



ОБЩЕСТВЕННО-НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ВЕСТНИК

РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

Издается с 2001 г.
Выходит 4 раза в год

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
тематического номера –
Аренс В.Ж.

Заместитель главного редактора –
Глазко В.И.
Горбачев В.В.

Ответственный секретарь –
Маринина М.В.

Алексеев В.Н.
Волков Ю.Г.
Грибов А.А.
Епифанцев С.Н.
Золотарев В.А.
Иваницкая А.В.
Магомедов Ш.М.
Панин А.Н.
Письменский Г.И.
Смирнов А.И.
Терехин М.Т.
Утямышев И.Р.
Черешкин Д.С.
Шахвердиев А.Х.

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель –
Кузнецов О.А.

Гейхман И.А.
Кервалишвили П.Д.
Козловский Е.А.
Лагуткин А.В.
Медуа А.И.
Никитин А.Н.
Новиков В.С.
Пирумов В.С.
Рахманин Ю.А.
Сенчагов В.К.
Степашин С.В.
Тыминский В.Г. (ФРГ)
Фурсей Г.Н.
Чилингар Дж. (США)
Шевченко Ю.А.

Выпускающий
редактор номера
Хчеян Г.Х.
Зав. редакцией –
Алексеев П.А.

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.

Журнал зарегистрирован в Министерстве
по делам печати, телерадиовещания и средств
массовых коммуникаций РФ.
Рег. свид. ПИ № 77-11708

Все права защищены. Никакая часть этого издания
не может быть репродуцирована в какой-либо форме
без письменного разрешения издателя.
Редакция не несет ответственности за содержание
рекламных материалов.
© РАЕН 2013 г.

☎ 119002, Москва,
пер. Сивцев Вражек, 29/16
тел./факс (495) 954-7305

Тираж 1000 экз.
Отпечатано в ООО «Типография Момент»
г. Химки, ул. Библиотечная, 11

СОДЕРЖАНИЕ

ВСТУПИТЕЛЬНОЕ СЛОВО
И.Е. Жилкина 5

ПОДЗЕМНОЕ И КУЧНОЕ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ

МЕТОДЫ
ИНТЕНСИФИКАЦИИ
СКВАЖИННОГО
ПОДЗЕМНОГО
ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА
И.Н. Солодов 6

ДОРАБОТКА УРАНОВОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЯ
ПОДЗЕМНЫМ
ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕМ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ШАХТНОГО СТВОЛА
Н.Г. Малухин,
С.В. Маркелов,
Х.Р. Баймурзаев 11

НЕТРАДИЦИОННЫЕ СПОСОБЫ ДОБЫЧИ НЕФТИ И ГАЗА

ПРИМЕНЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ
ХРАНИЛИЩ
ГАЗООБРАЗНЫХ И ЖИДКИХ
ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ
В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ
ЭКОНОМИКИ
В.А. Казарян 15

ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ
ЭФФЕКТИВНОСТЬ
ТЕХНОЛОГИИ ХИМИЧЕСКОЙ
ПЕРЕРАБОТКИ БУРОГО УГЛЯ
В БЕЛАРУСИ
А.Е. Воробьев,
А.А. Верчеба,
А. Ибройева 25

ДОБЫЧА СЛАНЦЕВОГО
ГАЗА. ПРОБЛЕМЫ И
ПЕРСПЕКТИВЫ
А.Г. Хисматуллина 34

ПЕРВОЕ В РОССИИ
МЕССОЯХСКОЕ
ГАЗОГИДРАТНОЕ
МЕСТОРОЖДЕНИЕ:
СОСТОЯНИЕ И
ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ
Ф.А. Адзынова 41

ПОДЗЕМНОЕ ХРАНЕНИЕ
ВОДОРОДА
Н.П. Федорова 44

СКВАЖИННАЯ ГИДРОТЕХНОЛОГИЯ

ОБОСНОВАНИЕ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ВОДОСТРУЙНЫХ
АППАРАТОВ В ТЕХНОЛОГИИ
ГИДРОРАЗРЫВ ПЛАСТА
Н.Г. Малухин,
И.У. Халимов 50

ОБОСНОВАНИЕ
ЭФФЕКТИВНОСТИ
ПРОЦЕССОВ
ВСАСЫВАНИЯ ПРИ
СКВАЖИННОЙ
ГИДРОДОБЫЧЕ
Н.Г. Малухин,
Р.В. Кудряшов 53

ВОЗНИКНОВЕНИЕ СТАБИЛЬНОГО
ПРОЦЕССА
ПСЕВДООЖИЖЕНИЯ ГОРНОЙ
МАССЫ В ОБЪЕМЕ
ЗАГРУЗОЧНОГО АППАРАТА ПРИ
НАПОРНОМ
ГИДРОТРАНСПОРТИРОВАНИИ
А.А. Вильмис,
В.П. Дробаденко,
Г.Н. Малухин,
Р.В. Кудряшов,
Н.Г. Малухин 57

ИССЛЕДОВАНИЕ
ОСОБЕННОСТЕЙ ИСТЕЧЕНИЯ
СТРУИ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ
НАСАДОК В ЗАГРУЗОЧНЫХ
АППАРАТАХ НАПОРНОГО
ГИДРОТРАНСПОРТА
А.А. Вильмис,
В.П. Дробаденко,
Р.В. Кудряшов,
Н.Г. Малухин 60

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФИЗИКО-
ХИМИЧЕСКИХ
ГЕОТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ
ОТРАБОТКИ БАКЧАРСКОГО
ЖЕЛЕЗОРУДНОГО
ПРОЯВЛЕНИЯ
Л.В. Григорьевич,
И.И. Михайлович 63

ОСВОЕНИЕ ШЕЛЬФОВЫХ И ГЛУБОКОВОДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

ПЕРСПЕКТИВЫ ОСВОЕНИЯ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ШЕЛЬФОВЫХ
ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ
КОНКРЕЦИИ
В БАЛТИЙСКОМ МОРЕ
А.С. Журавлев,
М.Ю. Козлов,
Д.С. Морозов 66

МОРСКИЕ ИСПЫТАНИЯ
НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ
ПОДВОДНОЙ ДОБЫЧИ
АЛМАЗОСОДЕРЖАЩИХ
ПОРОД НА ШЕЛЬФЕ
НАМИБИИ
В.П. Дробаденко,
Н.Г. Малухин,
А.А. Вильмис,
М.Ю. Козлов 71

ПРИКЛАДНАЯ ГЕОМИКРОБИОЛОГИЯ

ИССЛЕДОВАНИЯ
БАКТЕРИАЛЬНОГО
ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ
УПОРНЫХ
ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ
КОНЦЕНТРАТОВ
В.П. Мязин,
В.В. Баранов 76

ГЛУБОКАЯ ПЕРЕРАБОТКА
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ОТХОДОВ
Г.А. Пахомова,
А.Р. Макавецкас,
И.Н. Бабич,
М.А. Рязанов,
А.А. Курнев,
Е.А. Терентьева 80

ОБЕЗЖЕЛЕЗНЕНИЕ КВАРЦЕВЫХ ПЕСКОВ В УСЛОВИЯХ ЕСТЕСТВЕННОГО ЗАЛЕГАНИЯ Л.С. Калининко, Е.А. Аширбаева, А.В. Канарская	84	ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ ГЕОЛОГИЯ, ТЕХНОЛОГИЯ И ЭНЕРГЕТИКА	
ИЗВЛЕЧЕНИЕ НИКЕЛЯ ИЗ УПОРНЫХ РУД Т.В. Башлыкова, Е.А. Аширбаева, Ю.Ю. Фищенко, М.В. Пинясов, А.А. Дунаева, Е.Н. Баранова	86	ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ВАРИАЦИЙ НА ГЛУБИННЫЙ ТЕПЛОВОЙ ПОТОК В.Р. Ахмедзянов, М.Д. Хуторской	111
ПЕРЕРАБОТКА ПРОДУКТОВ ФХГ		ТЕРМИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ВОДНОЙ ТОЛЩИ ЗАПАДНО-АРКТИЧЕСКОГО БАСЕЙНА КАК КЛИМАТООБРАЗУЮЩИЙ ФАКТОР Е.А. Сухих	116
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И МАТЕРИАЛОВ НА ИХ ОСНОВЕ Д.В. Дробот	89	ГЕОТЕРМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ БАРЕНЦЕВО- КАРСКОЙ ПЛИТЫ А.В. Ермаков	119
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ВОДЫ ИЗ ЛУННЫХ ГРУНТОВ П.П. Ананьев, О.М. Гридин, А.В. Плотникова, Ю.В. Смирнова	100	ГИДРОТЕРМЫ ЧУКОТКИ Б.Г. Поляк, В.Ю. Лаврушин, А.А. Чешко	122
МЕТОДИКА ЭКСПРЕСС- КОНТРОЛЯ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ИХ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ П.П. Ананьев, С.Ф. Лесков, В.А. Зентинов, Е.И. Кудрявцева	103	ГЕОЛОГО- ГЕОТЕРМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СОЗДАНИЯ КРУПНЫХ ГЕОТЭС НА ТЕРРИТОРИИ ЧЕЧЕНСКОЙ РЕСПУБЛИКИ А.А. Абдрахманов, В.А. Васильев, Р.М. Алиев, Г.Б. Бадавов	125
СЕЛЕКТИВНОЕ ПРЕДРАЗРУШЕНИЕ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД НА ОСНОВЕ МАГНИТНО- ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ А.В. Плотникова	105	ХАРАКТЕРИСТИКА ВЫРАБОТАННЫХ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЧЕЧЕНСКОЙ РЕСПУБЛИКИ, ПЕРСПЕКТИВНЫХ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ А.А. Абдрахманов, В.А. Васильев, Р.М. Алиев, Г.Б. Бадавов	132
ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГИДРОМИНЕРАЛЬНО- СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ РОССИИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЙОДИДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ЗОЛОТОДОБЫЧЕ В. В. Мазин, Е.А. Полищук	107	РЕШЕНИЕ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ГЕОТЕХНОЛОГИЯ»	136



SCIENTIFIC & PUBLIC JOURNAL

BULLETIN

OF RUSSIAN
ACADEMY
OF NATURAL
SCIENCES

Published since 2001
4 issues per year

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief –

V.ZH. ARENS

Deputy Editor-in-Chief –

V.I. GLAZKO

V.V. GORBACHEV

Executive Secretary –

M.V. MARININA

V.N. ALEKSEEV

Y.G. VOLKOV

L.A. GRIBOV

S.N. EPIFANTSEV

V.A. ZOLOTAREV

L.V. IVANITSKAYA

SH.M. MAGOMEDOV

A.N. PANIN

G.I. PISMENSKY

A.I. SMIRNOV

M.T. TEREHIN

I.R. UTJAMYSHEV

D.S. CHERESHKIN

A.H. SHAHVERDIEV

EDITORIAL COUNCIL

Chairman –

O.L. KUZNETSOV

I.L. GEYKHMAN

P.D. KERVALISHVILI

E.A. KOZLOVSKY

A.V. LAGUTKIN

A.I. MELUA

A.N. NIKITIN

V.S. NOVIKOV

V.S. PIRUMOV

YU.A. RAKHMANIN

V.K. SENCHAGOV

C.V. STEPASHIN

V.G. TYMINSKY (GERMANY)

G.N. FURSEY

J. CHILINGAR (USA)

YU.L. SHEVCHENKO

Managing Editor

XCHEYAN G.H.

Editorial Director –

P.A. ALEKSEEV

iSSN 1682-1696

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

© RANS 2013

Editorial Board Address

29/16, Sivev Vrazhek, 119002,
Moscow, Russia, tel./fax +7 (495) 954-7305

CONTENTS

FOREWORD I.E. ZHILKIN	5	BEGINNING STABILITY OF PROCESS FLUIDIZATION FOR MINED MATERIAL INTO A LOADING APPARATUS FOR PRESSURE HYDROTRANSPORT A.L. VILMIS, V.P. DROBADENKO, G.N. MALUKHIN, R.V. KUDRYASHOV, N.G. MALUKHIN	57
UNDERGROUND HEAP LEACHING		THE PECULIARITY JET STREAM OF THE SWIVEL NOZZLES FOR A LOADING PRESSURE HYDROTRANSPORT APPARATUS A.L. VILMIS, V.P. DROBADENKO, R.V. KUDRYASHOV, N.G. MALUKHIN	60
ISL INTENSIFICATION METHODS I.N. SOLODOV	6	USING PHYSICO-CHEMICAL GEOTECHNOLOGY FOR TESTING BAKCHAR IRON MANIFESTATIONS V.G. LUKJANOV, I.M. IVANJUK	63
REFINEMENT OF URANIUM DEPOSIT BY UNDERGROUND LEACHING WITH SHAFT N.G. MALUKHIN, S.V. MARKELOV, K.R. BAYMURZAEV	11	DEVELOPMENT OF OFFSHORE AND DEEP-WATER DEPOSITS	
NONCONVENTIONAL WAYS OF OIL AND GAS PRODUCTION		FUTURE TRENDS OF FIELDS OF SHELF FERROMANGANESE CONCRETIONS IN THE BALTIC SEA A.S. GURAVLEV, M.Y. KOZLOV, D.S. MOROZOV	66
APPLICATION OF UNDERGROUND STORAGE GAS AND LIQUID POWER IN VARIOUS INDUSTRIES V.A. KAZARYAN	15	SEA TESTS OF NEW TECHNOLOGY OF UNDERWATER PRODUCTION OF DIAMOND-BEARING BREEDS ON A SHELF OF NAMIBIA V.P. DROBADENKO, G.N. MALUKHIN, A.L. VILMIS, M.Y. KOZLOV	71
FACTORS DETERMINING THE EFFECTIVENESS OF THE TECHNOLOGY OF CHEMICAL PROCESSING OF BROWN COAL I N BELARUS A.E. VOROBYOV, A.A. VERCHEBA, L. IBROJEVA	25	APPLIED GEOMICROBIOLOGY	
SHALE GAS PRODUCTION. PROBLEMS AND PROSPECTS L.G. KHISMATULLINA	34	STUDY OF BACTERIAL LEACHING OF REFRACTORY GOLD BEARING CONCENTRATES V.P. MYAZIN, V.V. BARANOV	76
THE FIRST IN RUSSIA MESSOYAKHSKOYE GAS HYDRATE FIELD: STATE AND PROSPECTS FOR DEVELOPMENT F.A. ADZYNOVA	41	DEEP PROCESSING OF METALLURGICAL WASTES A.G. PAKHOMOVA, A.R. MAKAVECKAS, I.N. BABICH, M.A. RJAZANOV, A.A. KURNEV, E.A. TERENTJEVA	80
UNDERGROUND STORAGE OF HYDROGEN N.P. FEDOROVA	44		
SUBSTANTIATION FOR THE USE OF WATER-JET DEVICES IN HYDRAULIC FRACTURING TECHNOLOGY N.G. MALUKHIN, I.U. HALIMOV	50		
BOREHOLE HYDROTECHNOLOGY			
SUBSTANTIATION OF EFFICIENCY OF PROCESSES SUCTIONS FOR HYDRAULIC BOREHOLE MINING N.G. MALUKHIN, R.V. KUDRYASHOV	53		

REMOVAL OF IRON FROM QUARTZ SAND IN A NATURAL OCCURRENCE L.S. KALINCHENKO, E.A. ASHIRBAEVA, A.V. KANARSKAJA	84	GEOTHERMAL GEOLOGY, TECHNOLOGY AND POWER	
EXTRACTION OF NICKEL FROM REFRACTORY ORES T.V. BASHLYKOVA, E.A. ASHIRBAEVA, JU.JU. FISHHENKO, A.A. DUNAeva, E.N. BARANOVA	86	CLIMATIC VARIATIONS INFLUENCE ON THE DEEP HEAT FLOW V.R. AKHMEDZYANOV, M.D. KHUTORSKOY	111
PROCESSING OF PRODUCTS OF GEOTECHNOLOGY		OCEANIC THERMAL STRUCTURE IN THE WESTERN ARCTIC OCEAN AND ITS IMPACT ON THE CLIMATE VARIABILITY E.A. SUHIH	116
PROMISING DIRECTIONS IN THE TECHNOLOGY OF RARE ELEMENTS AND MATERIALS BASED ON THEM D.V. DROBOT	89	HEAT FLOW AT NOTHERN PART OF BARENTS-KARA PLATE A.V. ERMAKOV	119
PROMISING TECHNOLOGY TO EXTRACT WATER FROM THE MOON P.P. ANANJEV., O.M. GRIDIN, A.V. PLOTNIKOVA, JU.V. SMIRNOV	100	THERMAL SPRINGS IN THE CHUKOTKA PENINSULA B.G. POLYAK, V.YU. LAVRUSHIN, A.L. CHESHKO	122
TECHNIQUE OF EXPRESS MONITORING OF IRON- ORE MATERIALS ON THE BASIS OF THEIR MAGNETIC PROPERTIES P.P. ANANJEV, S.F. LESKOV, E.I. KUDRJAVCEVA	103	GEOLOGICAL AND GEOTHERMAL JUSTIFICATION OF CREATION OF LARGE GEOTHERMAL POWER PLANTS IN THE TERRITORY OF THE CHECHEN REPUBLIC A.A. ABDRAKHMANOV, V.A. VASILYEV, R.M. ALIYEV, G.B. BADAVOV	125
SELECTIVE PRE-FRACTURE IRON ORE ON THE BASIS OF MAGNETIC-PULSE TREATMENT A.V. PLOTNIKOVA	105	CHARACTERISTICS OF DEPLETED OIL FIELDS OF THE CHECHEN REPUBLIC, PROMISING TO CREATE INDUSTRIAL GEOTHERMAL POWER PLANTS A.A. ABDRAKHMANOV, V.A. VASILYEV, R.M. ALIYEV, G.B. BADAVOV	132
DEVELOPMENT PROSPECTS HYDROMINERAL RESOURCE BASE RUSSIA AND USE OF COMPOUNDS IODIDE IN GOLD MINING V.V. MAZIN, E.A. POLISHCHUK	107	SOLUTION OF CONFERENCE «PHYSICO-CHEMICAL GEOTECHNOLOGY»	136

Уважаемые участники конференции!

От имени Уранового холдинга «Атомредметзолото» Горнорудного дивизиона госкорпорации Росатом позвольте всех вас приветствовать на конференции по физико-химической геотехнологии.

Спасибо организаторам, Московскому горному государственному университету за продолжение традиции собирать форумы по этой актуальной тематике.

Для нас, как группы предприятий, добывающих уран, участие в данной конференции не просто представляет научный интерес, а имеет вполне конкретную практическую ценность.

Те из вас, кто интересуется ситуацией на рынке природного урана, не понаслышке знают, какие драматические последствия оказала на него авария на АЭС Фукусима. Только за последние три года цены на уран упали в 2 раза. Многие уранодобывающие предприятия в мире поставлены на грань выживания. Новые проекты заморожены.

В этих условиях достаточно комфортно чувствуют себя и продолжают устойчиво развиваться предприятия, применяющие один из методов геотехнологии – скважинное подземное выщелачивание (СПВ).

Из российских предприятий такой метод применяет, прежде всего, ЗАО «Далур», расположенное в Курганской области. Для нас это своего рода площадка, где проходят апробацию передовые идеи. Среди последних достижений можно назвать внедрение в промышленное производство окислителей, значительно интенсифицирующих процесс СПВ, опытные работы по попутному с ураном извлечению скандия, создание автоматизированной системы управления добычным полигоном. Однако ресурсная база этого предприятия ограничена.

Чего не скажешь о другом нашем руднике СПВ – ОАО «Хиагда», расположенном в Республике Бурятия и владеющем значительной сырьевой базой урана. Однако и здесь есть свои трудности: территориальная удаленность от железных дорог и крупных промышленных центров, неразвитая инфраструктура, суровый климат, сложные гидрогеологические условия. Все это в сегодняшних экономических условиях существенно сдерживает развитие предприятия. Именно на этом направлении мы сосредотачиваем основной вектор наших усилий в области научно-инновационной деятельности на ближайшие 2–3 года.

Третье предприятие ОАО «ППГХО», старейшее из действующих. В августе этого года мы отметили 45-летие. Объединение работает с огромной финансовой нагрузкой. Причина – основные запасы отработаны, а в остаточных, очень низкое содержание. Что опять заставляет нас смотреть в сторону геотехнологических методов добычи.

В целом стратегией Холдинга предусмотрено увеличить долю добычи урана геотехнологическими методами с 25% в текущем году до 60% к 2025 году. При этом объем добычи классическим подземным горным способом существенно не изменится.

В настоящий момент ОАО «ППГХО» вместе с Забайкальским государственным университетом приступили к реализации крупного комплексного проекта по интенсификации применения кучного выщелачивания, адаптации блочного подземного выщелачивания к горно-геологическим условиям месторождений предприятия. Объем финансирования на трехлетний период составит 400 млн руб.

Коллеги, все вышесказанное еще раз подчеркивает важность и актуальность данной конференции. Хочу пожелать всем вам творческих успехов и продуктивного обмена идеями в рамках данного мероприятия.

Спасибо.

*Первый заместитель генерального директора –
исполнительный директор И.Е. Жилкин*

УДК 622.775

МЕТОДЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ СКВАЖИННОГО ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА

И. Н. Солодов

ОАО «АТОМРЕДМЕТЗОЛОТО»

Приведены два метода интенсификации сернокислотного СПВ урана из руд месторождений Хиагдинского рудного поля. Один метод нацелен на снижение вязкости выщелачивающих растворов, которая в 1,5 и 2,5 раза выше, чем на других российских и южно-казахстанских рудниках СПВ. Высокая вязкость растворов обусловлена низкой температурой подземных вод – 1–4° С. Другой метод, ориентирован на окисление U(IV) перекисью водорода или нитритом, поскольку в хиагдинских рудах уран полностью восстановлен и в водоносном рудоносном горизонте преобладает жесткая окислительно-восстановительная обстановка. Совместное применение этих технологий позволит существенно увеличить темп извлечения урана из хиагдинских руд.

Ключевые слова: СПВ, производительность скважин, содержание урана в растворе, вязкость раствора, окислитель, интенсификация.

РЫНОК УРАНА СТИМУЛИРУЕТ РАЗВИТИЕ ГЕОТЕХНОЛОГИЙ

Мировой кризис затронул практически все отрасли добычи твердых полезных ископаемых. В мировой атомной энергетике он еще более усугубился аварией на АЭС Фукусима-1. Цены на уран за последние три года снизились в 2 раза. В ближайшие 10 лет низкую цену на уран будут определять Казахстан и Канада, ведущие добычу урана из высококачественных руд.

На территории России в настоящее время действуют три уранодобывающих предприятия, входящих в Урановый холдинг «АРМЗ».

ОАО «ППГХО» в Забайкальском крае на протяжении 45 лет ведет добычу урана классическим подземным горным способом на пяти рудниках. За это время отработано более половины запасов Стрельцовского рудного поля. Резко снизилось качество урановых руд. Содержание урана в добытой руде меньше 0,15% и в перспективе будет снижаться. В этих условиях единственный путь снижения себестоимости добычи – это увеличение объема добычи малозатратными геотехнологическими методами: кучным на поверхности (КВ) и подземным блочным выщелачиванием (БПВ) урана.

ISL INTENSIFICATION METHODS

I.N. SOLODOV

Two methods of intensification of sulphuric-acid leaching of uranium at the Khiagdinskoye ore field are considered. The first method aims to decrease viscosity of leaching solutions, which is 1,5 and 2,5 times higher than in other Russian and South Kazakhstan ISL mines. High viscosity of solutions is caused by low temperature of underground waters (1–4° C). The other method is intended for oxidizing U(IV) with the use of hydrogen peroxide or nitrite, as the uranium is completely reduced in the Khiagdinskoye deposit and rigid reductive-oxidative conditions prevail in the ore-bearing aquifer. Combined use of these two methods will significantly increase the rate of uranium extraction from the Khiagdinskoye ore field.

KEYWORDS: ISL, well productivity, uranium content in the solution, fluid viscosity, oxidant, intensification.

