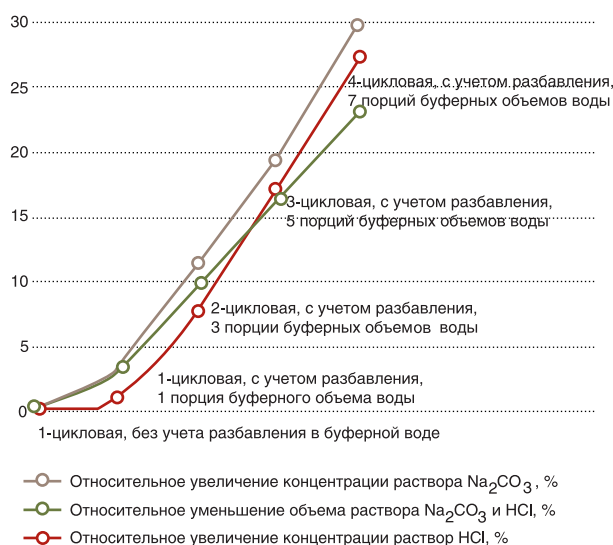


РИС. 2.

Относительные изменения объемов и концентраций при их коррекции на этапе приготовления реагентов

дима коррекция: объемов реагентов, предназначенных для внутривластовой генерации двуокиси углерода, – в сторону уменьшения, а расчетные концентрации реагентов – в сторону увеличения. Кор-

рекция должна количественно учитывать увеличение объемов растворов, снижение концентраций реагентов и генерируемой двуокиси углерода за счет разбавления в буферной воде.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При оптимизации технологии внутривластовой генерации CO₂, с применением газовыделяющего и газообразующего реагентов, для более равномерного смешения химреагентов в пласте число порций закачиваемых реагентов, при сохранении общего объема порций, целесообразно увеличивать с двух до шести, восьми и более.

Большее число закачиваемых порций реагентов требует закачки большего числа порций и объемов буферной воды, разделяющей порции реагентов.

Совершенствование технологии внутривластовой генерации CO₂, с применением газовыделяющего и газообразующего реагентов, для максимального соблюдения норм промышленной безопасности, охраны здоровья и окружающей среды, требует увеличивать объемы порций буферной воды до максимальных величин.

Увеличение числа и объемов порций буферной воды, разбавление в них растворов карбоната натрия и соляной кислоты, потери исходных концентраций реагентов и генерируемой двуокиси углерода в связи

с таким разбавлением необходимо корректировать на этапе приготовления водных растворов реагентов, путем увеличения исходных концентраций и уменьшения объемов относительно требуемых для внутрипластовой генерации двуокиси углерода.

Предложена оценочная формула для определения объема одной порции буферной воды, достаточного для максимального соблюдения требований промышленной безопасности, охраны здоровья и окружающей среды. Такой объем может значительно превышать объем порций буферной воды, реализуемых на практике.

Показано, что объемы буферной воды могут достигать от нескольких до десятков процентов от объемов реагентов, а разбавление буферной водой растворов реагентов и раствора хлорида натрия с двуокисью углерода приводит к ощутимому, 7–32% снижению концентраций относительно расчетных для реакции по внутрипластовой генерации CO₂. Поэтому растворы реагентов перед закачкой нужно готовить с учетом снижения концентраций в связи с дополнительным разбавлением буферной водой.

Предложена формула для оценок снижения расчетных концентраций водных растворов реагентов, необходимых для внутрипластовой генерации двуокиси углерода, за счет дополнительного разбавления растворов в буферной воде.

Предложены формулы для коррекции объемов и концентраций реагентов на этапе их приготовления, относительно объемов и концентраций, требуемых для генерации двуокиси углерода в пластовых условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балаян Г.Г., Дмитриевский А.Н., Комков Н.И., Бруслов А.Ю. Разработка моделей перспективных технологий нефтеизвлечения углеводородов / Организация и управление наукой в условиях интенсификации. М.: АН СССР, ИЭП НТП. 1989. С. 37–59.
2. Брезицкий С.В., Джафаров И.С., Панахов Г.М., Шахвердиев А.Х. Способ разработки нефтяной залежи. Патент на изобретение RU 2142557 C1, 10.12.1999. Заявка № 99113100/03 от 29.06.1999.
3. Бруслов А.Ю. Разработка метода определения фазовых подвижностей и степени извлечения нефтей при вытеснении их из пластов оторочками жидкой двуокиси углерода. Дис. на соискание уч-ой ст. к.т.н. М.: МИНГ им. И.М. Губкина. 1985. 132 с.
4. Мандрик И.Э., Панахов Г.М., Шахвердиев А.Х. Научно-методические и технологические основы оптимизации процесса повышения нефтеотдачи пластов. М.: Изд-во «Нефтяное хозяйство». 2010. 228 с.
5. Шахвердиев А.Х. Еще раз о нефтеотдаче // Нефтяное хозяйство. 2014. № 1. С. 44–48.
6. Шахвердиев А.Х. Некоторые концептуальные аспекты системной оптимизации разработки нефтяных месторождений // Нефтяное хозяйство. 2017. № 2. С. 58–63. DOI: 10.24887/0028-2448-2017-2-58-63
7. Шахвердиев А.Х. Системная оптимизация процесса разработки нефтяных месторождений. М.: Недра. 2004. 452 с.
8. Шахвердиев А.Х., Максимов М.М., Рыбickaя Л.П. Моделирование залежей нефти с позиции системной оптимизации процессов // Нефтяное хозяйство. 2000. № 12. С. 19–23.
9. Шахвердиев А.Х., Максимов М.М., Рыбickaя Л.П., Галушко В.В. Способ определения местоположения застойных и слабодренуемых зон нефтяной залежи. Патент на изобретение RU 2105136 C1, 20.02.1998. Заявка № 97114425/03 от 03.09.1997.
10. Шахвердиев А.Х., Панахов Г.М. Способ разработки нефтяной залежи. Патент RU 2244110 C1. Опубликовано: 2005.01.10.
11. Шахвердиев А.Х., Панахов Г.М., Аббасов Э.М. Синергетические эффекты при системном воздействии на залежь термо-реохимическими методами // Нефтяное хозяйство. 2002. № 11. С. 61–65.
12. 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. 76–80.
13. Шахвердиев А.Х., Панахов Г.М., Сулейманов Б.А., Аббасов Э.М., Курбанов Р.А., Матвеев К.Л. Способ разработки нефтяной залежи. Патент на изобретение RU 2123586 C1, 20.12.1998. Заявка № 97109102/03 от 16.06.1997.
14. Шахвердиев А.Х., Панахов Г.М., Сулейманов Б.А., Аббасов Э.М., Чукчеев О.А., Галеев Ф.Х. Способ разработки нефтяной залежи. Патент RU 2125154 C1. Опубликовано: 1999.01.20.
15. GUMERSKY K.N., DZHAFAROV I.S., SHAKHVERDIEV A.KH., MAMEDOV YU.G. In-situ generation of carbon dioxide: new way to increase oil recovery / Proceedings of the European Petroleum Conference. European Petroleum Conference (EUROPEC). Paris, France, 2000. P. 499–504.
16. 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. N 10. P. 1695–1710. DOI: 10.1134/S1995080219100226

REFERENCES

1. BALAYAN G.G., DMITRIEVSKY A.N., KOMKOV N.I., BRUSLOV A.YU. Development of models of promising

- technologies for oil recovery of hydrocarbons. In the book: Organization and management of science in conditions of intensification, USSR Academy of Sciences, IEP NTP. M. 1989:37–59. (In Russian).
2. BREZITSKY S.V., JAFAROV I.S., PANAKHOV G.M., SHAKHVERDIEV A.KH. Method for developing an oil deposit. Patent for invention RU 2142557 C1, 12.10.1999. Application N 99113100/03 dated June 29, 1999. (In Russian).
 3. BRUSLOV A.YU. Development of a method for determining phase mobility and the degree of oil recovery when they are displaced from layers by slugs of liquid carbon dioxide. dis. ... Ph.D. Moscow: MING im. THEM. Gubkina. 1985. 132. (In Russian).
 4. MANDRIK I.E., PANAKHOV G.M., SHAKHVERDIEV A.KH. Scientific, methodological and technological basis for optimizing the process of enhanced oil recovery. Moscow: Neftyanoye khozyaystvo. 2010:228.
 5. SHAKHVERDIEV A.KH. Once again about oil recovery. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2014;1:44–48. (In Russian).
 6. SHAKHVERDIEV A.KH. Some conceptual aspects of system optimization of oil field development. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2017;2:58–63. DOI: 10.24887/0028-2448-2017-2-58-63 (In Russian).
 7. SHAKHVERDIEV A.KH. System optimization of the oil field development process. Moscow: Nedra. 2004:452. (In Russian).
 8. SHAKHVERDIEV A.KH., MAKSIMOV M.M., RYBITSKAYA L.P. Modeling of oil deposits from the perspective of system optimization of processes. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2000;12:19–23. (In Russian).
 9. SHAKHVERDIEV A.KH., MAKSIMOV M.M., RYBITSKAYA L.P., GALUSHKO V.V. A method for determining the location of stagnant and poorly drained zones of an oil deposit. Patent for invention RU 2105136 C1, 02/20/1998. Application N 97114425/03 dated 09/03/1997. (In Russian).
 10. SHAKHVERDIEV A.KH., PANAKHOV G.M. Method for developing oil deposits. Patent RU 2244110 C1. Published: 2005.01.10. (In Russian).
 11. SHAKHVERDIEV A.KH., PANAKHOV G.M., ABBASOV E.M. Synergetic effects under systemic influence on a deposit using thermo-rheochemical methods. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2002;11:61–65. (In Russian).
 12. SHAKHVERDIEV A.KH., PANAKHOV G.M., ABBASOV E.M., MANDRIK I.E., BAKHTIYAROV S.I. Integrative efficiency of impact on the formation during in-situ gas generation. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2006;11:76–80. (In Russian).
 13. SHAKHVERDIEV A.KH., PANAKHOV G.M., SULEYMANOV B.A., ABBASOV E.M., KURBANOV R.A., MATVEEV K.L. Method for developing an oil deposit. Patent for invention RU 2123586 C1, 12/20/1998. Application N 97109102/03 dated June 16, 1997. (In Russian).
 14. SHAKHVERDIEV A.KH., PANAKHOV G.M., SULEYMANOV B.A., ABBASOV E.M., CHUKCHEEV O.A., GALEEV F.KH. Method for developing an oil deposit. Patent RU 2125154 C1. Published: 1999.01.20. (In Russian).
 15. GUMERSKY KH.KH., DZHAFAROV I.S., SHAKHVERDIEV A.KH., MAMEDOV YU.G. In-situ generation of carbon dioxide: new way to increase oil recovery. Proceedings of the European Petroleum Conference. European Petroleum Conference (EUROPEC). Paris, France, 2000:499–504.
 16. 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. DOI: 10.1134/S1995080219100226.

С. В. АРЕФЬЕВ,
А. Ю. БРУСЛОВ, А. В. ДЕНИСОВ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
ВНУТРИПЛАСТОВОЙ ГЕНЕРАЦИИ СО, С
КОМПЕНСАЦИЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПОТЕРЬ КОНЦЕНТРАЦИИ ХИМРЕАГЕНТОВ

Арефьев Сергей Валерьевич,
к.г.-м.н., начальник Управления разработки нефтяных и газовых месторождений Западно-Сибирского и Пермского регионов ПАО «Лукойл»

☎ 101 000, г. Москва, Сретенский бульвар, 11,
101000, Moscow, Sretensky Boulevard, 11,
тел: +7 (495) 627-44-44, e-mail: lukoil@lukoil.com

Бруслов Андрей Юрьевич,
доцент 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, Miklukho-Maklaya Str, 23
тел: +79057573208, e-mail: bruslovay@mgri.ru

Денисов Алексей Владимирович,
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, Miklukho-Maklaya Str, 23
тел: +7 (916) 801-95-64, e-mail: denisovav@mgri.ru

УДК 553.9:551.242.056: 551.324.28:004.413.4

DOI: 10.52531/1682-1696-2024-24-1-57-60

Научная статья

РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ НЕЧЕТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОГО СУДОХОДСТВА АРКТИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА В ПЕЧОРСКОМ МОРСКОМ РАЙОНЕ

Н.А. ЕРЕМИН^{1,2,3}, Р.З. ГУЛИЕВ²

¹ Институт проблем нефти и газа РАН, Аналитический центр энергетической политики и безопасности, Москва, Российская Федерация

² Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, г. Архангельск, Российская Федерация

³ Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, Москва, Российская Федерация

Судоходство в Арктике влияет на изменение климата, здоровье людей и окружающую среду. Внедрение альтернативных видов топлива в арктическом судоходстве может значительно снизить выбросы и воздействие, а также риск, связанный с использованием и перевозкой тяжелого нефтяного топлива. Во всем мире альтернативные виды топлива становятся жизнеспособной альтернативой топливу на основе нефти.

Планируется более широкое внедрение альтернативных видов топлива, особенно топлива с ультранизким содержанием серы, в качестве топлива для судов, плавающих в Арктике. Однако риск транспортной деятельности на арктическом шельфе связан с невероятно суровыми климатическими условиями. Детерминистический подход к оценке риска не дает полной оценки транспортной деятельности, поэтому авторы предлагают использовать метод нечеткой логики для оценки рисков транспортной доступности судов, использующих топливо с ультранизким содержанием серы в Печорском море.

Ключевые слова: Арктика, оценка рисков, нечеткая логика, транспортная доступность, безопасность

В ряде работ были продемонстрированы особенности использования метода нечеткой логики [8, 12, 13].

© 2024, Н.А. Еремин, Р.З. Гулиев
Поступила в редакцию 12.02.2024

Original article

DEVELOPMENT AND TESTING OF A FUZZY LOGIC ALGORITHM TO ENSURE SAFE ARCTIC TRANSPORT IN THE PECHORA SEA REGION

N.A. EREMIN^{1,2,3}, R.Z. GULIEV²

¹ OIL AND GAS RESEARCH INSTITUTE RAS, ANALYTICAL CENTER FOR ENERGY POLICY AND SECURITY, MOSCOW, RUSSIAN FEDERATION

² NORTHERN (ARCTIC) FEDERAL UNIVERSITY NAMED AFTER M.V. LOMONOSOV, DEPARTMENT DRILLING WELLS, DEVELOPING OIL AND GAS FIELDS, ARKHANGELSK, RUSSIAN FEDERATION

³ GUBKIN UNIVERSITY, DEPARTMENT DEVELOPMENT AND OPERATION OF OIL FIELDS, MOSCOW, RUSSIAN FEDERATION

Arctic shipping impacts climate change, human health and the environment. The introduction of alternative fuels in Arctic shipping can significantly reduce emissions and impacts, as well as the risk associated with the use and transport of heavy fuel oil. Around the world, alternative fuels are becoming viable alternatives to petroleum-based fuels.

There are plans to increase the adoption of alternative fuels, especially ultra-low sulfur fuels, to fuel ships sailing in the Arctic. However, the risk of transport activities on the Arctic shelf is associated with incredibly harsh climatic conditions. A deterministic approach to risk assessment does not provide a complete assessment of transport activities, so the authors propose to use the fuzzy logic method to assess the risks of transport accessibility of ships using fuel with ultra-low sulfur content in the Pechora Sea.

KEY WORDS: Arctic, risk assessment, fuzzy logic, transport accessibility, safety

В [11, 12] алгоритм нечеткой логики был использован с многообещающими результатами для решения проблемы оценки риска в морской разведке, в [13] результаты нечеткой логики сравнивались с традиционным подходом для оценки запасов углеводородов. Анализ

данных работ показывает, что нечеткая логика отражает специфические знания на выходе системы, и результаты дают нам более точную информацию для прогнозирования.

В данной работе мы предлагаем систему на основе нечеткой логики, применяемую для прогнозирования безопасности транспортных маршрутов. Анализ перспектив транспортной деятельности конкретных зон в пределах региона – важная задача, требующая решения. Он не направлен на создание готовой системы безопасных транспортных маршрутов на этих территориях, но позволит оценить техническую возможность реализации этих проектов и необходимый для этого объем средств [6, 10]. Целью данной работы было проектирование, разработка и тестирование нечеткого логического алгоритма (НЛА) для оценки деятельности арктического транспорта в Печорском морском районе, исходя из ледового состояния района исследований [9]. Авторы также проанализировали деятельность судов, использующих альтернативные виды топлива, чтобы оценить риски перевозок этих судов с учетом ледовой обстановки. Набор данных, используемый для анализа, должен содержать большой объем данных, полученных в результате спутниковых и полевых наблюдений. Чем больше период, в течение которого проводились наблюдения, тем точнее будет конечный результат анализа [3].

Мы рассмотрели риск транспортных маршрутов на арктическом шельфе в зависимости от состояния льда в двух случаях: при использовании метода на крупной сетке (123 зоны) и при использовании метода на мелкой сетке в районе Печорского моря (492 зоны).

Схема проведения численного эксперимента для оценки рисков показана на рисунке 1.

Для анализа мы использовали параметры состояния льда, позволяющие оценить перспективы развития территории. Эти ледовые факторы оказывают сильное влияние на транспортную безопасность региона. Анализ проводится с использованием метода экспертных оценок на основе многолетних данных о состоянии ледового покрова на данной территории. Эту группу следует рассмотреть более подробно. Существует несколько типов ледяного покрова, различающихся по своим свойствам. Обычно они различаются из-за времени, прошедшего с начала образования, и условий, в которых происходит обледенение: Новый лед, Нилас, Молодой лед, Перволетний лед, Старый лед.

Толщина льда – этот параметр является одним из самых важных в нашем списке, так как он напрямую влияет на возможность осуществления перевозок в регионе. В последние десятилетия среднегодовая толщина льда уменьшилась из-за влияния парникового эффекта, однако она по-прежнему остается главным препятствием для реализации проектов из-за высоких эксплуатационных расходов, связанных с навигацией по морям.

Н.А. ЕРЕМИН, Р.З. ГУДИЕВ
РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ НЕЧЕТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОГО СУДОХОДСТВА АРКТИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА В ПЕЧОРСКОМ МОРСКОМ РАЙОНЕ

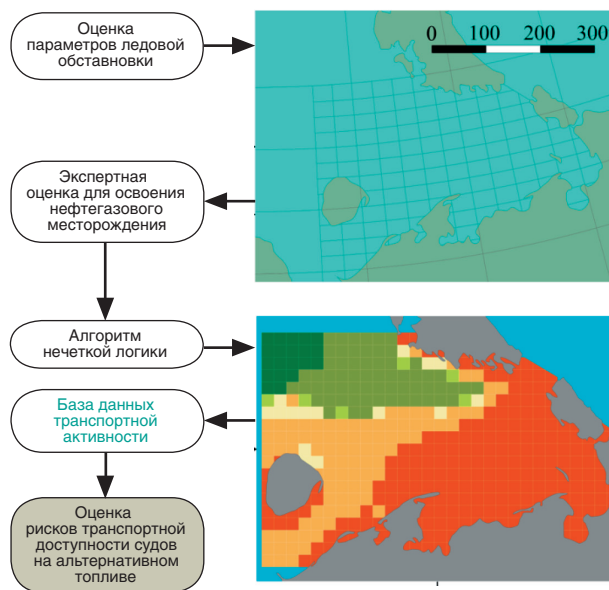


РИС. 1.

Схема проведения численного эксперимента для оценки рисков. Источник: Составлено авторами

Продолжительность этого периода влияет на время транспортировки, так как она обычно осуществляется в безледное время.

Концентрация льда – отношение характеризует количество поверхности моря, покрытой льдом, к общей поверхности моря в течение года. Общая концентрация включает все стадии транспортной деятельности, которые присутствуют, частичная концентрация может относиться к количеству определенной стадии или определенной формы льда и представляет собой только часть общей концентрации.

Айсберги, как одно из самых опасных ледовых образований, угрожают не только судоходству, но и значительно повышают риски, связанные с безопасным ведением процессов производственной деятельности [3, 8].

Описанные факторы имеют различные измерения. Некоторые из них измеряются во временных интервалах, некоторым можно дать лишь общую оценку "легкий/ложный". В таких условиях эффективен метод нечеткой логики [2]. Вся территория Печорского моря была разделена на несколько зон. Эти зоны были изучены и оценены с помощью многокритериального подхода. Причина использования подхода нечеткой логики заключалась в том, что он позволяет без труда оперировать многими параметрами при ограниченном знании предмета и большой неопределенности в отношении имеющихся данных [11]. Многокритериальный подход в оценке сложности условий означает одновременный анализ многих факторов [1, 5, 9]. Этот подход подробно рассмотрен в [8], где была проанализирована задача составления карты технической доступности. Поэтому здесь подход описан

лишь вкратце. Как объяснялось выше, для построения карты выбирается несколько параметров. Целый ряд значений для каждого критерия был отображен на оси соответствующей функции принадлежности, которая в дальнейшем была разделена на восемь различных классов, где 1-й класс имел наименьшее, а 8-й – наибольшее значение.

На рисунке 2 представлен обзор 13 типов судов и 7 размерных сегментов в декабре-марте в 2017–2018, 2018–2019 гг. Как мы видим, общее количество судов и судоходная деятельность увеличились.

После оценки параметров льда и активности перевозок мы можем создать карты транспортной доступности на основе оценки различных параметров. Таким образом, карты доступности покажут, в каких зонах и в какие месяцы можно осуществлять безопасную транспортную деятельность. В будущем этот метод поможет в мониторинге транспортной деятельности в режиме реального времени. Если мы добавим к нашему анализу следы судов, включая те, которые используют альтернативные виды топлива, мы также получим картину транспортной безопасности (рис. 3).

Печорское море – регион с суровыми ледовыми и погодными условиями [4]. Последовательное транспортное планирование позволяет комплексно подойти к будущим проектам. Высокий коммерческий потенциал региона и неопределенность, вызванная глобальным изменением климата, требуют активизации научно-исследовательской деятельности для достижения стабильной и долгосрочной стратегии развития [13]. Результаты исследования показывают успешность использования метода нечеткой логики в решении прогностической задачи оценки риска в случае многих ледовых факторов. На примере оценки транспортной доступности мы видим, что параметры льда, пропущенные через алгоритм, показывают безопасные и опасные регионы для судов. В сравнении с результатами оценки рисков нефтегазового освоения мы видим, что в Печорском море есть схожие регио-



РИС. 2. Транспортная деятельность в Арктическом регионе. Источник: Составлено авторами

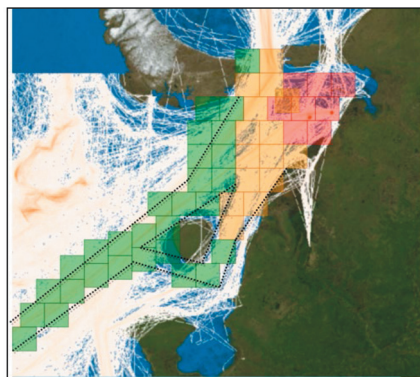


РИС. 3. Коридоры транспортной безопасности (зеленый цвет) для судов на альтернативных видах топлива на основе многокритериального анализа ледовой обстановки в Печорском море (значения цветов: зеленый и зеленые оттенки – комфортные условия для деятельности, оранжевый и оранжевые оттенки – суровые и очень суровые условия для деятельности). Источник: Составлено авторами

ны, представляющие риск как для морских нефтяных платформ, так и для судовой деятельности. В данной работе впервые показаны результаты применения многокритериального анализа для оценки рисков транспортной доступности в Арктическом регионе. Результаты исследования могут быть использованы в будущем для оценки технико-экономического обоснования различных транспортных маршрутов, включая северный морской путь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ рисков показал зоны и временные интервалы в году в районе Печорского моря, где условия достаточно хороши для транспортной деятельности судов на альтернативных видах нефтяного топлива. Эта методология может быть использована в будущем для мониторинга рисков с учетом ледовых условий в режиме реального времени, что поможет государственным органам и службам безопасности на море построить безопасные и стабильные стратегии транспортировки. В данной работе авторы показали эффективность нечеткой логики в прогнозировании безопасных транспортных зон, учитывая сложную ледовую обстановку в Печорском море.

ЛИТЕРАТУРА

1. AARI Archive of AARI comprehensive ice maps of the ice conditions of the Arctic and freezing seas of Russia in the exchange format SIGRID-3 for 01. 2020. /2019-12 / 2019 period. <http://wcd.aari.ru/datasets/d00041>.
2. DINGHONG C., YUWEI N. ET AL. Application and realization of fuzzy method for selecting wells and formations in fracturing in Putaohua oilfield: Production and operations: Diagnostics and evaluation. 2006. <https://scite.ai/reports/application-and-realization-of-fuzzy-AEa82O?page=1>.

3. GAUTIER D.L., BIRD K.J., CHARPENTIER R.R. ET AL. Assessment of undiscovered oil and gas in the Arctic. *Science*. 2009. Vol. 324. N5931. P. 1175–1179.
4. HARSEM Ø., HEEN K., RODRIGUES J.M.P. ET AL. Oil exploration and sea ice projections in the Arctic. *Polar Record*. 2015. Vol. 51. N1. P. 91–106.
5. JOHANNESSEN K., GUDMESTAD O.T., LØSET S. Drift of sea ice ridges in the Pechora Sea. *Journal of Navigation*. 2001. Vol. 54. N1. P. 81–96.
6. KHADEMI H.J., SHAHRIAR K., REZAI B. ET AL. Application of fuzzy set theory to rock engineering classification systems: An Illustration of the rock mass excavability index. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2010. Vol. 43. N3. P. 335–350.
7. MOHAGHEGH S.D., GASKARI R. ET AL. A new method for production data analysis to identify new opportunities in mature fields: Methodology and application. 2005. <https://onepetro.org/SPEERM/proceedings-abstract/05ERM/All-05ERM/SPE-98010-MS/89828>.
8. NESIC S., PIVOVAROV K.N., STRELETSKAYA V. ET AL. Mapping the main risks for offshore operations in the Pechora Sea. *WIT Transactions on the Built Environment*. 2018. Vol. 174. P. 69–80.
9. WAGNER P.M., HUGHES N., BOURBONNAIS P. ET AL. Sea-ice information and forecast needs for industry maritime stakeholders. *Polar Geography*. 2020. Vol. 43. N2–3. P. 160–187.
10. XIONG H., ROBINSON B.M., FOH S. Using an expert system to diagnose formation damage mechanisms and design stimulation treatments for gas storage wells. 2001. <https://onepetro.org/SPEERM/proceedings-abstract/01ERM/All-01ERM/SPE-72374-MS/134378>.
11. ZADEH L. Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965. Vol. 8. P. 338–353.
12. ZOLOTUKHIN A., GAVRILOV V. Russian Arctic petroleum resources. *Oil & Gas Science and Technology – Revue de l'IFP*. 2011. Vol. 66. N6. P. 899–910.
13. ZOLOTUKHIN A.B. A novel approach to resources and reserves determination. 2000. <https://onepetro.org/SPEATCE/proceedings-abstract/00ATCE/All-00ATCE/SPE-63199-MS/132183>.
- ET AL. Assessment of undiscovered oil and gas in the Arctic. *Science*. 2009;324;(5931):1175–1179.
4. HARSEM Ø., HEEN K., RODRIGUES J.M.P. ET AL. Oil exploration and sea ice projections in the Arctic. *Polar Record*. 2015;51;(1):91–106.
5. JOHANNESSEN K., GUDMESTAD O.T., LØSET S. Drift of sea ice ridges in the Pechora Sea. *Journal of Navigation*. 2001 54(1):81–96.
6. KHADEMI H.J., SHAHRIAR K., REZAI B. ET AL. Application of fuzzy set theory to rock engineering classification systems: An Illustration of the rock mass excavability index. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2010;43;(3):335–350.
7. MOHAGHEGH S.D., GASKARI R. ET AL. A new method for production data analysis to identify new opportunities in mature fields: Methodology and application. 2005. <https://onepetro.org/SPEERM/proceedings-abstract/05ERM/All-05ERM/SPE-98010-MS/89828>.
8. NESIC S., PIVOVAROV K.N., STRELETSKAYA V. ET AL. Mapping the main risks for offshore operations in the Pechora Sea. *WIT Transactions on the Built Environment*. 2018;174:69–80.
9. WAGNER P.M., HUGHES N., BOURBONNAIS P. ET AL. Sea-ice information and forecast needs for industry maritime stakeholders. *Polar Geography*. 2020;43;(2–3):160–187.
10. XIONG H., ROBINSON B.M., FOH S. Using an expert system to diagnose formation damage mechanisms and design stimulation treatments for gas storage wells. 2001. <https://onepetro.org/SPEERM/proceedings-abstract/01ERM/All-01ERM/SPE-72374-MS/134378>.
11. ZADEH L. Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965; 8:338–353.
12. ZOLOTUKHIN A., GAVRILOV V. Russian Arctic petroleum resources. *Oil & Gas Science and Technology – Revue de l'IFP*. 2011;66;(6):899–910.
13. ZOLOTUKHIN A.B. A novel approach to resources and reserves determination. 2000. <https://onepetro.org/SPEATCE/proceedings-abstract/00ATCE/All-00ATCE/SPE-63199-MS/132183>.

REFERENCES

1. AARI Archive of AARI comprehensive ice maps of the ice conditions of the Arctic and freezing seas of Russia in the exchange format SIGRID-3 for 01. 2020. / 2019-12 / 2019 period. <http://wdc.aari.ru/datasets/d00041>.
2. DINGHONG C., YUWEI N. ET AL. Application and realization of fuzzy method for selecting wells and formations in fracturing in Putaohua oilfield: Production and operations: Diagnostics and evaluation. 2006. <https://scite.ai/reports/application-and-realization-of-fuzzy-AEa82O?page=1>.
3. GAUTIER D.L., BIRD K.J., CHARPENTIER R.R.

Н.А. ЕРЕМИН, Р.З. ГУЛИЕВ
РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ НЕЧЕТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО
АЛГОРИТМА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОГО СУДОХОДСТВА
АРКТИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА В ПЕЧОРСКОМ МОРСКОМ РАЙОНЕ

Еремин Николай Александрович, д.т.н., профессор Института проблем нефти и газа РАН, заведующий аналитическим центром энергетической политики и безопасности РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, каф. разработки и эксплуатации нефтяных месторождений, главный научный сотрудник Северного (Арктический) федерального университета имени М.В. Ломоносова
 ☎ 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3,
 тел.: +7 (916) 672-85-71, e-mail: erm@mail.ru

Гулиев Рамиль Зафарович, ст. преподаватель кафедры бурения скважин, разработки нефтяных и газовых месторождений Северного (Арктический) федерального университета им. М.В. Ломоносова
 ☎ 163000, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 14,
 тел.: +7 (965) 793-44-86, e-mail: r.guliev@narfu.ru

УДК 550.344

DOI: 10.52531/1682-1696-2024-24-1-61-66

Научная статья

ВИБРОДИАГНОСТИКА ЗДАНИЙ НА ПРИМЕРЕ УЧЕБНО-ЛЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА МГРИ

В.В. Романов, А.А. ИвановРОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ (МГРИ),
МОСКВА, РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

В статье приводятся результаты вибродиагностики здания МГРИ с целью установления уровня вибраций на грунтовое основание и изучение характера распределения уровней вибрации по этажам. Отмечено существенное убывание амплитуд виброускорения с увеличением расстояния от источника до приёмника вибрации. Обратная картина наблюдается при изучении поэтажного распределения фона вибрации по этажам здания. С увеличением этажа компоненты вибраций растут, причем у вертикальной компоненты – быстрее, чем у горизонтальной.

Ключевые слова: *вибрация, вибродиагностика, микросейсмь, акселерограммы, велосиграны*

ВВЕДЕНИЕ

Вибрацией называется механическое колебание точек или связанных систем. При вибрации во времени изменяются три связанные величины – виброрасстояние x [м], виброрасстояние v [м/с] и виброускорение a [м/с²] колеблющегося тела [12]. Виброрасстояние и виброускорение являются векторными величинами, поэтому для их измерения используются трехкомпонентные датчики [3, 26]. Значения виброускорения и виброрасстояния имеют широкий динамический диапазон, поэтому они часто выражаются в децибелах, за опорные значения принимается $5 \cdot 10^{-8}$ м/с [1] и 10^{-6} м/с² соответственно. Например, виброускорение в 1 мм/с² равно 60 дБ, а виброрасстояния 1 мм/с соответствует уровню 86 дБ. Незначительные осадки зданий на малоустойчивых грунтах начинаются уже при превышении виброрасстояния уровня в 78 дБ (0,4 мм/с).

Механическое действие вибрации вызывает нежелательное изменение состояния зданий и грунтов, на которых они устанавливаются [17]. Долговремен-

Original article

VIBRATION DIAGNOSTICS BASED ON THE EXAMPLE OF THE MGRI TRAINING AND LECTURE COMPLEX

V.V. Romanov, A.A. IvanovSERGO ORDZHONIKIDZE RUSSIAN STATE
UNIVERSITY FOR GEOLOGICAL PROSPECTING,
MOSCOW, RUSSIAN FEDERATION

The article provides the results of vibration diagnostics of the MGRI building in order to establish the level of vibrations on the soil foundation and study the nature of the distribution of vibration levels across floors. A significant decrease in vibration acceleration amplitudes was noted with increasing distance from the source to the vibration receiver. The opposite picture is observed when studying the floor-by-floor distribution of vibration background across floors of a building. As the floor increases, the vibration components increase, and the vertical component grows faster than the horizontal one.

KEYWORDS: *vibration, vibration diagnostics, microseisms, accelerograms, velocigrams*

ное действие даже самых слабых вибраций вызывает деформации строительных конструкций и неравномерные осадки грунтов под фундаментами зданий [7, 26]. В несвязанных (песчаных и крупнообломочных) водонасыщенных грунтах под воздействием вибрации возникает разжижение, что приводит к потере несущей способности [13, 16]. Под влиянием вибрации конструкции зданий совершают колебания, с частотами, близкими к резонансным, что может вызвать обрушение бетонных и железобетонных конструкций [16]. Уровень вибрации на верхних этажах зданий определяется резонансным усилением отдельных частот вибраций перекрытиями и влиянием ветра [4, 15, 25]. Наибольшие амплитуды высокочастотных резонансных эффектов при взаимодействии техногенных вибраций и перекрытий зданий наблюдаются на верхних этажах [5, 25].

Вибрации подразделяются на следующие группы [18]:

- продолжительные вибрации (значительная продолжительность – несколько часов, устойчивый спектральный состав);
- импульсные вибрации (небольшая продолжитель-

ность, высокая начальная амплитуда воздействия, быстрое затухание);

- прерывистая вибрация (интервалы продолжительной вибрации с перерывами между ними; повторяющиеся импульсные колебания).

Продолжительные вибрации вызываются транспортными средствами, динамическим оборудованием или машинами, включая строительную технику [24]. Данный тип вибрации оценивается при помощи среднеквадратической амплитуды (*RMS*). Импульсная вибрация возникает под действием промышленных взрывов, падением тяжелых грузов, и ударами. Импульсная вибрация оценивается максимальным значением ускорения – пиковой амплитудой [18].

Техногенные вибрации обычно имеют относительно низкую амплитуду, поэтому их энергия определяется протяженностью процесса [1]. Основным источником продолжительной вибрации на территории крупных городов является автотранспорт и рельсовый транспорт [20], интенсивность потока постоянно возрастает [6]. Несмотря на относительно небольшой уровень вибрации, создаваемой транспортом [13], его влияние изменяет свойства грунтовых оснований и фундаментов зданий [3, 9]. Вибрационная нагрузка [19] может быть опасна для зданий и сооружений с длительными сроками эксплуатации и повышенной этажностью строений [2, 21, 22]. Однако влияние вибрации автотранспорта на городскую застройку изучено недостаточно полно [12, 26]. Большая часть энергии динамического воздействия от наземного транспорта переносится поверхностными волнами Рэлея, которые распространяются в грунтовой толще на глубине порядка 10–15 м от поверхности, где расположена основная часть заглубленных фундаментов зданий и сооружений [1].

Установлено, что при измерении на грунтовом основании горизонтальная составляющая виброускорений превышает вертикальную. Таким образом, именно воздействие горизонтальной составляющей вызывает колебания вышележащих конструкций [13].

Параметры фона вибраций (микросейсм) связаны с динамическими свойствами грунтовой толщи и здания, способных усиливать или уменьшать амплитуды колебаний [11]. При помощи исследований параметров вибраций изучаются свойства грунтов [10], состояние и устойчивость построенных зданий. Анализ спектров вибраций позволяет оценить преобладающие частоты сооружений [11]. Учитывая связь между напряжением и скоростью колебательного движения, а также связь напряжения и деформаций, можно выполнять диагностику состояния здания по значению виброскорости и (или) виброускорения [23].

Здание Российского государственного геологоразведочного университета (МГРИ) расположено на пересечении улиц Волгина и Миклухо-Маклая, в Юго-Западном муниципальном округе. Расстояния до обеих улиц – 120–130 м. По улицам перемещаются

В.В. РОМАНОВ, А.А. ИВАНОВ
ВИБРОДИАГНОСТИКА ЗДАНИЙ
НА ПРИМЕРЕ УЧЕБНО-ЛЕКЦИОННОГО
КОМПЛЕКСА МГРИ

легковые автомобили и автобусы, средняя скорость движения транспорта – 20–30 км/ч, утром и вечером возникают незначительные пробки. Здания МГРИ были сданы в эксплуатацию в 1986 году. Учебно-лабораторный корпус университета представляет собой 6-этажное здание, площадью около 40000 м². Верхняя часть грунтовой толщи сложена техногенными грунтами, покровными и моренными суглинками четвертичного возраста. По данным инженерной сейсморазведки на глубине 5 м прослеживается уровень грунтовых вод (УГВ). Скорость поперечных волн в толще – 200 м/с, скорость продольных волн над УГВ – 400 м/с, ниже – 1700 м/с.

Целью исследований было установить уровень слабых вибраций, создаваемых движением транспорта, на грунтовое основание здания МГРИ, а также изменение уровня вибрации по этажам.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Измерения вибрации выполнялись на открытом грунте юго-западнее основного здания МГРИ (пункт 1) и в северо-восточной части здания, на каждом из 6-ти этажей (пункт 2) (рис. 1). В здании измерялся лишь фон вибрации, на улице – фон и отклик грунтов на перемещаемый импульсный источник – удары легкой киянкой перпендикулярно земной поверхности. Для регистрации сейсмических колебаний применялся аппаратный комплекс, состоявший из 4-х канального регистратора Дельта-03 (ООО Логические системы) и 3-компонентного широкополосного акселерометра А0531 (ЗАО Геоакустика), обеспечивающего неискаженную запись колебаний в частотном диапазоне 0,1–100 Гц.

С помощью импульсного источника устанавливалось затухание вибраций [8] в грунтовом основании

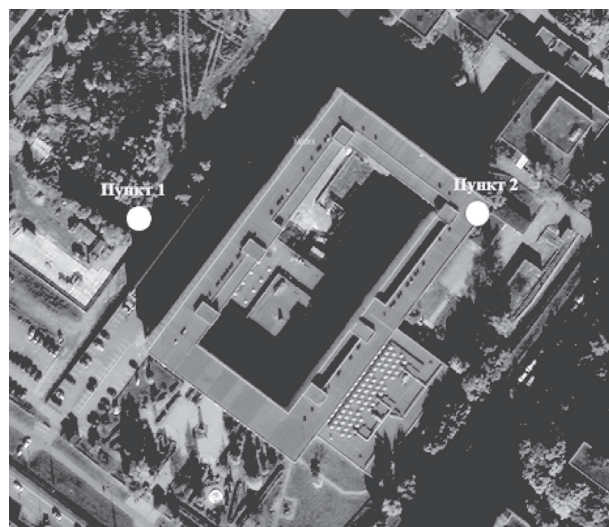


РИС. 1

Здание МГРИ на спутниковом снимке, выделены точки измерений вибрации

сооружения. Ударный импульсный источник (энергия около 10 Дж) перемещался по горизонтальному профилю с шагом 1 м, удары совершались в вертикальном направлении, ось X датчика ориентировалась вдоль профиля. Для снижения влияния неидентичности отдельных ударных воздействий в каждом пункте профиля совершалось по 5 повторных ударов, амплитуды которых при обработке усреднялись [14]. Увеличение длины профиля производилось до тех пор, пока пиковая амплитуда одной из трех компонент ускорения вибрации не становилась меньше уровня измеренного раннее фона. После этого регистрация ускорения вибрации останавливалась и перемещение источника прекращалось.

В здании МГРИ для регистрации вибрации применялись датчики, которые устанавливались на полу аудиторий, примерно на линии одного вертикального профиля. Длительность записи – 30 минут, ось X датчиков ориентировалась на север. Одновременно записывались величины виброскорости и виброускорения. Полученные данные обрабатывались в программе MicroSeisTools, предназначенной для анализа и преобразования записей микросейсмических колебаний (Романов В.В., Мальский К.С., свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016615697). Полученные в полевых условиях данные подвергались предварительной полосовой фильтрации в полосе 1–100 Гц, на них выбирались участки с относительно постоянным уровнем вибрации.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На открытом грунте (пункт 1) наблюдался постоянный фон вибраций с максимальной пиковой амплитудой (PGA) до 4,2 мм/с², что соответствует однобальному (неощутимому) землетрясению по шкале MSK-64. Общий уровень горизонтальных компонент виброускорения в 2,4 раза выше уровня вертикальной компоненты. Соотношение горизонтальных компонент периодически изменялось, но в целом они были примерно равны друг другу. Преобладающие частоты всех компонент вибрации входили в относительно узкий интервал 8–12 Гц, что соответствует толщине формирующего волновода 5 м и скорости поперечных волн 200 м/с.

В результате анализа распределения пиковых и среднеквадратических амплитуд было установлено, что амплитуда вибрации ожидаемо уменьшается с увеличением расстояния до ее источника. Однако было отмечено, что затухание пиковых и среднеквадратических амплитуд происходит по различным зависимостям. На полулгарифмическом бланке (амплитуда, дБ – расстояние до источника вибрации, м) зависимость ARMS от расстояния имеет практически линейный характер. На расстоянии 1–3 м от источника амплитуда вертикальной и горизонтальных компонент почти одинакова (82–100 дБ), затем горизонтальная

компонента убывает с градиентом 3,4 дБ/м, вертикальная – 7,6 дБ/м, то есть вертикальная компонента убывает быстрее чем горизонтальная (рис. 2).

Зависимость пиковой амплитуды от расстояния становится линейной с удаления 4 м от источника (рис. 3). На интервале 1–4 м пиковая амплитуда практически одинакова у вертикальной и горизонтальной компонент и быстро убывает от уровня 120 до 80 дБ (градиент 10 дБ/м). Затем горизонтальная компонента убывает с градиентом 2,8 дБ/м, вертикальная – 4,4 дБ/м. То есть пиковые амплитуды убывают медленнее, чем среднеквадратические, в 1,2–1,7 раз. Пиковые амплитуды в среднем на 20 дБ больше, чем среднеквадратические (в 10 раз). Несмотря на значительное различие абсолютных значений среднеквадратических и пиковых амплитуд, сам характер затухания вибраций в грунтах примерно одинаков.

Среднеквадратические амплитуды виброскорости (в дБ), характеризующие длительные вибрации в перекрытиях здания, плавно растут по мере увеличения номера этажа (рис. 4), причем скорость роста амплитуд с высотой падает.

Систематического преобладания одной компоненты вибраций над другой по ARMS выявлено не было. Средний градиент среднеквадратической амплитуды по этажам составил 2,64 дБ/этаж. Пиковая амплитуда APEAK вертикальной компоненты виброскорости больше, чем у горизонтальной, в среднем в 1,5 раза. Кроме того, для вертикальной компоненты пиковые амплитуды больше в среднем на 17 дБ (в 7 раз), а для горизонтальной на 14 дБ (в 5 раз) чем среднеквадратические, причем последнее отношение значительно стабильнее и слабо зависит от этажа.

По пиковой амплитуде виброскорости горизонтальной компоненты вибрации было установлено, что колебаниям основания здания соответствует землетрясение с интенсивностью 5,9 баллов (33 мм/с), 6-ому этажу – 7,5 баллов (186 мм/с), то есть градиент приращения интенсивности 0,25 баллов на этаж.

Среднеквадратические амплитуды виброускорения (в дБ), плавно растут по мере увеличения номера этажа. Градиент среднеквадратической амплитуды вертикальной компоненты виброускорения по этажам составил 4,50 дБ/этаж, горизонтальной – 3,63 дБ/этаж. Градиент APEAK вертикальной компоненты виброускорения по этажам составил 3,52 дБ/этаж, горизонтальной – 3,30 дБ/этаж. Кроме того, для вертикальной компоненты виброускорения пиковые амплитуды больше в среднем на 20 дБ (в 10 раз), а для горизонтальной на 18 дБ (в 8 раз), чем среднеквадратические.

На спектрах компонент четкой зависимости преобладающих частот компонент от высоты точки измерения выявлено не было. На компоненте Y на всех этажах наблюдался четкий спектральный пик с частотой 1,69 Гц и менее выраженный пик с частотой 2,1 Гц.

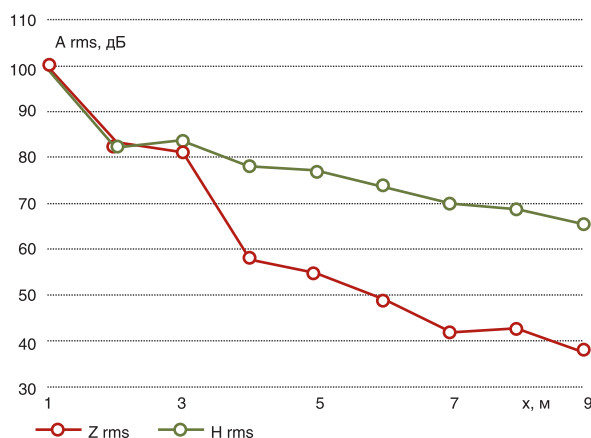


РИС. 2.

График убывания среднеквадратической амплитуды волны, созданной импульсным источником от расстояния, измеренной на открытой поверхности грунтов толщи

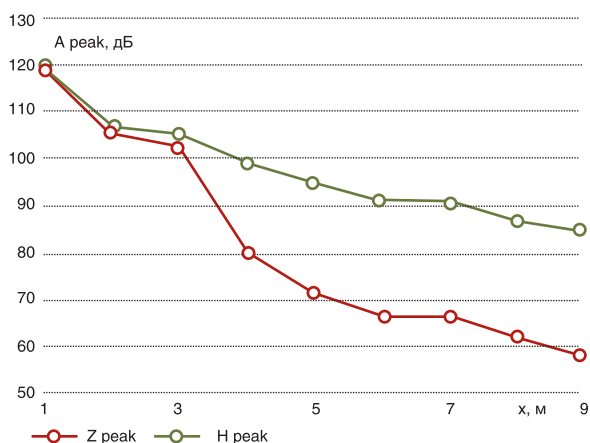


РИС. 3.

График убывания пиковой амплитуды волны, созданной импульсным источником от расстояния, измеренной на открытой поверхности грунтов толщи

На компоненте X также выделяются два пика – 1,85 и 2,07 Гц. В спектре вертикальной компоненты вибрации наблюдалась одна преобладающая частота 1,69 Гц. С ростом этажности появлялись новые, слабые высокочастотные резонансные максимумы.

ВЫВОДЫ

Выполненные работы дали результаты, хорошо сопоставляемые с теоретическими и практическими данными других публикаций. Отмечено существенное убывание амплитуд виброускорения с расстоянием, которое переносящие их сейсмические волны, проходят от источника до приемника вибрации. Затухание вертикальной компоненты вибрации в грунтовой толще происходит намного быстрее, чем горизонтальной примерно в 1,7 раз. Обратная картина наблюдается при изучении поэтажного распределения фона вибрации по этажам здания МГРИ. С увеличением этажа компоненты вибраций растут, причем у вертикальной компоненты – быстрее, чем у горизонтальной. Преобладающие частоты спектров Фурье с увеличением номера этажа не изменяются, но формируются новые узкополосные пики с высокой частотой. Помимо градиентов амплитуд было установлено соотношение между вибрациями здания УЛК МГРИ и интенсивностью землетрясений, которые создают колебания измеренного уровня.

Полученные данные могут быть использованы при оценке уровня вибрации вблизи зданий, диагностике устойчивости наземных и подземных сооружений, в горных выработках.

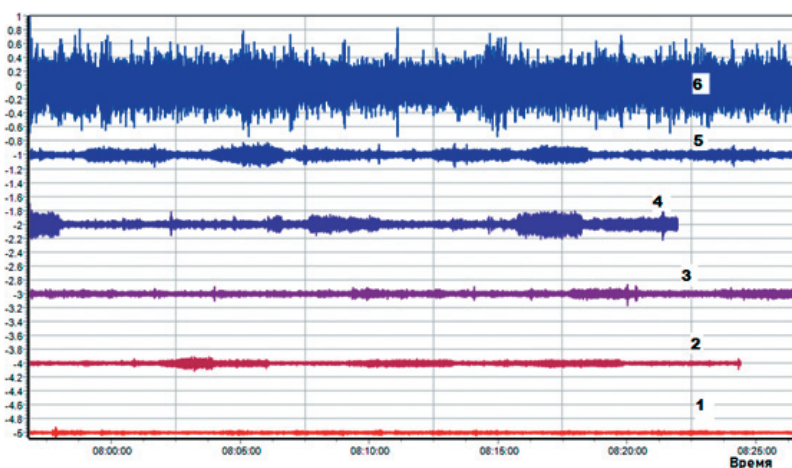


РИС. 4.

Распределение вертикальной компоненты виброскорости по этажам, номер этажа вынесен на записи вибрации

ЛИТЕРАТУРА

1. АБРАМОВА Т.Т. Защита грунтовых массивов от динамических и сейсмических воздействий // Символ науки. 2016. № 4–4 (16). С. 41–49.
2. АНОСОВ Г.И., ДРОБИЗ М.В., КОНОВАЛОВА О.А., СОТНИКОВ Д.С., ЧУГАЕВИЧ В.Я. Оценка сейсмической устойчивости учебного корпуса № 3 Российского государственного университета им. И. Канта с применением методики Накамура // Вестник Камчатской региональной организации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. 2010. № 1 (15). С. 223–231.
3. ВОЛКОВ Е.А., ТРЕТЬЯКОВА П.А., ШУТОВА О.А. Анализ результатов тестового эксперимента по исследованию вибрации, создаваемой автотранспортом на территории города // Вестник Пермского государственного технического университета. Строительство и архитектура. 2011. № 1. С. 15–20.