ЗАО «Далур» в Курганской области – полигон испытания и внедрения инновационных технологий, часть из которых по своим характеристикам превосходит зарубежные аналоги. За семилетний период в составе АРМЗ в производство внедрены: комплекс геотехнологического моделирования СПВ, позволяющий планировать работу рудника и управлять процессом добычи урана в недрах; комплексная реагентная схема – перекись водорода + нитрит + серная кислота; различные методы ремонта скважин и очистки растворов от механических взвесей и др. Все это в совокупности, несмотря на низкое качество руд, как по содержанию, так и по технологическим свойствам, позволяет предприятию оставаться рентабельным.

Технологии, апробированные в ЗАО «Далур», адаптируются и внедряются в ОАО «Хиагда», расположенное в Республике Бурятия. Это единственный рудник в мире, который ведет добычу урана методом СПВ в зоне распространения многолетней мерзлоты.

Стратегия развития уранодобывающих предприятий России при сложившейся конъюнктуре рынка – активное развитие малозатратных геотехнологиче-

ских методов добычи урана – СПВ, КВ и БПВ. Доля добычи урана этими методами на действующих рудниках АРМЗ с 2010 по 2025 год увеличится с 25 до 60%.

Наиболее перспективным из всех предприятий является ОАО «Хиагда», владеющее лицензиями на недропользование на 7-ми урановых месторождениях Хиагдинского рудного поля. Сырьевая база предприятия – 42 тыс. т урана. Хиагдинское рудное поле входит в Витимский ураново-рудный район, ресурсный потенциал которого оценивается в 105 тыс.т урана, пригодных для отработки методом СПВ.

Руды в водоносных рудоносных горизонтах залегают на глубине 90–280 м. Рудоносные отложения сложены делювиально-пролювиальными аллювиальными водопроницаемыми песками, заполняющими речные палеодолины. Рудоносные миоценовые пески залегают на корях выветривания гранитов, сверху перекрыты базальтовым трапом. По составу пески алюмосиликатные, кварц-полевошпатовые, практически бескарбонатные, содержание сульфидов 0,4% и органического дстрита – 1%.

Рудная минерализация – мономинеральная. Представлена, в основном, фосфатом U(IV) – нингиоитом. Руды контрастные. Содержания урана изменяются от бортового 0,01% до 4,5%. Среднее содержание урана в рудах – 0,054%. Наиболее богатые руды приурочены к стрежневой фации и ассоциируют со скоплениями пиритизированной органики.

Для образования нингиоита необходимы следующие условия: слабокислая (рН 5,5–6,5) и сильно восстановительная (Еh -50÷-400 мВ) среда. Эти условия создаются водородобразующей гетеротрофной естественной подземной микрофлорой. В процессе жизнедеятельности бактерии разрушают органическое вещество с образованием углекислого газа и мобилизуют фосфор из углефицированных органических остатков. Низкий окислительный потенциал задается образующимся биогенным атомарным водородом. Измеренные гидрогеохимическим зондом *in situ* рН и Еh [3] имеют значения – 6,5 и -250 мВ (разброс Еh от -430 до -50 мВ), соответственно. То есть руды на месторождениях Хиагдинского рудного поля (ХРП) – биогенные.

Фосфаты четырехвалентного урана слаборастворимые в растворах кислот (табл. 1) [2]. Промышленные содержания урана >10 мг/л появляются только в концентрированных растворах кислот при рН<0,5.

Отработка Хиагдинского месторождения ведется методом СПВ в суровых природно-климатических условиях. Температура воздуха в течение года изменяется от +35° до -50° С. Среднегодовая температура отрицательная – -4°С, что способствует сохранению повсеместной многолетней мерзлоты, которая распространяется на глубину до 50–90 м. Подземные воды в рудоносном горизонте – весьма холодные (-1–4° С).

В ОАО «Хиагда» самая низкая производительность откачных скважин ($Q = 4,6 \text{ м}^3/\text{ч}$) и, соответственно, закачных скважин из всех рудников альянса АРМЗ+U1 (5,4–9,3 $\text{м}^3/\text{ч}$). Главными факторами, обуславливающими низкую величину Q , являются: 1) неравномерная и, в целом, слабая обводненность рудоносных горизонтов в палеодолинах (коэффициент водопроницаемости – т 24–104 $\text{м}^2/\text{сут}$); 2) высокая вязкость (внутреннее трение) выщелачивающих растворов при низкой температуре подземных вод и в трубопроводах при отрицательной температуре воздуха.

Высокая степень восстановленности урана, дефицит кислоторастворимого суммарного железа, отсутствие естественного окислителя четырехвалентного урана трехвалентного железа в рудах и высокая вязкость выщелачивающих растворов не позволяют эффективно обрабатывать рудные залежи Хиагдинского рудного поля методом СПВ. В связи с этим необходима интенсификация обоих параметров определяющих объем и темп добычи урана – $D = Q \times C_U$ – производительность технологических скважин и содержание урана (C_U) в продуктивных растворах.

МЕТОДЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ СПВ

Интенсификация СПВ – это увеличение главных параметров (Q и C_U) добычи (D) урана выше проектных значений в основном при сохранении количества эксплуатационных скважин ($S_{арех}$) и удельного расхода серной кислоты ($Opex$). Увеличение любого из этих параметров (Q и C_U) приводит к росту темпа добычи урана. Однако увеличение производительности эксплуатационных скважин Q не безгранично, а возможно до определенного предела, когда скорость движения выщелачивающего раствора в рудоносном слое (u) ниже или равна скорости химической реакции (ζ). Теоретически это соотношение определяется критерием подобия Пекле (Pe). Однако из-за трудно-

ТАБЛИЦА 1.

Растворимость синтезированных фосфатов U(IV) в растворах соляной кислоты

рН	4,1	1,8	1,3	0,7	0,45	0,3	0 (1N HCl)
моль/л	2,10E-07	2,10E-08	4,00E-06	2,60E-05	6,40E-05	1,60E-04	6,40E-04
мг/л	0,0499	0,0499	0,95	6,19	15,23	38,1	152,3

стей обоснования эффективного размера (критерия подобия) на практике максимальный Q подбирают экспериментально в ходе натурных испытаний. В некоторых случаях скорость движения растворов может быть выше скорости выщелачивания урана. Главным критерием в этом случае выступает экономика.

Снижение вязкости выщелачивающих растворов. Вязкость подземных вод сильно зависит от температуры (рис. 1), слабо зависит (в сотых долях сР) от минерализации до 50 г/л (рис. 2а) и практически не зависит от давления при $P < 50$ атм (рис. 2б) [1]. На месторождениях ХРП температура подземных вод – 1–4° С (область 1 на рис. 1), на месторождениях Зауральского ураново-рудного района – 16–22° С (область 2 на рис. 1), а на месторождениях Южного Казахстана – 25–45° С (область 3 на рис. 1). Из-за низкой температуры на хиагдинских месторождениях вязкость подземных вод (1,75 сР) в 2,5 раза выше, чем на южноказахстанских – 0,7 сР.

При движении выщелачивающих растворов в наземных трубопроводах в зимний период, когда температура воздуха опускается до -50 ÷ -35° С, температура растворов может снижаться до -10° С (близко к точке замерзания водных растворов электролитов) и вязкость переохлажденных растворов может повышаться до 2,6 сР (в 3 раза выше нормальных условий, рис. 1). В этом случае резко возрастает гидравлическое сопротивление при входе выщелачивающих растворов в водоносный горизонт через фильтры закачных скважин. В зимний период производительность закачных скважин должна быть ниже, чем в летнее время года.

В условиях высокой вязкости выщелачивающих растворов наиболее эффективной оказалась гексаго-

нальная схема вскрытия, так как при этой схеме отношение количества закачных скважин к откачным – самое высокое.

Коэффициент фильтрации (K_f) рудоносных отложений по данным опытно-фильтрационных работ на месторождениях ХРП имеет низкую величину и изменяется от 1,4 до 3,7 м/сут при среднем значении 2,08 м/сут.

Как известно, K_f зависит от свойств фильтрующейся жидкости и, в первую очередь, от динамической вязкости растворов (μ), тогда как плотность выщелачивающих растворов (ρ) на коэффициент фильтрации практически не влияет, поскольку слабо изменяется с изменением температуры в умеренной области. Коэффициент проницаемости ($K_{пр}$) является свойством горной породы и от свойств фильтрующейся жидкости не зависит.

K_f , приведенный к нормальной температуре (20° С), должен был бы изменяться в диапазоне – 2,5 ÷ 6,4 м/сут при среднем значении 3,6 м/сут. Согласно формуле Дюпюи при такой величине K_f при температуре 20° С можно было бы иметь Q около 7 м³/ч и темп извлечения урана из руд увеличился бы в 1,5 раза относительно фактически достигнутой производительности 4,6 м³/ч.

Прогрев пластовых вод от 4 до 20° С невозможен из-за чрезвычайно высокой теплоемкости пород рудоносного горизонта. Тем не менее, прогрев выщелачивающих растворов в наземных трубопроводах необходим, так как снижает гидравлическое сопротивление растворов при входе в рудоносный пласт.

Одним из наиболее перспективных направлений снижения вязкости выщелачивающих растворов яв-

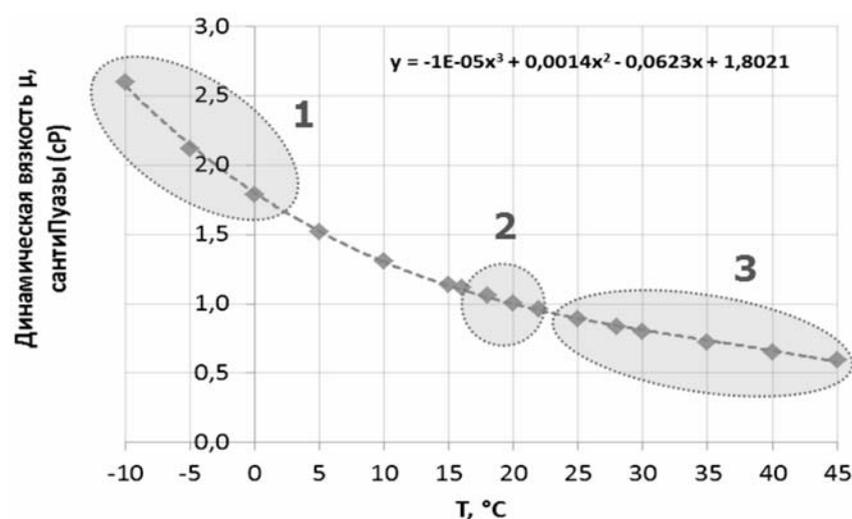


РИС. 1.

Влияние температуры на изменение вязкости подземных вод на месторождениях Хиагдинского рудного поля (1), Зауральского рудного района (2) и Южного Казахстана (3)

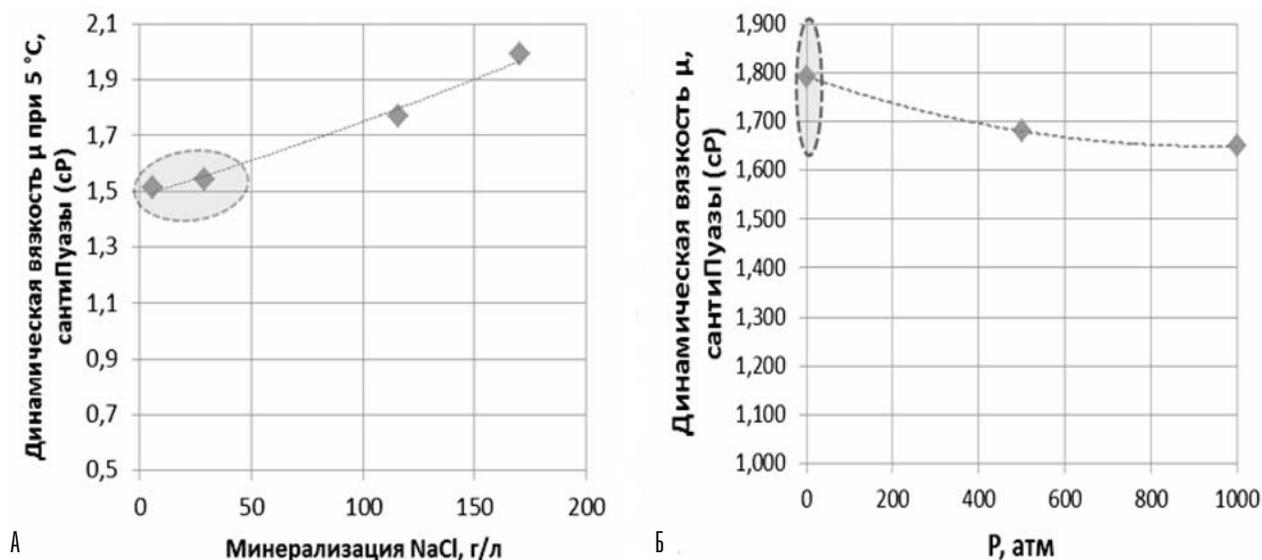


Рис. 2.

Влияние минерализации (А) и давления (Б) на изменение вязкости подземных вод

ляется применение ПАВ. В этом направлении начинаются специальные исследования.

Окисление U(IV). Рудные залежи, в которых уран и железо полностью восстановлены, отсутствует естественный окислитель в рудах – кислоторастворимое Fe(III), обрабатывать обычным сернокислотным СПВ без использования искусственных окислителей малоэффективно.

Кроме неблагоприятных природных факторов для отработки рудных залежей традиционным сернокислотным способом СПВ, имеются и техногенные факторы, отрицательно влияющие на добычу урана. Прежде всего – это сероводородная волна, которая возникает впереди фронта сернокислых растворов в период закисления рудного блока.

Сероводородная волна имеет биогенное происхождение. На фронте нейтрализации сернокислых растворов минералами-нейтрализаторами создаются благоприятные условия для жизнедеятельности сульфатредуцирующих бактерий: избыток сульфата, $pH > 5$, $Eh < 150$ мВ. В области максимальных содержаний сероводорода до 10 мг/л при pH 1,5 окислительный потенциал 300-400 мВ в тылу сероводородного фронта резко снижается до -50 мВ. Возникает очень агрессивная среда. Eh находится в области ниже нижней границы термодинамической устойчивости воды. Сероводород восстанавливает шестивалентный уран и трехвалентное железо в выщелачивающих растворах. При восстановлении Fe(III) образуется элементарная сера, экранирующая минералы урана и замедляющая процесс растворения:



Сероводород выводит из процесса естественный окислитель Fe(III), восстанавливает уран до U(IV) и переводит его из анионной в катионную форму. Уран не сорбируется на анионите и резко возрастают содержания урана в хвостах сорбции. Идет интенсивная коррозия технологического оборудования из нержавеющей стали. Сероводород – это яд для сернокислотного СПВ.

Продолжительность генерации сероводорода на эксплуатационных блоках изменяется от 1 недели до 1 года.

Неблагоприятные природные и техногенные факторы указывают на необходимость применения искусственных окислителей при СПВ. Причем назначение окислителя – это не только окисление U(IV), но и подавление генерации сероводорода.

Совместными исследованиями ИГЕМ РАН и ОАО «ВНИИХТ», проведенными в фильтрационных колонках на образцах руд, отобранных методами исключающими окисление U(IV) кислородом воздуха, показали, что добавление одного из окислителей – перекиси водорода или нитрита – увеличивают темп извлечения урана из руд в три раза (рис. 3).

Без окислителя процесс извлечения протекает очень медленно. Проектное извлечение достигается при $J/T=9$. Максимальная концентрация урана – C_U – не превышает 50 мг/л. Выщелачивание с окислителем увеличивает темп извлечения и проектное извлечение наступает при $J/T=3$, C_U достигает 250–325 мг/л.

Выводы

1. Повышение производительности технологических скважин в ОАО «Хиагда» возможно за счет сни-

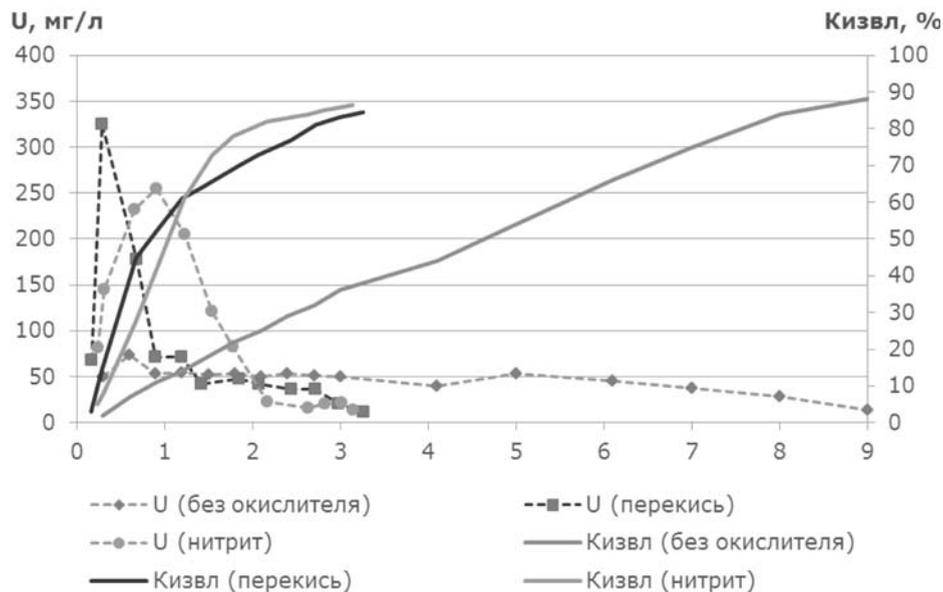


РИС. 3.

Увеличение в 3 раза темпа извлечения урана из руд при добавлении в качестве окислителя нитрита или перекиси водорода

жения вязкости технологических растворов, которая в 1,5–2,5 раза выше, чем на месторождениях в Зауральском рудном районе в России и Южном Казахстане.

2. Применение в качестве окислителей перекиси водорода или нитрита увеличивает темп извлечения урана из хиагдинских руд в 3 раза.
3. Возможность интенсификации извлечения урана из руд месторождений Хиагдинского рудного поля не исчерпывается приведенными выше технологиями. Имеются и другие методы увеличения темпа добычи урана на данном объекте, основанные на гидрогеологических технологиях управления ресурсом подземных вод.

ЛИТЕРАТУРА

1. АНТОНЕНКО Г.К., ГОЛЬДБЕРГ В.М. Фильтрационные свойства пород и вязкость растворов глубоких водоносных горизонтов. М.: Изд-во ВСЕГИНГЕО, 1969.
2. КАЦ Д.Ж., РАБИНОВИЧ Е. Химия урана. М.: Изд-во «Иностранная литература». Т. 1. 1954.
3. СОЛОДОВ И.Н. и ДР. Гидрогеохимический каротаж: теория и практика. М.: Едиториал УРСС, 2005.

Игорь Николаевич Солодов,
д.г.-м.н., директор по инновационному развитию ОАО
«Атомредметзолото»

☎ 109004, г. Москва, Б. Дровяной пер., д. 22.
тел.: +7 (495) 508-88-08 доб.196,
e-mail: Solodov.I.N@armz.ru

УДК 622.775

ДОРАБОТКА УРАНОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШАХТНОГО СТВОЛА

Н. Г. МАЛУХИН, С. В. МАРКЕЛОВ,
Х. Р. БАЙМУРЗАЕВ

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Приведены технологические схемы доработки целиков уранового месторождения Сабырсай после завершения добычи традиционным горным способом – лавой с обрушением.

На основе аналитических исследований получены зависимости потерь гидравлических напоров с учетом физических параметров рудного массива, что позволяет с высокой степенью надежности проектировать схемы расположения технологических скважин.

Использование шахтного ствола в качестве нагнетательной выработки позволило авторам интенсифицировать показатели фильтрационных параметров процесса скважинного подземного выщелачивания.

Ключевые слова: геотехнологическая скважина, откачка, шахтный ствол, уран, горная выработка.

Месторождение Сабырсай, открытое в 1960 г. при разведке Кызылкумского региона (Узбекистан), в начале своего исторического пути эксплуатации отрабатывалось традиционным горным способом – лавой с обрушением.

В конце 1982 г. была завершена отработка традиционным горным способом предусмотренных проектом площадей основного шахтного поля. Балансовые запасы урана (по условиям горных работ), приуроченные к охраняемым целикам, составили на этот период 25–28% от исходных.

Принципиальная схема расположения охраняемых целиков и шахтного ствола представлена на рис. 1. Опытные работы, начатые в 1982 г. по отработке запасов урана в целиках способом скважинного подземного выщелачивания (СПВ), подтвердили, в целом, эффективность промышленного внедрения данного способа разработки. Лабораторные исследования кернового материала, отобранного при бурении тех-

REFINEMENT OF URANIUM DEPOSIT BY UNDERGROUND LEACHING WITH SHAFT

N. G. MALUKHIN,
S. V. MARKELOV, K. R. BAYMURZAEV

The technological scheme of improvements pillars uranium deposit Sabysay after the end of production typical mountain way - with the collapse of the lava.

On the basis of analyzes obtained dependence of the loss of hydraulic pressures based on the physical parameters of the ore array that allows a high degree of reliability design layout technology wells.

Use of the shaft as the injection allowed the authors to intensify the development of indicators of filtration process parameters situ leaching.

KEYWORDS: geotechnical wells, pumping, mine shaft, uranium, excavation.

нологических скважин (Блок 1) подтвердили, что отношение 6-ти валентного урана к 4-х валентному составило 90–95 % по сравнению с 70–75 % на стадии разведки месторождения.

Таким образом, на этапе традиционной отработки в результате проветривания эксплуатационных горных выработок была сформирована окислительная геохимическая обстановка, что и обеспечило максимальную степень окисления уранового оруденения.

При отработке способом СПВ была принята рядная схема расположения эксплуатационных скважин; отношение количества нагнетательных скважин к откачным 2–3; расстояние между рядами 30–50 м; между скважинами в ряду 7–15 м. Геологические и технологические показатели параметров опытно-промышленного участка представлены в табл. 1.

Для оценки эффективности способа СПВ урана проведен сравнительный анализ кинетики перехода урана в раствор на основе эталонной кривой, постро-

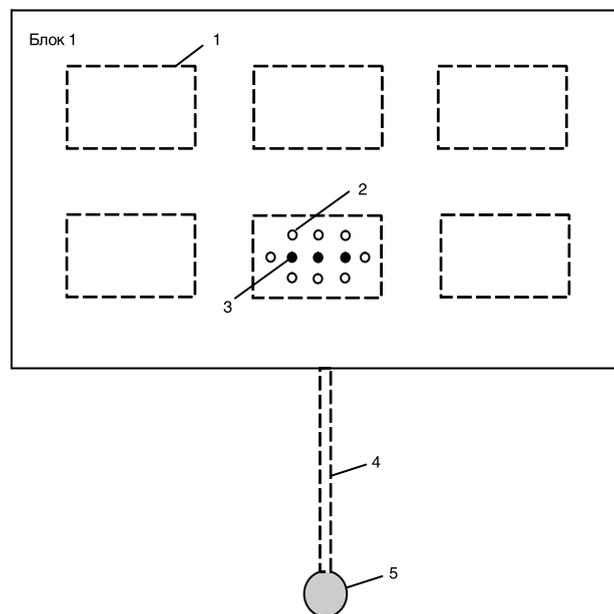


Рис. 1.

Принципиальная схема расположения охранных целиков и шахтного ствола. 1 – целик, 2 – нагнетательная скважина, 3 – откачная скважина, 4 – выработки, 5 – шахтный ствол

енной по результатам зависимостей усредненных значений концентраций урана в растворе от Ж:Т, при отработке СПВ блоков месторождений Кызылкумского региона: Букинай, Южный Букинай, Сутралы, Лявлякан, рис. 2. Снижение содержаний урана в растворе по сравнению с эталонной кривой следует объяснить более интенсивным развитием процессов химической и механической коагуляции при фильтровой зоны рудоносных пород за счет повышения минерализации продуктивных растворов и наличие твердых взвесей.

В табл. 1 приведены результаты снижения производительности технологических скважин. На втором этапе, с целью совершенствования параметров гидродинамического режима доработки урана способом СПВ, подачу рабочих растворов производили только через шахтный ствол, а откачка продуктивных растворов осуществлялась одновременно из всех технологических скважин. Такая технологическая схема позволила, практически, исключить влияние процессов коагуляции на производительность скважин, что подтверждается характером кинетики перехода урана в раствор, рис. 2, 3.