4. Захезин А.М., Колосова О.П., Иванов А.Е. Методы вибрационного диагностирования состояния несущих конструкций здания при воздействии транспортного потока // Наука и безопасность. 2015. № 3 (16). С. 24–31.
5. Зинатуллин А.В., Ковальчук О.А. Особенность динамических откликов элементов конструкций зданий повышенной этажности // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 1 (38). С. 59–64.
6. Изотова В.А. Развитие техногенного поля вибраций на территории Васильевского острова Санкт-Петербурга // В сборнике: Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Материалы XXIX молодежной научной школы-конференции, посвященной памяти члена-корреспондента АН СССР К.О. Кратца и академика РАН Ф.П. Митрофанова. 2018. С. 309–312.
7. Ишков А.Н., Воробьева Ю.А., Кононова М.С. Учет естественных колебаний зданий при оценке их технического состояния // Серия IOP Conference: Материаловедение и инженерия. IOP Publishing, 2018. Т. 451. № 1. С. 012047.
8. Камчыбеков М.П., Камчыбеков Ы.П., Егембердиева К.А., Кынатова З.Р. Затухание виброколебаний от строительной дорожной техники // Вестник Института сейсмологии Национальной Академии Наук Кыргызской Республики. 2018. № 1 (11). С. 32–40.
9. Козьмодемьянский В.Г. Исследование влияния динамических воздействий при строительстве на основании расположенных вблизи зданий // Недвижимость: экономика, управление. 2017. № 2. С. 58–61.
10. Лютоев В.А., Лютоева Н.В. Смешанные силы, влияющие на активность оползневых процессов вдоль железнодорожных склонов // Успехи современного естествознания. 2016. № 4. С. 145–150.
11. Мендекеев Р.А., Орумбаев С.Ж., Атабаев Б.М., Кыдыралиева У.С. Определение состояния зданий и сооружений с помощью исследования микросейсм объекта // Вестник КГУСТА. 2016. № 1 (51). С. 263–269.
12. Петрухин С., Петрухин В. Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации. Litres, 2017. 176 с.
13. Пономарев А.Б., Шутова О.А. Исследование вибрационного воздействия автотранспорта на фундаменты зданий в условиях плотной городской застройки // Интернет-Вестник ВолгГАСУ. 2013. № 2 (27). С. 2.
14. Романов В.В. и др. Определение затухания сейсмических волн в приповерхностной толще горных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. № 1. С. 110–116.
15. Смирнов В.В. Современное нормирование и требования к проведению измерений общей вибрации в помещениях жилых зданий // Здоровье – основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения. 2018. Т. 13. № 2. С. 958–965.
16. Чунюк Д.Ю., Козьмодемьянский В.Г., Коптева О.В. Инженерные изыскания для проектирования фундаментов сооружений вблизи источников вибрационных воздействий // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 10. С. 54–58.
17. BUYADZHI V.V. ET AL. Damage analysis and detection under varying environmental and operational conditions using a chaos theory method. Environmental problems. 2017. N2 (3). P. 165–170.
18. DEC. Assessing vibration. A technical guideline. 2006.
19. DESNICA E., ARSICH G., DURDEV M. Test and control methods for bearings in mining exploitation for increasing system reliability. 27th International Scientific and Professional Conference "Organization and Maintenance Technology". 2017. P. 1.
20. HUNAIDI O. Traffic vibrations in buildings. Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada. 2000. N 39. P. 1–6.
21. LOPES P. ET AL. Vibrations inside buildings due to subway railway traffic. Experimental validation of a comprehensive prediction model. Science of the Total Environment. 2016. N568. P. 1333–1343.
22. LU Z. ET AL. An experimental study of vibration control of wind-excited high-rise buildings using particle tuned mass dampers. Smart Structures and Systems. 2016. N18. (1). P. 93–115.
23. ROMANOV V.V., MALSKY K.S., POSERENIN A.I., KARINSKY A.D. Estimation of rock mass strength and water content by geophysical methods. Gornyi Zhurnal. 2018. (11). P. 61–64.
24. SHARDAKOV I. N. ET AL. Crack diagnostics in a large-scale reinforced concrete structure based on the analysis of vibration processes. AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, 2018. 2053;(1):040090.
25. TAMURA Y. ET AL. Evaluation perception of wind-induced vibration in buildings. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings. 2006. N159;(5). P. 283–293.
26. VLADIMIR S., ILYA T. To the question of vibration levels prediction inside residential buildings caused by underground traffic. Procedia Engineering. 2017. N176. P. 371–380.

REFERENCES

1. ABRAMOVA T.T. Protection of soil massifs from dynamic and seismic impacts. *Simvol nauki*. 2016;4–4;(16):41–49. (In Russian).
2. ANOSOV G.I., DROBIZ M.V., KONOVALOVA O.A., SOTNIKOV D.S., CHUGAEVICH V.Y. Evolution of seismic stability of the educational building 3 of Immanuel Kant Russian state university using the Nakamura method. *Vestnik Kamchatskoy regionalnoy or-*

- ganizacii Uchebno-nauchnyy centr. Seria Nauki o Zemle. 2010;1;(15):223–231. (In Russian).
3. VOLKOV E.A., TRETYAKOVA P.A., SHUTOVA O.A. Analysis of the results of a test experiment to study the vibration generated by vehicles in the city. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Stroitelstvo i arhitektura*. 2011;1:15–20. (In Russian).
 4. ZAHZIN A.M., KOLOSOVA O.P., IVANOV A.E. Methods of vibration diagnostics of the state of load-bearing structures of a building under the influence of traffic flow. *Nauka I bezopasnost*. 2015;3;16:24–31. (In Russian).
 5. ZINNATULLIN A.V., KOVALCHUK O.A. Special feature of dynamic responses of structural elements in high-rise buildings. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2013;1;(38):59–64. (In Russian).
 6. IZOTOVA V.A. Development of the technogenic field of vibrations on the territory of Vasilievsky Island of St. Petersburg. V sbornike Aktualnie problemi geologii, geofiziki I geocologii. Materiali XXIX molodezhnoi nauchnoy shkoli konferencii, posvyaschennoy pamyati chlena-korrespondenta AN SSSR K.O. Kratca i akademiika RAN F.P. Mitrofanova. 2018;309–312. (In Russian).
 7. ISHKOV A.N., VOROBIEVA YU.A., KONONOVA M.S. Taking into account natural fluctuations of buildings when assessing their technical condition. *Seriya IOP Conference: Materialovedenie i inzheneriya. IOP Publishing*. 2018;451(1):012047. (In Russian).
 8. KAMCHYBEKOV M.P., KAMCHYBEKOV Y.P., EGEMBERDIEVA K.A., KYNATOVA Z.R. Attenuation of vibrations from building-road equipment. *Vestnik Instituta seismologii Nacionalnoj Akademii Nauk Kyrgyzskoj Respubliki*. 2018;1;(11):32–40. (In Russian).
 9. KOZMODEMYANSKIY V.G. Investigating soil and structure vibrations caused by construction equipment. *Nedvizhimost: ekonomika, upravlenie*. 2017;2:58–61. (In Russian).
 10. LYUTOEV V.A., LYUTOEVA N.V. Mixed forces affecting the activity of landslide processes along railway slopes. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2016;4:145–150. (In Russian).
 11. MENDEKEEV R.A., ORUNBAEV S.ZH., ATABAEV B.M., KYDYRALIEVA U.S. Determination of the condition of buildings and structures by studying the microseismus of the object. *Vestnik KGUSTA*. 2016;1;(51):263–269. (In Russian).
 12. PETRUHIN S., PETRUHIN V. Fundamentals of vibration diagnostics and vibration measurement tools. *Litres*, 2017: 176. (In Russian).
 13. PONOMAREV A.B., SHUTOVA O.A. Investigation of the vibration effect of vehicles on the foundations of buildings in dense urban development. *Internet-Vestnik VolgGASU*. 2013;2;(27):2. (In Russian).
 14. ROMANOV V.V. ET AL. Determination of attenuation of seismic waves in the near-surface thickness of mine workings. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*. 2018;1:110–116. (In Russian).
 15. SMIRNOV V.V. Modern rationing and requirements for general vibration measurements in residential buildings. *Zdorov'eosnova chelovecheskogo potenciala: problemy i puti ih resheniya*. 2018;13;(2):958–965. (In Russian).
 16. CHUNYUK D.YU., KOZMODEMYANSKIY V.G., KOPTEVA O.V. Engineering surveys for the design of foundations of structures near sources of vibration effects. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo*. 2017;10:54–58. (In Russian).
 17. BUYADZHI V.V. ET AL. Damage analysis and detection under varying environmental and operational conditions using a chaos theory method. *Environmental problems*. 2017;2;(3):165–170.
 18. DEC. Assessing vibration. A technical guideline. 2006.
 19. DESNICA E., ARSICH G., DURDEV M. Test and control methods for bearings in mining exploitation for increasing system reliability. 27th International Scientific and Professional Conference "Organization and Maintenance Technology". 2017:1.
 20. HUNAIDI O. Traffic vibrations in buildings. Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada. 2000;39:1–6.
 21. LOPES P. ET AL. Vibrations inside buildings due to subway railway traffic. Experimental validation of a comprehensive prediction model. *Science of the Total Environment*. 2016; 568:1333–1343.
 22. LU Z. ET AL. An experimental study of vibration control of wind-excited high-rise buildings using particle tuned mass dampers. *Smart Structures and Systems*. 2016;18; (1):93–115.
 23. ROMANOV V.V., MALSKY K.S., POSERENIN A.I., KARINSKY, A.D. Estimation of rock mass strength and water content by geophysical methods. *Gornyi Zhurnal*. 2018;(11):61–64.
 24. SHARDAKOV I. N. ET AL. Crack diagnostics in a large-scale reinforced concrete structure based on the analysis of vibration processes. *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing, 2018; 2053;(1):040090.
 25. TAMURA Y. ET AL. Evaluation perception of wind-induced vibration in buildings. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*. 2006;159;(5):283–293.
 26. VLADIMIR S., ILYA T. To the question of vibration levels prediction inside residential buildings caused by underground traffic. *Procedia Engineering*. 2017;176:371–380.
- Романов Виктор Валерьевич**, к.т.н., доцент кафедры геофизики Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе (МГРИ)
- Иванов Андрей Александрович**, к.г.-м.н., доцент кафедры геофизики Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе (МГРИ)
 ☎ 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23,
 тел: +7 (495) 433-62-56, доб. 2152,
 e-mail: ivanovaa@mgri.ru
 117997, Moscow, Miklouho-Maclay St., 23

УДК 622.35

DOI: 10.52531/1682-1696-2024-24-1-67-74

Научная статья

МОДЕРНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬНО-МОНТАЖНОГО ПИСТОЛЕТА ДЛЯ ДОБЫЧИ ПРИРОДНОГО КАМНЯ

В.Т. Федоров¹, М.Н. Кокоев²¹ Концерн «Наноиндустрия», Москва,
РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ² КАБАРДИНО-БАЛКАРСКИЙ

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИМ. Х.М. БЕРБЕКОВА, НАЛЧИК,

КАБАРДИНО-БАЛКАРСКАЯ РЕСПУБЛИКА

Была исследована возможность механизации работы клиньев для добычи природного камня. Цель – снизить вес клиньев до нескольких кг и уменьшить диаметр шпуров в камне, куда вставляются клинья. Вес используемого одного гидроклина 26 кг, не считая веса гидронасоса с напорными шлангами. Среди вариантов механизации работ по добыче камня с помощью клиньев рассмотрены следующие подходы – использование электрогидравлического эффекта; применение испарения жидкого азота в замкнутом объеме; использование электромеханического привода клиньев. Выбран четвертый вариант – модернизация строительного монтажного пистолета под новую задачу. Сделан расчет модернизированного монтажного пистолета. Расколоть крупный каменный блок могут несколько монтажных пистолетов под винтовочный патрон 7,62 × 54,00 мм с зарядом флегматизированного пороха. В каменном блоке сверлятся шпуры, куда вставляются клинья. Приняты меры для компенсации отдачи пистолетов. Выстрел – и клинья, существенно крупнее дюбеля, раскалывают камень. Клинья многоразовые. Одновременность срабатывания нескольких пистолетов обеспечивается электроспусками от одной цепи. Модернизированный пистолет вместе с электроспуском для добычи камня может иметь массу до 3,5 кг. Обсуждаются технические детали предложения.

Ключевые слова: добыча природного камня, гидроклин, модернизация, строительный монтажный пистолет, заряд пороха

ВВЕДЕНИЕ

В атмосфере крупных городов, содержащих соединения агрессивных газов, наружная облицовка зданий из мрамора, арагонита, известняка и других карбонатных пород служит в десятки раз меньше, чем гранит,

© 2024, В.Т. Федоров, М.Н. Кокоев
Поступила в редакцию 06.10.2023

Original article

MODERNIZATION OF CONSTRUCTION- INSTALLATION OF A PISTOL FOR MINING NATURAL STONE

V.T. FEDOROV¹, M.N. KOKOEV²¹ CONCERN «NANOINDUSTRY», MOSCOW,
RUSSIAN FEDERATION² KABARDINO-BALKAR STATE UNIVERSITY
NAMED AFTER H.M. BERBEKOV, NALCHIK,
KABARDINO-BALKARIAN REPUBLIC

The possibility of mechanizing the operation of wedging for the extraction of natural stone was reviewed. The goal is to reduce the weight of the wedges to several kg and reduce the diameter of the holes in the stone where the wedges are installed. The weight of one hydraulic wedge used is 26 kg, not counting the weight of the hydraulic pump with pressure hoses. Among the options for mechanizing stone mining with wedges, the following approaches are considered – the use of the electro-hydraulic effect; application of liquid nitrogen evaporation in a closed volume; use of electromechanical wedge drive. The fourth option was chosen – modernization of the powder actuated fastening tool for the new task. A calculation has been made for a modernized fastening tool. Several fastening tools chambered for a 7,62 × 54,00 mm rifle cartridge with a charge of moderated propagation gunpowder can split a large stone block. Shallow holes are drilled into the stone block into which wedges are inserted. Measures have been taken to compensate for the recoil of a shot. A shot is fired and the wedges, much larger than a concrete anchor, split the stone. The wedges are reusable. The synchronized operation of several tools is ensured by electric firing from one circuit. A modernized tool with an electric triggering for stone mining can weigh below 3,5 kg. The technical details of the proposal are discussed.

KEY WORDS: extraction of natural stone, hydro wedge, modernization, powder actuated fastening tool, gunpowder charge

диабаз, кварцит и другие твердые изверженные метаморфизованные породы. Полированный или без обработки поверхности облицовочный гранит, диабаз имеют высокий спрос внутри страны. К натуральным облицовочным материалам высокого качества и дол-

говечности вырос интерес и за рубежом. Экономические соображения здесь играют не последнюю роль [3]. Использование устойчивых к крайне неблагоприятной атмосфере городов облицовочных материалов позволяет сократить расходы на ремонт фасадов при эксплуатации зданий.

При богатых запасах природного сырья Россия импортировала ежегодно до 2022 г. более 50% облицовочных изделий из природного камня. Это объясняется более высоким качеством и точными размерами зарубежной продукции. Не всегда удовлетворительное качество отечественных изделий – это следствие сильного износа оборудования и низкой технологической культуры предприятий, ведущих добычу и обрабатывающих облицовочный камень [11]. Благодаря постоянному технологическому развитию и быстрому распространению инновационных дизайнерских идей спрос на натуральные камни в последние годы увеличивается [22].

Применение канатно-абразивных пил, в которых в качестве абразива используют суспензию, содержащую кварцевый песок, в нашей стране началось в 1930 г. Но канатно-абразивные пилы показывали хорошую производительность только на камнях до средней твердости – подобных мрамору, а на камнях большей твердости – граните, диабазе и тому подобных, в несколько раз меньше.

15 февраля 1953 г. в шведской компании ASEA группа Эрика Лундблада впервые получила синтетические алмазы. В компании, без публикаций в прессе об успехе группы, более двух лет продолжались работы по оптимизации режимов и составов по производству синтетических алмазов. Советский физик Овсей Ильич Лейпунский в 1939 г. опубликовал теоретическую работу в «Успехах химии», в которой указал, при каких давлении и температуре можно получить алмазы в результате синтеза (так называемая диаграмма Лейпунского). Знал ли о диаграмме Лейпунского кто-либо из группы Э. Лундблада, неизвестно.

16 декабря 1954 г. американская фирма «Дженерал электрик» (GE), вторыми после шведов, получила синтетические алмазы. Но только в марте 1955 г. фирма GE сочла возможным опубликовать сообщение о том, что открытие состоялось. В тот же день акции компании GE поднялись в цене. Вскоре американцы начали производить технические алмазы в промышленных количествах. А осенью 1957 г. компания «Дженерал электрик» объявила, что ею изготовлено 100 тысяч карат (20 кг) алмазного порошка. В начале 1960-х годов, с появлением на мировом рынке первых синтетических алмазов, начали регистрировать за рубежом патенты на оборудовании с канатно-алмазными и дисковыми пилами для добычи природного камня.

В СССР тогда был сильнейший дефицит алмазов для технических целей. Западные страны не продавали стране стратегические материалы. В техниче-

ских алмазах остро нуждались машиностроение и инструментальные заводы. Алмазное месторождение «Мир», открытое в Якутии в 1955 г., начало выдавать свою продукцию в 1957 г., причем 80% – технические алмазы. Но природные алмазы, хоть и технические, все еще были в дефиците. Когда в 1960 г. будущий академик АН СССР Л.Ф. Верещагин [4] со своими сотрудниками осуществил получение синтетических алмазов, началась разработка алмазных инструментов и внедрение их в промышленность. Сначала синтетические алмазы пошли в авиастроение и на предприятия, имеющие отношение к космосу и ВПК, а потом уже на предприятия народного хозяйства.

Современные способы добычи каменных блоков не обходятся без алмазного инструмента. Резка алмазно-канатными пилами и алмазными дисковыми пилами – это высокоэффективный метод, позволяющий обеспечить точные размеры блоков и плит и уменьшить количество отходов [19]. Шлифовка гранитных облицовочных плит алмазным инструментом наиболее производительна. Но высокие затраты, износ и поломка алмазного режущего инструмента сдерживают распространение этой технологии [14].

Крупные блоки из крепких изверженных пород добывают буровзрывным и буроклиновым способами. Взрывные работы с использованием взрывчатых веществ (ВВ) для добычи камня требуют дальнейшего изучения и оптимизации. В отношении этой технологии существует ряд значительных ограничений. Во-первых, при таких подрывах каменные обломки могут разбрасываться на значительные расстояния, так как большинство конденсированных ВВ при взрыве обладают бризантным, то есть дробящим действием [2]. Есть составы ВВ, снижающие их бризантность. Во-вторых, известные трудности работы с взрывчатыми веществами ограничивают область их применения в неспециализированных организациях, так как использование ВВ предполагает специальную подготовку людей, соблюдение особых правил хранения, перевозки, использования и учета [15].

Применение простого клина при разработке камня практикуется давно и весьма рационально по своей сути, так как при воздействии расклинивающих усилий материал разрушается за счет растягивающих напряжений, предельная величина которых для камня в десятки раз ниже, чем величина допустимых напряжений сжатия.

В работе [20] проведено исследование механических свойств твердых горных пород более десяти видов. Установлено, что их средняя прочность на разрыв равна 3,4 МПа (34 кгс/см²), что примерно в 30 раз ниже прочности твердых пород на сжатие. Следует заметить, что прочность твердых горных пород указана весьма условно, отличие может достигать десятичного порядка. Кроме того, горные породы разрушаются

при малой линейной относительной деформации, которая в среднем не превышает 0,3–0,4%. Из приведенных в литературе данных следует, что количество энергии, необходимое для разрушения породы под действием растягивающих напряжений, соответствует 0,001 значения той величины, которая необходима для разрушения камня при сжатии.

Наиболее ответственный процесс в технологии добычи гранитных блоков – выкалывание из массива крупного монолита, размеры которого зависят от расстояния между отдельными трещинами, а при их отсутствии – от грузоподъемности подъемно-транспортного оборудования. Монолит раскалывают на блоки и заготовки буроклиновым способом с размещением простых или гидравлических клиньев в шпурах, пробуренных перфораторами с твердосплавными коронками.

Применяемые для добычи каменных блоков гидравлические клинья позволяют получать большие направленные усилия по сравнению с усилиями, развиваемыми при взрывах. Действие гидроклина также благоприятно, поскольку позволяет точнее ориентировать раскол в нужном направлении, что повышает выход годного материала. Однако работа с существующими гидроклинами требует большой затраты физической силы, так как масса известных гидроклиньев типа ГКБ-1 и ГКБ-2 равна примерно 45 кг. Гидроклинья подключены двумя шлангами к гидронасосной станции. Гидроклин ГКБ-2М имеет массу 26 кг [12]. Большая масса существующих гидроклиньев объясняется наличием гидроцилиндра с поршнем, длинного штока с клином, пружинящих разжимных щечек и других массивных деталей.

В одной из первых работ, посвященных уменьшению массы гидроклина [10], было предложено вместо клина закладывать в шпур мягкую оболочку из многослойного высокопрочного кевлара. В эту оболочку закачивать под высоким давлением от 12 до 32 МПа гидрожидкость.

Нами были исследованы возможные принципы работы и конструкции гидроклина, использование которых позволило бы снизить массу расклинивающего инструмента. Одновременно изучалась возможность уменьшения диаметров шпуров, используемых при разработке природного камня с помощью гидроклина. Очевидно, что обе задачи взаимосвязаны. Среди вариантов механизации работ по добыче натурального камня, используя идею клина, рассмотрим следующие подходы:

- использование электрогидравлического эффекта;
- применение испарения криогенной жидкости в замкнутом объеме;
- использование электромеханического привода для работы клина;
- применение патрона с порохом, как в строительном монтажном пистолете.

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Для создания импульса высокого давления в жидкости и передачи его на стенки шпура для раскалывания камня с целью получения крупных каменных блоков рассмотрим необычный физический эффект. Электрогидравлический эффект открыт Л.А. Юткиным в 1933 г., но первое опубликованное изобретение имеет дату 1950 г. Оборудование и технология использования электрогидравлического эффекта в различных отраслях промышленности достаточно хорошо освоены как в России, так и за рубежом [17]. Однако работа с высоковольтным конденсаторным накопителем в полевых условиях требует особых мер электрической безопасности, так как к электродам разрядной камеры прикладывается напряжение величиной от 10 до 25 кВ при большой величине тока [7]. Недостаток данного подхода заключается в импульсном (десятые доли миллисекунды) воздействии сильного электрогидравлического удара, который может вызвать поломку клина. Но, несмотря на это обстоятельство, проведем оценочные расчеты.

Определим необходимую мощность конденсаторного накопителя для одновременной импульсной передачи энергии на пять гидроклиньев. Чтобы расколоть крупный каменный блок должны работать несколько клиньев, выстроенных по линии раскола камня. Найдем величину работы Акл. для одного гидроклина ГКБ-2М:

$$A_{кл.} = [P (\pi D^2 / 4) h] / (\eta_{ш} \eta_{п} \eta_{н} \eta_{с} \eta_{ш} \eta_{к}), \quad (1)$$

где P – рабочее давление в гидроцилиндре (12 МПа), D – диаметр цилиндра гидроклина (60 мм), h – величина рабочего хода поршня (100 мм), $\eta_{ш}$ – КПД цилиндр-поршень (0,9), $\eta_{п}$ – КПД гидронасоса (0,82), $\eta_{н}$ – КПД электродвигателя насоса (0,85), $\eta_{с}$ – КПД гидро-шлангов (0,92), $\eta_{к}$ – КПД клина (0,9). Для самого легкого гидроклина ГКБ-2М массой 26 кг, общий КПД равен 0,519. Величина работы для одного клина Акл. равна 6,53 кДж.

При работе электрогидравлического устройства не более 50% энергии накопителя переходит в механическую работу. Следовательно, при работе накопителя на 5 шпуров необходимая энергия конденсаторной батареи должна быть минимум в десять раз больше. Таким образом, энергоемкость конденсаторной батареи, работающей одновременно на 5 шпуров должна быть не менее 65,34 кДж.

Как известно, энергия электрического поля $W_{э}$, запасаемая накопителем, равна:

$$W_{э} = \frac{CU^2}{2}, \text{ откуда } C = \frac{2W}{U^2}, \quad (2)$$

где C – электрическая емкость конденсатора, U – рабочее напряжение.

Приняв рабочее напряжение равным 10 кВ находим, что для получения указанной энергии разряда необходимо использовать импульсные конденсаторные батареи суммарной емкостью 1300 мкФ. Емкость конденсатора C определяется:

$$C = \frac{\epsilon_0}{d} \epsilon S, \quad (3)$$

где ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей пространство между пластинами (в вакууме равна 1,0), ϵ_0 – электрическая постоянная, равная $8,854 \times 10^{-12}$ Ф/м; S – площадь каждой (или наименьшей) пластины; d – расстояние между пластинами. Из формулы (3) следует, чем тоньше диэлектрический промежуток d , тем выше емкость конденсатора, но толщина изолирующего промежутка ограничена его электрической прочностью. В современных конденсаторах с высокой запасаемой на единицу объема энергией полимерные пленки с алюминиевым покрытием обычно имеют толщину 2...5 мкм [8]. Это физически ограничивает возможности их работы в качестве импульсных конденсаторов. Они применяются в обычной электротехнике и электронике, где нет импульсных разрядных токов. В будущем, возможно, появятся импульсные конденсаторы повышенной энергоемкости.

Для накопительных устройств конденсаторы производят с целью получения больших мощностей в коротком импульсе и способными выдерживать токи во многие кА и большие электродинамические нагрузки. Геометрический объем батареи определяем из того, что удельная энергоемкость серийных импульсных конденсаторов в лучшем случае не превышает $0,5$ Дж/см³ [16]. Объем конденсаторного накопителя для нашего случая берем равным 131 дм³. Основные компоненты импульсных конденсаторов – это алюминий, полимерная изоляция и электротехническое масло, фарфоровые высоковольтные вводы, поэтому конденсатор не может иметь среднюю плотность меньше 1400 кг/м³. Исходя из этого, минимальная масса накопителя вместе с высоковольтным блоком питания получается равной 500 кг.

Таким образом, накопитель энергии (батарея импульсных конденсаторов) для работы электрогидравлической установки имеет большую массу и для его перевозки вместе с блоком питания необходим грузовой автомобиль. По массе и стоимости всего комплекса он будет существенно больше существующего гидромеханического оборудования. Обслуживание всего комплекса из-за наличия высоковольтного оборудования будет намного сложнее.

ПРИМЕНЕНИЕ ЖИДКОГО АЗОТА В КЛИНЕ ДЛЯ ДОБЫЧИ КАМНЯ

Рассматривалось использование в силовом устройстве в виде пневматического клина жидкого азота для

раскалывания камня. Один литр жидкого азота, испаряясь и нагреваясь до 20° С, образует примерно 700 литров газа. При испарении жидкого азота в замкнутой камере давление в ней может быть увеличено до 35 – 40 МПа. В камерах должен быть незамерзающий предохранительный клапан. Это позволило бы существенно снизить массу инструмента и отказаться от применения гидронасоса и напорных шлангов. Для совершения клином одного рабочего хода необходимо подать в камеру инструмента 80 – 100 г жидкого азота (по объему 100 – 125 мл), после чего быстро закрыть ее затвором с уплотнителем с многозаходной резьбой. Надо предварительно захлаживать камеры клиньев жидким азотом, а после заправки криогенной жидкостью ждать пока они нагреются до температуры окружающей среды.

На многих промышленных предприятиях есть установки для получения жидкого азота и стоимость его невысока [5]. Хранение жидкого азота не представляется технически сложной задачей. Существуют криогенные емкости различного объема для хранения и перевозки жидкого азота. Жидкий азот обладает удельной плотностью $0,808$ г/см³ и имеет точку кипения $77,4$ К ($-195,75^\circ$ С). Азот не взрывоопасен и не ядовит [1]. Однако метод, основанный на применении криогенной жидкости, нельзя считать пригодным для широкого применения в камнедобывающих карьерах, так как жидкий азот все же является продуктом, доступным не во всех регионах страны. Есть и другая причина непригодности криогенной жидкости в пневмоклине.

Трудность, препятствующая дальнейшей разработке данного направления, связана с тем, что при использовании нескольких клиньев для раскалывания одного каменного блока, не решена проблема одновременной и равной заправки жидким азотом большого количества камер пневмоклиньев за малое время. Это приведет к неодновременному нарастанию давления в камерах клиньев, что снизит их суммарное силовое воздействие на обрабатываемый материал.

Кроме того, работа с газом высокого давления даже при небольших объемах используемых камер требует обеспечения строгих мер безопасности, чем работа с обычными гидравлическими устройствами небольшой и средней мощности. Коэффициент сжимаемости гидрожидкостей невысок, поэтому в случае разрыва гидроцилиндра последствия будут не столь катастрофичны, как при разрыве емкости со сжатым газом.

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА ДЛЯ РАБОТЫ КЛИНА

Изучалась возможность применения для механизации работы клина электромеханического привода, состоящего из электродвигателя, редуктора и винтовой передачи. Достоинство электропривода по

сравнению с гидроприводом заключается в том, что громоздкие напорные шланги ограниченной длины, которые затрудняют передвижение рабочего по рабочей площадке, можно заменить на более длинные и легкие электрокабели для питания электродвигателя.

Назначим распорное усилие клина $F = 0,5 \text{ МН}$ (50 тс). Если оно окажется недостаточным, то расстояния между шпурами можно уменьшить. Оценим мощность привода N для электромеханического клина:

$$N = Fs / (t \times \eta_s \eta_{\text{ч}} \eta_{\text{в}} \eta_{\text{ка}}) = 10 \text{ кДж} / (t \times \eta_s \eta_{\text{ч}} \eta_{\text{в}} \eta_{\text{ка}}), \quad (4)$$

где $s = 0,02 \text{ м}$ ход с распорным усилием клина, равное 50 тс, время работы электродвигателя $t = 30 \text{ с}$; КПД электродвигателя $\eta_s = 0,85$; КПД червячной передачи с малым передаточным числом $\eta_{\text{ч}} = 0,80$; КПД винтовой передачи $\eta_{\text{в}} = 0,92$; КПД передачи клином (скольжение клина по щечкам) $\eta_{\text{ка}} = 0,9$. Общий КПД привода из формулы (4) равен 0,56.

При указанной длительности рабочего хода электромеханического клина необходимая мощность электропривода должна быть равной 0,565 кВт. Учитывая, что привод работает не более полминуты и с большими паузами, можно взять электродвигатель мощностью 0,40 кВт. В случае применения для привода коллекторного двигателя масса инструмента вместе с червячным редуктором и реверсивной передачей типа «винт-гайка» получается несколько меньше, чем у гидроклина. Кроме того, у электрического клина не удастся снизить диаметр рабочей части инструмента, которая должна входить в шпур. Значит, трудоемкость бурения шпуров остается такой же.

Снизить немного массу электромеханического клина можно применив волновую или планетарную передачу и асинхронный электродвигатель, работающий от источника тока на 400 Гц. Однако такой вариант требует для питания двигателя применения преобразователя частоты тока. Таким образом, стоимость электромеханического клина будет выше стоимости гидроклиньев с гидронасосной станцией, с некоторым уменьшением массы электроинструмента и с повышением его сложности. Единственное и немалое преимущество клина с электромеханическим приводом, с учетом работы в карьере, отсутствие гидронасосной станции и тяжелых напорных шлангов. Вместо шлангов длинный и гибкий электрокабель для питания электродвигателя клина.

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПАТРОНОВ С ПОРОХОВЫМ ЗАРЯДОМ ДЛЯ ПРИВЕДЕНИЯ КЛИНА В ДЕЙСТВИЕ

Оценим по энергетическим показателям возможность применения в механизированном инструменте для добычи природного камня устройств, основанных на использовании энергии патронов с пороховым зарядом. Подобно тому, как это решение используется

в строительно-монтажных пистолетах. Такой подход оправдан тем, что для его реализации возможно использование готовых конструктивных элементов и узлов стрелкового оружия (патронники, затворы, спусковые устройства). На специализированных заводах имеется большой выбор серийно изготавливаемых изделий пиротехнической номенклатуры, а также методы и средства испытаний подобной продукции. Это направление разработки особенно перспективно в плане конверсии для НИИ и предприятий военно-промышленного комплекса [9].

Строительно-монтажные пистолеты по сравнению с гидроклином (26 кг) имеют массу намного меньше. Например, пороховой пистолет GFT5™ (АО «GEFEST») имеет массу 4,6 кг (ТУ 7181-001-90573248-2012; ГОСТ Р 50529-2010. Руководство по эксплуатации «Пистолет монтажный поршневой GFT5™» (<https://www.komplektacya.ru/data/pistolet-gft-5.pdf>). Бывают строительно-монтажные пистолеты и существенно меньшей массы до 2,5 кг. Например, строительно-монтажный пистолет ПЦ-84. Патрон для GFT5 размером 6,8 × 18 мм имеет максимальный заряд с энергией 1,3 кДж. В патроне строительно-монтажного пистолета GFT5™ бездымного пороха около 0,8 г. Этого достаточно, чтобы монтажный пистолет прибил деталь с толщиной малоуглеродистой стальной стенки до 4 мм к бетону дюбелем длиной 76 мм. Такого заряда пороха, как убедимся ниже, недостаточно для работы клина по раскалыванию камня.

Вообще, использование строительно-монтажного пистолета регулируется нормативными актами по охране труда: в Европе – Требования к безопасности для ручного инструмента прямого монтажа (Европейский Стандарт EN 792-13. В России – Инструкцией по технике безопасности при применении строительно-монтажных пистолетов (РД 34.03.214). Если изложенная в этой статье концепция модернизации пистолета с использованием патронов с пороховым зарядом для добычи природного камня будет реализована в какой-либо организации или предприятии, то разработчик должен разработать руководство по эксплуатации и инструкцию по технике безопасности при применении нового инструмента.

Сделаем ориентировочный расчет работы по раскалыванию крупного каменного блока. Из устройства гидроклина ГКБ-2М следует, что поперечный полный ход клина при раскалывании камня равен $s = 8,7 \text{ мм}$. В результате работы нескольких гидроклиньев раскалывается крупный каменный блок. В среднем напряжение разрыва для гранита, при котором раскалывается гранитный блок равно $\sigma = 3,4 \text{ МПа}$ [20]. Найдем затраты работы $A_{\text{ка}}$ для раскалывания гранитного блока для одного клина:

$$A_{\text{ка}} = \sigma \times b \times h \times s / (\eta_{\text{ка}} \eta_{\text{стр.о}}) = 3,4 \times 10^6 \times 0,25 \times 0,5 \times 0,0087 / (0,9 \times 0,4), \quad (5)$$

где b – межосевое расстояние между шпурами 0,25 м. Это расстояние между шпурами можно во время испытаний менять, в зависимости от прочности камня. То есть, при отладке опытного образца модернизированного пистолета, в зависимости от прочности камня и вида горной породы, можно расстояние b задавать от 0,7 до 0,10 м. Можно менять мощность патрона величину заряда в пределах объема гильзы патрона $7,62 \times 54,00$ мм и тип пороха (флегматизированные пироксилиновый или нитроглицериновый) в соответствии с правилами техники безопасности. h – глубина раскола камня 0,5 м, поперечный ход клина $s = 0,0087$ м, $\eta_{\text{кл}}$ – КПД клина 0,9. Принимаем КПД порохового заряда патрона для стрелкового оружия в среднем равным $\eta_{\text{стр.о}} = 0,4$. Общий КПД равен $0,9 \times 0,4 = 0,36$. Расчет по формуле (5) дает $A_{\text{кл}} = 10,27$ кДж. Определим массу заряда пороха $m_{\text{п}}$ для совершения работы одного клина:

$$m_{\text{п}} = A_{\text{кл}} / E_{\text{п}} = 10,27 / 4,09 = 2,51 \text{ г}, \quad (6)$$

где $A_{\text{кл}}$ – количество работы клина, $E_{\text{п}}$ – среднее энергосодержание бездымных порохов, равное 4,09 кДж/г [6]. По формуле (6) необходимая масса порохового заряда равна 2,51 г. Найдем объем гильзы патрона, чтобы поместить заряд пороха в 2,51 г, зная гравиметрическую плотность бездымного пороха (0,7 г/мл): объем гильзы равен 3,6 мл. Винтовочный патрон калибром $7,62 \times 54,00$ мм [13] имеет объем гильзы 3,8 мл, то есть помещается в гильзу весь порох с запасом.

Для уменьшения скорости роста давления пороховых газов и более полного использования энергии заряда патрона для совершения полезной работы можно применить флегматизированный порох, который имеет прогрессивное горение. При такой обработке порохового зерна флегматизатор проникает в толщу пороха на глубину до 15% от толщины свода зерна, причем постепенно уменьшается концентрация флегматизатора от наружных слоев внутрь зерна. Соответственно скорость горения пороха растет по мере того, как фронт горения перемещается от наружного слоя в глубь зерна. Таким образом, по мере сгорания заряда давление скачком не достигает максимальной величины, но поддерживается на оптимальном уровне до почти полного сгорания заряда. С начала XX-го века для флегматизации бездымных порохов применяется раствор камфоры [21], который вводят в порох пульверизацией. Порох обрабатывают раствором флегматизатора во вращающихся барабанах. Особенно часто такой обработке подвергаются винтовочные бездымные пороха. Камфору в промышленности получают переработкой скипидара.

Как добиться срабатывания патронов в модернизированных пистолетах в нескольких шпурах одновременно, чтобы расколоть каменный блок? С 1930-х

годов известен электроспуск огнестрельного оружия. Он применяется в авиационном оружии и везде, где требуется дистанционно привести оружие в действие. Массовый электроспуск применяется на танковых пулеметах КПП (Калашникова пулемет танковый) и КПВТ (крупнокалиберный пулемет Владимиров танковый). Электроспуск крепится на затыльнике ствольной коробки пулемета [18]. Электроспуск имеет вес около 300 г с коротким кабелем и герметичным разъемом. Модернизированный пистолет вместе с электроспуском для добычи камня может иметь массу до 3,5 кг (без клиньев).

Флегматизированный пороховой заряд винтовочного патрона при выстреле сгорает примерно за 1,2 миллисекунды. Поэтому электроспуски должны подбираться для нескольких монтажных пистолетов, предназначенных для одновременной работы на одном каменном блоке. Различие электроспусков, подбираемых для работы на одном каменном блоке, по времени срабатывания допускается не более 1–2 миллисекунды. Электрический сигнал одновременно приходит на группу электроспусков, но дальше по времени срабатывания могут быть отличия. Это может объясняться различием в механических свойствах пружин, моменте инерции подвижных частей, в индуктивности электромагнитов. Для определения времени срабатывания и подбора электроспусков надо иметь электронный таймер.

Для увеличения поверхности соприкосновения клина с камнем в шпурах круглого сечения применяют клинья, обеспечивающие требуемое направление раскалывания и высокие раскалывающие напряжения. Клин состоит из собственно клина с углом при вершине 12° и двух щечек. Форма клина может быть разной – коническая или призматическая. Чтобы избежать искривления линии раскалывания, разрез щечек должен находиться строго в плоскости откола камня. Для закрепления пистолета на шпуре и компенсации отдачи при выстреле сначала закрепляют в шпуре распорно-винтовое устройство, которое за счет распора в стенке шпура, прочно удерживается. Распорно-винтовое устройство малого диаметра (наподобие дюбеля «молли») с 2 тросиками свободно вставляется в глухое отверстие шпура диаметром 18–20 мм. Затем в каждый шпур вкладывают клинья с щечками. Далее с помощью распорно-винтовых устройств с 2 тросиками закрепляют пистолеты на шпурах и подключают электроспуски через общую кнопку «Пуск» к источнику питания. Выстрел – и поршни через амортизаторы, воздействуя на клинья, раскалывают камень.

Клинья со щечками и распорно-винтовые устройства с тросиками многоразовые. Наружный диаметр щечек от 18 мм и выше, а длина клина от 120 мм, в зависимости от размера каменного блока и конструкции модернизированного пистолета. Бурить шпуры

малого диаметра (18–20 мм) по меньшей мере в 4 раза легче, чем шпуров диаметром в два раза больше. По вредности, затрате физических усилий и времени эта операция одна из самых тяжелых. Кроме того, при бурении шпуров диаметром 18–20 мм, можно обойтись легким перфоратором.

ВЫВОДЫ

1. К натуральным облицовочным материалам высокого качества и долговечности растет интерес в нашей стране и за рубежом. Экономические соображения здесь играют не последнюю роль. Использование устойчивых к неблагоприятной атмосфере городов облицовочных материалов позволяет сократить расходы на ремонт фасадов зданий.

2. Среди вариантов механизации работ по добыче камня с помощью клиньев рассмотрены следующие подходы – использование электрогидравлического эффекта; применение испарения жидкого азота в замкнутом объеме; использование электромеханического привода клиньев. Выбран четвертый вариант – модернизация строительного пистолета для добычи природного камня.

3. Сделан расчет для модернизированного монтажного пистолета. Расколоть крупный каменный блок могут несколько модернизированных пистолетов под винтовочный патрон 7,62 × 54,00 мм с зарядом флегматизированного пороха. В каменном блоке бурятся шпуров, куда вставляются клинья. Приняты меры для закрепления в шпурах и компенсации отдачи модернизированных пистолетов. Одновременность действия на одном каменном блоке обеспечивают электроспуски пистолетов. Модернизированный пистолет вместе с электроспуском для добычи камня может иметь массу до 3,5 кг.

ЛИТЕРАТУРА

- Архаров А.М., Беляков В.П., Микулин Е.И. и др. Криогенные системы. М.: Машиностроение. 1987. 536 с.
- Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П. и др. Физика взрыва. М.: Наука. 1975. 704 с.
- Буянов Ю.Д., Буткевич Г.Р., Харо О.Е. Состояние нерудной промышленности и проблемы ее развития // Строительные материалы. 1997. № 1. С. 27–29.
- Верещагин Л.Ф. Синтетические алмазы и гидроэкструзия. М.: Наука. 1982. 328 с.
- Горохов В.С. Аппараты установок для разделения жидкого воздуха. М.: Машиностроение. 1965. 1233 с.
- Горст А.Г. Пороха и взрывчатые вещества. М.: Машиностроение, 1972. 208 с.
- Гудой А.Г. Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта. М.: Машиностроение. 1977. 320 с.
- Джон Галлипо. Силовые пленочные конденсаторы в возобновляемых источниках энергии // Вестник электроники. 2018. №2 (62). С. 1–5.
- Кокоев М.Н., Федоров В.Т. Изостатический клин для добычи природного камня // Строительные материалы. 1997. № 8. С. 13–14.
- Кокоев М.Н. ВПК и гражданские отрасли промышленности // Вестник Кабардино-Балкарского государственного университета. Серия: Эконом. науки. 1997. Вып. II. С. 92–94.
- Косолапов А.И., Безверхая Е.В. Выбор способа отработки месторождений облицовочного камня / Добыча, обработка и применение природного камня: Межвуз. сб. научн. трудов Магнитогорск: МГТУ, 2001. С. 65–77.
- Малин В.И., Дамье-Вульфсон В.Н. Наружная и внутренняя облицовка зданий природным камнем. М. 1991. 304 с.
- Параметры винтовочного патрона 7,62×54 мм R. https://ru.wikipedia.org/wiki/7,62_%D0%BC%D0%BC_R (дата обращения: 11.09.2023).
- Першин Г.Д. Технично-экономическое обоснование технологических параметров процессов резания камня канатно-алмазными пилами // Строительные материалы. 1994. №8. С. 4–6.
- Светлов Б.Я., Яременко Н.Е. Теория и свойства промышленных взрывчатых веществ. М.: Недра. 1973. 208 с.
- Хансиоахим Баум. Схемотехника и применение мощных импульсных устройств. М.: Додэка-XXI. 2008. 352 с.
- Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. СПб.: Машиностроение. 1986. 252 с.
- Электроспуск ПКТ. <https://guns.allzip.org/topic/120/1610059.html> (дата обращения: 11.09.2023).
- SAMARAKOON K.G.A.U., CHAMINDA S.P., JAYAWARDENA C.L. ET. AL. A Review of Dimension Stone Extraction Methods // Mining. 2023. 3(3). P. 516–531.
- RUDOLPH G. Wuerker. Annotaded Tables of Strength and Elastic Properties of Rocks. University of Illinois, Published by Petroleum Branch, AIME, December, 1956. С. 474–478.
- STECHE R. V. M., PAUL G. FINKE, SIEGMUND O. H. The merck index of chemicals and drugs. 7th ed. Edited by Paul G. Merck & Co., Inc., Rahway, N.J., 1960. 1641 p.
- TUMAC D., SHATERPOUR-MAMAGHAN A. Estimating the sawability of large diameter circular saws based on classification of natural stone types according to the geological origin // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018. 101. P. 18–32.

REFERENCES

1. **АРКХАРОВ А.М., БЕЛЯКОВ В.П., МИКУЛИН Е.И. ET AL.** Cryogenic systems. Moscow: Mashinostroyeniye. 1987:536 (In Russian).
2. **БАУМ Ф.А., ОРЛЕНКО Л.П., СТАНЮКОВИЧ К.Р. ET AL.** Physics of explosion. Moscow: Nauka. 1975:704. (In Russian).
3. **БУЯНОВ Ю.Д., БУТКЕВИЧ Г.Р., КХАРО О.Е.** State of the non-metallic industry and problems of its development. *Stroitel'nyye materialy*. 1997;1:27–29. (In Russian).
4. **ВЕРЕШЧАГИН Л.Ф.** Synthetic diamonds and hydroextrusion. Moscow: Science. 1982: 328. (In Russian).
5. **ГОРОХОВ В.С.** Equipment for liquid air separation plants. Moscow: Mashinostroyeniye. 1965:1233. (In Russian).
6. **ГОРСТ А.Г.** Gunpowder and explosives. Moscow: Mashinostroyeniye. 1972:208. (In Russian).
7. **ГУЛОЙ А.Г.** Equipment and technological processes using the electrohydraulic effect. Moscow: Mashinostroyeniye. 1977:320. (In Russian).
8. **JOHN GALLIPEAU.** Power film capacitors in renewable energy sources. *Vestnik elektroniki*. 2018;2;(62):1–5. (In Russian).
9. **КОКОЕВ М.Н., ФЕДОРОВ В.Т.** Isostatic wedge for the extraction of natural stone. *Stroitel'nyye materialy*. 1997;8:13–14. (In Russian).
10. **КОКОЕВ М.Н.** Military-industrial complex and civil industries. *Vestnik Kabardino-Balkarskogo gosuniversiteta. Seriya: Ekonom nauki*. Nalchik, 1997;2:92–94. (In Russian).
11. **КОСОЛАПОВ. А.И., БЕЗВЕРКХАЯ Е.В.** Choosing a method for mining facing stone deposits. Extraction, processing and use of natural stone: Interuniversity. Sat. scientific tr. Magnitogorsk: MSTU, 2001:65-77. (In Russian).
12. **МАЛИН В.И., ДАМИЕР-ВУЛФСОН В.Н.** External and internal cladding of buildings with natural stone. Moscow. 1991:304. (In Russian).
13. Parameters of the rifle cartridge 7,62 × 54 mm R. https://ru.wikipedia.org/wiki/7,62_%C3%97_54_%D0%BC%D0%BC_R (Accessed 11.09.2023). (in Russian).
14. **ПЕРШИН Г.Д.** Feasibility study of technological parameters of stone cutting processes using diamond wire saws. *Stroitel'nyye materialy*. 1994;8:4–6. (In Russian).
15. **SVETLOV B.YA., YAREMENKO N.E.** Teoriya i svoystva promyshlennykh vzryvchatykh veshchestv. Moscow: Nedra. 1973:208. (In Russian).
16. **HANSIOACHIM BLOOM.** Circuit design and application of high-power pulse devices. Moscow: Dodeka-XX1. 2008:352. (In Russian).
17. **YUTKIN L.A.** Electrohydraulic effect and its application in industry. Saint Petersburg: Mashinostroyeniye. 1986:252. (In Russian).
18. Electric trigger PKT. <https://guns.allzip.org/topic/120/1610059.html> (Accessed 11.09.2023) (In Russian).
19. **SAMARAKOON K.G.A.U., CHAMINDA S.P., JAYAWARDENA C.L. ET. AL.** A Review of Dimension Stone Extraction Methods. *Mining*. 2023. 3(3):516–531.
20. **RUDOLPH G.** Wuerker. Annotated Tables of Strength and Elastic Properties of Rocks. University of Illinois, Published by Petroleum Branch, AIME, December, 1956:474–478.
21. **STECHEB B.M., PAUL G. FINKEL, O.H. SIEGMUND.** The merck index of chemicals and drugs. 7th ed. Edited by Paul G. Merck & Co., Inc., Rahway, N.J., 1960:1641.
22. **TUMAC D., SHATERPOUR-MAMAGHAN A.** Estimating the sawability of large diameter circular saws based on classification of natural stone types according to the geological origin // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018, 101:18–32.

Федоров Виктор Тихонович,
д.т.н., советник директора Концерна «Наноиндустрия»

✉ 119334, г. Москва, ул. Бардина, д. 4, корп. 1,
119334, Moscow, st. Bardina, d. 4, building. 1
e-mail: fedorovsteer@gmail.com

Кокоев Мухамед Нурғалиевич,
д.т.н., профессор кафедры строительного производства Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х.М. Бербекова, советник РААСН

✉ 360004, КБР, Нальчик, ул. Чернышевского, 173,
360004, KBR, Nalchik, st. Chernyshevsky, 173
e-mail: kbagrostroy@yandex.ru

УДК 629.46:004.94

DOI: 10.52531/1682-1696-2024-24-1-75-83

Научная статья

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ОСНОВЕ УЧЕТА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТИРУЕМОГО ГРУЗА

А.В. Путято¹,
А.О. Шимановский²,
М.Г. Гегедеш²,
П.М. Афанаськов²

¹ГОМЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ П.О. СУХОГО, г. Гомель, Республика Беларусь

²БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА, г. Гомель, Республика Беларусь

Рассматриваются особенности решения задач о динамике и прочности конструкций железнодорожного подвижного состава в случаях высокой деформативности транспортируемого груза на основе компьютерного моделирования в инженерных пакетах твердотельного и конечноэлементного анализа. Представлены результаты анализа крепления рельсов при их транспортировке на сцепе железнодорожных платформ. Исследованы напряжения и деформации в контейнере-цистерне С11N17 T11, возникающие при ударном воздействии на нее. Приведен анализ влияния когезии сыпучего груза на силы, действующие на кузов вагона при его соударении. Полученные результаты позволяют анализировать безопасность перевозки и прогнозировать сохранность грузов с различными геометрическими и физическими характеристиками при транспортировке железнодорожным транспортом.

Ключевые слова: железнодорожный подвижной состав, деформируемость грузов, компьютерное моделирование, напряженно-деформируемое состояние, крепление грузов, цистерна, сыпучий груз

ВВЕДЕНИЕ

К перевозке различными видами транспорта часто предъявляются грузы, которые в процессе транспортировки значительно деформируются под действием динамических нагрузок различного происхождения, продолжительности и характера. К числу таких грузов относятся жидкие, сыпучие, а также длинномерные,

Original article

IMPROVMENT OF THE RAILWAY ROLLING STOCK DESIGN ON THE BASE OF TRANSPORTED CARGO DEFORMATION CONSIDERATION

A.V. PUTSIATA¹, A.O. SHIMANOVSKY²,
M.G. GEGEDESH², P.M. AFANASKOU²

¹SUKHOI STATE TECHNICAL UNIVERSITY OF GOMEL, GOMEL, REPUBLIC OF BELARUS

²BELARUSIAN STATE UNIVERSITY OF TRANSPORT, GOMEL, REPUBLIC OF BELARUS

The features of solving problems on the railway rolling stock design dynamics and strength on the basis of computer modeling in engineering packages of solid-state and finite element analysis are considered taking into account high deformability of the transported cargo. There are demonstrated the results of the analysis of rails fastening dynamics for the case of rails transportation on the coupling of railway platforms. The stresses and deformations in the C11N17 T11 tank container at the longitudinal impact of cars are investigated. There is presented the analysis of the bulk cargo cohesion influence on the forces acting the car body at the collision of cars. The obtained results make it possible to analyze the transportation safety and to predict the safety of cargo with various geometric and physical characteristics during rail transportation.