Научная оценка гидродинамических параметров технологии СПВ руд в естественном залегании (в целиках) основывается на аналитических исследованиях закономерностей фильтрации растворов в опытно-эксплуатационных блоках в процессе взаимодействия рудоносных пород с рабочими растворами. Это вызвано тем, что применяемые для геотехнологических расчетов зависимости на стадии проектирования схем выщелачивания металлов по фильтрационной

Н. Г. МАЛУХИН,
С. В. МАРКЕЛОВ, Х. Р. БАЙМУРЗАЕВ
ДОРАБОТКА УРАНОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ
ПОДЗЕМНЫМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕМ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШАХТНОГО СТВОЛА

гидродинамической схеме, как правило, не учитывают многообразие гидрогеологических и геотехнологических факторов, существенно влияющих на точность определения основных геотехнологических показателей.

Движения раствора реагента через толщу жидкости происходит при малой скорости, а следовательно потери напора на этом пути перемещения можно принять равными нулю. При фильтрации раствора реагента по массиву выщелачиваемого целика потери напора должны соответствовать закономерности движения жидкости через поровый слой целика:

$$\Delta h = \lambda \frac{l}{d_{кан}} \cdot \frac{v_{кан}^2}{2g}, \quad (1)$$

где: Δh – потери напора выщелачивающего потока через поровый слой, м; λ – коэффициент гидравлического сопротивления; l – длина пути фильтрации выщелачивающего реагента, м; $d_{кан}$ – гидравлический диаметр порового канала, м; $v_{кан}$ – реальная (истинная) скорость в поровом канале, м/с.

Коэффициент гидравлического сопротивления при ламинарном режиме течения жидкости равен:

$$\lambda = \frac{64}{Re_{кан}},$$

где: $Re_{кан}$ – число Рейнольдса для порового канала.

$$Re_{кан} = \frac{v_{кан} \cdot d_{кан}}{\nu}, \quad v_{кан} = \frac{v_{\phi}}{\varepsilon},$$

v_{ϕ} – скорость фильтрации, м/с, ε – порозность.

Гидравлический диаметр порового канала соответствует отношению площади поперечного сечения этого канала к смоченному периметру:

$$d_{кан} = \frac{\omega_{кан}}{\chi_{кан}}, \quad (2)$$

где: $\omega_{кан}$ – площадь поперечного сечения порового канала, м²; $\chi_{кан}$ – смоченный периметр порового канала, м.

Преобразуем выражение (2):

$$d_{кан} = \frac{\omega_{кан} \cdot l}{\chi_{кан} \cdot l} = \frac{V}{C}, \quad (3)$$

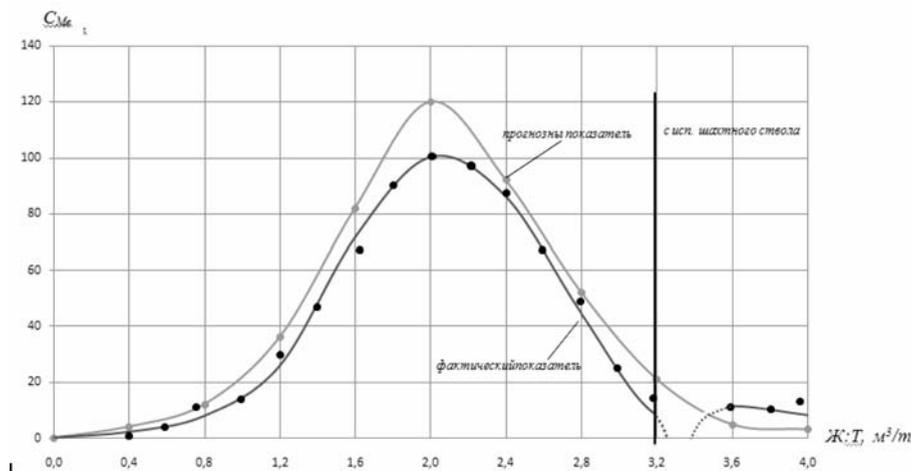
где: l – длина порового канала, м; V – объем порового канала, м³; C – смоченный периметр порового канала, м.

Таким образом, гидравлический диаметр порового канала можно представить как отношение объема порового канала к площади его внутренней боковой поверхности.

Для порового слоя состоящего из окатанных частиц, объем канала равен:

$$V = n_y \cdot \frac{\pi \cdot d_T^3}{6} \cdot \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)},$$

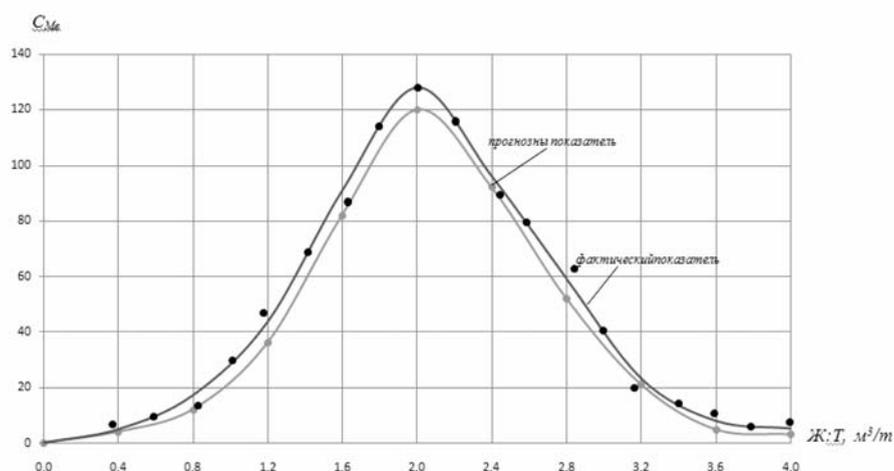
где: n_y – количество частиц в поровом слое, шт.; d_T – средний диаметр частиц, м.



Ж:Т	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2	3,6	4,0
C _{Me}	2,1	7,8	25,7	71,5	100,2	86,1	44,7	8,3	11,3	8,1

Рис. 2.

Кинетика выхода урана в раствор в зависимости от Ж:Т для рядной схемы расположения скважин



Ж:Т	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2	3,6	4,0
C _{Me}	4,8	17,0	43,4	90,7	127,9	96,1	59,3	23,2	7,9	5,1

Рис. 3.

Кинетика выхода урана в раствор в зависимости от Ж:Т при использовании шахтного ствола (нагнетание)

Площадь внутренней боковой поверхности поровых каналов равна:

$$C = n_v \cdot \frac{\pi \cdot d_T^2}{4},$$

Тогда, гидравлический диаметр порового канала согласно выражению (3) равен:

$$d_{кан} = \frac{V}{C} = \frac{n_v \cdot \frac{\pi \cdot d_T^3}{6} \cdot \frac{\epsilon}{(1-\epsilon)}}{n_v \cdot \frac{\pi \cdot d_T^2}{4}} = \frac{2}{3} d_T \frac{\epsilon}{(1-\epsilon)}, \quad (4)$$

С учетом выражений $v_{кан}$ и $d_{кан}$, число Рейнольдса для порового канала равно:

$$Re_{кан} = \frac{v_{кан} \cdot d_{кан}}{\nu} = \frac{v_{ф} \cdot d_T}{\nu} \cdot \frac{2}{3} \frac{\epsilon}{(1-\epsilon)} N,$$

Следовательно, потери напора при движении жидкости через поровый слой соответствуют уравнению:

$$\Delta h = \frac{64}{\frac{v_{ф} \cdot d_T}{\nu} \cdot \frac{2}{3} \frac{\epsilon}{(1-\epsilon)}} \cdot \frac{l}{\frac{2}{3} d_T \frac{\epsilon}{(1-\epsilon)}} \cdot \frac{v_{ф}^2}{\epsilon^2 \cdot 2g}, \quad (5)$$

ТАБЛИЦА 1.

№ блока	№ целиков	Площадь целика тыс. м ²	Средняя рудная мощность, м	Объем руды тыс. м ³	Кол-во скважин шт.	Коэффициент фильтрации м/сут	Удельный расход раствора г м ³ /т	Среднее содержание металла, мг/л
I	1-1	8,5	6,50	55,25	9,0	3,3	1,05	0,048
	1-2	9,6	7,00	67,20	10,0		1,37	0,044
	1-3	7,8	6,12	47,74	8,0		1,25	0,036
	1-4	9,1	7,79	70,89	9,0		1,63	0,022
	1-5	7,3	9,20	67,16	8,0		2,12	0,031
	1-6	9,4	8,70	81,78	9,0		3,16	0,035

или

$$\Delta h = 72 \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{v}{d_T^2 \cdot g} \cdot l \cdot v_{\phi} \quad (6)$$

тогда скорость фильтрации равна:

$$v_{\phi} = (0,0139 \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \cdot \frac{d_T^2 \cdot g}{v}) \cdot J, \quad (7)$$

где: J – гидравлический уклон ($J = \frac{\Delta h}{l}$);

$$k_{\phi} = (0,0139 \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \cdot \frac{d_T^2 \cdot g}{v}) - \text{коэффициент}$$

фильтрации, м/с.

Таким образом коэффициент фильтрации зависит от порозности порового слоя \square , диаметра частиц $dч$, вязкости фильтрующей жидкости ν .

Коэффициент фильтрации в зависимости от порозности порового слоя \square представим в упрощенном виде:

$$\text{при } \square=0,4; k_{\phi} = 24,7 \cdot 10^{-4} \frac{d_T^2 \cdot g}{\nu},$$

$$\text{при } \square=0,35; k_{\phi} = 21,7 \cdot 10^{-4} \frac{d_T^2 \cdot g}{\nu}.$$

Таким образом потери напора выщелачиваемого потока по целику равны, при скорости фильтрации $v_{\phi} = 1,5$ м/с:

$$\Delta h = 72 \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{v}{d_T^2 \cdot g} \cdot l \cdot v_{\phi} \cdot K_{\Pi}, \quad (8)$$

где: K_{Π} – эмпирический коэффициент потерь гидравлического напора, учитывающий наличие глинистых разностей выполняющих поровый объем руд. Для условия месторождения Сабырсай $K_{\Pi} = 3,3 \cdot 10^{-4}$.

Для $\square = 0,4$; $\nu = 1,01 \cdot 10^{-6}$; $d_T^2 = 2 м$; $l = 10 м$;

$$\Delta h = 72 \cdot \frac{(1-0,4)^2}{0,4^3} \cdot \frac{1,01 \cdot 10^{-6}}{(2 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 9,81}$$

$$\cdot 10 \cdot 1,5 \cdot 3,3 \cdot 10^{-4} = 1,03 м$$

Тогда расчетное значение Δh составит 1,03 м при скорости фильтрации $v_{\phi} = 1,5$ м/с.

Приведенные авторами расчеты по оценке потерь напоров при фильтрации жидкости от шахтного ствола до контуров целиков свидетельствуют о высокой сходимости с практическими результатами, полученный в опытно-промышленном блоке.

Выводы

– Полученные аналитические зависимости потери гидравлических напоров можно использовать на стадии проектирования для формирования эффективных скоростей фильтрации растворов выщелачивания при отработке целиков.

– Представленные расчетные технологические параметры (скорость фильтрации, время фильтрации, отношения жидкого к твердому) позволяют более эффективно оценивать схемы расположения технологических скважин на стадии проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бочеввер Ф.М., Гармонов И.В., Лебедев А.В., Шестаков В.М. Основы гидрогеологических расчетов. М.: Недра, 1965. 306 с.
2. Кротков В.В., Лобанов Д.П., Нестеров Ю.В. и др. Горно-химическая технология добычи урана. М.: ГЕОС, 2001. 368 с.
3. Добыча урана методом подземного выщелачивания. Под ред. Мамилова В.А.. М.: Атомиздат, 1980. 248 с.

Николай Григорьевич Малухин,
д.т.н., профессор, МГРИ-РГГРУ

Сергей Владимирович Маркелов,
д.т.н., профессор, МГРИ-РГГРУ

Хуршед Рашидович Баймурзаев,
аспирант, МГРИ-РГГРУ

✉ 117997, г. Москва, улица Миклухо-Маклая, д. 23,
e-mail: maluhin@mail.ru, тел. +7 (495) 433-62-33 доб. 1246

УДК 621.311.16

ПРИМЕНЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ ГАЗООБРАЗНЫХ И ЖИДКИХ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ ЭКОНОМИКИ

В. А. КАЗАРЯН

ООО «Газпром геотехнологии»

В работе рассматривается применение подземных хранилищ газообразных и жидких энергоносителей, созданных в отложениях каменной соли, в различных отраслях экономики. В качестве регуляторов неравномерности потребления газообразных и жидких энергоносителей, а также электроэнергии, подземные хранилища используются в газовой, нефтяной, нефтехимической и химической промышленности, атомной и общей энергетике.

Ключевые слова: подземные хранилища, энергоносители, природный газ, электроэнергия, возобновляемые источники энергии.

Научно-технический прогресс в горном деле, знание физико-механических и физико-химических свойств горных пород, возможность создания подземных резервуаров с оптимальной формой и геометрическими размерами для хранения газообразных и жидких энергоносителей послужили основой широкого их применения в различных отраслях экономики. Необходимость создания подземных резервуаров для различных отраслей экономики обусловлена номенклатурой выпускаемой продукции, характером промышленного производства и физико-химическими характеристиками промышленных отходов.

Подземные хранилища газообразных и жидких энергоносителей используются во многих отраслях экономики (рис. 1). В частности, для регулирования неравномерности потребления газообразных и жидких энергоносителей и электроэнергии подземные хранилища используются в газовой, нефтяной, нефтехимической и химической промышленности, атомной и общей энергетике. Для захоронения промышленных отходов подземные резервуары используются кроме перечисленных выше отраслей экономики, в сельском хозяйстве, здравоохранении и других отраслях.

Для бесперебойного функционирования отраслей экономики необходимо, чтобы топливно-энергетиче-

APPLICATION OF UNDERGROUND STORAGE GAS AND LIQUID POWER IN VARIOUS INDUSTRIES

V. A. KAZARYAN

The application of gaseous and liquid energy underground storages in different economic sectors. The report considers the issue of gaseous and liquid energy underground storages in rock salt application in different economic sectors. Underground storages serve for the purpose of gaseous, liquid and electric energy demand irregularity balancing for the needs of gas, oil, petrochemical, chemical, atomic and total energy industries.

KEYWORDS: underground storages, energy resources, natural gas, electric energy, renewable energy sources.

ский комплекс обеспечил сохранность такого права за отраслями экономики в независимости от времени года. А для этого необходимо, чтобы топливно-энергетический комплекс функционировал устойчиво и надежно. Однако неравномерный характер потребления энергии в условиях РФ объективно обусловлен неравномерностью размещения природных запасов энергоресурсов по территории, совпадением по времени максимального спроса на топливо, электро- и теплоэнергию.

Создание крупномасштабных аккумуляторов энергоносителей должно проводиться на основе достижений науки и техники. В наибольшей степени этим условиям отвечают подземные аккумуляторы, создаваемые в отложениях каменной соли, которые обеспечивают лучшую защиту окружающей среды от вредного воздействия хранимого продукта, имеют высокую пожаровзрывобезопасность и защищенность от воздействия всех видов современного оружия.

Кроме традиционных способов обеспечения надежности функционирования топливно-энергетического комплекса – создание подземных хранилищ газообразных и жидких углеводородов, рассматриваются технологии хранения других энергоносителей – водород, сжатый воздух, углекислый газ.



Рис. 1.

Применение подземных хранилищ энергоносителей в различных отраслях экономики

Развитие энергетики характеризуется возрастанием доли энергоресурсов, расходуемых на производство преобразованных видов энергии – электрической и тепловой. Режим электропотребления характеризуется суточными графиками нагрузки энергосистемы с тремя пиковыми участками – ночным провалом, утренними и вечерними пиками. Для обеспечения графика нагрузки наиболее широкое применение получили гидроаккумулирующие (ГАЭС) и воздушно-аккумулирующие газотурбинные (ВАГТЭ) электростанции.

На рис. 2. приведена схема обычной газотурбинной установки с подземным хранилищем сжатого воздуха [1].

Газотурбинная электростанция с подземным хранилищем сжатого воздуха работает следующим об-

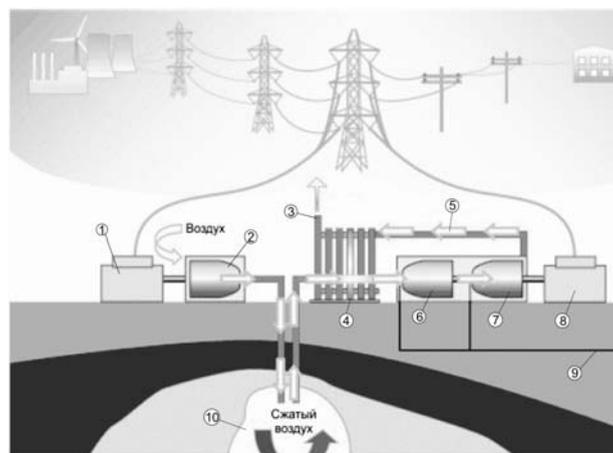


Рис. 2.

Схема газотурбинной установки с подземным хранилищем сжатого воздуха: 1 – двигатель, 2 – компрессор, 3 – выхлопная труба, 4 – генератор, 5 – отходящее тепло, 6 – турбина высокого давления, 7 – турбина низкого давления, 8 – генератор, 9 – топливо (природный газ), 10 – подземный резервуар сжатого газа

разом. В период провала графика электрической нагрузки производится закачка воздуха компрессором (2), работающим с помощью электродвигателя (1), в подземный резервуар (10). При выработке электроэнергии сжатый воздух из подземного резервуара, проходя через регенератор (4), подается с начала в камеру сгорания турбины высокого давления (6) и далее в камеру сгорания турбины низкого давления (7). Одновременно в соответствующие камеры сгорания подается топливо (природный газ) (9). После турбин газы проходят через регенератор (4) и направляются к выхлопной трубе (3). Выработка электроэнергии производится в генераторе (8), который соединен с турбинами (6), (7).

В США (Алабама) была спроектирована ТЭС с ВАГТЭ общей мощностью 788 МВт, где предусмотрено размещение подземных резервуаров воздуха на соляном куполе. На электростанции устанавливаются 4 ГТУ, соединенные с четырьмя отдельными подземными резервуарами воздуха с геометрическим объемом по 670 тыс. м³ (рис. 3) [2].

Первая подобная электростанция эксплуатируется с ноября 1978 г. на ТЭС Хунторф (Huntorf) в ФРГ.

В состав ГТУ входит подземный аккумулятор воздуха, состоящий из двух резервуаров с геометрическим объемом 140 и 170 тыс. м³ каждый. Резервуары созданы методом подземного растворения каменной соли через вертикальные буровые скважины. Интервал размещения резервуаров составляет 650-800 м. Максимальный диаметр (пролет) подземных выработок-емкостей составляет 60 м. Расстояние между скважинами подземных резервуаров составляет 200 м.

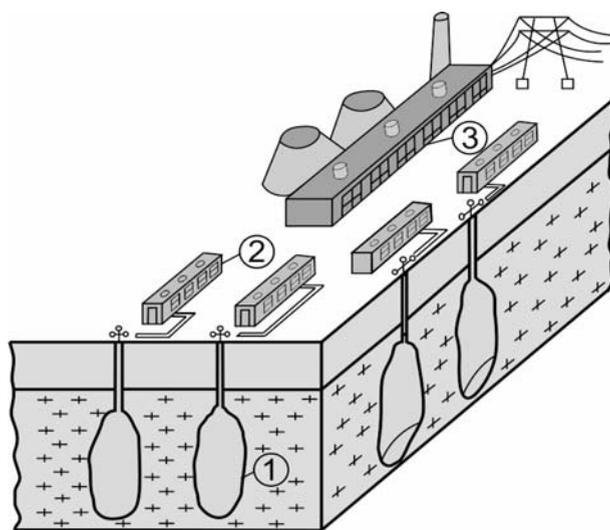


Рис. 3.

Схема размещения ВАГТЭ GE с подземным аккумулятором воздуха в каменной соли: 1 – подземные резервуары воздуха; 2 – наземный комплекс ВАГТЭ; 3 – ТЭС

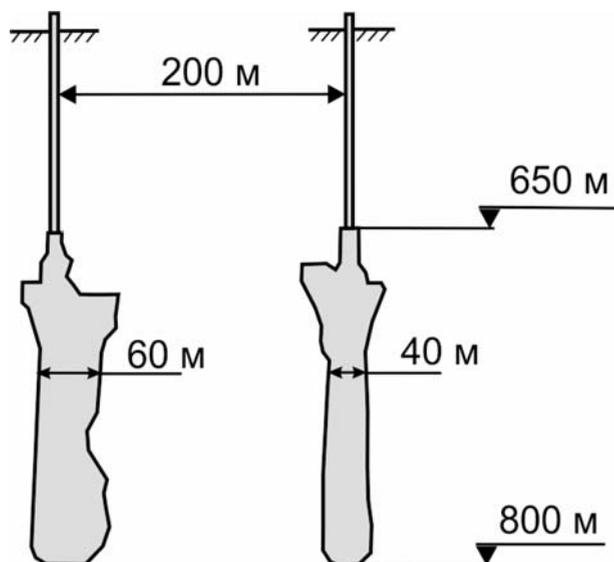


Рис. 4.
Схема размещения подземных резервуаров воздуха
ВАГТЭ Хунторф

Схематическое изображение подземных резервуаров приводится на рис. 4.

В подземный резервуар подается воздух с давлением 6–7 МПа и охлажденный до 50° С. Минимально допустимое эксплуатационное давление для обеих выработок-емкостей составляет 2 МПа.

Подземный аккумулятор эксплуатируется при минимальном давлении воздуха на устье скважины, равном 4,3 МПа. Максимальное эксплуатационное давление воздуха на устье скважины подземного резервуара составляет 7 МПа. Скорость уменьшения давления в аккумуляторе в процессе отбора воздуха составляет не более 1,5 МПа/ч. Указанная величина скорости падения давления согласуется с условиями устойчивости при эксплуатации подземных резервуаров, созданных в каменной соли методом подземного растворения через вертикальные буровые скважины на глубинах до 900 м.

Первоначальное заполнение аккумулятора воздухом представляет определенные трудности, так как поддерживать при низком давлении в аккумуляторе скорости движения воздуха по подвесной колонне скважины в допустимых пределах можно только при небольших расходах, с которыми основные компрессоры ВАГТЭ работали бы крайне неэкономично. Поэтому до давления в первой емкости 0,83 МПа заполнение ее производилось в течение месяца с помощью вспомогательных компрессоров. При работе компрессорной группы ВАГТЭ скорость движения воздуха по скважине подземного аккумулятора поддерживалась не более 20 м/с.

Опыт эксплуатации подземных резервуаров счи-

тается успешным. Проведенные в течение 20 лет звуколокационные измерения формы подземной выработки-емкости показали, что изменения ее контуров практически отсутствуют.

Регулирование неравномерности газопотребления, особенно пиковой, обеспечивается подземными хранилищами природного газа, созданными в отложениях каменной соли.

В среднем для обеспечения нормальной работы единой системы газоснабжения страны требуется отбор газа из подземных хранилищ в количестве 20–22 млн м³ в сутки на каждый градус снижения температуры окружающего воздуха.

Принципиальная технологическая схема эксплуатации подземного хранилища природного газа приводится на рис. 5.

Природный газ из магистрального газопровода (15) по газопроводу-отводу направляется на площадку хранилища. Газ сначала очищается от твердых механических (14) и жидко-капельных (13) примесей. Затем, проходя через узел замера количества газа (8), поток направляется к компрессорной станции (7). После компримирования, на каждой ступени компрессора, газ проходит через маслоотделитель (6), охлаждается в холодильнике (5) и направляется на устье подземного резервуара. В выработку-емкость газ закачивается по подвесной колонне.

Межтрубное пространство обсадной (4) и подвесной (3) колонн изолируется с помощью пакера (2) и заполняется антикоррозийной жидкостью.

Отбор газа из выработки-емкости осуществляется по подвесной колонне. Прежде, чем газ попадает в магистральный газопровод он проходит полный цикл подготовки газа к транспорту. При этом изменяются давления, температура и влажность газа. Первоначально в узле дросселирования (8) снижается давление газа до величины, соответствующей давлению в магистральном газопровode (15). Далее поток газа, поочередно проходя через сепаратор (9), для выделения капельной жидкости (если в газе есть), теплообменник (10), где происходит подогрев газа, установку осушки газа (11), и узел замера (8) подается по газопроводу-отводу в магистральную газопровод (15).

Единая система газоснабжения представляет собой совокупность взаимосвязанных технологических объектов и процессов: газовые месторождения и добыча газа, газоперерабатывающие заводы и подготовка газа к дальнему транспорту, газопроводы и процесс транспортировки газа, подземные хранилища и их эксплуатация, распределительные станции и процесс распределения газ. Во всех технологических объектах для реализации процессов добычи, переработки, транспортировки, распределения необходимо иметь подземные хранилища для соответствующих продуктов, являющимися основными в данном технологическом процессе.

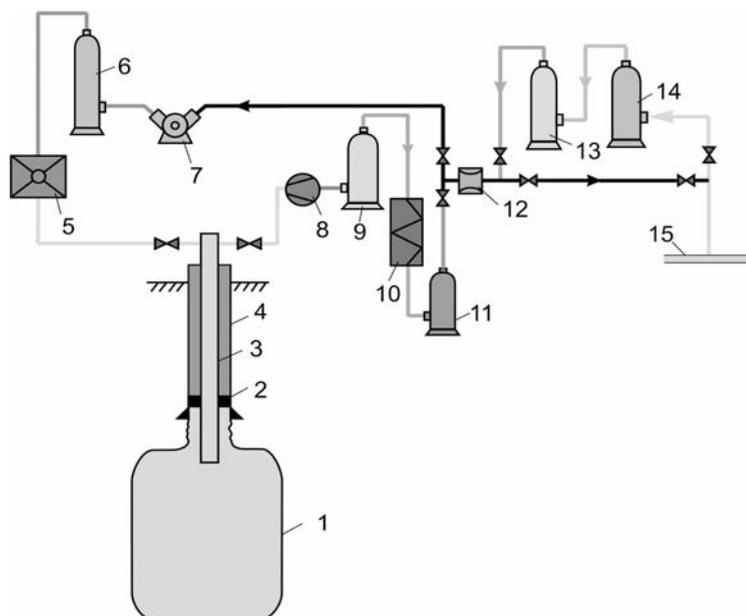


Рис. 5.

Принципиальная технологическая схема эксплуатации подземного хранилища природного газа: 1 – подземный резервуар; 2 – пакер; 3 – подвесная колонна; 4 – обсадная колонна; 5 – холодильник; 6 – маслоотбойник; 7 – компрессор; 8 – узел дросселирования; 9 – сепаратор; 10 – теплообменник; 11 – установка осушки газа; 12 – узел замера газа; 13 – фильтр-сепаратор; 14 – пылеуловитель; 15 – магистральный газопровод

Принципиальная схема распределения подземных резервуаров, созданных в каменной соли, по значимости применения в газовой промышленности, показана на рис. 6.

На первом месте по значимости и по объему находятся подземные хранилища природного газа для регулирования неравномерностей газопотребления. Следующий блок хранилищ создается на газоперерабатывающих заводах для товарных продуктов. Такими продуктами являются широкая фракция легких углеводородов (ШФЛУ), стабильный конденсат, пропан-бутановая фракция (ПБФ).

Принципиальная схема подземного хранилища товарного продукта на газоперерабатывающих заводах приводится на рис. 7.

Эксплуатация хранилища осуществляется по рассольной схеме путем взаимного замещения хранимого продукта рассолом и наоборот. Товарный продукт с завода по продуктопроводу подается на площадку

хранилища. Проходя замерное устройство (10), накапливается в наземном буферном резервуаре (9). Далее с помощью насоса для перекачки продукта (8) закачивается в подземный резервуар (7), при этом вытесняя рассол по центральной подвесной колонне скважины (5) из подземного резервуара.

Для выдачи продукта потребителю из рассолохранилища (1) с помощью насоса (2) рассол закачивается в подземный резервуар, вытесняя при этом эквивалентное количество хранимого продукта из него. Далее продукт направляется в наземный буферный резервуар (9), после чего, проходя через замерное устройство (10), передается потребителю.

Для обеспечения ритмичной работы сложной системы промысел-завод-потребитель необходимо создавать подземные хранилища нестабильного конденсата (на месторождениях), этилена, гелия (при газоперерабатывающих заводах), а также подземные технологические аппараты, сооружаемые на месторождениях.

К технологическим аппаратам относятся подземные резервуары для продувки газонефтеконденсатных скважин, подземный гидрокомпрессор непрерывного действия, подземный аппарат промышленной подготовки газа.

На рис.8 приводится принципиальная технологическая схема гидрокомпрессора непрерывного действия.

Принцип работы гидрокомпрессора непрерывного действия заключается в следующем. Газы низкого давления подаются к узлу смешения жидкости и газа (3). Также к узлу смешения при помощи насоса (2) подается из наземного резервуара (1) рассол. Давление рассола, подаваемое к узлу смешения, должно быть больше или равно давлению низконапорного газа.



Рис. 6.

Принципиальная схема распределения подземных резервуаров, созданных в каменной соли, по значимости применения в газовой промышленности

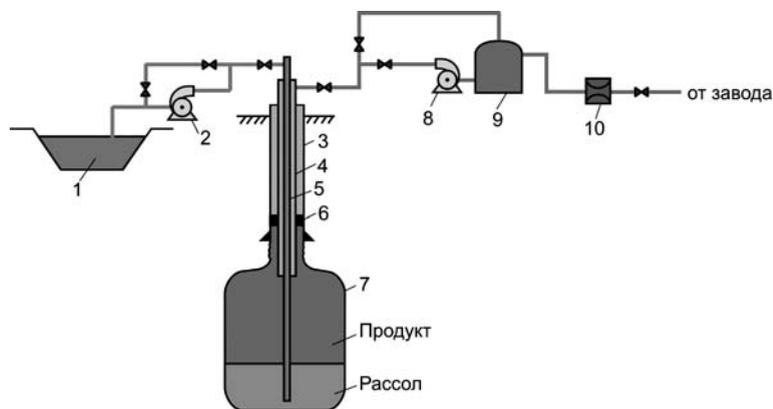


РИС. 7.

Принципиальная технологическая схема эксплуатации подземного хранилища ШФЛУ, стабильного конденсата и ПБФ: 1 – рассолохранилище; 2 – насос подачи рассола; 3 – обсадная колонна выработки-емкости; 4 – внешняя подвесная колонна; 5 – центральная подвесная колонна; 6 – пакер; 7 – выработка-емкость; 8 – насос для перекачки продукта; 9 – наземный буферный резервуар; 10 – замерное устройство

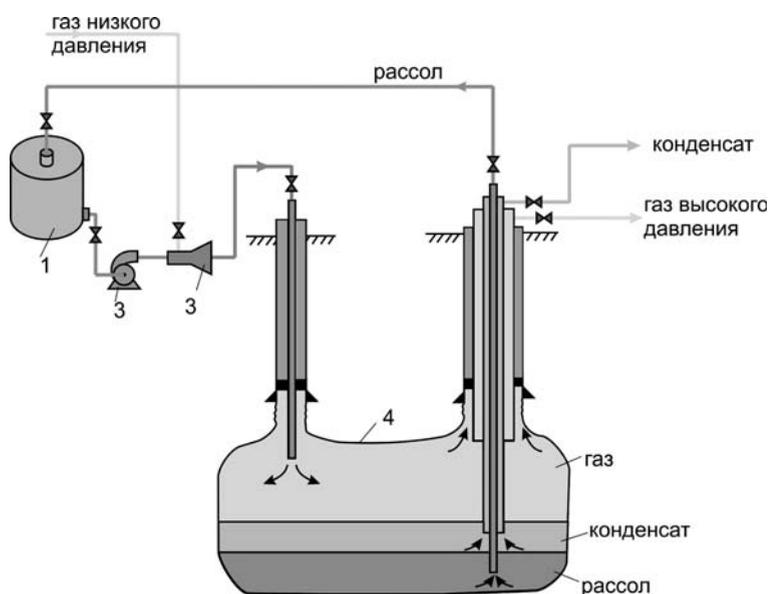


РИС. 8.

Принципиальная технологическая схема гидрокомпрессора непрерывного действия: 1 – наземный резервуар для рассола; 2 – насос; 3 – узел смешения; 4 – подземный резервуар

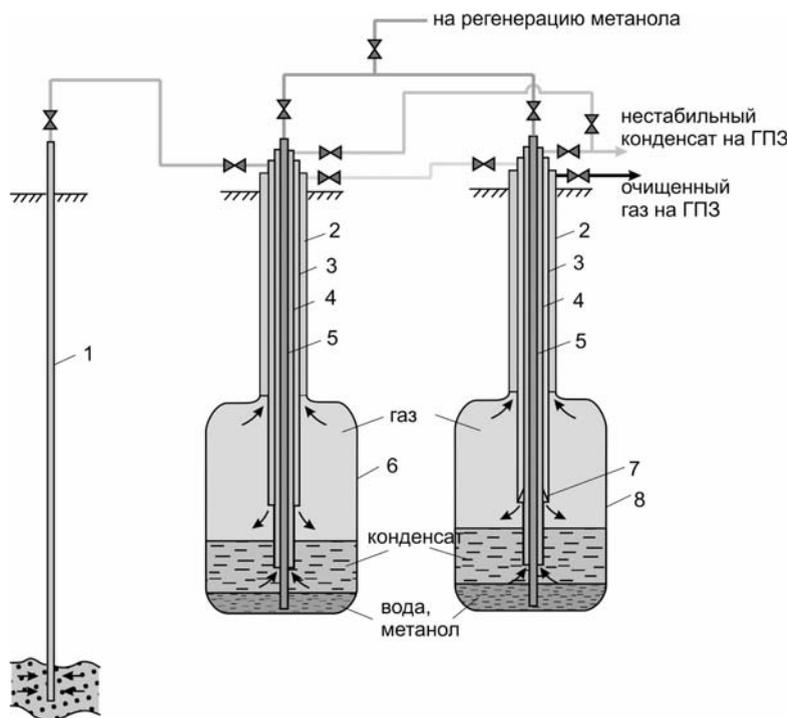


РИС. 9.

Принципиальная технологическая схема промышленной подготовки газа с применением подземных резервуаров, созданных в отложениях каменной соли: 1 – газоконденсатная скважина; 2 – обсадная колонна; 3 – первая внешняя подвесная колонна; 4 – вторая внешняя подвесная колонна; 5 – центральная подвесная колонна; 6 – подземный сепаратор; 7 – дроссельное устройство; 8 – низкотемпературный сепаратор

Полученная в узле смешения газожидкостная смесь направляется в подземный резервуар (4). В скважине подземного резервуара под действием гидростатического столба жидкости происходит сжатие газа. В подземном резервуаре-отделителе газ отделяется от рассола, скапливается в верхней части выработки-емкости, откуда через вторую скважину поступает к потребителю. Рассол по центральной подвесной колонне скважины поступает в наземный резервуар (1), и цикл повторяется снова.



Рис. 10.

Принципиальная схема распределения подземных резервуаров, созданных в каменной соли, по значимости применения в нефтяной промышленности и в системе снабжения нефтепродуктами

Принципиальная технологическая схема промышленной подготовки газа с применением подземных резервуаров, созданных в отложениях каменной соли, приведена на рис. 9.

Пластовая смесь из скважины (1) направляется по первой внешней подвесной колонне (3) в сепаратор (6). Под действием гравитационных сил пластовая смесь разделяется на газ, жидкость и мехпримеси. Жидкая фаза (нестабильный конденсат, вода + метанол) за счет избыточного давления газа в выработке-емкости поднимается по колоннам (4) и (5) на поверхность.

Очищенный от механических примесей и капельной жидкости газ поступает в низкотемпературный сепаратор (8) по первой внешней подвесной колонне (3), на которой установлено дроссельное устройство (7). При прохождении через дроссель газ охлаждается. Давление газа после дроссельного устройства определяется давлением газопровода. Образовавшаяся в результате охлаждения жидкость собирается в нижней части сепаратора, где происходит ее разделение на нестабильный конденсат, метанол и воду.

Водометанольная смесь из обоих сепараторов направляется на установку регенерации метанола. Нестабильный конденсат из сепараторов направляется на ГПЗ.

Диаметр сепаратора определяется по формуле:

$$D = \sqrt{\frac{Q_n \cdot P_0 \cdot z \cdot T_c}{86400 \cdot W \cdot P_1 \cdot T_0}}$$

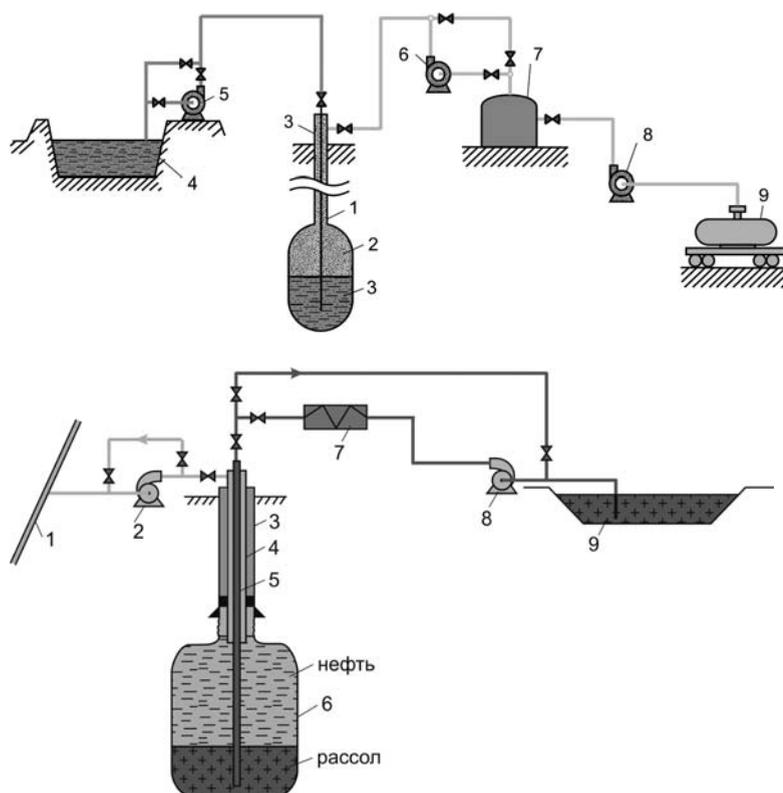


Рис. 11.

Принципиальная технологическая схема рассольной эксплуатации хранилища нефтепродуктов с использованием наземного рассолохранилища: 1 – подземный резервуар нефтепродукта; 2 – нефтепродукт; 3 – рассол; 4 – рассолохранилище; 5 – насос для закачки рассола; 6 – насос высокого давления для закачки продукта; 7 – буферный резервуар нефтепродукта; 8 – насос низкого давления для закачки продукта; 9 – железнодорожная цистерна (сливо-наливная эстакада)

Рис. 12.

Принципиальная технологическая схема эксплуатации подземного хранилища нефти: 1 – нефтепровод; 2 – насосная станция для закачки нефти; 3 – обсадная колонна; 4 – внешняя подвесная колонна; 5 – центральная подвесная колонна; 6 – подземный резервуар; 7 – теплообменник; 8 – насосная станция для перекачки рассола; 9 – рассолохранилище

где D – внутренний диаметр сепаратора, м; Q_n – пропускная способность сепаратора, м³/сутки; P_0 – абсолютное атмосферное давление, н/м²; z – коэффициент сжимаемости газа; T_c – температура газа в сепараторе, К; W – скорость осаждения жидких частиц, м/с; P_1 – давление в сепараторе, н/м²; $T_0 = 273,2$ К.

Эксплуатационная надежность транспортно-распределительной системы, обеспечивающей экономику страны нефтепродуктами, находится в прямой зависимости от развития региональных баз оперативного и долговременного хранения топлива и от резервуарных парков аварийного назначения.

Принципиальная схема распределения подземных резервуаров, созданных в каменной соли, по значимости применения в нефтяной промышленности, включая систему снабжения нефтепродуктами, показана на рис. 10.

Все развитые страны мира имеют многомесячные стратегические и оперативные запасы нефтепродуктов, в основном размещенные в резервуарах, создаваемых в каменной соли.

Рассмотрим классическую схему рассольного способа эксплуатации подземного хранилища жидких углеводородов. На рис. 11 представлена принципиальная технологическая схема рассольной эксплуатации хранилища нефтепродуктов с использованием наземного рассолохранилища.

Хранимый продукт, поступивший цистернами (9) по железной дороге, с помощью насоса низкого давления (8) подается в буферный резервуар нефтепродукта (7). По мере накопления определенного количества продукта в буферном резервуаре включается в работу насос высокого давления (6), и продукт подается в подземный резервуар (1). Вытесняемое при этом из подземного резервуара эквивалентное количество рассола по центральной колонне скважины направляется по рассолопроводу в рассолохранилище (4). Выдача продукта из резервуара на поверхность земли производится путем выдавливания его рассолом. Рассол подается в подземный резервуар (1) по центральной колонне скважины из рассолохранилища (4) при помощи насоса (5).

Для обеспечения стабильности работы нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей отраслей, связанной с неравномерностью потребления нефтепродуктов внутри страны и выполнения межгосударственных соглашений по поставкам нефти и нефтепродуктов, необходимо построить подземные хранилища нефти для оперативного регулирования нефтетранспортной системы и для создания государственного резерва нефти.

Принципиальная технологическая схема эксплуатации подземного хранилища нефти, созданного в отложениях каменной соли, приводится на рис. 12. Данное хранилище построено на нефтепроводе для обеспечения надежности его эксплуатации. Хранили-

ще эксплуатируется по рассольной схеме.

Нефть для закачки в хранилище отбирается из нефтепровода (1). Для преодоления в скважине разности весов столбов жидкостей (рассол, нефть) сооружается насосная станция (2), которая работает только на закачку нефти в подземный резервуар. Нефть в выработку-емкость подается по внешней подвесной колонне (4), вытесняя при этом из резервуара (6) по центральной подвесной колонне (5) эквивалентное количество рассола. В дальнейшем рассол направляется в рассолохранилище. Процесс закачки продолжается до полного заполнения подземного резервуара. При отборе нефти из резервуара производится закачка рассола по центральной подвесной колонне (5). Давление закачиваемого рассола рассчитывается таким образом, чтобы обеспечить безнасосную подачу нефти в нефтепровод. В зависимости от района размещения хранилища в зимнее время года при низких температурах воздуха подаваемый в скважину рассол подогревается (7).

Нефтяное месторождение с большим содержанием растворенного газа осложнит разработку месторождения с применением промышленного оборудования в обычной компоновке, так как оно не справится с таким количеством растворимого газа. Для решения данной задачи можно использовать подземный резервуар, созданный в каменной соли в качестве аппарата промышленной подготовки нефти.

На рис. 13 приводится принципиальная схема разработанной установки промышленной подготовки нефти.

Подземная технологическая установка промышленной подготовки нефти состоит из двухскважинного сепаратора и резервуара-хранилища. Расстояние между скважинами сепаратора составляет 40 м. Геометрический объем сепаратора – 80 тыс. м³, резерву-

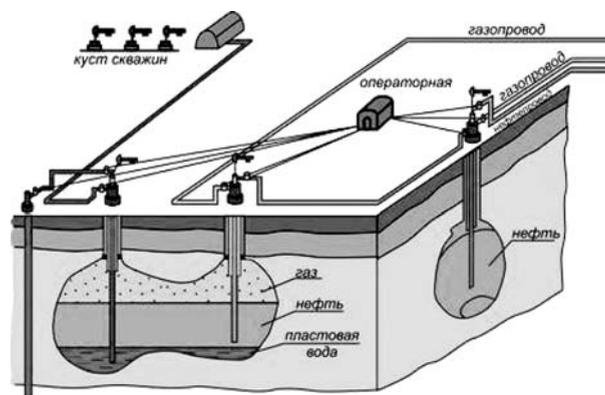


РИС. 13.
Подземная установка промышленной подготовки нефти

ара-хранилища – 50 тыс. м³. Эти размеры определены в зависимости от времени фильтрации эмульсии через пластовую воду и дегазации растворенного в эмульсии газа.

Рекомендуется насосный способ эксплуатации сепаратора. При использовании штанговых насосов нефть из сепаратора отбирается непрерывно (из-за ограниченной производительности насосов). При использовании насосов с электродвигателями нефть отбирается из сепаратора как непрерывно, так и периодически, в зависимости от производительности насосов.

Эксплуатацию резервуара-хранилища рекомендуется осуществлять также насосным способом.

Газоводонефтяная смесь из промысловых скважин по шасйфу подается на скважину подземной технологической установки. Башмак колонны скважины, по которой закачивается газоводонефтяная смесь в подземный сепаратор, устанавливается на глубине не менее десяти метров от уровня раздела «пластовая вода-нефть». В результате процессов фильтрации, дегазации и отстаивания эмульсии происходит разделение пластовой воды, нефти и газа. В зависимости от плотности полученных продуктов каждый занимает свое место по вертикали в подземном сепараторе.

Обезвоженная и дегазированная нефть по второй скважине направляется в нефтепровод или в подземный резервуар-хранилище. Выделенный газ в процессе дегазации накапливается в верхней части сепаратора и по межтрубью второй скважины подается в газопровод. Пластовая вода, по мере накопления до определенного уровня, отбирается из сепаратора и закачивается в поглощающую скважину.

Возобновляемыми источниками энергии называются объекты, энергия у которых во временных масштабах существования человечества является неисчерпаемой.

Потенциал возобновляемой энергетики огромен. Только Солнце ежедневно посылает на Землю в 20 раз больше энергии, чем ее использует все население земного шара за год. Возможный потенциал использования возобновляемых источников энергии в мире в настоящее время оценивается в 20 млрд т. у. т. в год, что в два раза превышает объем годовой добычи всех видов ископаемого топлива.

Использование возобновляемых источников энергии является одним из возможных направлений сбережения топливно-энергетических ресурсов в обозримом будущем.

Возобновляемые источники энергии включают следующие формы энергии:

Широкое использование возобновляемых источников энергии связано с аккумулярованием избытка электроэнергии, производимой ими. В настоящее время рассматриваются различные технологии аккумулярования энергии, полученные на основе возоб-

В. А. КАЗАРЯН
ПРИМЕНЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ
ГАЗООБРАЗНЫХ И ЖИДКИХ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ
В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ ЭКОНОМИКИ

новляемых источников. Каждая технология обладает индивидуальными способностями, никогда не может быть одной доминирующей технологией для применения повсеместно.



Ниже рассматриваются две технологические схемы аккумулярования выработанной энергии двумя возобновляемыми источниками энергии – солнечными и ветряными электростанциями.

На рис. 14. представлена принципиальная схема интеграции солнечной электростанции с газотурбинной установкой, с подземными аккумуляторами для воздуха и топлива.

В случае избытка электроэнергии в энергосистеме мотор – генератор (6) переключается на режим «мотор» для запуска воздушного компрессора (7), который обеспечивает закачку воздуха в подземный аккумулятор (8). Воздушный компрессор является многоступенчатым с промежуточными охладителями.

При возрастании электропотребления в энергосистеме включается в работу вторая часть газотурбинной установки – генерация электричества. Воздух под большим давлением из подземного аккумулятора подается в камеру сгорания (10) с одновременной подачей топлива из подземного аккумулятора (9). После камеры сгорания рабочее тело направляется в турбинную группу (11). Вращаясь, турбина приводит в действие генератор (12).

На рис. 15 представлена схема ветряной электростанции в интеграции с газотурбинной установкой с подземными аккумуляторами воздуха и топлива.

В случае избытка электроэнергии производится закачка воздуха в подземный резервуар (4). Закачка воздуха осуществляется многоступенчатым компрессором (3) с промежуточными охладителями. Подземный аккумулятор воздуха (4) и топлива (5), как правило, сооружаются в отложениях каменной соли методом подземного растворения через вертикальную скважину. Геометрический объем подземных резервуаров устанавливается в соответствии с мощностью и длительностью работы газотурбинной установки.