KEYWORDS: railway rolling stock, deformability of cargo, computer modeling, stress-strain state, cargo fastening, tank, bulk cargo

которые перевозятся на сцепах платформ и полувагонов. Для выявления особенностей их динамического поведения возникает необходимость решения междисциплинарных задач о взаимодействии элементами крепления и конструкцией транспортного средства, в частности, о нахождении относительного смещения частей грузов либо их центров масс, если речь идет о перевозках наливных и сыпучих грузов. Для повышения безопасности транспортировки грузов необходим полный учет всех этих явлений на основе использования аналитических и численных методов

© 2024, А.В. Путято, А.О. Шимановский, М.Г. Гегедеш, П.М. Афанаськов

Поступила в редакцию 04.11.2023

механики твердого и деформируемого тел, сплошной среды, жидкостей и газов с учетом особенностей организации перевозочной и маневровой работы.

Нормативными документами регламентируется крепление грузов в вагонах без учета возможности их деформирования. Исследователями стран СНГ и дальнего зарубежья неоднократно выполнялись работы по моделированию транспортировки железнодорожным транспортом твердотельных стандартных [15, 31] и длинномерных [4], грузов. Существует лишь относительно небольшое число публикаций, в которых при расчетах размещения и крепления длинномерных грузов и транспортировке жидкостей железнодорожным транспортом принимается во внимание деформируемость перевозимых грузов жидких [8, 18, 23] и насыпных [22], а также средств их крепления [3, 20]. Как показывает практика, учет деформаций грузов в таких случаях позволяет выявить причины повреждения подвижного состава, а также средств крепления, которые не могут быть предсказаны при рассмотрении грузов как абсолютно твердых тел.

Цель представленной работы заключается в анализе возможностей инженерных программных продуктов для прогнозирования сохранности перевозки грузов, обладающих невысокой жесткостью, железнодорожным транспортом и повышения безопасности перевозочного процесса.

ТРАНСПОРТИРОВКА ДЛИННОМЕРНЫХ ГРУЗОВ

На Белорусской железной дороге достаточно часто возникает необходимость перевозки рельсов Р65 длины 25 м без болтовых соединений, которые грузятся, как правило, на сцеп из двух платформ, имеющих базу 9,72 м. Еще с 50-х годов XX в. [2] установлено, что наиболее простой с технической точки зрения является перевозка рельсов на сцепках платформ и на платформах сочлененного типа [16]. На железных дорогах колеи 1520 мм размещение и крепление рельсов на платформах осуществляется попарно в соответствии с [14] с помощью подкладок, брусьев, проволочных растяжек и обвязок.

Практика перевозки рельсов показывает, что через некоторое время после начала транспортировки такого груза может наблюдаться разрыв подкладочного бруса с одной из сторон нижнего яруса. В результате деформируются проволочные обвязки, ярусы рельсов выходят из состояния равновесия и распадаются. Это приводит к необходимости повторного закрепления груза, что требует использования подъемно-транспортного оборудования и занимает достаточно много времени.

Для анализа динамики сцепки платформ с погруженными на них рельсами были созданы компьютерные модели в среде MSC ADAMS. В них предусматривалось, что рельсы укладываются на сцеп из двух платформ 13–401 с базой 9720 мм в соответствии с

А. В. ПУТЯТО, А. О. ШИМАНОВСКИЙ,
М. Г. ГЕГЕДЕШ, П. М. АФАНАСЬКОВ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА
НА ОСНОВЕ УЧЕТА ДЕФОРМИРОВАНИЯ
ТРАНСПОРТИРУЕМОГО ГРУЗА

главой 3 частью 1 Приложения 14 к [14] (рис. 1). При этом производилось жесткое закрепление одного конца нижнего яруса, для другого предусматривалась возможность свободного перемещения в продольном направлении. Отдельно нижний ярус закреплялся с использованием растяжек и обвязок, а остальные ярусы связаны между собой и с нижним при помощи обвязок.

Выполнен анализ движения сцепки по прямолинейной траектории и при входе сцепки в кривую малого (350 м) радиуса при скорости 5 м/с. Результаты расчетов показали, что при исследовании движения такого сцепки вдоль пути транспортируемые рельсы, имеющие сложную геометрию, можно заменить при моделировании упрощенными геометрическими телами (параллелепипедами) соответствующей массы.

При моделировании движения в кривой определено максимальное смещение нижнего яруса рельсов в сравнении с первоначальным его положением, т. е. максимальное отклонение продольной оси нижнего яруса рельсов от продольной оси платформы, которое составило 115 мм. То есть на практике при размещении костылей в деревянных подкладках на таком расстоянии от нижнего яруса с каждой стороны, целостность подкладки от удара рельсов о костыли нарушаться не должна. Однако следует предусмотреть замену костылей на другие приспособления, ограничивающие свободу перемещения нижнего яруса в продольном направлении, поскольку в деревянных подкладках возникают области повышенного напряжения и микротрещины, которые при малейшем несоблюдении требований, предъявляемых к перевозке рельсов, приводит к разрыву подкладки и возможному разрушению ярусов.

При рассмотренном смещении костыля расстояние между ним и концом деревянной подкладки уменьшается, а это может привести к образованию трещин и разрыва подкладки. Для выявления особенностей взаимодействия элементов системы «деревянный брусок – костыль» в среде ANSYS создана конечно-элементная модель. Она включала деревянный брусок, рассматривающийся как ортотропный материал, ко-

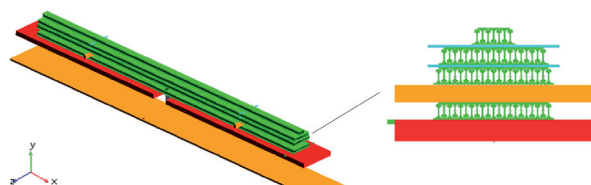


РИС. 1.

Компьютерная модель перевозки рельсов на сцепе их двух платформ 13–401 в инженерном пакете MSC ADAMS

торый в средней части имеет трещину с размещенным в ней стальным костылем.

При моделировании использованы 10-узловые тетраэдральные объемные конечные элементы. С целью обеспечения наилучшей аппроксимации перемещений и напряжений в области контакта сгущалась сетка конечных элементов. Области возможного соприкосновения поверхности древесины с костылем промоделированы плоскими контактными элементами. На рисунке 2 приведен фрагмент полученной конечноэлементной модели.

На рисунке 3 приведена эпюра распределения эквивалентных по Мизесу напряжений в исследуемой системе по плоскости сечения, нормальной к продольной оси костыля. Анализ результатов расчета позволил зафиксировать раскрытие трещины по волокнам древесины и показал наличие высоких значений контактных напряжений в граничных областях между деревянной поверхностью и костылем.

Полученные результаты позволили выработать рекомендации по усовершенствованию способов крепления длинномерных грузов на сцепе вагонов.

Одним из перспективных направлений развития железнодорожного транспорта во всех регионах является строительство и эксплуатация высокоскоростных магистралей, для которых используются рельсовые плети различной длины для формирования бесстыкового пути. Сварка рельсов может осуществляться непосредственно на перегоне, однако для достижения более высокого качества ее целесообразно производить в стационарных условиях. В работе [1] исследуется транспортировка готовых рельсовых плетей длиной 100 м, авторы патента [7] предлагают устройство для перевозки рельсов, имеющих длину до 250 м. На территории стран СНГ используются рельсовые плети длиной до 800 м [10], которые, как показывает опыт американских компаний, могут также транспортироваться в готовом к укладке на специальных устройствах, уложенных на железнодорожные платформы. Обоснование максимальной безопасной

скорости такой перевозки связано с необходимостью определения поперечных сил, возникающих при изгибе перевозимых рельсовых плетей, и нахождению условий устойчивости движения вагонов по перегону. Решение данной комплексной задачи возможно только на основе компьютерного моделирования процесса транспортировки.

ПЕРЕВОЗКА НАЛИВНЫХ ГРУЗОВ

Главной особенностью перевозки наливных грузов является возможность перемещения груза относительно резервуара, которое может привести к возникновению значительных давлений на корпус резервуара. Задачей данной части работы является разработка способов, позволяющих определять характеристики напряженно-деформированного состояния железнодорожных цистерн при нестационарных движениях на основе компьютерного моделирования.

Значительное число исследований отечественных и зарубежных авторов, приведенных, например, в [24, 25, 27, 30], посвящено анализу динамики и прочности железнодорожных вагонов-цистерн. В то же время достаточно большой объем перевозки жидких грузов осуществляется с использованием контейнеро-цистерн, требования к прочности которых отличаются ввиду того, что они могут перевозиться как железнодорожным, так и другими видами транспорта. Конструкция такой цистерны может повредиться вследствие сильных ударных воздействий, вызванных соударением вагонов, а также иных динамических процессов, обусловленных изменением кривизны железнодорожного полотна и пути, резким изменением тяговых или тормозных сил, в том числе приводящих к возникновению волновых процессов в транспортируемом наливном грузе. Кроме того, при разработке конструкций резервуаров контейнеро-цистерн следует учитывать особенности их динамического нагружения, характерные для условий движения и по автомобильным дорогам.

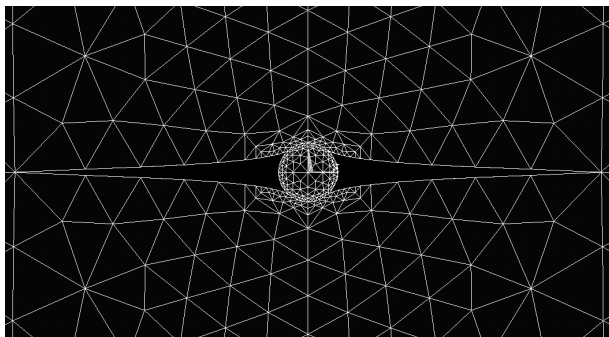
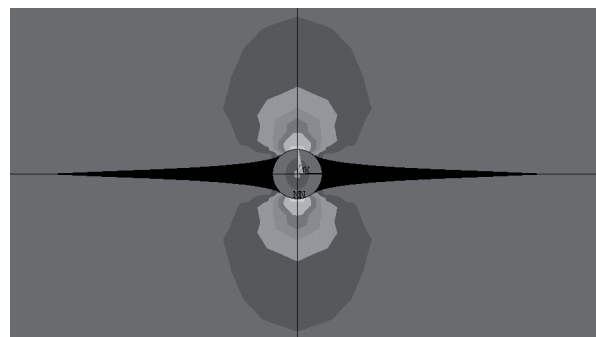


Рис. 2.

Фрагмент конечноэлементной модели в ANSYS



0 29 58 87 116 146 175 204 233 262

Рис. 3.

Распределение напряжений (кПа) в поперечной плоскости

В работе [28] авторами получены значения горизонтальных сил, действующих на днище перевозимой на платформе цистерны с водой, для случая соударения вагонов и определено, что зависимость от времени сил, действующих на торцевую стенку резервуара со стороны жидкости, имеет колебательный характер, что, в свою очередь, существенно влияет на устойчивость и прочность цистерны, а также на напряжения, возникающие в средствах крепления.

При разработке новых контейнеров, предназначенных для транспортировки на железнодорожном открытом подвижном составе, их необходимо испытать на динамический удар в продольном направлении. Процедура проведения испытаний регламентируется руководством [13]. В ходе испытаний проверяется прочность конструкции, которую также можно исследовать на основе компьютерного моделирования.

Рассмотрен случай ударного воздействия на контейнер-цистерну типа С11N17 Т11 [9]. На рисунке 4 представлен танк-контейнер и его модель в ANSYS. На рисунке 5 приведены некоторые результаты исследования прочности и жесткости конструкции при ударном воздействии, при котором величина перегрузки согласно [5] составляет $4g$. К торцевой стенке по ходу движения поезда прикладывалось давление, обусловленное гидродинамическим ударом транспортируемого жидкого груза, которое рассчитывалось в соответствии с [5] и составило 352,147 кПа. Также в расчетной схеме учитывался вес жидкости и общий вес брутто танк-контейнера с грузом, равный 353,16 кН.

Результаты расчетов показали, что при единичном ударном воздействии максимальные деформации возникают в верхней части каркасной рамы и не превышают 1 мм, максимальные напряжения в продольном направлении составили 63,276 МПа, максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу – 83,68 МПа, максимальные деформации – 0,58 мм. Таким образом, теоретически установлено, что напряжения в материале не превышают допустимых значений. Результаты проведенных испытаний подтвердили правильность представленного вывода.

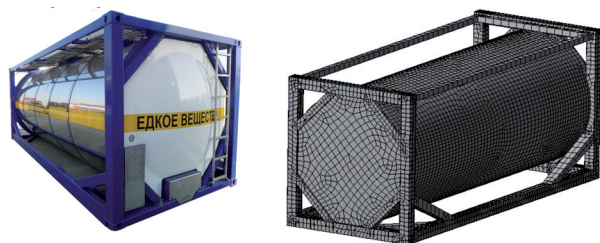


РИС. 4.

Общий вид и конечно-элементная модель контейнера-цистерны типа С11N17 Т11

А. В. ПУТЯТО, А. О. ШИМАНОВСКИЙ,
М. Г. ГЕГЕДЕШ, П. М. АФАНАСЬКОВ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА
НА ОСНОВЕ УЧЕТА ДЕФОРМИРОВАНИЯ
ТРАНСПОРТИРУЕМОГО ГРУЗА

Однако результаты анализа усталостных явлений по эквивалентным напряжениям, рассчитанным в соответствии с [5] на основе компьютерного моделирования показали, что наиболее нагруженные области конструкции контейнера-цистерны способны выдержать не более 1650 ударных воздействий, то есть при частой эксплуатации таких резервуаров в ударных режимах значительно снижается срок безаварийной эксплуатации контейнера-цистерны.

ТРАНСПОРТИРОВКА СЫПУЧИХ ГРУЗОВ

Номенклатура перевозимых сыпучих грузов достаточно широка, а их характеристики (угол внутреннего трения, плотность, напряжение когезии и т.п.) существенно различаются. Применяемый в ГОСТ 33211 подход для определения нагруженности элементов кузовов вагонов от сыпучего груза, основанный на применении теории Кулона, не учитывает некоторые физико-механические свойства материала, например, связанные с наличием когезии. Значение ее напряжения может изменяться в широком диапазоне: так для идеального сыпучего песка она стремится к нулю, для сухого глинистого песка составляет 5 – 7 кПа, а для суглинка может достигать 90 кПа [29]. В работах различных исследователей проводился анализ нагруженности кузова при перевозке сыпучего груза для стандартного [6, 12, 17, 26], а также увеличенного объема загрузки [19]. Однако оценка нагруженности кузова вагона, в частности, торцевой стены при изменении когезионных свойств перевозимого сыпучего груза не осуществлялась.

Задача оценки нагруженности торцевой стены полувагона решалась в плоской постановке в программном комплексе ANSYS, а деформирование материала описывалось теорией Друккера-Прагера [21]. Использован 4-х узловой конечный элемент PLANE42. Свойства материала сыпучего груза представлены следующими характеристиками: плотность $\gamma = 1300 \text{ кг/м}^3$; угол естественного откоса $\varphi = 30^\circ$; модуль упругости $E = 10^6 \text{ Н/м}^2$; коэффициент Пуассона $\mu = 0,27$. Стены кузова вагона выполнены из стали. Для анализа взаимодействия груза со стенами решалась контактная задача. Геометрия сыпучего груза в продольной плоскости представлена прямоугольником со сторонами $h = 2 \text{ м}$, $L = 10 \text{ м}$ (рис. 6). Для моделирования изменения объема груза и оценки возможности разгрузки торцевой стены предусмотрена установка сплошной поперечной перегородки высотой h_0 на расстоянии $0 \leq x \leq L/2$ (рис. 6).

Выполненные тестовые расчеты показали удовлетворительную сходимость результатов, полученных с использованием описанной компьютерной модели с экспериментальными данными [11]. Проведена оценка нагруженности кузова при соударении вагонов. На рисунке 7 приведены результаты расчета распределения динамического давления на торцевую

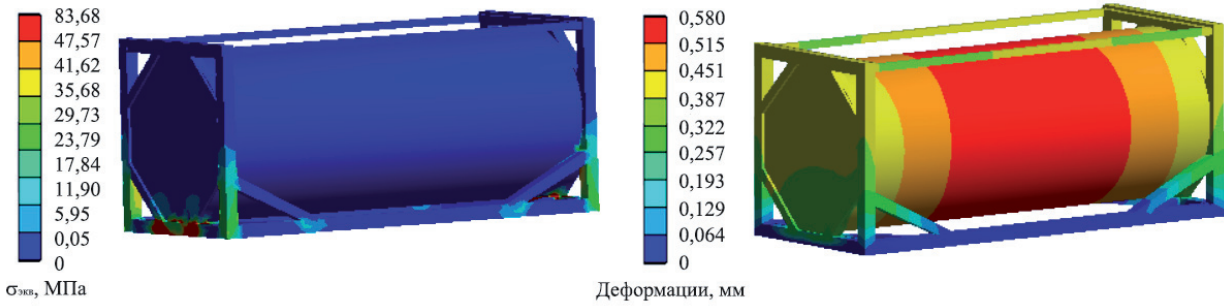


Рис. 5.

Результаты расчета эквивалентных напряжений по Мизесу и деформаций для контейнера-цистерны типа С11Н17 Т11 для случая единичного удара в продольном направлении в инженерном пакете ANSYS

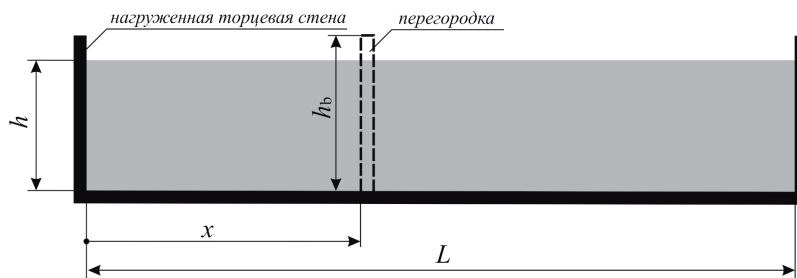


Рис. 6.

Геометрическая схема расчетной модели

стену и перегородку по высоте для различных значений x при $c = 20$ кПа, а на рисунке 8 – при $c = 7$ кПа.

Из приведенных зависимостей видно, что при $c = 20$ кПа по мере увеличения x снижается равномерность распределения нагрузки по высоте и наибольшие давления оказываются в средней части. Эффект такого перераспределения давления обнаружен при $x > 0,22L$. В то же время, давление на перегородку для практически всех рассмотренных мест ее установки оказывается на одном, достаточно высоком, уровне (коридор с кривыми 10). Отметим, что при установке перегородки в средней части вагона давления на торцевую стену и перегородку имеют одинаковые значения (кривые 8 и 9).

Несколько иные зависимости получены при $c = 7$ кПа. Максимальные давления на торцевую стену имеют существенно меньшие значения и стабилизируются при $x > 0,15L$. Кривые распределения давлений на торцевую стену при значениях $x > 0,15L$, а на перегородку оказались в коридоре значений, обозначенных на рисунке 8 позицией 5.

Полученные результаты показали, что установка сплошной перегородки приводит к снижению динамической нагруженности торцевой стены полувагона, причем для разных параметров груза место установки различно. В то же время давления сыпучего груза на установленную перегородку эквивалентны давлению на торцевую стену вагона без такой перегородки, что свидетельствует о нецелесообразности ее использования.

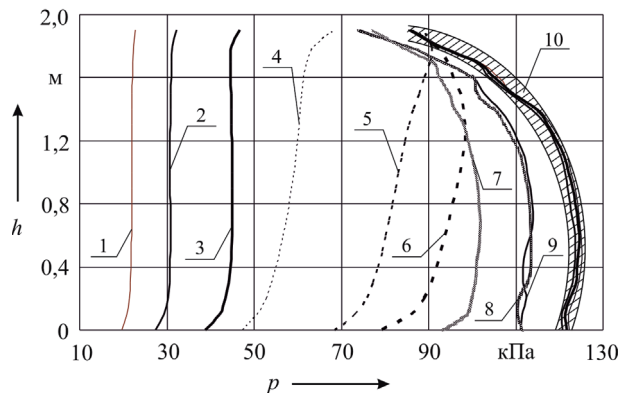


Рис. 7.

Распределение давления сыпучего груза по высоте торцевой стены и перегородки при $c = 20$ кПа: 1 – $x = 0,05L$; 2 – $x = 0,075L$; 3 – $x = 0,1L$; 4 – $x = 0,15L$; 5 – $x = 0,2L$; 6 – $x = 0,22L$; 7 – $x = 0,25L$; 8,9 – $x = 0,5L$ (на перегородку и стену); 10 – давление на перегородку при $0 \leq x \leq 0,5L$

Анализ изменения динамической нагруженности торцевой стены для широкого диапазона значений напряжений когезии сыпучего груза, а также при разных положениях перегородки показал, что при размещении перегородки на расстоянии $0 \leq x \leq 0,1L$ значения средних давлений на торцевую стену для различных уровней когезии сыпучего груза одинаковы. Далее, по мере увеличения значения напряжения когезии, наблюдается первая стадия разветвления зависимостей на интер-

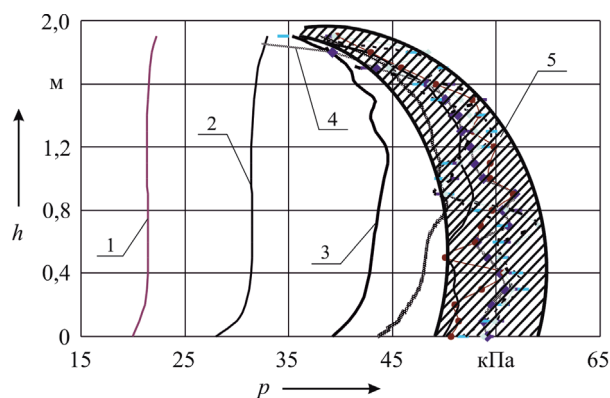


РИС. 8.

Распределение давления сыпучего груза по высоте торцевой стены и перегородки при $c = 7$ кПа: 1 — $x = 0,05L$; 2 — $x = 0,075L$; 3 — $x = 0,1L$; 4 — $x = 0,125L$; 5 — давление на стену при $x > 0,15L$ и на перегородку при $0 \leq x \leq 0,5L$

вале $0,1L \leq x \leq 0,2L$, а при значениях $x > 0,2L$ можно выделить вторую стадию. Отметим, что при рассмотрении материала с когезией менее 1,5 кПа возникли сложности с применением модели Друккера-Прагера и ее численным решением в виду нарушения сходимости нелинейной задачи.

Полученные результаты расчетов позволили установить так называемый «определяющий объем» сыпучего тела $V_{\text{опр}}$, соответствующий продольной силе инерции, действующий на торцевую стену. Очевидно, что для различных сыпучих материалов он будет отличаться. Так, например, при $c = 7$ кПа получено $V_{\text{опр}} = 12...17\%$ от общего объема перевозимого груза, при $c = 15$ кПа — $V_{\text{опр}} \approx 25\%$, при $c = 20$ кПа — $V_{\text{опр}} \approx 30\%$. При $c > 40$ кПа градиент роста $V_{\text{опр}}$ оказывается весьма незначительным.

Таким образом, имеет место высокий разброс значений нагруженности торцевой стены при соударении вагонов для материалов с различными когезионными свойствами. Из графика (рис. 9) видно, что при прочих принятых характеристиках сыпучего тела значение среднего динамического давления на торцевую стену вагона стабилизируется при $c > 40$ кПа. Таким образом, при оценке нагруженности торцевой стены при соударении вагонов и прочих принятых характеристиках сыпучего груза значение $V_{\text{опр}}$ составляет порядка 35%, что соответствует рекомендации, приведенной в нормативной документации. Вместе с тем, следует отметить, что целесообразно ввести адаптивную оценку нагруженности кузовов вагонов, предназначенных для перевозки сыпучих грузов в зависимости от их номенклатуры, указанной в Технических условиях на вагон.

Такой подход приведет к разработке новых конструкций, отвечающим условиям прочности и отличающимся улучшенными технико-экономическими параметрами (снижение массы тары, увеличение грузоподъемности).

А. В. ПУТЯТО, А. О. ШИМАНОВСКИЙ,
М. Г. ГЕГЕДЕШ, П. М. АФАНАСЬКОВ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА
НА ОСНОВЕ УЧЕТА ДЕФОРМИРОВАНИЯ
ТРАНСПОРТИРУЕМОГО ГРУЗА

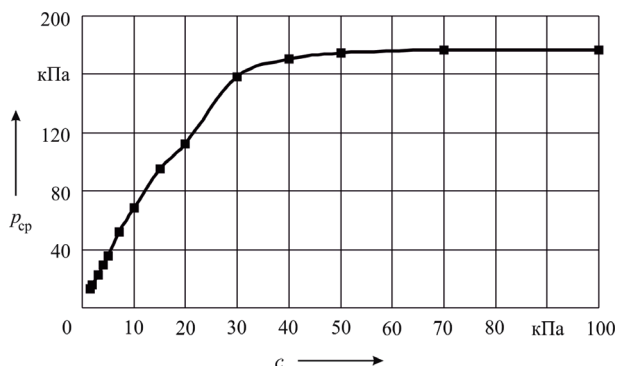


РИС. 9

Изменение $p_{\text{ср}}$ на торцевую стену от значения когезии (перегородка отсутствует)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполненных исследований рассмотрены различные случаи, при которых транспортируемый груз в процессе транспортировки смещается относительно кузова железнодорожного подвижного состава, и получены следующие основные результаты:

1. Анализ транспортировки рельсов на сцепе двух платформ показали, что при движении по кривой для предотвращения ударов рельсов о костыли, размещенные в деревянных подкладках, такие костыли должны размещаться на расстоянии, большем, чем 12 см от крайнего рельса, что позволит обеспечить целостность груза. Однако указанное смещение костыля может приводить к образованию трещин и разрыву подкладки. Конечноэлементное моделирование позволило установить особенности напряженно-деформированного состояния деталей крепления в зависимости от диаметра костыля и размеров бруска и выработать рекомендации по усовершенствованию способов креплений длинномерных грузов на сцепе вагонов.