При возрастании электропотребления включается в работу вторая часть установки – генерация электричества. Подготовленный воздух под необходимым

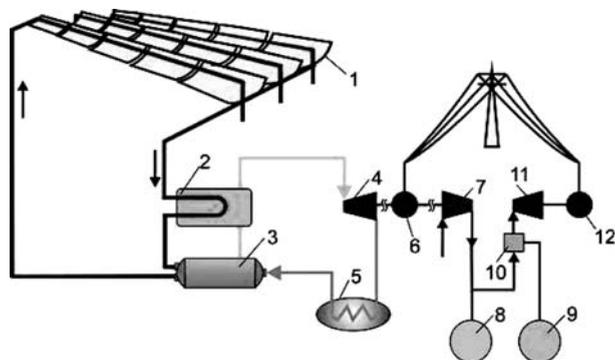


Рис. 14.

Принципиальная схема интеграции солнечной электростанции с газотурбинной установкой, с подземными аккумуляторами воздуха и топлива: 1 – солнечный коллектор; 2 – пароперегреватель; 3 – парогенератор; 4 – паровая турбина; 5 – конденсатор; 6 – электрический мотор-генератор; 7 – воздушный компрессор; 8 – подземный аккумулятор воздуха; 9 – подземный аккумулятор топлива; 10 – камера сгорания; 11 – газовая турбина; 12 – электрический генератор

давлением подается прямо в камеру сгорания с одновременной подачей топлива. Газовая турбина (6) и генератор (7) смонтированы на одном валу. Вращаясь, турбина приводит в действие генератор (7).

Экологические проблемы, связанные с производством и использованием как первичных, так и вторичных энергоносителей, в последние годы получили заостренное внимание не только со стороны специалистов, но и со стороны общественности. Сбор и утилизация (хранение или захоронение) вредных выбросов в результате сжигания ископаемых видов топлива имеет огромное значение по части сокращения или ослабления воздействия энергетических объектов на окружающую среду. Рассмотрим способ хранения (захоронения) и использования CO_2 с применением подземных резервов.

Перспективным является использование органических топлив для выработки двух энергоносителей без углекислого газа – электричества и водорода. На рис. 16 приводится иллюстрация такого подхода получения энергии. Новым здесь является то, что централизованно извлекается углекислый газ и направляется на хранение (захоронение) в течение длительного времени.

Природный газ из скважины (5) по газопроводу (7) направляется на электростанцию (8) и на станцию по получению водорода из природного газа (10). Выделившийся углекислый газ на электростанции и на станции по получению водорода собирается сначала в наземном накопителе (11) для дальнейшей закачки его в поглощающий пласт (4). Полученный водород используется для заправки автомашин (13), получения электроэнергии (14) и использования на промышленном предприятии в качестве энергоносителя (15), а также направляется по трубопроводу в город для ис-

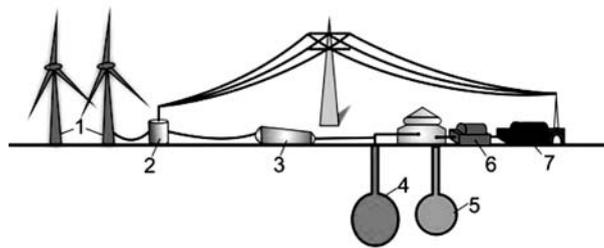


Рис. 15.

Схема ветряной электростанции в сочетании с газотурбинной установкой с подземными аккумуляторами воздуха и топлива: 1 – ветряная электростанция; 2 – трансформатор; 3 – воздушный компрессор; 4 – подземный аккумулятор воздуха; 5 – подземный аккумулятор топлива; 6 – газовая турбина; 7 – генератор

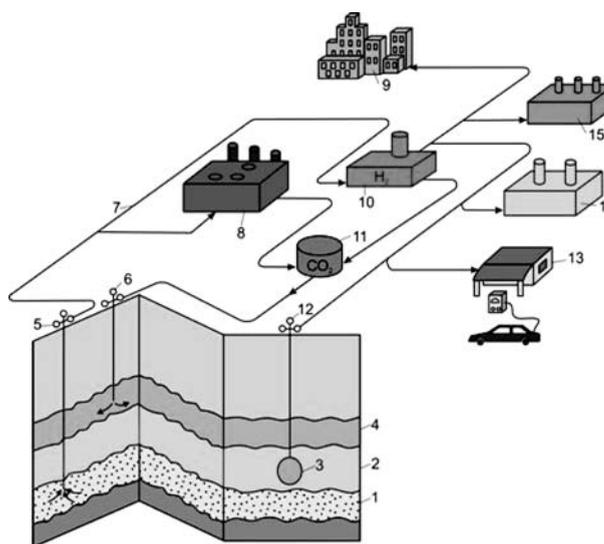


Рис. 16.

Схематическое изображение централизованного извлечения из природного газа углекислого газа и его захоронения в пористых пластах: 1 – газоносный пласт; 2 – пласт каменной соли; 3 – подземный аккумулятор водорода; 4 – пласт для закачки углекислого газа; 5 – газовая скважина; 6 – скважина для закачки углекислого газа; 7 – газопровод природного газа; 8 – электростанция; 9 – город; 10 – станция по получению водорода из природного газа; 11 – наземный накопитель углекислого газа; 12 – скважина подземного аккумулятора водорода; 13 – автозаправочная станция; 14 – газотурбинная установка, работающая на водороде; 15 – промышленное предприятие

пользования населением в качестве топлива. Излишки водорода закачиваются в подземное хранилище (3), созданное в отложениях каменной соли.

Углекислый газ можно использовать в качестве рабочего тела при эксплуатации газотурбинной электростанции. Наиболее эффективным является использование углекислого газа для пиковых (газотурбинных) электростанций, где требуется прерывистая работа – два часа утром и два часа вечером. Принципиальная схема такой электростанции приводится на рис. 17.

Один подземный аккумулятор двуокиси углерода состоит из нескольких подземных выработок. Минимальное количество – две подземные выработки. Одна является накопителем рассола, а другая – накопителем двуокиси углерода. Максимальное количество подземных выработок для одного аккумулятора может составлять пять единиц. Одна центральная остается в качестве накопителя рассола, а четыре, расположенные симметрично вокруг центральной, для накопления двуокиси углерода.

По трубопроводу, соединяющему подземный аккумулятор с газовой турбиной (10), CO_2 с давлением 4,4 МПа подается на вход турбины. Перед газовой турбиной установлен снижающий регулятор давления. После турбины углекислый газ принимает следующие параметры состояния: давление $P=1,0$ МПа, температура $T=6^\circ\text{C}$.

Рабочий контур газотурбинной установки работает по замкнутому циклу. Это значит, что после расширения на турбине, CO_2 обратно направляется в подземный резервуар, где восстанавливаются прежние параметры состояния ($P=6,5$ МПа, $T=25^\circ\text{C}$). Для возвращения отработанного в турбине газа в подземный аккумулятор необходимо использовать принцип работы гидрокомпрессора непрерывного действия, позволяющего получение сжатого газа с помощью нисходящего потока газожидкостной смеси.

Газожидкостная смесь формируется в жидкостно-газовом эжекторе (5) рабочей средой в котором служит концентрированный рассол, а инжектируемым потоком является CO_2 , идущий из инжектора (4). Концентрированный рассол подается из рассолохранилища (1) при помощи рассольного насоса (2). Уровень рассола в рассолохранилище (1) поддерживается постоянным благодаря непрерывному поступлению рассола из подземного накопителя рассола (7). Рассол из подземного накопителя (7) отбирается с помощью погружного скважинного насоса (6) и направляется в дегазатор (3) и далее в рассолохранилище (1).

Выделившийся в дегазаторе (3) низконапорный газ направляется в инжектор (4), где смешивается с потоком газа, идущего из турбины.

Газожидкостная смесь после жидкостно-газового эжектора (5) направляется в скважину рассольного накопителя (7). Смешанный поток, полученный после эжектора, при транспортировке по скважине, осуществляет дополнительное сжатие газа, при этом, чем больше глубина скважины, тем выше давление газа, поступающего в подземный накопитель рассола. В подземном накопителе рассола, являющемся уникальным гравитационным сепаратором в силу своих геометрических размеров, происходит разделение смеси на отдельные компоненты: рассол и CO_2 . Отсепарированный рассол по центральной колонне скважины накопителя рассола при помощи скважинного погружного насоса (6) транспортируется в дегазатор

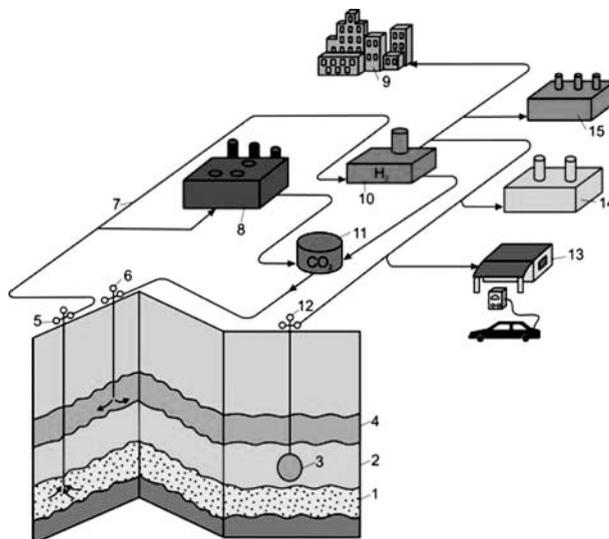


Рис. 17.

Принципиальная схема газотурбинной электростанции, работающей на CO_2 с использованием подземных аккумуляторов, созданных в отложениях каменной соли:
 1 – наземное рассолохранилище; 2 – насос рассольный;
 3 – дегазатор; 4 – инжектор; 5 – жидкостно-газовый эжектор; 6 – скважинный погружной насос; 7 – подземный накопитель рассола; 8 – подземный накопитель CO_2 ;
 9 – электрический генератор; 10 – газовая турбина

(3). Отделившийся в накопителе рассола газообразный CO_2 частично остается в накопителе рассола, а основная масса переходит в накопитель для CO_2 , от-

ЛИТЕРАТУРА

1. Ольховский Г.Г., Казарян В.А., Столяревский А.Я. Методы регулирования неравномерности электропотребления. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2012. 712 с.
2. Казарян В.А. Подземные аккумуляторы энергоносителей в энергетике. М. Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2013. 320 с.

Казарян Варздат Амаякович,
 д.т.н., профессор, заместитель генерального директора по науке ООО «Газпром геотехнологии»

☎ 123290, г. Москва, 1-я Магистральная ул., д. 11/2,
 тел.: +7 (499) 940-02-69,
 e-mail: V.Kazaryan@gazpromgeotech.ru

УДК. 622. 278

ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНОЛОГИИ ХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ БУРОГО УГЛЯ В БЕЛАРУСИ

А.Е. ВОРОБЬЕВ¹,
А.А. ВЕРЧЕБА²,
Л. ИБРОЙЕВА³

¹ РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ
НАРОДОВ

² РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

³ КЫЗЫЛКЙСКИЙ ГОРНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
КОЛЛЕДЖ

Рассмотрено современное отраслевое развитие республики Беларусь на основе инновационных технологий недропользования. Проанализированы основные факторы, определяющие вектор развития инновационных технологий недропользования. Предложены методы газификации и гидрогенизации бурых углей Беларуси.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: месторождения, бурый уголь, инновации, технологии, газификация, гидрогенизация, вектор развития.

Для получения все большей эффективности от освоения месторождений полезных ископаемых используются специализированные технологии и техника неизбежно и постоянно совершенствуются, т.е. периодически возникают более новые и эффективные технико-технологические инновации [2, 5].

Причем конкретные виды этих инновации определяются особыми (горно-геологическими) условиями залегания того или иного месторождения полезных ископаемых.

Так, в первую очередь направление инновационного вектора развития технологий недропользования определяет глубина залегания месторождений полезных ископаемых [1, 4].

В частности, если глубина залегания угольных месторождений не превышает 150 м, то их разработка осуществляется, прежде всего, открытым способом, а если превышает – то подземным (шахтным).

Самые глубокие шахты на территории Российской Федерации осуществляют добычу угля с уровня ниже 1200 метров от дневной поверхности [13]. Например, максимальная глубина разработки угольных пластов на шахте «Ключевской» составляет 1025 м. На Укра-

FACTORS DETERMINING THE EFFECTIVENESS OF THE TECHNOLOGY OF CHEMICAL PROCESSING OF BROWN COAL IN BELARUS

A.E. VOROBJOV,
A.A. VERCHEBA, L. IBROJEVA

Modern branch development of republic of Belarus is considered on the basis of innovative technologies bowels of the earth. Basic factors are analysed, qualificatory the vector of development of innovative technologies of working mine of minerals. The methods of processing of brown coals of Belarus offer at the place of their bedding

KEYWORDS: Deposits, brown coal, innovations, technologies, processing, receipt of gas and oil-fuel, vector of development.

ине максимальная глубина добычи угля в настоящее время достигла значения 1290 м, а подготовительные работы здесь ведутся уже на глубине 1310 м.

Так как угольные месторождения, как правило, представляют собой протяженные залежи и пласты (свиты пластов), то такая довольно простая форма их залегания не является определяющим фактором инновационного развития технологий недропользования (в отличие от угла падения пластов, обуславливающего появления новых способов разработки).

Следующим определяющим горно-геологическим фактором возникновения новых технологий разработки является мощность и количество угольных слоев.

Например, для подземной разработки угольные пласты обычно дифференцируют на тонкие (до 1,2 м), средней мощности (1,2–4,5 м) и мощные (более 4,5 м) [17]. В зависимости от той или иной мощности пластов специально были разработаны и в последствие применены различные технологии шахтной выемки угля: ручной, механизированный, буровзрывной, геотехнологический (гидрошахтный) и смешанный способы.

При открытой разработке к тонким относят угольные пласты мощностью до 2 м, к средним – от 2 м до 15–20 м (в зависимости от угла их падения), а к мощным – свыше 15–20 м. Мощность угольных пластов влияет на выбор специализированной техники открытой выемки угля (гидравлические экскаваторы, драглайны и т.д.) и его транспортировки (автомобильная откатка или железнодорожная).

Кроме горно-геологических факторов направление вектора развития инновационных технологий эффективного недропользования определяют и возможные пути (области) дальнейшего использования извлекаемых из недр полезных ископаемых.

Для бурого угля это может быть [7]:

- сжигание (для нужд энергетики – выработки тепла или электроэнергии);
- получение синтетических топлив (вследствие термохимической переработки, газификация или гидрогенизации);
- химическая индустрия.

Наиболее инновационными и высокоэффективными являются процессы пиролиза, газификации и гидрогенизации бурого угля (рис. 1).

И здесь необходимо выделять реальное численное значение эффективности, которое и определяет ту или иную область использования бурых углей. Так, сжигание 1 кг этого топлива (табл. 1) позволяет получить, в среднем, 23–27 МДж (6,4–7,5 кВт·ч) электрической энергии или — 2,0 кВт·ч электричества (при КПД 30%) [13].

В ходе проведенных исследований была установлена довольно высокая эффективность бурых углей Беларуси в отраслях энергетики [18]. При этом наиболее перспективным является их 2-х стадийное сжигание — с генерацией и последующим дожиганием полученных углеводородных газов.



РИС. 1.

Инновационные технологии переработки бурого угля [16]

А.Е. ВОРОБЬЕВ,
А.А. ВЕРЧЕБА, Л. ИБРОЙЕВА
ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬ
ТЕХНОЛОГИИ ХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ
БУРОГО УГЛЯ В БЕЛАРУСИ

ТАБЛИЦА 1.

Удельная теплота сгорания органического топлива

Топливо	У.Т.С., ккал/кг	У.Т.С., кДж/кг
Древесина	2960	12400
Торф	2900	12100
Бурый уголь	3100	13000
Каменный уголь	6450	27000
Антрацит	6700	28000
Кокс	7000	29300
Сланец	2300	9600
Сланцевый мазут	9100	38000
Природный газ	8000	33500
Сланцевый газ	3460	14500

Что касается получения из углей синтетических топлив, то в 70–80-е годы XX века в России была создана экономически эффективная технология переработки бурых углей методом гидрогенизации под довольно невысоким (6–10 МПа) давлением водорода, позволяющая рентабельно производить высококачественный бензин, дизельное топливо, бензол и т.д. [18].

В настоящее время для обеспечения получения объективной геологической информации и необходимого объема геоматериала для лабораторных исследований, РУП «Белгеология» на месторождениях бурого угля Беларуси было пробурено 25 скважин (с получением кернов), средней глубиной 90 м и общим метражом 2250 м.

Для непосредственного осуществления лабораторных исследований термохимического разложения бурого угля на жидкие и газообразные углеводороды в Институт проблем использования природных ресурсов и экологии Национальной академии наук Беларуси было направлено 2,5 т бурых углей.

Проведенные на этом материале лабораторные эксперименты показали, что термическое разложение (при температуре 600° С) бурых углей Бриневского месторождения обеспечивает выход жидких углеводородов в размере 17–21%, газообразных — 19–22%, а полукокса — около 60%.

С целью разработки современной инновационной технологии эффективного получения из бурого угля синтетических жидких топлив также в лабораторных условиях были детально исследованы состав и структура бурого угля, с получением закономерностей их изменения в зависимости от его возраста [17].

Так, были установлены реальные характеристики и численные значения физико-химических условий распада существующих в угле разнообразных связей, которыми соединены между собой алифатические, ароматические, гетероциклические и гидроароматические фрагменты, входящие в состав высокомолекулярных полимеров угля [18].

В частности было выявлено, что для молодых бурых углей характерно более высокое содержание гетероатомов, а макромолекулы в их структуре соединяются между собой, преимущественно, с помощью электронно-донорно-акцепторных связей и механизмов.

В настоящее время межмолекулярные донорно-акцепторные связи в углях рассматривают как взаимодействия, протекающие между донорными или акцепторными центрами пространственно сшитой макромолекулярной структурной части и несшитыми молекулами [19]. При экстракции этих несшитых молекул, молекулы растворителя вытесняют экстрагируемые молекулы в донорно-акцепторных комплексах со сетчатой матрицей.

При чем, величина E_1 у атома водорода равна – 13,6 эВ.

На этой основе было установлено и совершенно новое явление, заключающееся в том, что при определенных условиях взаимодействия с реакционной средой бурый уголь из первоначального твердого агрегатного состояния (даже при нормальной температуре и атмосферном давлении) переходит в жидкое агрегатное состояние [18].

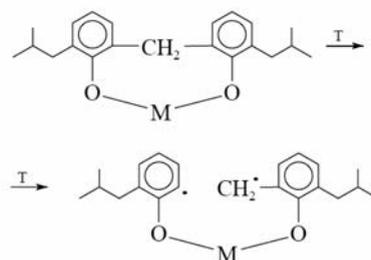
Это открытие позволило разработать принципиально новую технологию получения из бурого угля синтетических жидких топлив, включающую следующие основные стадии [18]: ожижение, очистку и плазмохимический каталитический крекинг.

В соответствии с которой на первой стадии осуществляется процесс ожижения бурого угля. Для этого в размольно-смесительный аппарат (представляющий собой 2-х червячный смеситель непрерывного действия) загружается бурый уголь и специальные модифицирующие добавки.

В процессе последующего измельчения и гомогенизации компонентов такой смеси осуществляется полноценная модификация бурого угля [18]: значительно изменяется его первоначальная высокомолекулярная структура и состав исходных фрагментов, а также разрушаются существовавшие электронно-донорно-акцепторные связи, что приводит к деполимеризации бурого угля и его превращению в жидкую углеводородную смесь.

В результате получаемая жидкая углеводородная смесь по всем своим физико-химическим свойствам приближается к нефти.

Целенаправленно управлять реакциями разрыва определенных связей возможно путем избирательного введения металлов-катализаторов в функциональные группы угольного вещества. Например, температура разрыва алифатической связи, соединяющей два ароматических фрагмента, существенно снижается, если катион двухвалентного металла (катализатора) замещает протоны 2-х соседних фенольных групп [16]:



На этой основе была разработана принципиально новая плазмохимическая технология переработки бурого угля, осуществляемая только в одну стадию, на выходе которой получают низкооктановый и высокооктановый бензины, а также дизельное топливо и жидкое топливо для энергетических установок [18].

В соответствии с этой технологией переработка бурого угля осуществляется в плазмохимическом реакторе, который представляет собой стальной вертикальный аппарат колонного типа [17].

В корпусе этого реактора размещают стационарный слой катализатора (необходимого объема). Очищенный и подготовленный бурый уголь (при нормальной температуре) подается равномерно в эту же колонну снизу, а сверху на него накладывается мощный поток микроволнового излучения.

В итоге в объеме катализатора генерируется микроволновая плазма, разогревающая катализатор, реагент и угольную загрузку до необходимой (по реакционным условиям) температуры. В результате этого, в реакторе осуществляется каталитический крекинг углеводородного сырья и другие специфические реакционные превращения.

По реагированию в верхнюю зону колонны в газообразном виде поступает катализатор, который затем выводится из колонны и возвращается в «голову» процесса, на последующую стадию приготовления перерабатываемой смеси.

В настоящее время для обеспечения каталитических превращений угля применяются 2 основные группы методов [16].

Одна из них включает каталитические превращения только на границе раздела фаз «поверхность угля — катализатор». Другая группа методов характеризуется тем, что каталитические превращения угля происходят путем передачи действия катализатора через жидкие или газообразные компоненты реакционной среды по следующей схеме [16]:

катализатор → компоненты реакционной среды → уголь → продукты превращения

Разработаны разнообразные способы (рис. 2) применения катализаторов в процессах химического превращения углей [16].

Самый хороший контакт (для последующих реакций) достигается при введении в уголь катализатора методами химического связывания с наиболее реак-

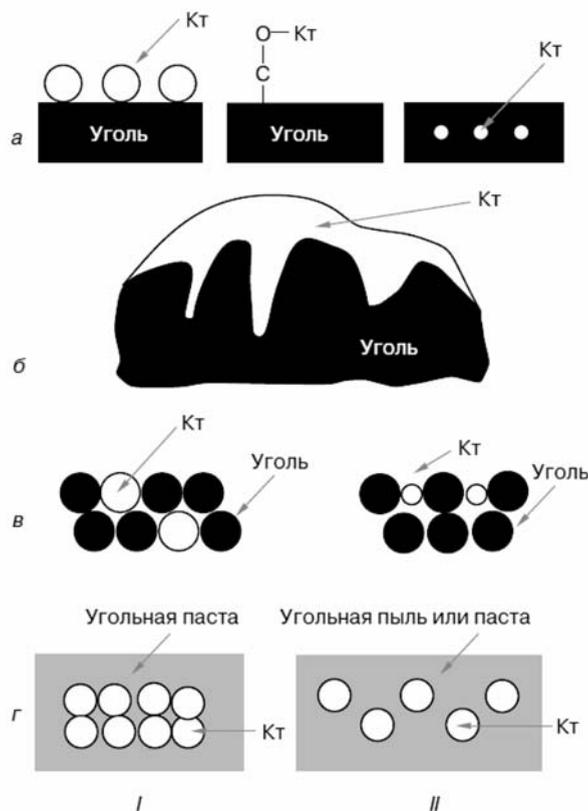


Рис. 2.

Способы применения катализаторов (Кт) в процессах превращения углей [16]: а – катализатор, введенный в уголь методами нанесения, химического закрепления на поверхности, внедрения в угольную структуру; б – растворенные и расплавленные катализаторы; в – механическая смесь измельченного или суспендированного катализатора и угля; г – традиционные гетерогенные катализаторы переработки нефтяного сырья: I – в стационарном и II – в псевдоожиженном слое (с подачей угольной пасты или пыли)

ционноспособными группами (например, $-\text{COOH}$, $-\text{CH}_2\text{OH}$) на поверхность угля или внедрения в объем угольного вещества, а также при использовании катализаторов в растворенном, расплавленном или летучем состоянии.

Длительность процесса гидрогенизации угля, как правило, определяется объемной скоростью его подачи в реакционную камеру [9]. Эта скорость зависит от типа угля, его фазового состояния, катализаторов, значений температуры и давления процесса.