2. Выполнены прочностные расчеты контейнерацистерны С11N17 Т11 под действием нагрузок, возникающих при соударении вагонов. Результаты моделирования в среде программного комплекса ANSYS оказались близкими к данным экспериментов и показали, что напряжения в материале конструкции не превышают допустимые значения.

3. В ходе компьютерного моделирования динамики вагона с сыпучим грузом установлено, что «определяющий объем» 35%, указанный в нормативной документации, соответствует напряжению когезии сыпучего груза $c > 40$ кПа. При меньших значениях напряжения когезии давление сыпучего груза на торцевую стенку кузова может оказаться в несколько раз меньшим. Учет данного факта при проектировании новых специализированных вагонов позволит разработать конструкции, обладающие улучшенными технико-экономическими параметрами по сравнению с универсальными вагонами.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект T22M-073).

ЛИТЕРАТУРА

1. АДИЛЬБЕКОВА, К.Б., КАЕРБЕКОВ Д.Ж., МЕДВЕДЕВ А.С., СТАВРОВА Н.Д. Реконструкция железнодорожного пути с целью увеличения скорости движения поездов // Наука и техника Казахстана. 2017. № 3–4. С. 9–18.
2. Американская железнодорожная энциклопедия. М.: Государственное транспортное железнодорожное издательство, 1959, 416 с.
3. АНТРОПОВА А.В., БАТАЛОВ А.В., КОЗЛОВ В.В., ЛАГУН А.В. Математическая модель оценивания динамических характеристик транспортировки ракетных блоков железнодорожным транспортом / Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2020. № 673. С. 159–168.
4. ВАСИЛЬЕВ С.М. Математическое моделирование динамических воздействий на длинномерные грузы и опорные вагоны // Вестник Белорусского государственного университета транспорта. Наука и транспорт. 2006. № 1–2(12–13). С. 30–36.
5. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам: межгос. стандарт. Введ. 2016–07–01. Москва: Стандартинформ. 2014, 54 с.
6. ЛОВСЬКА А.О. Вплив тиску насипного вантажу на стійкість контейнера при перевезенні залізничним поромом // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Динаміка та міцність машин. 2019. №. 1. С. 23–27. DOI:10.20998/2078-9130.2019.1.187413.
7. МАГАЛЯС С.В., БОБРОВ А.А. Устройство для предотвращения поперечного смещения (выброса) рельсовых плетей с рельсовозного состава при транспортировке. Патент на полезную модель RU 142140 U1, 20.06.2014. Заявка № 2013122573/11 от 16.05.2013.
8. МАКЕЕВ С.В., БУЙЛЕНКОВ П.М. Особенности расчета напряженно-деформированного состояния танка-контейнера с учетом реального нагружения в эксплуатации // Наука–образование–производство: Опыт и перспективы развития. Мат-лы XIV Межд. науч.-техн. конф.-ии. Нижний Тагил. 2018. Т. 1. С. 174–184.
9. Морской танк-контейнер C11N17 T11 [Электрон. ресурс] https://www.sespel.com/catalog/tank-konteyner/morskoy_tank_konteyner_c11n17_t11/
10. НАУМЕНКО М.А., ХАЛУПА И.И., ИНЮТИН В.И., КОЖЕДУБ С.С. Повышение эффективности укладки сверхдлинных плетей / Проблемы безопасности на транспорте. Мат-лы XII Межд. науч.-практич. конф.-ии, Гомель: БелГУТ. 2022. Ч. 1. С. 379–380.
11. ПУТЯТО А.В. Теория и практика совершенствования конструкций кузовов вагонов с учетом взаимодействия с перевозимыми грузами. Гомель: БелГУТ. 2011. 295 с.
12. ПУТЯТО А.В., КОНОВАЛОВ Е.Н., АФАНАСЬКОВ П.М. Прогнозирование остаточного ресурса вагона хоппер-дозатора после длительной эксплуатации с учетом фактических физико-механических характеристик материала несущей конструкции // Механика машин, механизмов и материалов. 2016. № 1 (34). С. 26–35.
13. Рекомендации по перевозке опасных грузов: Руководство по испытаниям и критериям. Нью-Йорк, Женева: Организация объединенных наций. 2013. 460 с.
14. Соглашение о международном железнодорожном грузовом сообщении (СМГС): действует с 1 ноября 1951 г. с изменениями и дополнениями на 1 июля 2015 г. Минск, «Амалфея», 2015, 216 с.
15. ТУРАНОВ Х.Т., РУЗМЕТОВ Я.О., ЯКУШЕВ А.В. О деформируемом состоянии механической системы «Груз-вагон-крепление» // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2019. Т. 16. №. 3. С. 455–468. DOI:10.20295/1815-588X-2019-3-455-468.
16. ЧАГАНОВА О.С., БЫСТРЕНКОВА Т.И., МЕНЬШОВА Е.В. Расчет средств крепления строительных грузов на современных вагонах сочлененного типа // Механика. Исследования и инновации. 2020. Вып. 13. С. 159–165.
17. ШМЫГИН А.А., ЧУГУНОВ М.В. Расчет на устойчивость сжатых элементов вагона-хоппера с использованием САПР // XLIX Огаревские чтения : материалы научной конференции. Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева. 2021. Ч. 3. С. 621–629.
18. ASHTIANI I.H., RAKNEJA S., AHMED W. Investigation of coupled dynamics of a railway tank car and liquid cargo subject to a switch-passing maneuver // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 2019. Vol. 233. №. 10. P. 1023-1037. DOI:10.1177/0954409718823650.
19. BARANOVSKIY D., MYAMLIN S.S., KEVAL I. Increasing the Carrying Capacity of the Solid-Body Rail Freight Car // Advances in Science and Technology. Research Journal. 2022. Vol. 16. N 3. P. 219–225. DOI:10.12913/22998624/149935.
20. CHAGANOVA O.S., VARAZHUN I.A. Fastenings parameters determination for highly deformative cargo, taking into account its durability during transportation in cars and trains // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. 2018. Vol. 7. Is. 3. P. 218–222. DOI:10.18178/ijmerr.7.3.218-222.
21. DRUCKER D.C., PRAGER W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. Quarterly of applied math-

- ematics. 1952. Vol. 10. N 2. P. 157–165.
22. **KWIATUSZEWSKA-SARNECKA B.** Reliability and risk function improvement of bulk cargo transportation system // Journal of Polish Safety and Reliability Association. 2015. Vol. 6. N 2. P. 81–88. DOI:10.1109/DT.2015.7222965.
 23. **LOVSKA A., GERLICI J., FOMIN O., KRAVCHENKO K., FOMINA YU, LACK T.** Special aspects of determining the dynamic load of the tank container during its transportation in an integrated train set by a railway ferry // TRANSBALTICA XI: Transportation Science and Technology. Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure. Cham, Springer. P. 581–590. DOI:10.1007/978-3-030-38666-5_61.
 24. **NAGY G.** Numerical and experimental stress determination in a tank car body // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 45. P. 4292–4297. DOI:10.1016/j.matpr.2020.12.775.
 25. **RAHMATI-ALAEI A., SHARAVI M., SAMADIAN ZAKARIA M.** Hunting stability analysis of partially filled tank wagon on curved track using coupled CFD-MBD method // Multibody System Dynamics. 2020. Vol. 50. N 1. P. 45–69. DOI:10.1007/s11044-019-09715-y.
 26. **ROMANOVYCH Y., KRAVETS A., AFANASOV G., POVOROZHENKO Y., AFANASOVA O.** Method for determining non-uniform loading of gondola cars with bulk cargo // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1021. N 1. Paper 012048. 11 p. DOI:10.1088/1757-899X/1021/1/012048.
 27. **SHIMANOVSKY A.O.** Recent research of dynamics and strength of tank vehicles // Механика машин, механизмов и материалов. 2016. № 3 (36). С. 59–70.
 28. **SHIMANOVSKY A.O., KUZNIATSOVA M.G.** Computer modeling of wheeled vehicles fastened to railway platform // Revista Academiei Fortelor Terestre. 2011. Vol. 16. N 1 (61). P. 130–136.
 29. Typical values of soil cohesion for different soil [Электрон. ресурс] <https://www.geotechdata.info/parameter/cohesion>.
 30. **YANG G.X., FUB D.L., LIA Q., LIUA Z.M.** A finite element analysis on mechanical behavior of Al/Al-Mg composites for the design of tank cars under actual measuring loads // Engineering Failure Analysis. 2019. Vol. 103. P. 294–307. DOI:10.1016/j.engfailanal.2019.05.008.
 31. **ZHANG D., TANG Y., CLARKE D.B., PENG Q., DONG C.** An innovative method for calculating diagonal lashing force of cargo on railway wagons in a curve alignment // Vehicle System Dynamics. 2021. Vol. 59. № 3. P. 352–374. DOI:10.1080/00423114.2019.1686160.
 2. American Railway Encyclopedia. Moscow: Gosudarstvennoye transportnoye zheleznodorozhnoye izdatel'stvo. 1959:416. (In Russian).
 3. **ANTROPOVA A.V., BATALOV A.V., KOZLOV V.V., LAGUN A.V.** Mathematical model for assessing the dynamic characteristics of transporting rocket blocks by rail / Proceedings of the Military Space Academy named after. A.F. Mozhaisky. 2020;673:159–168. (In Russian).
 4. **VASILIEV S.M.** Mathematical modeling of dynamic effects on long cargo and support cars. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta. Nauka i transport*. 2006;1–2;(12–13):30–36. (In Russian).
 5. GOST 33211-2014. Freight cars. Requirements for strength and dynamic properties: interstate. standard. Enter. 2016–07–01. Moscow, Standardinform. 2014:54. (In Russian).
 6. **LOVSKA A.O.** Influencing the pressure of the pressure on the resistance of the container when transported by the slag. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnogo universytetu «KHPI». Seriya: Dynamika ta mitsnist mashyn*. 2019;1:23–27. DOI:10.20998/2078-9130.2019.1.187413. (In Russian).
 7. **MAGALYAS S.V., BOBROV A.L.** A device for preventing lateral displacement (ejection) of rail strands from a rail stock during transportation. Utility model patent RU 142140 U1, 06/20/2014. Application N 2013122573/11 dated 05/16/2013. (In Russian).
 8. **MAKEEV S.V., BUYLENKOV P.M.** Features of calculating the stress-strain state of a tank container taking into account real loading in operation. Science–education–production: Experience and development prospects. Materials XIV Int. Nau.-Techn. conf. Nizhny Tagil. 2018;1:174–184. (In Russian).
 9. Sea tank container C11N17 T11 [Electronic. resource] https://www.sespe.com/catalog/tank-konteynery/morskoy_tank_konteyner_c11n17_t11/ (In Russian).
 10. **NAUMENKO M.L., KHALUPA I.I., INYUTIN V.I., KOZHEDUB S.S.** Increasing the efficiency of laying extra-long lashes. Transport safety problems. Materials XII Int. scientific-practical conference, Gomel: BelGUT. 2022;1:379–380. (In Russian).
 11. **PUTYATO A.V.** Theory and practice of improving the designs of car bodies, taking into account the interaction with transported goods. Gomel: BelGUT. 2011:295. (In Russian).
 12. **PUTYATO A.V., KONOVALOV E.N., AFANASKOV P.M.** Forecasting the residual life of a hopper dispenser car after long-term operation, taking into account the actual physical and mechanical characteristics of the material of the supporting structure. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov*. 2016;1;(34):26–35. (In Russian).
 13. Recommendations for the Transport of Dangerous Goods: Manual of Tests and Criteria. New York, Geneva: Organizatsiya ob'yedinennykh natsiy. 2013:460. (In Russian).

REFERENCES

1. **ADILBEKOVA, K.B., KAERBEKOV D.ZH., MEDVEDEV A.S., STAVROVA N.D.** Reconstruction of the railway track in order to increase the speed of trains. *Nauka i tekhnika Kazakhstana*. 2017;3–4: 9–18. (In

А. В. ПУТЯТО, А. О. ШИМАНОВСКИЙ, М. Г. ГЕГЕДЕШ, П. М. АФАНАСЬКОВ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА
НА ОСНОВЕ УЧЕТА ДЕФОРМИРОВАНИЯ
ТРАНСПОРТИРУЕМОГО ГРУЗА

14. Agreement on international rail freight traffic (SMGS): valid since November 1, 1951 with amendments and additions as of July 1, 2015. Minsk: "Amalfeya", 2015:216. (In Russian).
15. TURANOV KH.T., RUZMETOV YA.O., YAKUSHEV A.V. On the deformable state of the mechanical system "Cargo-car-fastening". *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya*. 2019;16;3:455–468. DOI:10.20295/1815-588X-2019-3-455-468. (In Russian).
16. CHAGANOVA O.S., BYSTRENKOVA T.I., MENSHOVA E.V. Calculation of means of securing construction cargo on modern articulated cars. *Mekhanika. Issledovaniya i innovatsii*. 2020;13:159–165. (In Russian).
17. SHMYGIN A.A., CHUGUNOV M.V. Calculation of the stability of compressed elements of a hopper car using CAD // XLIX Ogarevsky readings: materials of a scientific conference. Saransk: Natsional'nyy issledovatel'skiy Mordovskiy gosudarstvennyy universitet im. N.P. Ogárova. 2021;3: 621–629. (In Russian).
18. ASHTIANI I.H., RAKHEJA S., AHMED W. Investigation of coupled dynamics of a railway tank car and liquid cargo subject to a switch-passing maneuver. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: *Journal of Rail and Rapid Transit*. 2019;233;10:1023-1037. DOI:10.1177/0954409718823650.
19. BARANOVSKIY D., MYAMLIN S.S., KEBAL I. Increasing the Carrying Capacity of the Solid-Body Rail Freight Car. *Advances in Science and Technology. Research Journal*. 2022;16;3:219–225. DOI:10.12913/22998624/149935.
20. CHAGANOVA O.S., VARAZHUN I.A. Fastenings parameters determination for highly deformative cargo, taking into account its durability during transportation in cars and trains. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. 2018;7;3:218–222. DOI:10.18178/ijmerr.7.3.218-222.
21. DRUCKER D.C., PRAGER W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. *Quarterly of applied mathematics*. 1952;10;2:157–165.
22. KWIATUSZEWSKA-SARNECKA B. Reliability and risk function improvement of bulk cargo transportation system. *Journal of Polish Safety and Reliability Association*. 2015;6;2:81–88. DOI:10.1109/DT.2015.7222965.
23. LOVSKA A., GERLICI J., FOMIN O., KRAVCHENKO K., FOMINA YU, LACK T. Special aspects of determining the dynamic load of the tank container during its transportation in an integrated train set by a railway ferry. TRANSBALTICA XI: Transportation Science and Technology. Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure. Cham, Springer. 581–590. DOI:10.1007/978-3-030-38666-5_61.
24. NAGY G. Numerical and experimental stress determination in a tank car body. *Materials Today: Proceedings*. 2021;45:4292–4297. DOI:10.1016/j.matpr.2020.12.775.
25. RAHMATI-ALAEI A., SHARAVI M., SAMADIAN ZAKARIA M. Hunting stability analysis of partially filled tank wagon on curved track using coupled CFD-MBD method. *Multibody System Dynamics*. 2020;50;1:45–69. DOI:10.1007/s11044-019-09715-y.
26. ROMANOVYCH Y., KRAVETS A., AFANASOV G., POVOROZHENKO Y., AFANASOVA O. Method for determining non-uniform loading of gondola cars with bulk cargo. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021;1021;1. Paper 012048. 11. DOI:10.1088/1757-899X/1021/1/012048.
27. SHIMANOVSKY A.O. Recent research of dynamics and strength of tank vehicles. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov*. 2016. № 3 (36). С. 59–70.
28. SHIMANOVSKY A.O., KUZNIATSOVA M.G. Computer modeling of wheeled vehicles fastened to railway platform. *Revista Academiei Fortelor Terestre*. 2011;16;1; (61):130–136.
29. Typical values of soil cohesion for different soil [Электрон. ресурс] <https://www.geotechdata.info/parameter/cohesion>.
30. YANG G.X., FUB D.L., LIA Q., LIUA Z.M. A finite element analysis on mechanical behavior of Al/Al-Mg composites for the design of tank cars under actual measuring loads. *Engineering Failure Analysis*. 2019;103:294–307. DOI:10.1016/j.engfailanal.2019.05.008.
31. ZHANG D., TANG Y., CLARKE D.B., PENG Q., DONG C. An innovative method for calculating diagonal lashing force of cargo on railway wagons in a curve alignment. *Vehicle System Dynamics*. 2021;59;3:352–374. DOI:10.1080/00423114.2019.1686160.

Пуцято Артур Владимирович,

д.т.н., профессор, ректор Учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого»

☎ тел.: +37529-652-43-65,
 e-mail: putsyata@gstu.by, pav78@list.ru

Шимановский Александр Олегович

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Техническая физика и теоретическая механика» Учреждения образования «Белорусский государственный университет транспорта»

☎ тел.: +37529-831-14-19, e-mail: shim@tut.by

Гегедеш Марина Григорьевна

к.т.н., доцент кафедры «Техническая физика и теоретическая механика» Учреждения образования «Белорусский государственный университет транспорта»,

☎ тел.: +37544-730-45-74, e-mail: marina-kuzn@mail.ru

Афанаськов Павел Михайлович

магистр т.н., м.н.с. отраслевой научно-исследовательской лаборатории «Технические и технологические оценки ресурса единиц подвижного состава» Учреждения образования «Белорусский государственный университет транспорта»

☎ 246653, г. Гомель, ул. Кирова, д. 34,
 тел.: +37529-369-53-91,
 e-mail: pavel.afanaskou@gmail.com

УДК 664

DOI: 10.52531/1682-1696-2024-24-1-84-92

Научная статья

ДЕПРИВАТИЗАЦИЯ, НАЦИОНАЛИЗАЦИЯ ИЛИ ТЕНДЕНЦИЯ BACK IN THE USSR? РОСТ ОБРАЩЕНИЙ ИМУЩЕСТВА В ДОХОД ГОСУДАРСТВА

И. А. Трунов

КОЛЛЕГИЯ АДВОКАТОВ

«Трунов, Айвар и партнёры», Москва,
РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

Результатом присоединения и имплементации Конвенции ООН против коррупции от 31 октября 2003 г., появилась норма предусматривающая форму ответственности за нарушение законодательства о противодействии коррупции в виде обращения имущества в доход государства (пп. 8 п. 2 ст. 235 ГК РФ). Во взаимосвязи со статьей 17 ФЗ-№230 «О контроле за соответствием расходов лиц, замещающих государственные должности, и иных лиц их доходам», имеет назначение противодействию коррупции и подлежит применению в специальной процедуре искового производства. Прокуратура получила право на обращение в суд на основании п. 2 ст. 235 ГК РФ – пп. 8 с исковым заявлением об обращении в доход РФ имущества, в отношении которого не представлены, в соответствии с законодательством РФ о противодействии коррупции, доказательства его приобретения на законные доходы по решению суда. Множатся гражданские иски к физическим и юридическим лицам, результат которых – обращение в доход государства имущества, приобретенного десятилетия назад. Исковая давность не применяется. Доходы, полученные должностными лицами от запрещенной предпринимательской деятельности, или имущество, скрытое от декларирования, квалифицируются как подлежащие изъятию, хотя это не вытекает из закона. Прекращается залог изъятых имущества, хотя для этого также нет оснований в законе. В статье анализируются аспекты применения закона. Кроме того, автор доказывает, что оспаривание сделок должностного лица для признания их недействительными не вытекает из закона и не отвечает целям и задачам законодательства о противодействии коррупции.

Ключевые слова: Конвенция ООН против коррупции; ФЗ-№230 «О контроле за соответствием расходов лиц, замещающих государственные должности, и иных лиц их доходам»; должностные лица; Генеральная прокуратура; конфискация, коррупция, недействительность сделок, прекращение залога; исковая давность

© 2024, И. А. Трунов

Поступила в редакцию 04.03.2024

Original article

DEPRIVATION, NATIONALIZATION, OR THE TREND OF BACK IN THE USSR? THE GROWTH OF PROPERTY TRANSFERS TO THE STATE INCOME

I. L. TRUNOV

BAR ASSOCIATION

«TRUNOV, AIVAR AND PARTNERS»

As a result of the accession and implementation of the UN Convention against Corruption of October 31, 2003, a norm appeared providing for a form of liability for violation of anti-corruption legislation in the form of conversion of property to state income (clause 8, clause 2, Article 235 of the Civil Code of the Russian Federation). In connection with Article 17 of Federal Law No. 230 "On control over the compliance of expenses of persons holding Public Positions and other persons with their incomes", it has an anti-corruption purpose and is subject to application in a special procedure of claim proceedings. The prosecutor received the right to appeal to the court on the basis of paragraph 2 of Article 235 of the Civil Code of the Russian Federation – paragraph 8 with a statement of claim for applying to the income of the Russian Federation property in respect of which, in accordance with the legislation of the Russian Federation on combating corruption, evidence of its acquisition for legitimate income by a court decision is not provided. Civil lawsuits against individuals and legal entities are multiplying, the result of which is the conversion of property acquired decades ago into state income. The statute of limitations does not apply. Income received by officials from prohibited business activities, or property hidden from declaration, are qualified as subject to seizure, although this does not follow from the law. The pledge of the seized property is terminated, although there are also no grounds for this in the law. The article analyzes aspects of the application of the law. In addition, the author proves that challenging an official's transactions to invalidate them does not follow from the law and does not meet the goals and objectives of anti-corruption legislation.

KEYWORDS: United Nations Convention against Corruption; Federal Law N 230 "On Control over the Compliance of Expenses of Persons holding Public Office and Other Persons with their Incomes"; officials; Prosecutor General's Office; confiscation, corruption, invalidity of transactions, termination of collateral; limitation period

Как результат присоединения и имплементации Конвенции ООН против коррупции от 31 октября 2003 г., появилась норма, предусматривающая форму ответственности за нарушение законодательства о противодействии коррупции в виде обращения имущества в доход государства (пп. 8 п. 2 ст. 235 ГК РФ) во взаимосвязи со статьей 17 ФЗ-№230 «О контроле за соответствием расходов лиц, замещающих государственные должности, и иных лиц их доходам», имеющая назначением именно противодействие коррупции и подлежащая применению в специальной процедуре искового производства [13]. Прокурор обращается в суд на основании п. 2 ст. 235 ГК РФ – пп. 8 с иском заявлением об обращении по решению суда в доход РФ имущества, в отношении которого не представлены, в соответствии с законодательством РФ о противодействии коррупции, доказательства его приобретения на законные доходы.

Имущество ответчиков не изымается в виде санкции за совершение преступления или иного правонарушения (конфискация), а как юридическое и фактическое следствие отсутствия у соответствующего лица законных оснований для обладания спорным имуществом.

В силу положений ч. 1 ст. 56 ГПК РФ прокурор обязан представлять доказательства приобретения ответчиком (ответчиками) в отчетном периоде земельного участка, другого объекта недвижимости, транспортного средства, ценных бумаг, акций (долей участия, паев в уставных (складочных) капиталах организаций) на сумму, превышающую его (их) общий доход за три последних года, предшествующих отчетному периоду.

01.01.2013 со вступлением в законную силу поправок в ст. 235 ГК РФ, появилась презумпция вины, действующая в гражданско-правовой сфере, а в уголовной по-прежнему действует презумпция невиновности. Бремя доказывания невиновности или законного источника происхождения средств, позволивших приобрести такое имущество, возлагается на ответчика (ответчиков). При этом суд вправе принимать любые допустимые ГПК РФ доказательства, представленные лицом, в отношении которого осуществляется контроль за расходами, но в Российской Федерации отсутствует законодательное закрепление понятия и определения понятия "стандарты доказывания" не только в гражданском, но и в иных видах судопроизводства, а принятие судом решения основывается на принципе свободной оценки им доказательств по внутреннему убеждению судьи [4]. Тенденция последних нескольких лет в том, что истцом выступает не прокуратура субъекта РФ, надзирающая за восстановлением законности в «обычном» порядке, а Генеральная прокуратура РФ. Понятно, в чем разница. Предъявление иска Генпрокуратурой, представляющей Россию – орган, уполномоченный осуществлять

права владения, пользования и распоряжения государственной собственностью, свидетельствует о важности спора для государства, его заинтересованности в соответствующем активе. Районные судьи проявляют к такому истцу сверхлояльность, что при широкой возможности оценки, по внутреннему убеждению, доказательств и широкому усмотрению суда, иск Генпрокуратуры удовлетворяется практически всегда. Хотя согласно ч. 4 ст. 212 ГК РФ права всех собственников защищаются равным образом.

Через 4 первых года применения этой нормы появился обзор судебной практики, утвержденный Верховным судом с 2013 г. по 2017 г., тогда судами было рассмотрено 19 дел, по 12 делам требования прокурора удовлетворены, по 7 отказано¹. Это были "незначительные" должностные лица с незначительным имуществом, и абсолютно адекватные справедливые решения.

Через несколько лет произошел взрыв такого рода дел, который продолжает разрастаться.

Как пример, небольшой регион – Кавказские Минеральные Воды, общее количество объектов в отношении которых Генеральной Прокуратурой РФ заявлены иски – 1763 объекта, в том числе, 37 санаторно-курортных учреждения и 680 объектов недвижимости.