Оптимальная объемная скорость гидрогенизации подбирается эмпирически и обычно составляет значение 0,8–1,4 т на 1 м³ реакционного объема в час.

Образующиеся продукты реакции гидрогенизации разделяются в сепараторе на парогазовую смесь и тяжелый остаток – шлам [9]. Технологически, первоначально выделяют жидкие продукты (масло и воду) и газ, который после отделения предельных углеводородов ($\text{C}_1\text{--C}_4$), NH_3 , H_2S , CO_2 и CO , H_2O обогащают

А.Е. ВОРОБЬЕВ,
А.А. ВЕРЧЕБА, Л. ИБРОЙЕВА
ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬ
ТЕХНОЛОГИИ ХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ
БУРОГО УГЛЯ В БЕЛАРУСИ

95–97%-ным H_2 и вновь возвращают в технологический процесс.

Шлам же разделяют на жидкие продукты и твердый остаток. Жидкие продукты после отделения воды подвергают дистилляции на фракцию с температурой кипения до 325–400° С и остаток, который возвращают в «голову» технологического процесса.

Величина запасов полезных ископаемых обуславливает значение продолжительности периода отработки месторождения.

В этом отношении запасы бурого угля в Беларуси оцениваются величиной 1,5 млрд т: в том числе разведанные (балансовые экономически целесообразные) — 160 млн т.

В настоящее время была проведена детальная разведка Бриневского месторождения, на котором запасы бурого угля по категории В + С1 составляют 30 млн т. Международный аудит (в соответствии с кодексом JORC) оценил запасы этого месторождения в 41,79 млн т [12].

Бриневское месторождение имеет следующее расположение [12]: оно занимает часть территории Петриковского района Гомельской области, в 22 км на северо-запад от г. Петриков и в 8 км на юго-восток от железнодорожной станции «Старушки» (рис. 3). В 5 км на север от этого месторождения проходит железная дорога «Лунинец – Калинковичи» и в 8 км на север – автомагистраль «Брест – Гомель» (граница с ЕС). Южнее, в 8 км от этого месторождения, протекает река Припять.



Рис. 3.

Расположение месторождений бурого угля в Беларуси

Заявленными потребителями продуктов переработки бурого угля этого месторождения являются концерн «Белнефтехим», а также многие предприятия Министерства энергетики Беларуси.

Себестоимость добычи 1 тонны бурого угля на этом объекте составляет 13,5 долл.

По Житковичскому месторождению в пределах Северной и Найдинской залежей также была выполнена детальная разведка [12]. Запасы бурого угля на этом объекте были оценены по категориям А + В + С1 + С2 в размере 47,97 млн т. Международный аудит (в соответствии с кодексом JORC) оценил запасы этого месторождения в количестве 47,14 млн т. Заданная годовая производительность угольных разрезов на этом объекте составляет 3,3 млн т в год. В итоге, срок службы для Северной залежи Житковичского месторождения составит 4,7 года, а для Найдинской – 5,9 лет.

Расположение этого месторождения [12]: захватывает Житковичский и Петриковский районы Гомельской области. Здесь же (в 1 км на запад от данного месторождения) находится железнодорожная дорога со станцией. Вдоль северной границы месторождения проходит железная дорога «Лунинец – Калинковичи», а в 4 км севернее – автомагистраль «Брест – Гомель». В 1,5 км к западу проходит шоссейная дорога «Житковичи – Туров». В 6 км к югу от этого месторождения протекает р. Припять. Через Северную угольную залежь проходит высоковольтная линия электропередач. Район расположения месторождения снабжается электроэнергией от Василевичской тепловой электростанции.

По Тонежскому месторождению запасы бурого угля по категориям С1 + С2 составляют 42,03 млн т. Международный аудит (в соответствии с кодексом JORC) оценил запасы этого месторождения в 40,04 млн т. Таким образом, при заданной годовой производительности угольного разреза 3,3 млн т срок его службы составит 5,8 года.

Расположение этого месторождения следующее [12]: оно занимает северо-западную часть Лельчицкого района Гомельской области, в 2 км к юго-западу от д. Тонеж, в 48 км к западу от г.п. Лельчицы и в 60 км к югу от г. Житковичи.

Участники проекта: 1) Иностраный партнер – любые формы участия (инвестор, координатор, субподрядчик); 2) Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Беларуси, Департамент по геологии, РУП «Белгеология» – инициаторы и координаторы проекта; 3) Концерн «Белнефтехим» – консультант проекта.

Лельчицкое месторождение бурых углей расположено в п.г.т. Лельчицы Гомельской области. Эксплуатационные (извлекаемые) запасы бурого угля проектируемого горнодобывающего предприятия на этом объекте были оценены величиной 35,715 млн т.

Уголь этого месторождения обладает следующими характеристиками [12]: влажность – 5,0–8,8%, средняя зольность – 34%, выход летучих веществ – 43,2–44,9%, содержание общей серы – 0,8–1,5%, высшая теплота сгорания – 27,2–28,9 МДж/кг, теплота сгорания на сухое топливо – 16,0–20,4 МДж/кг.

Характеристика угленосной толщи на этом объекте [12]: перспективная площадь распространения – более 40 км², глубина залегания – от 90 до 400 м и более, угленосная толща содержит от 1 до 7 пластов бурого угля, мощность основного пласта угля – от 0,5 до 12,2 м.

Уголь этого месторождения относится к переходной технологической группе, находящейся между группами ЗБ (плотный маловлажный бурый уголь) и Д (длиннопламенный каменный уголь).

Участники проекта: 1) Иностраный партнер – любые формы участия (инвестор, координатор, субподрядчик); 2) Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Беларуси, Департамент по геологии, РУП «Белгеология» – инициаторы и координаторы проекта; 3) Концерн «Белнефтехим» – консультант проекта; 4) Жилищно-коммунальное хозяйство, строительные организации (цементные заводы) – потребители бурого угля.

По различным экспертным оценкам себестоимость добычи и погрузки в железнодорожные вагоны на этом объекте составляет 50,43 долл. за 1 тонну угля, а добычи и отгрузки потребителям – 51,36 долл. за 1 тонну.

Основной тип потребителей: жилищно-коммунальное хозяйство, а также строительные организации (цементные заводы).

Кроме этого в южной части Припятского прогиба были выявлены отдельные угленосности (Букчанское и Приболовичское), с суммарными ресурсами бурого угля порядка 450 млн т [10].

Современный вектор разработки эффективных инновационных технологий недропользования обязательно должен учитывать и экологическую составляющую (при чем – сквозную: по горному цеху и при переработке полезных ископаемых, в общей совокупности).

Так, для того что-бы получить 4 млн т синтетической нефти (жидкого топлива) необходимо переработать в заводских условиях около 10 млн т бурого угля. При этом в атмосферу будет выброшено около 1,2 млн т углерода, 80 тыс. т углекислого газа и будет образовано 700 тыс. т золы. А кроме этого по горному цеху (в соответствии с коэффициентом вскрыши, равным 3–4) из недр будет извлечено и заскладировано в отвалах примерно 35 млн т горной массы.

Данное обстоятельство обуславливает применение технологии скважинной газофикации бурого угля (по месту его залегания в литосфере) – ПГУ [3, 6, 8].

Это предопределено тем, что если при открытой или шахтной разработке месторождений бурого угля,

как правило, получают только горную массу (уголь), то при ПГУ – уже готовый продукт (газообразные горючие углеводороды).

Однако, современная технология подземной газификации угля по месту его залегания является все еще нетрадиционным геотехнологическим способом разработки угольных месторождений, позволяющим использовать инновационные методы освоения угольных пластов со сложными горно-геологическими условиями залегания, совмещающим обогащение угля, его переработку и получение готового продукта в виде газовых смесей.

Способ ПГУ (рис. 4) включает в себя бурение с дневной поверхности системы специальных скважин (до глубины залегания угольного пласта), с последующей их сбойкой (соединением) и с обязательным нагнетанием воздуха (кислорода) и розжигом (созданием управляемого очага горения) угольного пласта [15].

Для этого, в компрессорном цехе устанавливаются компрессоры 2-х типов – высокого и низкого давления. Первые предназначены для подачи под высоким давлением (5–6 МПа) в подземный газогенератор дутья на фильтрационную сбойку или проработку каналов газификации. Компрессоры низкого давления (турбовоздуходувки) подают дутье на газификацию под давлением 0,2–0,3 МПа [15].

Из компрессорного цеха дутье поступает в газогенераторный цех по двум системам трубопроводов и далее подводится к соответствующим скважинам.

Для отбора газа из газоотводящих скважин служат коллекторы из металлических труб. Дутьевые и газовые коллекторы не являются постоянными сооружениями и по мере отработки угольного пласта периодически переносятся.

На каждом газовом коллекторе устанавливаются циклоны – аппараты для улавливания крупной пыли, выносимой с газом из газоотводящих скважин. После

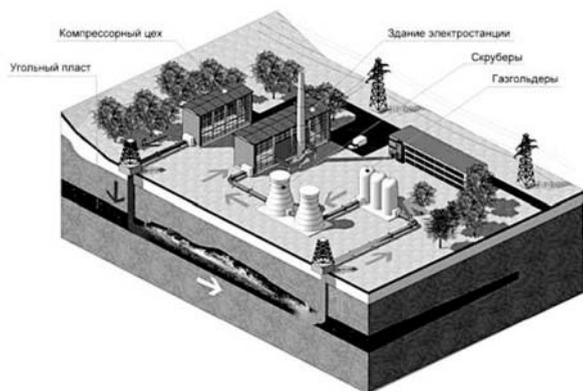


Рис. 4.

Принципиальная схема предприятия подземной газификации углей [14]

осаждения пыли газ направляется в цех охлаждения и очистки (рис. 5).

Предварительное охлаждение извлекаемого углеводородного газа может производиться непосредственно в газоотводящих скважинах. Для этого в каждую из них опускается водоподающая трубка (диаметром 12–18 мм), с распылителем на конце [15].

В состав цеха охлаждения и очистки газа входят скрубберы, градирня, циркуляционная система охлаждающей воды, отстойники, электрофильтры и установка сероочистки.

Вначале углеводородный газ поступает в скрубберы, где охлаждается до температуры 30–35° С и одновременно дополнительно очищается от пыли и частично от смолы. Далее он поступает в электрофильтры, где окончательно очищается, а после этого в скрубберы сероочистки для извлечения сероводорода. Затем он направляется в транспортный цех, где установлены турбогазодувки, подающие горючий газ уже потребителям.

Существуют основные технологические требования к разработке новой технологии подземной газификации угля [11]:

- целенаправленный подвод окислителя к реакционному угольному участку, обеспечивающий высокоэнергетическую эффективность процесса газификации угля в канале;
- стабильность и устойчивость процесса горения, за счет управляемого и контролируемого переноса зон горения забоя в подземном газогенераторе;
- возможность получения теплоты сгорания от 4 МДж/м³ (воздушное дутье) до 11 МДж/м³ (кислородное дутье);
- обеспечение управлением выработки ценных компонентов и их соотношения (СО, Н₂, СО₂) в газе ПГУ;
- к.п.д. процесса – до 75–80;
- небольшое количество эксплуатационных скважин;
- полное выгазовывание угля в пласте – до 90–95%;
- минимизация экологического воздействия на подземные воды.

На развитие инновационных технологий недропользования оказывают существенное влияние и показатели экономического плана, выдвигаемые заказчиком.

В этой связи по Бриневскому месторождению капитальные затраты (суммарные инвестиции в основные средства) составляют 1435,4 млн долл., операционные и эксплуатационные затраты – 44,55 млн долл. (табл. 2), по Житковичскому месторождению (табл. 3) – 391,3 млн долл. и 74,75 млн долл., соответственно, а по Тонежскому месторождению (табл. 4) – 262,3 млн долл. и 45,4 млн долл. [12].

По Бриневскому месторождению объем требуемых инвестиций в уставный капитал, технологии и техно-

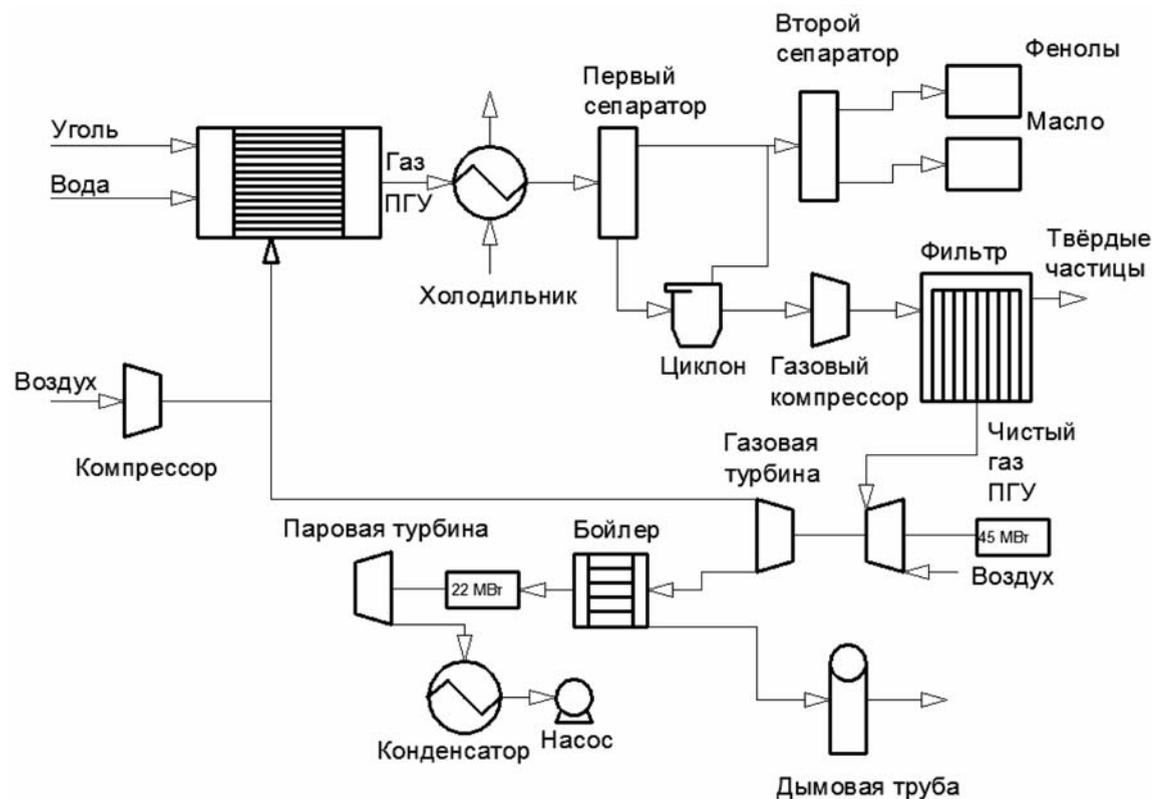


Рис. 5.
Детализация комплексного предприятия «ПГУ-ТЭС» [15]

ТАБЛИЦА 2.
Капитальные затраты (суммарные инвестиции в основные средства) (Бриневское месторождение)

Физические компоненты	Капиталовложения (млн долл.)
Приобретение технологического оборудования	765,2
Строительно-монтажные работы (с учетом жилищно-гражданского строительства)	639,6
Преинвестиционные разработки и НИР	30,6
Всего (оценка):	1435,4
Операционные и эксплуатационные затраты	
Статьи затрат:	
Вспомогательные материалы	0.54
Топливо и энергия на технологические цели	13.49
Основная и дополнительная заработная плата	4.61
Соц. страхование	1.57
Амортизация	22.52
Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования	1.14
Цеховые расходы	0.69
Всего млн долл. (оценка)	44.55

ТАБЛИЦА 3.

Капитальные затраты (суммарные инвестиции в основные средства) (Житковичское месторождение)

Физические компоненты	Капиталовложения (млн долл.)
Приобретение технологического оборудования	187,33
Строительно-монтажные работы (с учетом жилищно-гражданского строительства)	157,05
Прединвестиционные разработки и НИР	46,92
Всего (оценка):	391,30
Операционные и эксплуатационные затраты	
Статьи затрат:	
Вспомогательные материалы	0,97
Топливо и энергия на технологические цели	21,42
Основная и дополнительная заработная плата	6,05
Соц. страхование	2,06
Амортизация	39,77
Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования	3,25
Цеховые расходы	1,25
Всего млн долл. (оценка)	74,75

ТАБЛИЦА 4.

Капитальные затраты (суммарные инвестиции в основные средства) (Тонежское месторождение)

Физические компоненты	Капиталовложения (млн долл.)
Приобретение технологического оборудования	90,44
Строительно-монтажные работы (с учетом жилищно-гражданского строительства)	139,92
Прединвестиционные разработки и НИР	31,94
Всего (оценка):	262,30
Операционные и эксплуатационные затраты	
Статьи затрат:	
Вспомогательные материалы	0,64
Топливо и энергия на технологические цели	14,50
Основная и дополнительная заработная плата	4,90
Соц. страхование	1,66
Амортизация	21,60
Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования	1,40
Цеховые расходы	0,70
Всего млн долл. (оценка)	45,40

логические процессы составляет 267,16 млн долл., по Житковичскому месторождению – 391,3 млн долл., а по Тонежскому месторождению – 262,3 млн долл. [12].

По Лельчицкому месторождению объем требуемых инвестиций в уставный капитал, технологии и технологические процессы составляет 578,7 млн долл., а капитальные затраты (суммарные инвестиции в основные средства) оцениваются в размере 508 млн долл. [12].

Кроме этого, при оценке эффективности различных вариантов технологий освоения место-

рождений бурого угля следует учитывать рентабельность, срок окупаемости затрат, время строительства предприятия и годовой экономический эффект.

Необходимо учитывать также и социальные факторы – условия труда рабочих. С этой точки зрения ПГУ гораздо перспективнее других методов, т.к. этот метод, как правило, не требует создания горных выработок и необходимости присутствия в них персонала.

ЛИТЕРАТУРА

1. **ВОРОБЬЕВ А.Е., ДЖИМИЕВА Р.Б.** Обоснование инновационных технологий шахтной разработки месторождений сланца и высоковязкой нефти. Владикавказ: СКГТУ, 2008. 114 с.
2. **ВОРОБЬЕВ А.Е., ЛОЦЕВ Г.В., ДРЕБЕНШТЕДТ К., ЧЕКУШИНА Е.В.** Современный инновационный менеджмент недропользования. Ош (Кыргызстан), 2008. 323 с.
3. **ВОРОБЬЕВ А.Е., НОРОВ Ю.Д., ДЖИМИЕВА Р.Б.** Инновационные методы газификации и термодеструкции месторождений горючего сланца // Под ред. д.т.н. К.С. Санакулова. Гриф НТС Навоийского горно-металлургического комбината. Бухара (Узбекистан): Изд-во Бухоро, 2011. 168 с.
4. **ВОРОБЬЕВА А.Е., РАЗОРЕНОВ Ю.И., ИГНАТОВ В.Н., ДЖИМИЕВА Р.Б.** Инновационные геотехнологии разработки месторождений горючего сланца и высоковязкой нефти. Учебное пособие. Новочеркасск, Изд-во ЮРГТУ (НПИ), 2008. 213 с.
5. **ВОРОБЬЕВ А.Е., ЧЕКУШИНА Т.В.** Инновационный менеджмент недропользования. М.: РУДН, 2008. 222 с.
6. **ВОРОБЬЕВ А.Е., ДЖИМИЕВА Р.Б.** Инновационная технология подземной дегазации горючего сланца // Вестник ЗабГК: Агосшковские чтения. № 3. Чита. ЗабГК, 2010. С. 19–22.
7. **ВОРОБЬЕВ А.Е., КИПРИЯНОВ Н.А., БУРЦЕВ А.В., СУХИН П.П.** Научные основы инновационных методов переработки полезных ископаемых // Материалы республиканской научно-технической конференции «ISTIQLOL» (с международным участием) «Геотехнология: инновационные методы недропользования в XXI веке». Навоий: НавГИИ, 2007. С. 204–205.
8. **ВОРОБЬЕВ А.Е., САБАНОВ С.М., ДЖИМИЕВА Р.Б.** Принципы обеспечения инновационных экологически щадящих геотехнологий на месторождениях горючего сланца и высоковязкой нефти // Материалы III Международной конференции «Горное, нефтяное, геологическое и геоэкологическое образование в XXI веке», Москва-Горно-Алтайск, 2008. М.: РУДН, 2008. С. 142–146.
9. Гидрогенизация угля // http://chemport.ru/data/chemipedia/article_862.html.
10. Государственная программа геологоразведочных работ по развитию минерально-сырьевой базы Беларуси на 2011–2015 годы и на период до 2020 года. Минск. Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. 2010. 92 с.
11. **ЗОЯ А.Ю.** Разработка основ эффективной технологии подземной газификации углей с целью получения синтетических моторных топлив // <http://dlib.rsl.ru/rsl0100400000/rsl01004423000/rsl0100442-3803.pdf>.
12. Инвестиционные предложения по разработке месторождений полезных ископаемых Беларуси // <http://businessforecast.by/partners/publication/396>.
13. Ископаемый уголь // <http://ru.wikipedia.org>.
14. **КОНДЫРЕВ Б.И., БЕЛОВ А.В., НИКОЛАЙЧУК Н.А., ЗВОНАРЁВ М.И., ГРЕБЕНЮК И.В.** Состояние и перспективы развития подземной газификации угля на Дальнем Востоке России. Владивосток: ДВГТУ, 2010. С. 213.
15. **КРЕЙНИН Е.В.** Нетрадиционные термические технологии добычи трудно извлекаемых топлив: уголь, углеводородное сырье. М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2004.
16. **КУЗНЕЦОВ Б.Н.** Новые подходы в химической переработке ископаемых углей // Соровский образовательный журнал. 1996. № 6. С. 50–57.
17. Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. М., ФГУ ГКЗ. 2007.
18. <http://www.nestor.minsk.by/sn/2007/25/sn72516.html>.
19. <http://masters.donntu.edu.ua/2006/feht/bondarenko/library/article5.htm>.]

Воробьев Александр Егорович,
д.т.н., профессор, зав. кафедрой Российского университета дружбы народов

☎ 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6,
тел.: +7 (495) 952-63-53

Верчеба Александр Александрович,
д.г.-м.н., профессор, декан геолого-разведочного факультета Российского государственного геолого-разведочного университета,

☎ 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23

Ибройева Лола,
старший преподаватель Кызылкийского горно-технического колледжа

☎ Кыргызстан, г. Кызылкия, ул. Дехканская, д. 5

УДК 553.985

ДОБЫЧА СЛАНЦЕВОГО ГАЗА. ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

А. Г. ХИСМАТУЛЛИНА

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ НЕФТИ И ГАЗА
ИМ. И. М. ГУБКИНА

Работа посвящена одной из новых энергетических проблем – сланцевому газу. В работе рассматриваются технологические особенности и методы разработки месторождений сланцевого газа, а также экологические аспекты, влияние «сланцевой революции» на мировой газовый рынок и последствия для стран экспортеров традиционного газа.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сланцевый газ, проницаемость, экология, гидроразрыв пласта, термогенный газ, биогенный газ, горизонтальные скважины, метод одновременного разрыва «Симулфрак», сланцы Барнетт, сланцы Антрим.

«Сланцевый газ – это самая крупная инновация этого десятилетия».

Дэниэл Йергин, председатель
Cambridge Energy Research Associates.

Открытие новых источников энергетических ресурсов является для человечества потребностью и однозначной необходимостью. Тема весьма актуальна – практически во всех странах мира, как производителях, так и потребителях энергоресурсов, активно обсуждается вопрос сланцевого газа. «Сланцевая революция», а именно так стали называть выход сланцевого газа на мировой рынок – обострила споры о роли традиционного газа, вызвала к жизни новые дискуссии относительно энергетического будущего традиционных поставщиков природного газа. Повышенный интерес к сланцевому газу во многих странах мира, в том числе и в Европе, объясняется задачей диверсификации поставок углеводородных ресурсов. Расширение числа источников получения углеводородного сырья является приоритетом для многих стран.

Эйфория возникла на волне успеха США, сумевших добиться роста добычи значительных объемов сланцевого газа. Сланцевый газ изменил энергетический рынок США, позволив стране стать крупнейшим в мире производителем газа в 2009 году. Уровень добычи сланцевого газа в США к 2011 году вырос до 150 млрд м³ в год, составив 15% от общей добычи газа

SHALE GAS PRODUCTION. PROBLEMS AND PROSPECTS

L. G. KHISMATULLINA

The work is dedicated to one of the new energy problems – shale gas. The paper is considered the technological features and methods of development of shale gas field, as well as environmental aspects, the impact of «shale revolution» in the global gas market and the implications for the traditional gas exporters.

KEYWORDS: shale gas, permeability, ecology, hydrofracturing, thermogenic gas, biogenic gas, horizontal wells, method of joint fracturing «Simulfrac», Barnett Shale, Antrim Shale.

[3]. Лидером в применении специальных технологий по добыче сланцевого газа, помимо США, является Канада. Добывать газ из сланца намерен еще и Китай. В настоящий момент эксперимент с добычей сланцевого газа проводится в Европе, надеющейся повторить опыт США.

Потенциальные возможности сланцевого газа как энергоресурса являются предметом спора многих экспертов, которые пытаются прогнозировать ситуацию на рынке газа.

Уход с рынка крупнейшего импортера углеводородного сырья – Соединенных Штатов – существенно меняет карту традиционных маршрутов экспортных поставок и всей структуры мировой торговли углеводородами [4].

Например, сжиженный газ Катара (объем экспорта к 2012 году прогнозировался до 100 млрд м³), прежде поставляемый в США, был переориентирован на Европу, в результате переизбыток предложения сформировал эффективный спотовый рынок, который уже оказывает значительное влияние на регуляцию газовых цен в Европе.

Газовый бум в США уже сказался и на российских позициях. Ситуация со сланцевым газом влияет на ценовую политику прежде всего в Европе. Потребление газа в Европе сократилось на 9,9% за 2011 г. не только из-за экономических проблем, но и из-за вытеснения газа более дешевым углем. Европа и сама стала добы-

вать больше угля, но главное — на 38% за год вырос импорт из США, американцы нарастили поставки угля именно за счет самообеспечения сланцевым газом [2].

Мнения экспертов по отношению к оценке мировых запасов сланцевого газа и перспектив развития этого направления диаметрально противоположные. Глобальные оценки запасов сланцевого газа остаются приблизительными.

По данным Energy Information Administration (EIA) объем запасов сланцевого газа США на 2011 год составляет 72 трлн м³, из них технически-извлекаемые запасы — 24 трлн м³. Мировой объем сланцевого газа превышает 187 трлн м³. Самые крупные запасы сосредоточены в Азиатско-Тихоокеанском регионе более — 45 трлн м³ [8]. Наиболее активные действия в области разведки сланцевого газа наблюдаются в тех странах, которые не имеют достаточных запасов собственного природного газа. Ведется разведка месторождений в Канаде, Европе, Китае, Австралии, Израиле, а также других странах. Оцениваемые затраты на разведку и разработку за пределами США значительно выше, чем для американских сланцев из-за отсутствия оборудования и систем снабжения, экологического регулирования и т.д.

Основные промышленно-разрабатываемые газосланцевые месторождения сосредоточены в США. Сланцевый газ присутствует в большинстве южных 48 штатов. Рисунок 1 показывает приблизительное расположение добычи сланцевого газа в настоящее время и в перспективе на будущее. Наиболее востребованными сланцами на сегодняшний день являются Barnett Shale, Haynesville / Bossier Shale, Antrim Shale, Fayetteville Shale, Marcellus Shale, и New Albany Shale.

Доля сланцевого газа в общем объеме газа добываемого в США в последующие годы составит: на 2020 г. — 34–48%, 2035 г. — 37–50% [8]. За пределами США Канада представляет следующую территорию, на которой будут развиваться крупные промышленные газовые проекты. Необходимо обратить внимание на то, что МЭА к 2030 году прогнозирует энергетическую независимость Северной Америки.

Что же такое сланцевый газ?

Сланцевый газ — это разновидность природного газа, хранящегося в виде небольших газовых образований, в коллекторах сланцевых отложений.

Сланцевый газ добывается из богатых органикой аргиллитов, которые одновременно служат материнской породой, ловушкой и коллектором газа. Качественным показателем газовой эффективности сланца является содержание керогена, то есть углеродсодержащей органики. Коллекторские свойства сланцев сильно различаются и для их эксплуатации при бурении, заканчивании и разработке используется широкий диапазон практических методов [1].

Сланцы имеют очень низкую проницаемость скелета (сотни нанодарси), для добычи газа с промышленно-рентабельными дебитами требуется наличие естественных трещин и/или стимуляция трещин посредством гидроразрыва. Чем выше проницаемость, тем больше зона дренирования. Если проницаемость низкая и/или трещины удалены друг от друга, горизонтальная скважина может давать газ на неустановившемся режиме многие годы.

При оценке месторождений сланцевого газа необходимо учитывать тот факт, что объем доступного газа в сланцевом слое прямо пропорционален мощности сланца. Наиболее выгодными считаются «хрупкие»

Global shale gas basins, top reserve holders

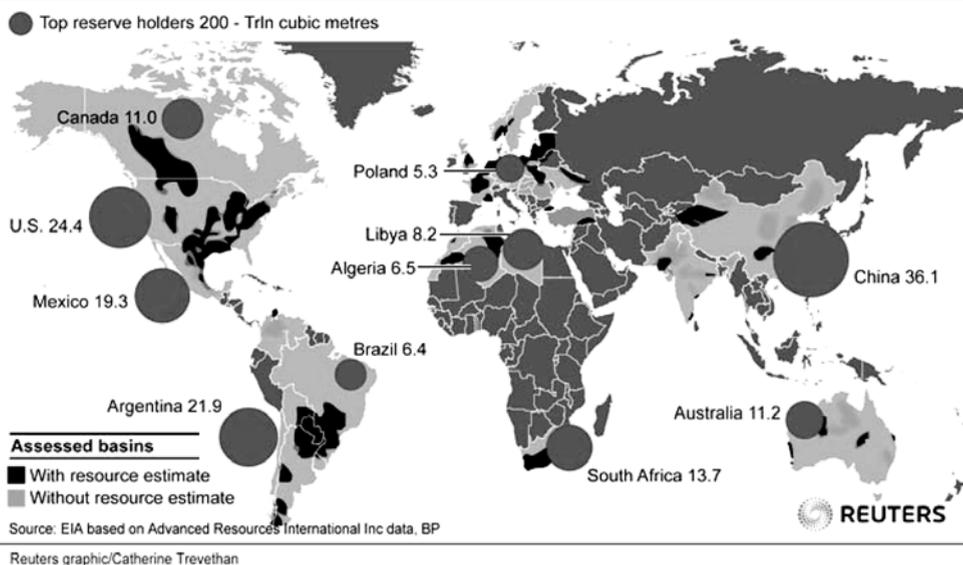


Рис. 1.

Карта мировых запасов сланцевого газа

сланцы с большим содержанием диоксида кремния. Эти месторождения содержат естественные разломы и трещины. Одна из причин, что месторождение Barnett Shale является продуктивным, связана с высоким содержанием кварца в сланце — 29–38%, порода сланца в Barnett Shale очень хрупкая. Хрупкая порода сланца позволяет уменьшать мощность гидроразрыва. Такие сланцы называют термогенные. В отличие от этого, биогенные сланцы обычно менее хрупкие, их способность формировать проводимость для добычи воды и газа зависит от существования открытых естественных трещин (например, сланцы Antrim).

Залежи термогенного сланцевого газа обычно расположены на глубинах свыше 900 м. В добыче преобладает сухой газ, удерживаемый в порах сланцев. Начальные дебиты газа из горизонтальных скважин, подвергнутых гидроразрыву, обычно превышают 28 тыс. м³/сут, а соответствующие начальные извлекаемые запасы превышают 28,3 млн м³. Залежи термогенного сланцевого газа характеризуются первоначальным резким падением дебитов от 30 до 80% и более в течение первого года. Такой характер падения свидетельствует о том, что скважины находятся в состоянии неустановившейся фильтрации. Из-за того, что проницаемость таких коллекторов очень низкая, объем стимулируемого коллектора невелик и расстояние между скважинами велико. Термически незрелые сланцы (находящиеся на стадии нефтегенерации или генерации жирного газа) обычно дают более низкие начальные дебиты и характеризуются более низкими начальными извлекаемыми запасами (рис. 2). Залежи биогенного сланцевого газа обычно характеризуются значительно более низкими дебитами и начальными извлекаемыми объемами по сравнению с термогенными сланцами из-за меньшей глубины залегания, более

низких значений начальных геологических запасов газа и необходимости обезвоживания трещин до начала добычи сорбционного газа.

Каждое месторождение сланцевого газа уникально, разведка и добыча сланцевого газа представляет собой процесс, который требует значительного количества времени и дорогих технологий.

Рассмотрим «типовые» модели залежей сланцевого газа.

Сланцы Антрим термически незрелые, что объясняет низкие дебиты, Барнетт — одно из лучших месторождений сланцевого газа в США, где были пробурены первые скважины и началась промышленная добыча сланцевого газа. Файетвилл — образец успешной разработки сланцевого газа. На месторождении Файетвилл постоянно совершенствуются технологии. На сегодняшний день разработка ведется только горизонтальными скважинами, средняя длина боковых стволов увеличена (приблизительно до 1430 м).

Наиболее сложным для бурения в США считается месторождение Haynesville Shale, оно отличается высоким давлением в породах, а также его значительными скачками. При глубине бурения 3200–4100 м давление составляет 67,5 МПа при температуре более 150° С. Горизонтальные скважины имеют длину до 1500 м, а добыча газа требует более мощных гидроразрывов.

Сланцевые месторождения США характеризуются концентрацией газа в пределах от 0,2 до 3,2 млрд м³/км². При коэффициенте отдачи 20% извлекаемые запасы составляют от 0,04 до 0,6 млрд м³/км², что в 50–100 раз меньше, чем в традиционных месторождениях газа [1].

Современная технология добычи сланцевого газа подразумевает бурение горизонтальных скважин длиной до 2–3 км или горизонтальное бурение

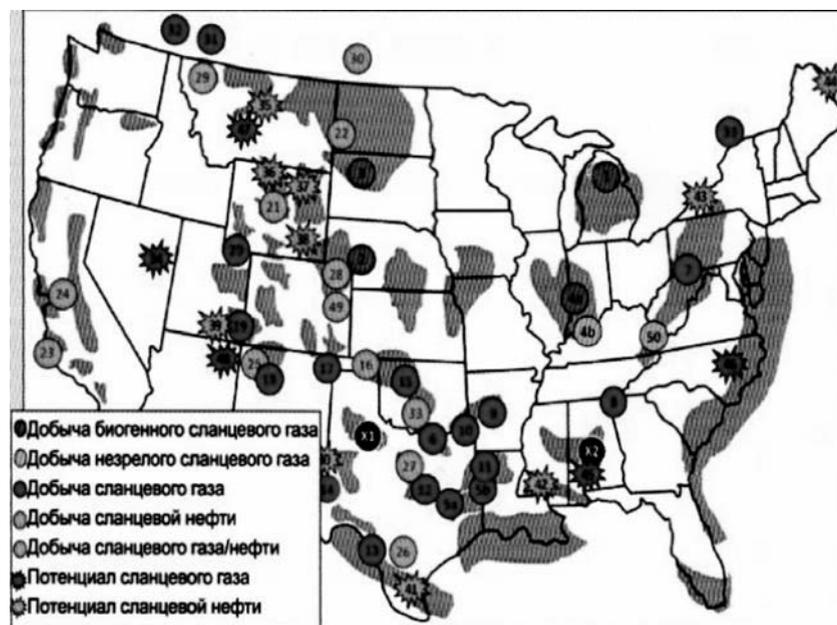


РИС. 2.

География распространения месторождений сланцевого газа в США

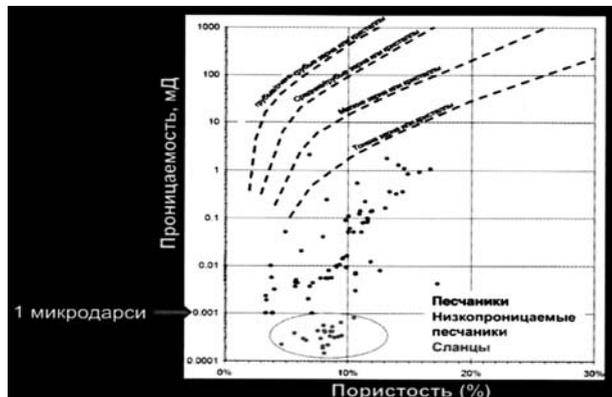


Рис. 3.
Влияние проницаемости на дренирование

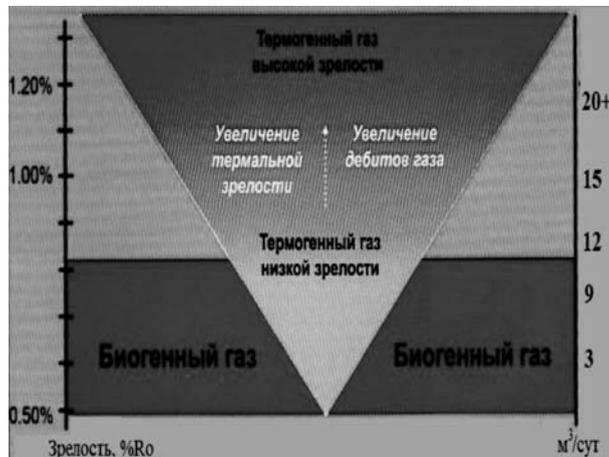


Рис. 4.
Ожидаемые дебиты газа в зависимости от типа системы

с мультиотводами на одной глубине, а также многоступенчатые горизонтальные скважины с длиной горизонтального отвода до 2 км. Сравнение со средней скважиной показало, что горизонтальные скважины с гидроразрывом в сланцах Барнетт могут дать примерно в 3,8 раза больше газа на протяжении рентабельной эксплуатации скважин, чем средняя стимулированная вертикальная скважина. В пробуренные скважины закачивается рабочая смесь (состоящая из воды, песка и химикатов), в результате гидроудара образуются трещины и весь доступный газ откачивается на поверхность. При помощи сейсмоки 3D возможно точно оценить содержание глин (хрупкость), пористость газонасыщенных интервалов, горизонтальные напряжения и естественные трещины.

Многие скважины дают более половины газа в течение первых нескольких лет, поэтому для поддержания высокого уровня добычи, а тем более ее роста, нужно постоянно увеличивать количество скважин. Соответственно, необходимо расширение площадей, на которых должно осуществляться бурение.

Боковые стволы бурятся параллельно друг другу и перпендикулярно максимальному сжимающему напряжению. Типичная система размещения скважин на секцию (2,59 км²) включает от 4 скважин (расстояние между краями соответствует 0,65 км² на скважину) до 8 скважин (0,324 км² на скважину), а некоторые пилотные проекты работают по сетке 0,16 км² на скважину. Боковые стволы обычно размещаются в наиболее хрупких интервалах, что помогает более легкому

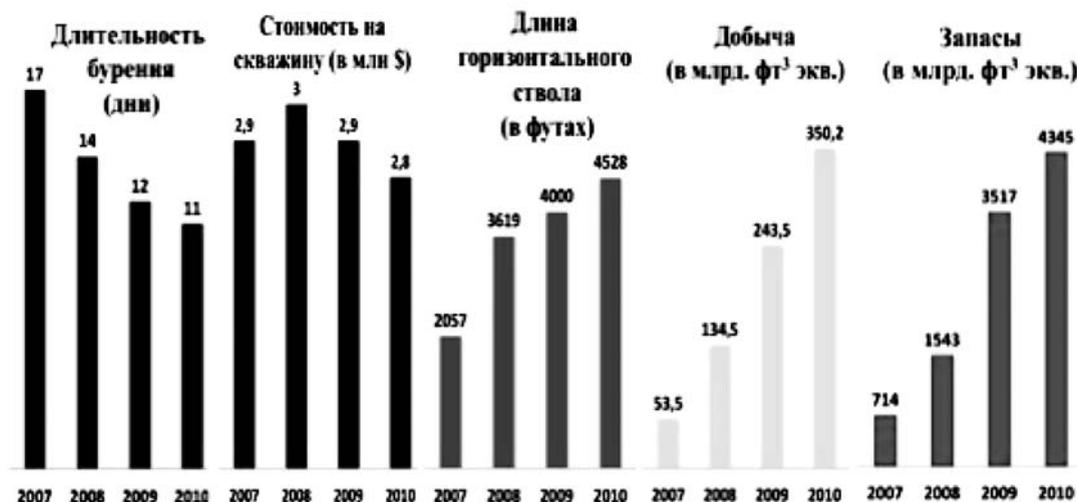


Рис. 5.
Изменение параметров эксплуатации сланцев Файетвилл с 2007 по 2011 г.

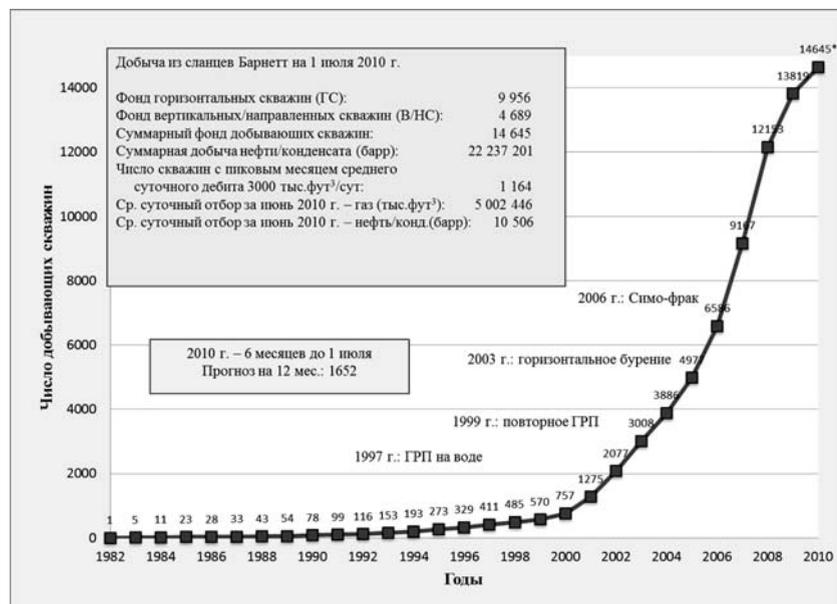


Рис. 6.

Изменение фонда добывающих скважин в сланцах Барнетт в период до 1 июля 2010 г.

образованию трещин и более интенсивной стимуляции пород. Принимаются меры по избежанию структурных осложнений, таких как сбросы значительной амплитуды и расположенные по соседству водоносные горизонты [1].

Для экономически рентабельной разработки месторождений сланцевого газа необходимо проводить ГРП.

ГРП включает в себя закачку жидкости гидроразрыва в пласт с рассчитанной, заданной скоростью и давлением для получения перелома или трещины в заданном пласте. Для разработки сланцевого газа, рабочая жидкость используется, прежде всего, на водной основе, которую смешивают с добавками. Флюид на водной основе имеет ряд преимуществ:

- более длинные и узкие трещины;
- более высокую производительность насоса;
- трещины контактируют с большим объемом коллектора;
- меньший размер зерен пропантанта;
- более легкую очистку;
- отсутствие гелевой коагуляции;
- значительно дешевле гелевых ГРП.

К минусам можно отнести: данная технология требует внушительный объем воды (для гидроразрыва скважины может потребоваться 7–19 млн л воды); используются химические присадки, загрязняющие поверхностные воды.

Производители сланцевого газа, вынуждены совершенствовать технологию ГРП, после того, как общественность подвергла критике добычу сланцевого газа этим методом.

В штате Нью-Йорк будет применяться метод безводного разрыва пласта. Новая технология, направлена на снижение загрязнения окружающей среды.

Суть метода состоит в том, что в пласт закачивается густой гель из сжиженного пропана, а не смесь

воды и химикатов. По словам канадских разработчиков GASFRAC Energy Services, метод обладает такой же эффективностью по разрыву пласта, но не несет никакого вреда для экологии – во время добычи гель превращается в пар и полностью выводится из пород. Если эффективность новой технологии будет доказана, то это позволит начать добычу сланцевого газа и нефти в графстве Тийога, Нью-Йорк.

Метод имеет как преимущества, так и недостатки. К главному преимуществу относится значительное повышение производительности при минимальном использовании воды. Недостатки: существует угроза взрыва, пропановый фрекинг обходится в полтора раза дороже за счет патентных отчислений для GASFRAC [7].

Компании совершенствуют технологии, уменьшения как экологических рисков, для увеличения добычи. Более распространенными становятся повторные гидроразрывы и симулафрак.

Повторное ГРП проводится для:

- улучшения проводимости трещин по сравнению с первоначальным гидроразрывом;
- увеличения геометрии трещин и улучшения контакта с пластом – пространственное и вертикальное;
- восстановления проводимости трещин, потерянной в результате вдавливания, циклического напряжения, деградации пропана, парафиновых и асфальтеновых отложений, засорения мелкими фракциями и пр.;
- улучшения профиля добычи скважин, стимуляции интервалов с пониженной проницаемостью;
- переориентация в результате изменения поля напряжения за счет изменений порового давления – повторный гидроразрыв часто контактирует с «новыми» породами.

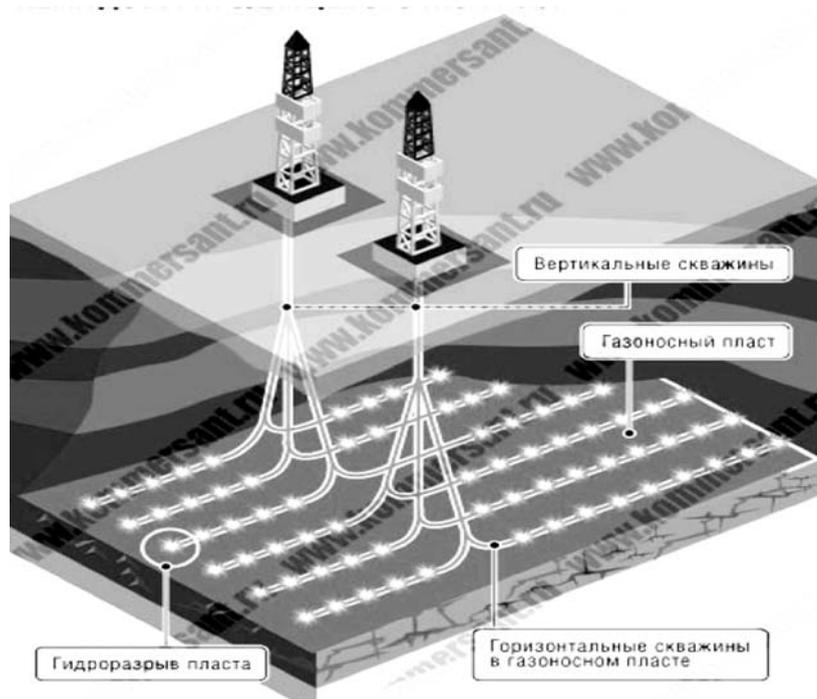


РИС. 7.

Схема расположения горизонтальных скважин с гидроразрывами

Метод «Симулфрак» представляет собой одновременное стимулирование двух соседних скважин.

Из-за сложной системы трещин существует значительная сообщаемость между соседними скважинами, разделенными сотнями метров. Если барьеры гидроразрыва позволяют, одновременный гидроразрыв повышает степень и интенсивность трещиноватости между боковыми стволами [1].

Несмотря на большие запасы сланцевого газа в мире, на преимущества разработки сланцевых месторождений для стран-импортеров природного газа, существуют значительные трудности в разработке таких месторождений. Так какие же проблемы сопровождают добычу газа из сланца?

Экономические, а именно требуется:

- густая сеть скважин;
- непрерывное бурение новых скважин, стоимость которых в среднем оценивается в 2,6–4 млн долларов (средний срок эксплуатации, пригодной для добычи сланцевого газа, составляет от несколько месяцев до 5 лет);
- большое количество буровых установок и насосных станций для обеспечения неоднократных гидроразрывов пластов (в течение года на каждой скважине может производиться от 3 до 10 ГРП).