Иски Генпрокуратуры о передаче в госсобственность 610 га чайных плантаций, ЗАО «Дагомьсчай», ЗАО «Хоста чай» и АО «Мацестинский чай». Дела о незаконной приватизации рассматривают суды многих регионов: Пермского, Челябинского, Санкт-Петербурга и т.д. Приморский край – иски к компаниям ОАО «Радиоприбор», ООО «Инвест-Лайн», ООО «СЗ «Форест Групп» и ОАО «Строитель», с указанием на нарушение приватизации от 1993 г. Генпрокуратура забирает земли у собственников на Черноморском побережье. Туапсинский районный суд Краснодарского края вынес решение по иску более 150 владельцев земельных участков в поселке Шепси. Владельцы потеряли и землю, и жилье, которое для значительной части из них было единственным [23]. В сочинских судах – конвейер, за половину февраля прокуратурой подано свыше 250 исков об обращении земельных участков с домовладениями граждан в собственность государства, на 11 тысяч участков наложен запрет на регистрационные действия [22].

«Башнефть», Ростовский оптико-механический завод, АО «Калининградский морской торговый порт», ТГК-2, «Метафракс Кемикалс», «Кучуксульфат», Соликамский магниевый завод, Башкирская

¹ Обзор судебной практики по делам по заявлениям прокуроров об обращении в доход РФ имущества, в отношении которого не представлены в соответствии с законодательством о противодействии коррупции доказательства его приобретения на законные доходы, утвержденном Президиумом Верховного Суда РФ 30.06.2017

содовая компания, АО «Волжский оргсинтез», ОАО «Завод «Исеть»», «Коми энергосбытовая компания», ОАО «Уралбиофарм», АО «Компания Эталон» и т.д. Все эти и много других, недавно частных предприятий обращены в государственную собственность.

Поднялся вечный вопрос критики приватизации Е.Т. Гайдара, А.Б. Чубайса в 1990-х годах. Тогда по итогам приватизации Россия получила 7,2 млрд долларов, а небольшая Венгрия величиной как Кемеровская область, за то же время – 15 млрд [24].

«В РФ предложили деприватизировать квартиры бедных семей, пенсионеров и одиночек» [25]. Вернуть в собственность государства неправильно приватизированные квартиры один из болезненных вопросов, который может касаться широкого круга граждан, ведь по данным Росстата, к 2015 г. в частную собственность перешло 79% от общего числа подлежащего приватизации жилья.

С критикой и предостережениями, не остановившими маховик выступили:

– Председатель «Сбербанка России» Герман Греф. В стране складывается «обратный тренд приватизации» – национализация. Сегодня действительно мы видим большое количество исков со стороны прокуратуры, причем по историческим сделкам, где, собственно говоря, и срок исковой давности, и срок приобретательской давности давно прошли. Прокуратура должна защищать интересы бизнеса в такой же мере, как интересы государства, потому что интересы государства и бизнеса неразделимы. Это очень важная задача, и нам важно эту грань не перейти, чтобы и права собственности, и стабильность хозяйственного оборота присутствовали» [26].

– Президент Российского союза промышленников и предпринимателей (РСПП) Александр Шохин - «У нас никто не знает, кто в очереди может быть следующим. В худшем положении финальный собственник, бизнес плохо реагирует на сообщения о планах национализации» [26].

– Глава Минэкономразвития Максим Решетников назвал идею пересмотра приватизации бесперспективной. «Это путь в никуда, и он очень многих демотивирует, и очень многие начинают задаваться вопросом, а где те красные линии», заявил он об эпизодах «деприватизации» [3].

– Президент В.В. Путин. В сентябре 2023 г. на Пленарном заседании VIII Восточного экономического форума заверил: «Никакой деприватизации не намечается. Никакой деприватизации не будет, это я вам могу точно сказать. Кошмарить никого не будут, но все должны соблюдать законы Российской Федерации» [14].

Предлагаю с научной точки зрения и на примере конкретных дел разобраться, бизнес кошмарят или все происходит в рамках Закона.

В соответствии со ст. 35 Конституции РФ право частной собственности охраняется законом. Каждый вправе иметь имущество в собственности, владеть, пользоваться и распоряжаться им как единолично, так и совместно с другими лицами. Конституция РФ гарантирует свободу экономической деятельности, поддержку конкуренции, признание и защиту равным образом частной, государственной, муниципальной и иных форм собственности в качестве основ конституционного строя РФ (ст. 8), а также закрепляет право на свободное использование своих способностей и имущества для предпринимательской и иной не запрещенной законом экономической деятельности (ст. 34, ч. 1).

В силу ст. 55 Конституции РФ и п. 2 ст. 1 ГК РФ гражданские права могут быть ограничены только на основании федерального закона, иные нормативные акты, ограничивающие права собственника, применению не подлежат.

Как указал Конституционный Суд, положения ГК РФ и ФЗ «О контроле за соответствием расходов лиц, замещающих государственные должности, и иных лиц их доходам», действующие с учетом их конституционно-правового смысла, выявленного Конституционным Судом РФ, не предполагают принятия произвольных, без учета особенностей того или иного вида имущества решений об обращении соответствующего имущества в доход РФ. В силу абз. 2 п. 2 ст. 1 ГК РФ гражданские права могут быть ограничены на основании закона и только в той мере, в какой это необходимо в целях защиты основ конституционного строя, нравственности, здоровья, прав и законных интересов других лиц, обеспечения обороны страны и безопасности государства [5].

Определяя с учетом требований статей 17 (часть 3) и 19 (части 1 и 2) Конституции РФ критерии допустимости ограничений конституционных прав и свобод, Конституционный Суд РФ пришел к выводу, что цели таких ограничений должны быть не только юридически, но и социально оправданны, а сами ограничения – адекватны этим целям и отвечать требованиям справедливости; при допустимости ограничения законом того или иного права в соответствии с конституционно одобряемыми целями следует использовать не чрезмерные, а только необходимые и строго обусловленные этими целями меры; публичные интересы, перечисленные в статье 55 (часть 3) Конституции РФ, могут оправдывать правовые ограничения прав и свобод, только если они адекватны социально необходимому результату; в ходе правового регулирования недопустимо искажение самого существа конституционного права или свободы, а цели одной только рациональной организации деятельности органов власти не могут служить основанием для ограничения прав и свобод [11].

Применительно к праву собственности это также означает, что его ограничения, вводимые федераль-

ным законодателем, должны отвечать требованиям справедливости, разумности и соразмерности (пропорциональности), не могут затрагивать само существо данного права [10].

Первый и важный вопрос – сроки исковой давности. Исковая давность один из фундаментальных принципов гражданского законодательства, обеспечивающих стабильность гражданского оборота. Правоотношения, которые затрагивают иски Прокуратуры РФ и последующие судебные решения 20-и или 30-и летней давности. Общий срок исковой давности составляет 3 года, срок исковой давности не может превышать 10 лет со дня нарушения права (ст. 196 ГК РФ). Суды отклоняя доводы ответчиков о пропуске истцом срока исковой давности для обращения в суд с исками, исходят из того, что в действиях ответчиков имеет место коррупционная составляющая, в связи с чем к спорным правоотношениям с учетом характера заявленных требований правила об исковой давности применению не подлежат, поскольку положения ФЗ от 25.12.2008 № 273-ФЗ «О противодействии коррупции» не ограничивают прокурора в борьбе с коррупцией сроками исковой давности и предписывают суду при рассмотрении подобного рода исков исходить из неотвратимости ответственности физических и юридических лиц за совершение коррупционных правонарушений [17], а кроме того, полагая, что иски прокурора направлены на защиту нематериальных благ, суд применяет к спорным правоотношениям положения ст. 208 ГК РФ, согласно которым исковая давность не распространяется на требования о защите нематериальных благ.

Однако такие выводы о том, что на заявленные прокуратурой исковые требования срок исковой давности не распространяется, противоречат нормам материального права и фактическим обстоятельствам.

Согласно ст. 195 ГК РФ исковой давностью признается срок для защиты права по иску лица, право которого нарушено. В соответствии с п. 1 ст. 196 ГК РФ общий срок исковой давности составляет 3 года со дня, определяемого в соответствии со статьей 200 ГК РФ. В силу п. 2 ст. 199 ГК РФ исковая давность применяется судом только по заявлению стороны в споре, сделанному до вынесения судом решения. Истечение срока исковой давности, о применении которой заявлено стороной в споре, является основанием к вынесению судом решения об отказе в иске. Согласно п. 1 ст. 200 ГК РФ, если законом не установлено иное, течение срока исковой давности начинается со дня, когда лицо узнало или должно было узнать о нарушении своего права и о том, кто является надлежащим ответчиком по иску о защите этого права.

Прокуратура в обоснование исковых требований об обращении имущества в доход государства, ссылается на положения пп. 8 ч. 2 ст. 235 ГК РФ и положения ФЗ от 3.12.2012 № 230-ФЗ «О контроле за

соответствием расходов лиц, замещающих государственные должности, и иных лиц их доходам», однако Конституционный Суд РФ однозначно отметил, что каких-либо специальных сроков исковой давности ФЗ от 3.12.2012 № 230-ФЗ «О контроле за соответствием расходов лиц, замещающих государственные должности, и иных лиц их доходам» не установлено, а потому к таким правоотношениям подлежат применению нормы ГК РФ об исковой давности, включая п. 1 ст. 200, закрепляющий общее правило о начале течения срока исковой давности со дня, когда лицо узнало или должно было узнать о нарушении своего права и о том, кто является надлежащим ответчиком по иску о защите нарушенного права [6].

Как неоднократно отмечал Конституционный Суд РФ, законодатель в пределах своей дискреции вправе устанавливать, изменять и отменять сроки исковой давности в зависимости от цели правового регулирования и дифференцировать их при наличии к тому объективных и разумных оснований, а также закреплять порядок их течения во времени, с тем чтобы обеспечивались возможность исковой защиты права, стабильность и предсказуемость правового статуса субъектов правоотношений. Соответственно, пункт 1 статьи 200 ГК РФ сформулирован так, что наделяет суд необходимыми полномочиями по определению момента начала течения срока исковой давности, исходя из фактических обстоятельств дела [7]. Согласно разъяснениям п. 4 Постановления Пленума Верховного Суда РФ от 29.09.2015 № 43 «О некоторых вопросах, связанных с применением норм ГК РФ об исковой давности» в силу п. 1 ст. 200 ГК РФ срок исковой давности по требованиям публично-правовых образований в лице уполномоченных органов исчисляется со дня, когда публично-правовое образование в лице таких органов узнало или должно было узнать о нарушении его прав, в частности, о передаче имущества другому лицу, совершении действий, свидетельствующих об использовании другим лицом спорного имущества, например, земельного участка, и о том, кто является надлежащим ответчиком по иску о защите этого права.

Согласно правовой позиции, сформулированной в Обзоре судебной практики по делам, связанным с истребованием имущества от граждан по искам государственных органов и органов местного самоуправления, утвержденном Президиумом Верховного Суда РФ 25.11.2015 г., при обращении в суд прокурора в защиту интересов публично-правового образования начало течения срока исковой давности определяется исходя из того, когда о нарушении своего права и о том, кто является надлежащим ответчиком по иску, узнало или должно было узнать такое публично-правовое образование в лице уполномоченных органов.

Поскольку право собственности и другие вещные права на недвижимое имущество подлежат государственной регистрации в ЕГРН органами, осущест-

вляющими государственную регистрацию прав на недвижимость и сделок с ней, течение срока исковой давности по заявленному иску начинается не позднее дня, когда лицо узнало или должно было узнать о соответствующей записи в ЕГРП [21].

Следовательно, в случаях, когда с исковыми требованиями в суд обращается прокурор в защиту интересов иного лица (материального истца), течение срока исковой давности начинается со дня, когда о нарушении своих прав узнал материальный истец, а не прокурор. Таким образом, срок исковой давности по заявленным прокурором требованиям должен исчисляться с того момента, как Российская Федерация в лице уполномоченных органов узнала или должна была узнать о нарушении своего права.

При этом несостоятельными являются доводы о необходимости исчислять срок исковой давности с момента, когда о нарушении права собственности РФ стало известно прокурору, поскольку при обращении прокурора в защиту прав и законных интересов других лиц в порядке, предусмотренном ч. 1 ст. 45 ГПК РФ, начало течения срока исковой давности определяется исходя из того, когда о нарушении своего права и о том, кто является надлежащим ответчиком по иску о защите этого права, узнало или должно было узнать лицо, в интересах которого подано такое заявление.

Вышеизложенное согласуется с правовой позицией, изложенной в пункте 5 Постановления Пленума Верховного Суда РФ от 29.09.2015 № 43, согласно которой по смыслу пункта 1 статьи 200 ГК РФ при обращении в суд органов государственной власти, органов местного самоуправления, организаций или граждан с заявлением в защиту прав, свобод и законных интересов других лиц в случаях, когда такое право им предоставлено законом (часть 1 статьи 45 и часть 1 статьи 46 ГПК РФ, часть 1 статьи 52 и части 1 и 2 статьи 53, статья 53.1 – АПК РФ), начало течения срока исковой давности определяется исходя из того, когда о нарушении своего права и о том, кто является надлежащим ответчиком по иску о защите этого права, узнало или должно было узнать лицо, в интересах которого подано такое заявление.

В соответствии с разъяснениями п. 15 Постановления Пленума Верховного Суда РФ от 29.09.2015 № 43, истечение срока исковой давности является самостоятельным основанием для отказа в иске (абз. 2 п. 2 ст. 199 ГК РФ). Если установлено, что сторона по делу пропустила срок исковой давности и не имеется уважительных причин для восстановления этого срока для истца – физического лица, то при наличии заявления надлежащего лица об истечении срока исковой давности суд вправе отказать в удовлетворении требования только по этим мотивам, без исследования иных обстоятельств дела.

Так же не соответствует закону утверждение, что иски прокурора направлены на защиту нема-

И. А. ТРУНОВ
ДЕПРИВАТИЗАЦИЯ, НАЦИОНАЛИЗАЦИЯ
ИЛИ ТЕНДЕНЦИЯ BACK IN THE USSR?
РОСТ ОБРАЩЕНИЙ ИМУЩЕСТВА В ДОХОД
ГОСУДАРСТВА

териальных благ, суд применяет к спорным правоотношениям положения ст. 208 ГК РФ, согласно которым исковая давность не распространяется на требования о защите нематериальных благ. Закон говорит об обращении в пользу государства имущества (пп. 8 п. 2 ст. 235 ГК РФ), в то время как не материальными благами (ст. 150 ГК РФ) являются; жизнь и здоровье, достоинство личности, личная неприкосновенность, честь и доброе имя, деловая репутация и иные нематериальные блага. Иски прокуратуры носят имущественный характер и, как любой другой материальный иск, они реализуемы только в пределах исковой давности.

Перейдем от общего к частному на конкретных примерах.

Генпрокуратура обратила в доход государства активности Андрея Викторовича Коровайко – основателя крупнейшего агропромышленного концерна «Покровский». По решению Лабинского суда государству отошло 50 предприятий, владеющих более чем 242 тыс. га земли [1]. Всего в пользу государства обращены 94 предприятия [15]. В решении суда по данному делу отчетливо видны системные нарушения закона повсеместные в сегодняшней практике.

Конструкция, предусмотренная п. 2 ст. 235 ГК незатейлива, прокуратура собирает сведения сколько чиновник заработал, затем собирает сведения сколько имущества числится на нем, его супруге и несовершеннолетних детях (ФЗ-№230 от 03.12.2012), оценивает и разницу по решению суда изымают в пользу государства.

В данном деле, как и в остальных похожих, прокуратура смешивает уголовное судопроизводство с гражданским, ссылаясь на, якобы, факты рейдерства, мошенничества, незаконного извлечения личной материальной выгоды, давления физического и психологического, соучастия сторонних лиц, то есть то, что суд в данном гражданском производстве не может рассматривать и оценивать. Генеральная прокуратура таким образом увеличивает количество ответчиков из 2 регламентированных законом (бывший чиновник и жена), получает 7 (не указываемых в ФЗ-№230) и так же в геометрической прогрессии растет количество имущества, к которому юридически экс-чиновник не имеет отношения. Повсеместно в подобного рода судопроизводствах, на третьих лиц возлагается бремя доказывания законности получения имущества аналогично тому, которое предусмотрено для чиновников, их супругов и несовершеннолетних детей.

Так же нарушается фундаментальный Конституционный принцип ст. 54 Конституции РФ: «Закон, устанавливающий или отягчающий ответственность, обратной силы не имеет». Так же в соответствии со ст. 4 ГК РФ акты гражданского законодательства не имеют обратной силы. Норма пп. 8 п. 2 ст. 235 ГК РФ принята Федеральным Законом от 03.12.2012

№ 231-ФЗ, «О внесении изменений в отдельные законодательные акты» и вступила в законную силу 01.01.2013. А.В. Коровайко занимал должность федерального инспектора и главного советника Управления по работе с органами власти субъектов и органами местного самоуправления Аппарата полномочного представителя Президента РФ в Южном федеральном округе в 2001–2004 гг.

При введении в действие 1.01.2013 г. ФЗ № 230-ФЗ предусматривалась возможность проведения процедуры контроля за расходами государственных служащих только в отношении действующих, работающих должностных лиц. 3.08.2018 в ФЗ-№307 были внесены поправки, позволяющие осуществить процедуру контроля расходов и в случае увольнения государственного гражданского служащего со службы – в течение шести месяцев после увольнения. А.В. Коровайко занимал должность в 2001–2004 гг., суд состоялся в 2023 г.

Еще типичное решение, повторяющее практику несоответствия законодательству. Иск заместителя Генерального прокурора РФ к экс-Губернатору Республики Марий Эл Л.И. Маркелову, Т.И. Маркеловой, А.Ю. Шилову. Судебным решением Нижегородского суда от 25.11.2019 г., на основании пп. 8 п. 2 ст. 235 ГК РФ, ст. 17 ФЗ от 03.12.2012 №230-ФЗ «О контроле за соответствием расходов лиц, замещающих государственные должности...» и ст. 169 ГК в доход государства изъято недвижимое и движимое имущество, принадлежащее на праве собственности третьим лицам, не входящим в круг лиц, подлежащих контролю и ответственности в соответствии ст. 17 ФЗ-№230. Это денежные средства А.Ю. Шилова, недвижимое и движимое имущество принадлежащее (бывшей супруге умершего отца, не имеющей родственной связи с ответчиком Л.И. Маркеловым) Т.И. Маркеловой, юридических лиц: ООО «Воскресенский парк», ООО «Июнь-2006», ООО «Кардинал», ООО «Компания "Чукшинский карьер"», ООО «Марийский цемент», ООО «Телскомпания 12 регион», ООО «Чукшинский карьер», АО «Памашьяльский каменный карьер», АО СПК «МАПДС», приобретенные в период с 1968 года, т.е. до вступления нормы в законную силу. Конституционный Суд РФ указал, что федеральный законодатель, вводя контроль за расходами, установил, что обязанность по представлению сведений о расходах возникает в отношении сделок, совершенных с 1 января 2012 г. В то же время нормы законодательства, позволяющие обратиться в доход государства объекты недвижимости в отношении которых государственным гражданским служащим не представлено сведений, подтверждающих их приобретение на законные средства, вступили в силу с 1 января 2013 г. [8]. Согласно правовой позиции КС РФ ч. 1 ст. 17 ФЗ-№ 230 не предполагает возможности обращения в доход государства имущества, которое было приобретено до

замещения ответчиком государственной должности [12].

Суд, по внутреннему убеждению, пришел к выводу о том, что все имущество, приобретенное юридическими лицами, якобы фактически (не юридически) принадлежит экс-губернатору Л.И. Маркелову, деньги изъяты у А.Ю. Шилова – являются деньгами Л.И. Маркелова, так как Шилов не привел убедительных доводов откуда у него денежные средства [16]. При том, что в Законе № 230-ФЗ «О контроле за соответствием расходов лиц, замещающих государственные должности...», не прописаны деньги как объект обращения в доход государства, (ст. 17 ч. 1 – об обращении в доход РФ земельных участков, других объектов недвижимости, транспортных средств, ценных бумаг (долей участия, паев в уставных (складочных) капиталах организаций), цифровых финансовых активов, цифровой валюты). Инициативы поправок закона о включении денег периодически вносились, но не были приняты законодателем.

Гражданское законодательство РФ для целей изъятия имущества в порядке ст. 17 Закона № 230-ФЗ, п. 2 ст. 235 ГК РФ ограничивает имущество лишь тем, на которое имеется право собственности, но не таким, на которое имеется не право собственности, а интерес, и тем более не таким, которое приобретено "косвенно" [20]. Так же повсеместно квалифицируются как подлежащие изъятию, доходы, полученные должностными лицами от запрещенной им предпринимательской деятельности, или имущество, скрытое от декларирования, хотя это не регламентировано законом.

Выход за рамки закрытого перечня лиц, регламентированных ст. 17 Закона № 230-ФЗ, «О контроле за соответствием расходов лиц, замещающих государственные должности, и иных лиц их доходам», должностного лица и его супруги (супруга) и несовершеннолетних детей, имущество которых подлежит контролю и может быть изъято в порядке п. 2 ст. 235 ГК РФ, предлагалось расширить. Как пример, отклоненный проект федерального закона № 726111-6 депутата О.А. Нилова [19], свидетельствует, что законодатель не намерен это делать, но Прокуратура и суды стабильно выходят за его рамки, что наносит большой вред публичным интересам.

За последнее время Генпрокуратура и ФАС подали в суды множество исков с целью изъятия частных активов в госсобственность и это касается не только крупных активов и олигархов. С каждым месяцем подобных исков становится все больше, налицо очевидная расширяющаяся тенденция. В России любое здоровое начинание имеет опасность превратится в кампанейщину, поэтому так важно держаться в рамках правового поля и строго соблюдать действующее законодательство.

Отдельный болезненный вопрос, о судьбе залоговых прав на изымаемое имущество. Прекращается ли

право залога (прекращается ли залог) в случае применения меры, предусмотренной п. 2 ст. 235 ГК. Имеется судебная практика, в соответствии с которой залог прекращается (ООО «Магnum» об обращении в доход государства здания ТЦ «Подсолнух» в г. Хабаровске), с формулировкой – владелец не наказывается, а утрачивает право собственности на имущество, поскольку в ходе судебного разбирательства выясняется отсутствие у лица законных оснований для его возникновения. Не следствие прекращения залога полагается не наличие закона, в силу которого залог прекращается, а отсутствие закона, в силу которого залог сохраняется. Практика аннулирования банковских залогов при изъятии имущества должностных лиц повлечет обвал кредитного рынка, а вслед за ним и гражданского оборота в целом [20].

Есть так же курьезная практика решений по подобным делам. Так, к примеру, Генеральная прокуратура заявила иск в Арбитражный суд Санкт-Петербурга с требованием изъять в пользу государства ООО «ХайделбергЦемент Рус», АО «Сырьевая компания», «Сланцевый цементный завод «Цесла», ОАО «Гурово-Бетон» материнская компания – группа HeidelbergCement, затем отказалась от требований, указав, о возможности защиты интересов государства иными правовыми способами [2]. Что имеет в виду Генеральная прокуратура, под иными правовыми способами, в каком законе они прописаны и, что для этого сделал миллиардер Людвиг Меркле, другие предприниматели и юридическое сообщество хотели бы знать.

Несоответствие по многим критериям действующему законодательству судебной практики по делам по заявлениям прокуроров об обращении в доход РФ имущества, в соответствии с законодательством о противодействии коррупции, как нам видится состоит не столько в корыстных деяниях, сколько в неправильном осуществлении государственной службы, злоупотребление правом, или неумение его применять.

Отдельный болезненный вопрос – изъяти, что дальше.

Прокуратура отчитывается об огромных суммах, перешедших в доход государства. Как заявил Генеральный прокурор РФ, в 2021 г. сумма изъятых у коррупционеров имущества, ценностей составила более 54 млрд руб., выявлено свыше 250 тысяч коррупционных правонарушений [18]. Но изъятые это не деньги, а заводы, плантации чая, фабрики, мясокомбинаты, порты и т.п., требующие постоянного квалифицированного управления. Абсолютно точно отметил помощник Президента России по экономическим вопросам Максим Орешкин, оценив иски прокуратуры об изъятии частных активов: «государство в лице чиновников – не очень хороший собственник, управление из Москвы заводами в регионах к хорошим результатам не приводит, руководить должны заинтере-

И. А. ТРУНОВ
ДЕПРИВАТИЗАЦИЯ, НАЦИОНАЛИЗАЦИЯ
ИЛИ ТЕНДЕНЦИЯ BACK IN THE USSR?
РОСТ ОБРАЩЕНИЙ ИМУЩЕСТВА В ДОХОД
ГОСУДАРСТВА

ресованные в прибыли люди на местах» [9]. Но, если отобрать у одних людей на местах, и передать другим, руками Генеральной прокуратуры, под эгидой борьбы с коррупцией, с учетом большого количества нарушений закона, возможна отмена решений и вероятность движения по кругу с ухудшающейся производительностью.

Всё-таки гораздо лучше соблюдать закон, даже, если это Генеральная прокуратура?

ЛИТЕРАТУРА

1. Агростоппинг // Коммерсант 02.08.23. <https://www.kommersant.ru/doc/6147979>
2. Арбитражный суд г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области Дело от 15.09.2023 г. № А56-74979/2023.
3. Глава Минэкономразвития назвал пересмотр итогов приватизации «путем в никуда» // Forbs. 11.09.2023. <https://www.forbes.ru/biznes/496235-glava-minekonomrazvitia-nazval-peresmotr-itogov-privatizacii-putem-v-nikuda>
4. **Мильчакова О.В.** Стандарты доказывания факта незаконного установления контроля иностранного инвестора над стратегическим хозяйственным обществом // Российское конкурентное право и экономика. 2023. № 2.
5. Определение Конституционного Суда РФ от 25.11.2020 № 2852-0.
6. Определение Конституционного Суда РФ от 19.12.2019 № 3559-0.
7. Определения Конституционного Суда РФ от 8.04.2010 № 456-0-0, от 21.11.2013 № 1756-0, от 20.03.2014 № 534-0, от 29.03.2016 № 516-0, от 29.09.2016 № 2071-0, от 25.10.2016 № 2309-0 и др.
8. Определение Конституционного Суда РФ от 6 июня 2017 г. № 1163-О.
9. Орешкин раскритиковал передачу частных активов в регионах под управление чиновникам из Москвы // Коммерсант. 12.09.2023.
10. Постановления Конституционного Суда РФ от 16.07.2008 № 9-П, от 14.05.2012 № 11-П; Определение Конституционного Суда РФ от 14.05.2015 № 1127-0 и др.
11. Постановления Конституционного Суда РФ от 22.06.2010 № 14-П, от 13.07.2010 № 16-П и др.
12. Постановление Конституционного Суда РФ от 9 января 2019 г. № 1-П.
13. Постановление Конституционного Суда РФ от 4.07.2022 № 22-П.
14. Пленарное заседание восьмого Восточного экономического форума. <http://www.kremlin.ru/events/president/news/72259>
15. Решение Лабинского городского суда Краснодарского края от 23.10.2023 № 2-987/2023.
16. Решение Нижегородского районного суда г. Нижний Новгород от 25.11.2019 г. №2-9507/2019.

17. Решение Советского районного суда г. Владивостока от 06.03.2020 по делу № 2-292/2020.
18. Российская газета от 26.04.2022 <https://rg.ru/2022/04/26/krasnov-vozmeshchenie-ushcherba-ot-korrupcii-vpervye-prevysilo-samushcherb.html>.
19. Система обеспечения законодательной деятельности. <https://sozd.duma.gov.ru/bill/726111-6>.
20. **СКЛОВСКИЙ К.И.** Применение законодательства об обращении в доход государства имущества, полученного в результате нарушения законодательства о противодействии коррупции // Консультант Плюс. Вестник экономического правосудия Российской Федерации. 2021. № 11.
21. Совместное постановление Пленума Верховного Суда РФ и Пленума Высшего Арбитражного Суда РФ от 29.04.2010 № 10/22 п. 57.
22. "Хуже, чем в 90-ые". В Сочи суды продолжают изымать у собственников участки с домами // Новые Известия. <https://newizv.ru/news/2023-02-28/huzhe-chem-v-90-ye-v-sochi-sudy-prodolzhayut-izymat-u-sobstvennikov-uchastki-s-domami-398978>.
23. <https://legal.report/zakon-ili-proizvolgenprokuratura-zabiraet-zemli-u-sobstvennikov-nachernomorskom-poberezhe/>
24. https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%B2%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D0%B2_%D0%A0%D0%BE%D1%81%D1%81%D0%B8%D0%B8
25. <https://www.pravda.ru/news/realty/1938156-deprivatizacia/>
26. <https://www.rbc.ru/economics/12/09/2023/65003a0e9a7947552625175b?from=copy>
7. Rulings of the Constitutional Court of the Russian Federation dated April 8, 2010 N 456-0-0, dated November 21, 2013 N 1756-0, dated March 20, 2014 N 534-0, dated March 29, 2016 N 516-0, dated September 29, 2016 N 2071-0, dated October 25, 2016 N 2309-0, etc. (In Russian).
8. Determination of the Constitutional Court of the Russian Federation of June 6, 2017. N 1163-O. (In Russian).
9. Oreshkin criticized the transfer of private assets in the regions under the management of officials from Moscow. *Kommersant*. 09.12.2023. (In Russian).
10. Resolutions of the Constitutional Court of the Russian Federation dated July 16, 2008. N 9-P, dated May 14, 2012 No. 11-P; Determination of the Constitutional Court of the Russian Federation dated May 14, 2015. N 1127-0, etc. (In Russian).
11. Resolutions of the Constitutional Court of the Russian Federation dated June 22, 2010 N 14-P, dated July 13, 2010. N 16-P, etc. (In Russian).
12. Resolution of the Constitutional Court of the Russian Federation of January 9, 2019. N 1-P. (In Russian).
13. Resolution of the Constitutional Court of the Russian Federation dated July 4, 2022. N 22-P. (In Russian).
14. Plenary meeting of the eighth Eastern Economic Forum. <http://www.kremlin.ru/events/president/news/72259> (In Russian).
15. Decision of the Labinsky City Court of the Krasnodar Territory dated October 23, 2023. N 2-987/2023. (In Russian).
16. Decision of the Nizhny Novgorod District Court of Nizhny Novgorod dated November 25, 2019. N 2-9507/2019. (In Russian).
17. Decision of the Sovetsky District Court of Vladivostok dated 03/06/2020 in case N 2-292/2020. (In Russian).
18. Russian newspaper dated 04/26/2022 <https://rg.ru/2022/04/26/krasnov-vozmeshchenie-ushcherba-ot-korrupcii-vpervye-prevysilo-samushcherb.html>. (In Russian).
19. System for supporting legislative activities. <https://sozd.duma.gov.ru/bill/726111-6>. (In Russian).
20. **SKLOVSKY K.I.** Application of legislation on the conversion into state income of property obtained as a result of violation of anti-corruption legislation. *Konsultant Plus. Vestnik ekonomicheskogo pravosudiviya Rossiyskoy Federatsii*. 2021;11. (In Russian).
21. Joint resolution of the Plenum of the Supreme Court of the Russian Federation and the Plenum of the Supreme Arbitration Court of the Russian Federation dated April 29, 2010. N 10/22. p. 57. (In Russian).
22. "Worse than in the 90s." In Sochi, courts continue to confiscate plots of houses from owners." *Novyye Izvestiya*. <https://newizv.ru/news/2023-02-28/huzhe-chem-v-90-ye-v-sochi-sudy-prodolzhayut-izymat-u-sobstvennikov-uchastki-s-domami-398978>. (In Russian).

REFERENCES

1. Agrostopping. *Kommersant* 02.08.23. <https://www.kommersant.ru/doc/6147979> (In Russian).
2. Arbitration Court of St. Petersburg and Leningrad Region Case dated September 15, 2023. N A56-74979/2023. (In Russian).
3. The head of the Ministry of Economic Development called the review of the results of privatization "a path to nowhere". *Forbes*. 09/11/2023. <https://www.forbes.ru/biznes/496235-glava-minekonomrazvitiya-nazval-peresmotr-itogov-privatizacii-putem-v-nikuda> (In Russian).
4. **MILCHAKOVA O.V.** Standards of proving the fact of illegal establishment of control of a foreign investor over a strategic business company. *Rossiyskoye konkurentnoye pravo i ekonomika*. 2023;2. (In Russian).
5. Determination of the Constitutional Court of the Russian Federation dated November 25, 2020. N2852-0. (In Russian).
6. Determination of the Constitutional Court of the Russian Federation dated December 19, 2019. N 3559-0. (In Russian).

23. <https://legal.report/zakon-ili-proizvolgenprokuratura-zabiraet-zemli-u-sobstvennikov-nachernomorskom-poberezhe/> (In Russian).
24. https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%B2%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D0%B2_%D0%A0%D0%BE%D1%81%D1%81%D0%B8%D0%B8 (In Russian).
25. <https://www.pravda.ru/news/realty/1938156-deprivatizacia/>
26. <https://www.rbc.ru/economics/12/09/2023/65003ae9a7947552625175b?from=copy> (In Russian).

Трунов Игорь Леонидович,
д.ю.н., к.э.н., профессор, адвокат Коллегии адвокатов
«Трунов, Айвар и партнёры» Адвокатской палаты города
Москвы

➔ 125080 г. Москва, Волоколамское ш., д. 15/22
125080 Moscow, Volokolamskoye shosse, 15/22
тел.: +7(499) 158-85-81, e-mail: trunov08@yandex.ru

АКИФУ АГА МЕХТИ ОГЛЫ АЛИЗАДЕ – 90 ЛЕТ



25 февраля 2024 г. выдающемуся ученому и крупному организатору науки Азербайджана, директору Института геологии и геофизики, иностранному члену РАЕН, академику Акифу Ализаде исполнилось 90 лет.

Академик А. Ализаде родился в 1934 г. в Баку. В 1956 г. окончил геологоразведочный факультет Азербайджанского института промышленности (ныне Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности). А. Ализаде получил ученую степень доктора философии по геолого-минералогическим

наукам в 1961 г. и доктора геолого-минералогических наук в 1969 г., в 1980 г. стал членом-корреспондентом Академии наук Азербайджана (АНА), а в 1989 г. стал действительным членом Академии. В 1990–2007 годах был академиком-секретарем Отделения наук о Земле НАНА, в 2007–2013 годах был вице-президентом НАНА, а в 2013 г. был избран президентом НАНА.

Академик Акиф Ализаде занимает особое место в ряду крупнейших ученых, которые вошли в историю советской и азербайджанской науки, имеющую богатые многовековые традиции. Видный ученый создал свою научную школу в области геологии, снискавшую известность как в Азербайджане, так и за ее пределами, смог органически совместить творческую деятельность с организаторской работой и миссией гражданина. В те годы в Азербайджане были заложены основы палеонтологии и достигнуты важные результаты в области изучения мелового периода. Академик А. Ализаде посвятил всю свою жизнь палеонтологии и поднял ее на новый уровень развития. В трудах ученого впервые

в истории отечественной науки была системно изучена и обобщена геопалеонтозоология многих регионов, с именем академика Акифа Ализаде связано научно-обоснованное исследование геопалеонтозоологии Азербайджана.

Юбиляр обладает безграничной любовью к жизни, всегда настроен на творческий лад, даже в самые напряженные, трудные моменты мудрый старейшина азербайджанской науки смотрит в будущее с большими надеждами. Академик А. Ализаде, обладающий сильным мышлением и прекрасной памятью, большой любитель поэзии.

Академик Акиф Ализаде сохраняет тесные связи с РАЕН, по его инициативе в г. Баку был создан совместный Азербайджанский научный центр РАЕН, который активно развивает сотрудничество с научной общественностью России и Азербайджана.

Президиум РАЕН, редакционная коллегия журнала «Вестник РАЕН» сердечно поздравляют академика Акифа Ализаде со знаменательной датой и желают крепкого здоровья, ярких успехов и достижений в науке и общественной деятельности!

ВИКТОРУ АНТОНОВИЧУ САДОВНИЧЕМУ – 85 ЛЕТ



3 апреля исполнилось 85 лет ректору Московского государственного университета (МГУ) имени М.В. Ломоносова, академику РАН, д. чл. РАЕН, профессору Виктору Антоновичу Садовничему.

С 1992 года В.А. Садовничий руководит ведущим вузом страны. За годы работы Виктор Антонович провел ряд преобразований, позволивших университету оставаться в числе престижных учебных заведений мира.

Он отдал больше полувека своей жизни науке и внес колоссальный вклад в развитие не только alma mater, но и всей образовательной системы Российской Федерации.

Члены Российской академии естественных наук желают Виктору Антоновичу сохранить на долгие годы энергию, открытость инновациям, обилия талантливых учеников, интересных проектов, здоровья и счастья!

ИСААКУ ЛЬВОВИЧУ ГЕЙХМАНУ – 85 ЛЕТ



17 апреля встречает свой юбилей вице-президент РАЕН Исаак Львович Гейхман.

В 1961 г. Исаак Львович окончил Московский горный институт и посвятил свою жизнь горному производству и горной науке. Но уже в 1960 г. он начал трудовую деятельность, он слесарь, конструктор, технолог, мастер механического цеха Малаховского экспериментального завода угольного машиностроения «Гипроуглемаш».

Начиная с 1963 г. им пройден путь от аспиранта до заместителя генерального директора по научной работе Института горного дела им. А.А. Скочинского, а после его преобразования Исаак Львович стал первым заместителем генерального директора Национального научного центра горного производства – ИГД им. А.А. Скочинского, директором по науке. В этот период Исаак Львович становится – к.т.н., ст. научным сотрудником, доцентом, д.т.н., профессором, д.чл. РАЕН, академиком Академии горных наук, членом ряда зарубежных академий и почетным профессором нескольких университетов мира, Заслуженным деятелем науки РФ, Заслуженным работником Минтопэнерго России.

В период с 1993 г. по 1995 г. – проректор Академии народного хозяйства при Правительстве РФ. С 1967 г. он преподает в Московском горном университете, где прошел ступени от старшего преподавателя до профессора. В 2000-е годы Исаак Львович Гейхман д.т.н. избирается членом президиума РАЕН, первым вице-президентом МАНПО, зам. председателя Ученого совета ИГД им. А.А. Скочинского, почетным доктором Европейского университета, почетным профессором Центрального южного политехнического университета КНР.

Профессор Гейхман – автор более 220 научных трудов, в том числе 5 монографий, свыше 200 изобретений, патентов, включая патенты США, Канады и Австралии, Германии и Великобритании, автор научного открытия. Он стоял у истоков создания современного горно-шахтного оборудования и нетрадиционных способов добычи угля. Основопологающие работы И.Л. Гейхмана связаны с обеспечением надежности горного оборудования и созданием новых средств крепления, прогрессивных видов индивидуальных гидравлических стоек и шахтных крепей для комплексной механизации процессов горного производства. Профессор Гейхман разработал научные основы использования визуальной информации в горном деле, в частности, новые способы прогнозирования выброса метана и создал новые средства технического видения. Плодотворная и многообразная деятельность И.Л. Гейхмана сделала его ведущим ученым России в области горной механики, автоматизации физических процессов горного производства, технического зрения широкого профиля. Открытое им новое физическое явление линейной поляризации света представ-

ляет существенный интерес для разработки перспективного класса систем технического видения.

Плодотворная научная и трудовая деятельность И.Л. Гейхмана оценена правительством страны, научной общественностью России и за рубежом. Он – кавалер 40 государственных, зарубежных и общественных наград, награжден Почетной грамотой Президента РФ. Среди них орден «За заслуги перед Отечеством», высшая профессиональная награда «Золотая звезда горняка», «Золотая звезда честь, гордость и слава России». Профессор Гейхман полный кавалер знака «Шахтерской славы» РФ трех степеней и кавалер «Шахтерской доблести». Награжден Высшим Патриаршим знаком русской Православной церкви «Святой великомученицы Варвары» I степени – Покровительницы горняков. Исаак Львович – Почетный академик Российской академии художеств.

И.Л. Гейхман продолжает активно и плодотворно работать как вице-президент РАЕН, Первый вице-президент Международной академии исторических и социальных наук, почетный член Президиума академии горных наук, член Высшего горного Совета России, Президент ассоциации строительных компаний «Росза рубежстрой».

Научная эрудиция, высокие профессиональные качества, организационный талант и дипломатические способности органически сочетаются в нем с искренней доброжелательностью, отзывчивостью, чуткостью к людям.

Президиум РАЕН, редколлегия журнала, коллеги и друзья сердечно поздравляют юбиляра и желают ему крепкого здоровья, удачи, всегда прекрасного настроения и дальнейших творческих успехов.



ВАСИЛИЮ СЕМЕНОВИЧУ НОВИКОВУ – 75 ЛЕТ

Поздравляем с юбилеем вице-Президента РАЕН, Лауреата Государственной премии РФ в области науки и техники, Заслуженного деятеля науки РФ, Лауреата Премии АН СССР, кавалера Золотой Звезды Науки, академика, доктора медицинских наук, профессора, Почетного гражданина г. Гагарин,

почетного профессора 12 Вузов России и Республики Беларусь, участника боевых действий Новикова Василия Семеновича

Президиум РАЕН, редколлегия журнала и коллеги от души поздравляют юбиляра и желают доброго здоровья, творческих успехов, бодрости и оптимизма.



ВАЛЕНТИНЕ ГРИГОРЬЕВНЕ ДОБРОХЛЕБ – 75 ЛЕТ

Президиум РАЕН, редколлегия журнала «Вестник РАЕН» поздравляют с юбилеем д.э.н., профессора, главного научного сотрудника ФНИСЦ РАН, д. чл. РАЕН, руководителя отделения проблем народонаселения РАЕН Валентину Григорьевну Доброхлеб. Валентина Григорьевна – известный исследователь демографической динамики,

яркий представитель современной российской научной социодемографической школы, продолжатель традиций, заложенных основателем этого научного направления Н.М. Римашевской.

Желаем Валентине Григорьевне здоровья, творческих успехов, новых больших открытий и признания.



День геолога — профессиональный праздник специалистов, связанных с геологическими науками и специальностями. Праздник учрежден Указом Президиума Верховного Совета СССР от 31 мар-

та 1966 года в ознаменование заслуг советских геологов в создании минерально-сырьевой базы страны. Праздник приходится на первое воскресенье апреля, что связано с началом подготовки к летним работам и сборам в экспедиции.

Поздравляем замечательных людей, которые благодаря своей работе, помогают найти в недрах земли сокровища, запасы ценных ресурсов и древние тайны, которые надежно спрятаны на нашей планете.

Вы покорили недра нашей планеты, вы исследуете все тайны и закономерности. Пусть ваш профессионализм ведет к достижению поставленных задач, и все мечты обязательно воплощаются в жизнь. Пусть здоровье будет богатырским, жизнь дарит большие возможности для осуществления всего задуманного, пусть всегда получается то, что не удастся другим!



АСПИРАНТУРА, СОИСКАТЕЛЬСТВО, ДИССЕРТАЦИОННЫЙ СОВЕТ В ИНСТИТУТЕ РЕГИОНАЛЬНЫХ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ



ИРЭИ, в соответствии с государственной аккредитацией и лицензией на осуществление образовательной деятельности, проводит прием на обучение в аспирантуре по научной специальности
5.2.3 «РЕГИОНАЛЬНАЯ И ОТРАСЛЕВАЯ ЭКОНОМИКА»
(ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ)



В ходе обучения изучаются дисциплины кандидатского минимума (ИСТОРИЯ И ФИЛОСОФИЯ НАУКИ, ИНОСТРАННЫЙ ЯЗЫК, СПЕЦИАЛЬНОСТЬ) и дисциплины образовательной подготовки (дисциплины по выбору). Особое внимание уделяется научно-исследовательской деятельности, с целью подготовки диссертации и представления её к защите



К Диссертационному совету можно прикрепиться для подготовки и защиты диссертации в качестве соискателя, без освоения программы аспирантуры



Закончив обучение, Вы получите Заключение «О соответствии диссертации на соискание ученой степени кандидата наук установленным критериям» и Свидетельство об окончании аспирантуры. Подготовленная и рекомендованная к защите работа может быть защищена в диссертационном совете на базе ИРЭИ



В ИРЭИ действует Диссертационный совет 75.1.060.01 по защите диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора экономических наук по научной специальности 5.2.3., соответствующей профилю подготовки в аспирантуре. Специализация совета:

- РЕГИОНАЛЬНАЯ ЭКОНОМИКА;
- ЭКОНОМИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

ОЧНАЯ
форма
обучения
Срок
обучения –
3 ГОДА



Адрес:
РФ, 119002,
г. Москва,
пер. Сивцев Вражек,
29/16
тел.: +7 (499) 241-0418,
+7 (499) 241-6095
e-mail: irei@irei.ru

Ждем будущих аспирантов и соискателей.
Желаем успешной учебы и защиты диссертационных работ

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)

Глазко Валерий Иванович — ин. чл. РАЕН, ин. чл. РАН, д.с.-х.н., профессор, зав. Центром нанобиотехнологии Российского государственного аграрного университета – Московской сельскохозяйственной академии им. К.А. Тимирязева (РФ)

Ростанец Виктор Григорьевич — д. чл. РАЕН, д.э.н., профессор, зам. директора АО «Институт региональных экономических исследований» (РФ)

Алексеев Александр Сергеевич — д. чл. РАЕН, д.г.-м.н., профессор кафедры палеонтологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, зав. лабораторией протистологии Палеонтологического института им. А.А. Борисяка РАН, почетный работник сферы образования РФ (РФ)

Башкирцева Наталья Юрьевна — д. чл. РАЕН, д.т.н., профессор, директор Института нефти, химии и нанотехнологий, заведующий кафедрой «Химической технологии переработки нефти и газа», Директор Научно-производственного центра «Панхимтех» Казанского национального исследовательского технологического университета», Заслуженный деятель науки Республики Татарстан (РФ)

Бобров Андрей Викторович — д. чл. РАЕН, профессор РАН, д.г.-м.н., доцент, профессор кафедры петрологии и вулканологии, заместитель декана геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (РФ)

Гулиев Ибрагим Саид оглы — ин. чл. РАЕН, д.г.-м.н., профессор, академик, вице-президент Национальной Академии Наук Азербайджана, Лауреат Государственной премии АР, главный редактор журнала АНХ (Азербайджан)

Жданов Михаил Семенович — д. чл. РАЕН, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории электромагнитных методов геофизических исследований Института геоэлектромгнитных 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)

Капунов Давид Родионович — д. чл. РАЕН, д.т.н., профессор, чл.-корр. РАН, зав. лабораторией теории проектирования освоения недр Института проблем комплексного освоения недр (ИПКОН) РАН, Заслуженный деятель науки и техники России (РФ)

Кервалишвили Паата Джамлетович — ин. чл. РАЕН, д.ф.-м.н., профессор Института прикладной физики Грузинского технического университета, президент Грузинской АЕН (Грузия)

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Аренс Виктор Жанович — почетный вице-президент РАЕН, д.т.н., профессор, почетный профессор НИТУ «МИСиС», член ученого совета ФГБОУ ВО «РГУ 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)

Медуа Аркадий Иванович — д. чл. РАЕН, д.филос.н., профессор, генеральный директор научного издательства «Гуманистика» (РФ)

Мандрик Илья Эммануилович — д. чл. РАЕН, д.т.н., к.г.-м.н., вице-президент по геологоразведке и разработке ПАО «ЛУКОЙЛ», Заслуженный Геолог РФ (РФ)

Михайлов Николай Нилович — д. чл. РАЕН, д.т.н., профессор, профессор Российского государственного университета нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, почетный нефтяник (РФ)

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 фа-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)

Судейманов Багир Алекпер оглы — д.т.н., профессор, чл.-корр. НАН Азербайджана, зам. директора НИИГИПРОМОРНЕФТЬ, гл. редактор журнала Scientific Petroleum, зам. гл. редактора журнала SOCAR Proceedings, зам. гл. редактора журнала «ANAS Transactions. Earth Sciences» (Азербайджан)

Чень Цзяньпин — ин. чл. РАЕН, д.т.н., профессор, директор Научно-исследовательского центра «Земли, ресурсов и высоких технологий» Китайского геологического университета (г. Пекин), начальник головной лаборатории и профессионального комитета математической геологии и геоинформации Китайского геологического общества. Лауреат пяти премий научно-технологического прогресса министерства геологии и минеральных ресурсов (Китай)

Чжао Пенда — ин. чл. РАЕН, д.т.н., профессор Китайского геологического университета (г. Пекин), д. чл. Китайской академии наук, председатель международного комитета по геологическим данным от азиатского региона (Китай)

Шевченко Юрий Леонидович — д. чл. РАЕН, академик РАН, д.м.н., профессор, президент Национального медико-хирургического Центра им. Н.И. Пирогова, Заслуженный врач РФ, Заслуженный деятель науки РФ (РФ)

Шестопалов Юрий Викторович — д. чл. РАЕН, д.ф.-м.н., профессор кафедры прикладной математики Российского технологического университета МИРЭА (РФ)

Шогенов Беслан Аминович — д. чл. РАЕН, д.э.н., профессор кафедры Экономики Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета, Заслуженный деятель науки КБР (РФ)

Яннакопулос Панайотис — ин. чл. РАЕН, профессор кафедры компьютерных систем, член управляющего совета Пирейского университета прикладных наук, Вице-президент Европейских программ ПУПИ, член совета Национального греческого информационного центра (Греция)

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 не более 15 страниц через 1,5 интервала в формате MS WORD.

ИЛЛЮСТРАЦИИ. Иллюстрации (графики, схемы, диаграммы, рисунки, фотографии) в виде отдельных файлов с указанием позиции для размещения в тексте. Растровые изображения в формате TIFF с разрешением 350 dpi. Векторные изображения в формате EPS. При необходимости в журнале могут быть опубликованы цветные иллюстрации при условии оплаты автором.

ФОРМУЛЫ. Количество формул в статье не должно превышать 10.

Список источников нумеруется и составляется в алфавитном порядке. В тексте статьи дается в квадратных скобках ссылка на порядковый номер упомянутой работы, которая в списке приводится в следующем виде: фамилия и инициалы автора (авторов), полное название работы, сокращенное название журнала, год, том, номер, интервал страниц. Ссылки на монографии (книги) включают полное название книги, фамилию и инициалы автора (авторов), город, издательство, год, полное количество страниц.

Дополнительно приводится перечень затекстовых библиографических ссылок на латинице (“References”). Нумерация записей в дополнительном перечне затекстовых библиографических ссылок должна совпадать с нумерацией записей в основном перечне затекстовых библиографических ссылок.

Редакция оставляет за собой право сокращать и редактировать материалы статьи.

Утверждено на совместном заседании редакционной коллегии и редакционного совета
7 февраля 2002 г.

Журнал входит в перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук по следующим группам специальностей:

- ◆ 1.6.9. Геофизика (технические науки),
- ◆ 1.6.10. Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения (технические науки),
- ◆ 2.8.2. Технология бурения и освоения скважин (технические науки),
- ◆ 2.8.4. Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений (технические науки),

- ◆ 2.8.5. Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ (технические науки),
- ◆ 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика (технические науки),
- ◆ 2.8.3. Горнопромышленная и нефтегазопромышленная геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр (технические науки),
- ◆ 5.2.3. Региональная и отраслевая экономика (экономические науки),
- ◆ 5.2.6. Менеджмент (экономические науки),
- ◆ 5.2.7. Государственное и муниципальное управление (экономические науки).