Считается, что добыча газа из сланца не рентабельна, из-за высокой себестоимости. Однако оценки ресурсов сланцевого газа, особенно в той части, которая является технически извлекаемой, скорее всего, увеличатся по мере поступления новых данных от дополнительного бурения, по мере накопления опыта, как результат совершенствования технологий – себестоимость будет снижаться в США государством были

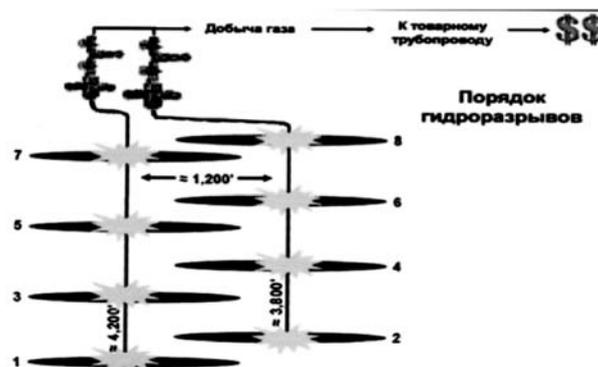


РИС. 8.

Пример технологии «Симулфрак»

введены налоговые льготы для повышения рентабельности разработки месторождений сланцевого газа.

В то же время при разработках месторождений сланцевого газа возникают проблемы такие как:

- потребление больших объемов воды;
- необходимость утилизации жидкости для ГРП (химикаты используемые при ГРП приводят к появлению ядовитых отходов и загрязнению поверхностных вод, а иногда и грунтовых вод);
- выбросы метана и углекислого газа;
- в регионах повышается сейсмическая активность, возникают землетрясения малой амплитуды;
- воздействие на ландшафт.

Экологические аспекты повлияли на решения ряда европейских стран ввести мораторий на добычу сланцевого газа и применение технологий гидроразрыва. Экологические стандарты в Европе выше, чем в США [5].

Страны, ограничившие добычу сланцевого газа

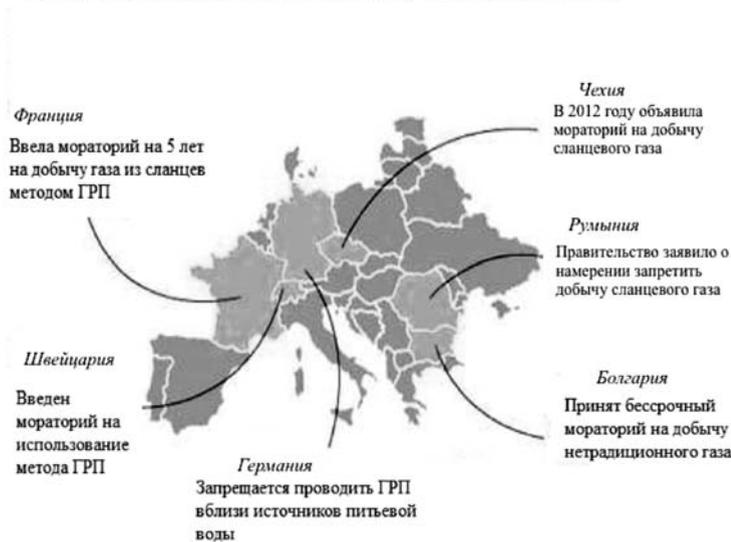


Рис. 9.

Страны, ограничившие добычу сланцевого газа

Из данной работы можно сделать следующие выводы:

- подход к решению проблемы сланцевого газа носит комплексный характер;
- в зависимости от типа, содержания и зрелости керогена, сланцы могут содержать существенные количества генерированной нефти и/или газа;
- дебиты скважин, выше пробуренных термогенных сланцах высокой зрелости, чем в скважинах, пробуренных в термогенных сланцах низкой зрелости или биогенных сланцах;
- подавляющее большинство скважин, бурящихся в настоящее время на сланцевый газ, горизонтальные;
- технологии разработки месторождений сланцевого газа постоянно совершенствуются для снижения себестоимости газа и экологического ущерба; «Сланцевая революция» приведет к увеличению конкуренции на газовом рынке, появление новых поставщиков. В балансе мирового спроса на энергоресурсы большую роль станут играть страны АТР, и прежде всего, Китай и Индия. Именно на них будут переориентироваться производители углеводородного сырья.

Для РФ освоение нетрадиционных источников УВ связано с необходимостью открытия его ресурсов, создания и развития новых технологий добычи и использования.

Главная задача, которая сегодня стоит перед Россией – отслеживать изменения, происходящие на мировом энергетическом рынке, включая изменения в энергобалансе, инфраструктуре, маршрутах поставок

и технологическом развитии отрасли и инвестировать в развитие ресурсной базы и реализацию инфраструктурных проектов, которые позволят ей удовлетворять потребность рынка в углеводородном сырье [4]. Ведь энергетика будущего многоукладна. Это не революция одного энергоносителя, а развитие для каждого региона своего.

Автор выражает глубокую благодарность доктору технических наук, профессору К.С. Басниеву за поддержку, сотрудничество и ценные обсуждения в процессе выполнения работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **ДЖИКИНС КРЕТИС.** Сланцевый газ: поиск, разведка, освоение.
2. **ДРЕБЕНЦОВ В.В.** Санкт-Петербургский международный экономический форум. 2012, 21–23 июня 2012.
3. **Жильцов С.С., Григорьянц В.Е., Ишин А.В.** Сланцевый газ. Симферополь: Таврия, 2012. 136 с.
4. **НОВАК А.В.** 49-я Мюнхенская конференция по безопасности, 02.2013 г.
5. **ТЕРЕНС Т.** Экологические аспекты добычи сланцевого газа (опыт США). 2012.
6. Газпром предупрежден // Ведомости. 2012, №202 (3216).
7. **CURRIE A.** Gas investing news from Wednesday May 9, 2012,
8. U.S Energy Information Administration.

Хисматуллина Лилия Гылюсовна,
аспирант, РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина

✉ 119991, г. Москва, ул. Академика Волгина, д. 2, корп. 2
тел.: +7 (967) 259-48-89, e-mail: khismatulina@mail.ru

УДК 553.985

ПЕРВОЕ В РОССИИ МЕССОЯХСКОЕ ГАЗОГИДРАТНОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ

Ф.А. АДЗЫНОВА

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ НЕФТИ И ГАЗА
ИМ. И.М. ГУБКИНА

Возможность существования газогидратных залежей в природных условиях была доказана работами выдающихся отечественных инженеров И.Н. Стрижова (1946 г.), М.П. Мохнаткина (1947 г.) и экспериментальными исследованиями Ю.Ф. Макогона, выполненными на кафедре разработки и эксплуатации газовых и газоконденсатных месторождений РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина 42 года назад. Научное открытие возможности существования природных газогидратов было зарегистрировано в Государственном реестре научных открытий (№75, 1971 г.) [1]. Авторы открытия – А.А. Трофимук, Н.В. Черский, В.Г. Васильев, Ю.Ф. Макогон, Ф.А. Трebin.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: газогидрат, нетрадиционные источники, альтернативная энергия, многолетнемерзлые породы, гидратообразование, Мессояха.

Толчком к активному изучению этого явления во всем мире послужило открытие первого в мире газогидратного месторождения – Мессояхского, расположенного на северо-востоке Западной Сибири на 250 км западнее г. Норильска. Позже газогидраты были обнаружены под многолетнемерзлыми породами (ММП) в северных районах России, Аляски и Канады. Было доказано, что процесс газогидратообразования на морском дне имеет глобальный характер – в шельфовых зонах и прибрежных склонах на небольших глубинах они встречаются практически на любых широтах.

К настоящему времени газогидраты, по данным геофизических исследований, обнаружены в 200 районах, расположенных вдоль восточного и западного побережий Северной и Южной Америки Евразийского континента, в частности Австралии, Индии, Японии, под Черным, Каспийским и Средиземным морями, озером Байкал и др. В 20 из них образцы гидрата были извлечены на поверхность.

THE FIRST IN RUSSIA MESSOYAKHSKOYE GAS HYDRATE FIELD: STATE AND PROSPECTS FOR DEVELOPMENT

F.A. ADZYNOVA

Possibility of the existence of gas hydrate deposits in the wild has been proven works of outstanding domestic engineers I.N. Strizhova (1946), M.P. Mohnatkina (1947) and experimental studies of YF Makogon, made at the department of development and operation of gas and gas condensate fields Gubkin Oil and Gas University. I.M. Gubkin 42 years ago. Scientific discovery possible existence of natural gas hydrates have been registered in the State Register of scientific discoveries (№ 75, 1971) [1]. The discovery team – A.A. Trofimuk, N.V. Cherskii, V.G. Vasilyev, J.F. Makogon, F.A. Trebin.

KEYWORDS: gas-hydrate, unconventional recourses, alternative energy, perennially frozen rocks, formation of hydrates, Messo-yakha.

Мессояхская структура имеет размеры 12 на 19 км по кровле долганской свиты и амплитуду 84 м. Средняя глубина залежи составляет 800 м; толщина мерзлых пород в пределах залежи – 440 м; начальное пластовое давление – 7,4 МПа; пластовая температура на уровне кровли составляет 11°С, на уровне ГВК – 14°С; этаж газоносности равен 76 м; глубина газодляного контакта составляет 802 м [1, 5, 8].

Само месторождение является неоднородной структурой. В разрезе залежи выделяются три продуктивных пласта, залегающих на глубинах приблизительно 807–827 м, 827–857 и 857–885 м. продуктивная зона представляет собой чередование проницаемых и непроницаемых пропластков, поэтому эффективная толщина является переменной величиной по площади. Неоднородность геологического строения данного месторождения приводит к неоднородности его физических свойств. В частности, коллекторские характеристики существенно меняются от скважины к скважине. По лабораторным исследованиям и

данным исследований скважин коэффициент открытой пористости составляет 16–38% (средняя – 25%), остаточная водонасыщенность изменяется в пределах 29–50% (средняя – 40%). Коэффициент проницаемости равен 1-1000мД (в среднем 300 мД) [12].

Пластовый газ Мессояхского месторождения по углеводородному составу относится к сухим газам. Основной компонент – метан (98–99%). Гомологи метана составляют сотые доли процента. Из не горючих компонентов в газе присутствует азот (0,117–0,270%), из кислых – углекислый газ (0,020–0,942%). Теплотворная способность – 7920 ккал/м³ (3314 Дж/м³).

С самого своего открытия и начала освоения это месторождение стало объектом интенсивного обучения. На нем были проведены геолого-промысловые испытания и опытно-промышленные работы. Было пробурено 11 разведочных и 50 эксплуатационных скважин. Несмотря на большой объем полученной информации, строение залежей и характер их насыщения были не совсем ясны. Выдвигались различные модели строения этого месторождения.

Принципиальным поворотным моментом в этом исследовании стало вышеупомянутое открытие. Согласно ему гидраты образуются в том случае, если пластовая температура (синяя линия на рисунке 1) меньше равновесной температуры гидратообразования на данной глубине (красная линия на рисунке 1).

Это означает, что вся область глубин, которая соответствует интервалу на этом графике, лежащему между точками пересечения температурных кривых, потенциальная возможность еще не означает их фактического существования. Для этого необходимы еще дополнительные условия, главным из которых является наличие проницаемого порового пространства и подпитка его восходящим потоком углеводородных газов. Геотермический градиент в интервале многолетнемерзлых пород 1°С на 100 м, а в продуктивном разрезе – 4,75°С/100 м [8]. Изложенные соображения дают возможность определить строение Мессояхского месторождения по характерным изломам геотермы и кривой температурного равновесия гидратов [5, 8].

Как видно из указанного графика, гидраты могут образоваться на глубинах, расположенных в интервале от 90 до 770 м (точки 1 и 2 на рис. 1). Собственно продуктивный слой лежит в нижней части этого интервала и занимает всего несколько десятков метров вплоть до первого излома геотермы (точка 3). Он насыщен, в основном, гидратами природного газа, а также свободным газом и остаточной водой. Значения коэффициента гидратонасыщенности по данным геофизических исследований ориентировочно составляют 20–50% (среднее – 35%) [9]. Выше, примерно до глубины в 440 м (точка 4), лежат малопроницаемые и малопроницаемые породы, в которых вода находится в жидкой фазе. Еще выше на глубинах от 450 до 90 м расположены многолетнемерзлые породы, которые

также обладают малой пористостью и малой проницаемостью. Эти слои обеспечивают месторождению необходимую непроницаемую покрывку, удерживающую газ. Область, начиная от уровня – 770 м и вплоть до газовой контактной (ГВК), заполнена, в основном, газом, а также остаточными гидратами и водой.

Другим косвенным доказательством наличия гидратной шапки является история разработки месторождения, прослеженная по всем скважинам. Месторождение было вскрыто эксплуатационными скважинами, однако информация по каждой из них отсутствует. Эта неопределенность сглаживается при осреднении. Суммарный по всей площади месторождения годовой отбор газа за каждый год разработки известен.

Согласно [5], разработку Мессояхского месторождения можно условно разделить на пять периодов. В период 1969–1971 гг. пластовое давление не снижалось ниже равновесного значения. Месторождение эксплуатировалось при газовом режиме.

Дальнейший отбор газа из месторождения – второй период (1971–1975 гг.). Пластовое давление на этом этапе разработки превышает проектное, причем величина превышения фактического пластового давления над проектным возрастает со снижением давления. Этот факт объясняется интенсификацией разложения гидрата.

Третий период (1976–1977 гг.) характеризуется тем, что объем отбираемого газа, выделившегося из гидрата. В период 1978–1981 гг. месторождение было переведено в режим консервации, который продолжался около четырех лет. Вследствие того, что пластовое давление к

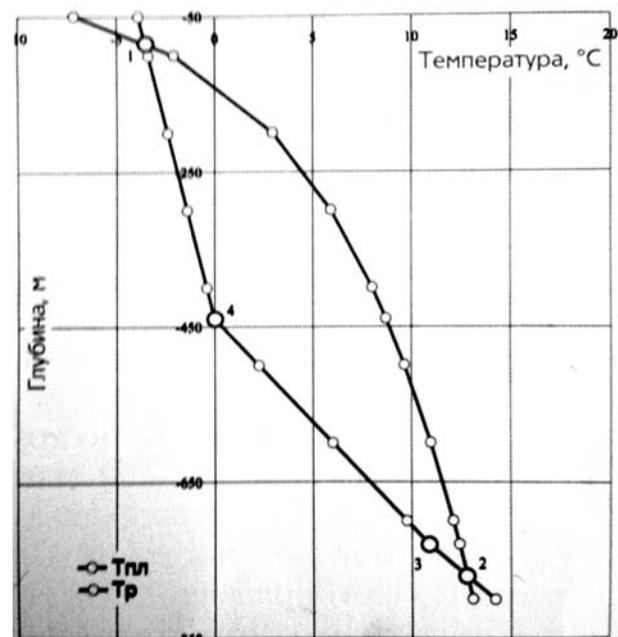


РИС. 1.

Пластовая температура и равновесная температура гидратообразования

периоду консервации было ниже равновесного, продолжалось интенсивное разложение гидратов в газогидратной залежи. Пластовое давление в период консервации возрастало, а достигнув величины равновесного давления для пластовой температуры, стабилизировалось.

С 1982 г. Отборы газа из месторождения не превышали 400 млн м³/год и пластовое давление оставалось практически постоянным. Объемы газа, отбиравшегося из залежи, примерно соответствовали объемам газа, поступившего за счет разложения гидрата.

Утверждается [8], что на 1 января 2001 г. суммарный отбор газа из месторождения составил 11,6 млрд м³, из которых 5,7 млрд м³ поступило в результате разложения гидратов при снижении пластового давления ниже равновесного. Средне – пластовое давление за 44 года разработки понизилось с 7,8 МПа до 6,2. При отсутствии гидрата, согласно проекту разработки, пластовое давление должно было понизиться до 4 МПа.

В 1968 г. на Мессояхском месторождении поставлены на баланс и утверждены в ГКЗ СССР (Протокол № 5429 от 05.07.1968 г.) запасы газа, подсчитанные Главным Тюменским геологическим управлением в объеме: по категории В – 24790 млн м³, по категории С₂ – 19440 млн м³. При подсчете запасов учитывался объем запасов гидратной шапки.

В результате пересмотра запасов газа, проведенных в 1975 г. (по состоянию запасов на балансе РГФ на 01.01.75 г.) объем гидратной шапки был исключен из запасов газа и уточненные запасы составили:

- по категории В – 19793 млн м³;
- по категории С₂ – списали.

Запасы по категории В также списали в количестве 5 млрд м³ по графе «Переоценка» как неподтвердившиеся в результате эксплуатационного разбуривания месторождения.

Проведенный в 2006 г. специалистами ООО НТЦ «Нефтегазтехносервис» оперативный подсчет запасов газа Мессояхского месторождения показал, что запасы газовой части пласта, подсчитанные объемным методом, составили 30,1 млрд м³. Запасы газа в гидратной шапке в данном подсчете равен 12022,1 млн м³. По моему мнению, запасы газа оцениваются в 42,9 млрд м³, что соответствует оценке 1968 г.

В настоящее время разработка месторождения законсервирована на 2–3 года. Ведутся геофизические исследования по установлению объема возможных остаточных запасов газовых гидратов и уточнение истории разработки месторождения по анализу фактических данных. По мнению геологов, проведение дополнительных геолого – разведочных работ может увеличить запасы месторождения примерно на 30%. С этой целью ведется подготовка к бурению дополнительных скважин и поиски оптимальных технологий воздействия на гидратосодержащие пласты с целью повышения степени извлечения из них газа.

В РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина ведется моделирование возможных вариантов доразведки и доразработки месторождения, что позволит подготовить дополнительные ресурсы газа для обеспечения энергетических нужд основных потребителей – г. Норильск и Группу компаний Норильский Никель. Дальнейшие перспективы разработки Мессояхского и других месторождений этого региона очевидно будут связаны с развитием газохимических производств на основе имеющейся сырьевой базы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимук А.А., Черский Н.В., Васильев В.Г., Макогон Ю.Ф., Требин Ф.А. Научное открытие СССР № 75 «Свойство природных газов в определенных термодинамических условиях находится в земной коре в твердом состоянии и образуют газогидратные залежи» // Открытия, изобретения, товарные знаки. 1970. № 10.
2. Макогон Ю.Ф. Гидраты природных газов. М.: Недра, 1974. 208 с.
3. Гусейн-Заде М.А., Макогон Ю.Ф. и др. Теоретические основы и рекомендации к разработке газогидратных залежей. Якутск: Якутский филиал СО АН СССР, 1975. 32 с.
4. Макогон Ю.Ф. Разработка газогидратной залежи // Газовая промышленность. 1984. № 3.
5. Гинсбург Г.Д., Новожилов А.А. О гидратах в недрах Мессояхского месторождения // Газовая промышленность. 1997. № 2, С. 19–21.
6. Истомина В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. М.: Недра, 1992. 236 с.
7. Макогон Ю.Ф. Природные газогидраты: открытие и перспективы // Газовая промышленность. 2001. № 5. С. 10–16.
8. Щebetов А.В. Создание методов прогнозирования эффективности технологий разработки газогидратных залежей. Автореферат диссертации канд. техн. наук. М., 2007. 24 с.
9. Терешенков Г.М., Моргун М. Неизвестная Мессояха // Факел Таймыра. 2009. № 2.
10. COLLETT T.S. Geologic comparison of the Prudhoe Bay – Kuparuk River (U.S.A.) and Messoyakha (U.S.S.R.) gas hydrate accumulations // SPE 24469.
11. MAKOGON Yu.F. Natural gas hydrates. Tulsa: PennWell Publishing Co, 1997. 482 p.
12. KRASON J. Messoyakha gas field (W. Siberia) A model for development of the methane hydrate deposits of Mackenzie delta // Ann. New York Acad. Sci. 2000. Vol. 912. P. 173.

Ф.А. Адзынова,
ассистент РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина
✉ 119991, г. Москва, Ленинский пр-т., д. 65,
тел.: +7 (916) 466-61-41, e-mail: adzynova@gmail.com

УДК 62-622:622.272

ПОДЗЕМНОЕ ХРАНЕНИЕ ВОДОРОДА

Н. П. ФЕДОРОВА

Институт проблем нефти и газа РАН

Начался этап интенсивного развития водородной энергетики в мире, вызванный наступающим истощением органических ресурсов углеводородов. Технологии разномасштабного производства водорода достаточно хорошо освоены и имеют практически неограниченную сырьевую базу. Однако, низкая плотность газообразного водорода, низкая температура его сжижения, более широкие пределы взрываемости и более высокая температура воспламенения по сравнению с углеводородами ставят на первый план проблемы разработки эффективных и безопасных систем хранения водорода. В статье рассматривается возможность создания водородного ПХГ, сделан расчет по основным параметрам эксплуатации гипотетического высокотемпературного водородного ПХГ с учетом динамики влагонасыщенности водорода.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водород, ПХГ, нетрадиционные источники, альтернативная энергия, подземная выработка-емкость, солевые отложения, водоносный пласт.

Использование органического топлива для покрытия всё возрастающей потребности в энергии связано с глобальным загрязнением окружающей природной среды, изменением воздушного и водного баланса, угрозой парникового эффекта и кислородного голода для земной цивилизации. Поэтому возникает крайняя необходимость в постепенной замене органического топлива новым универсальным энергоносителем. В этой связи водород рассматривается как один из альтернативных источников энергии будущего.

Водород является и горючим, и химическим сырьем. Переход транспорта, промышленности и бытовых потребителей на водород не требует коренных изменений в современной технологии использования топлива. Важным является то, что использование водорода не меняет не только водного баланса планеты, но и водного баланса отдельных регионов, где будут расположены крупные системы для разложения воды термохимическим способом или электролизом. При сжигании водород вновь в виде воды возвращается в кругооборот природы. Благоприятно складывается ситуация при использовании водорода для получения атомной энергии.

HYDROGEN – FUTURE ENERGY SOURCE UNDERGROUND STORAGE OF HYDROGEN

N. P. FEDOROVA

The authors believe that a phase of intensive hydrogen power development has begun in the world. Different-scale production technologies of hydrogen are well studied and have an unlimited source of raw materials. However, the low density of hydrogen gas, the lowest temperature of its liquefaction larger explosive limits and higher ignition temperature compared with hydrocarbons put to the forefront the problem of the development of efficient and safe hydrogen storage systems. The article describes the ability to create hydrogen Underground Gas Storage (UGS), made the calculation of the main exploitation parameters of a hyperthermal hydrogen UGS considering the dynamics water saturation of hydrogen.

KEYWORDS: hydrogen, underground gas storage, unconventional recourses, alternative energy, mine working storage, saline deposits, water producing formation.

Наиболее перспективными направлениями в водородной технологии являются синтез аммиака и метанола, синтез газообразных и жидких углеводородов, гидрогазификация твёрдых горючих, гидропереработка и очистка жидких горючих, металлургия, использование водорода в топливных элементах (ТЭ) и двигателях внутреннего сгорания, производство авиационного и ракетного горючего, а также горючего для газовых турбин [5].

Технологии разномасштабного производства водорода достаточно хорошо освоены и имеют практически неограниченную сырьевую базу. Однако низкая плотность газообразного водорода, низкая температура его сжижения, более широкие пределы взрываемости и более высокая температура воспламенения по сравнению с углеводородами в сочетании с негативным воздействием на свойства конструкционных материалов ставят на первый план проблемы разработки эффективных и безопасных систем хранения водорода – именно эти проблемы, сдерживающие развитие водородной энергетики и технологии в настоящее время.

В настоящее время реализованы следующие физические методы, хранения водорода:

- в газовых баллонах, в газгольдерах (сжатый газообразный водород при давлении от 40 до 100 МПа);
- в стационарных и транспортных криогенных контейнерах (жидкий водород под давлением до 20 МПа);
- металлгидриды (абсорбция в объеме материала);
- адсорбционный (цеолиты и родственные соединения, активированный уголь, углеводородные наноматериалы);
- резервуары;
- подземное хранение.

Эффективность применения того или иного метода аккумуляции водорода определяется в результате анализа функционирования всей цепочки от производства до потребления, включая хранение, транспорт и распределение.

Подземное хранение водорода необходимо для регулирования суточных, недельных, месячных и сезонных неравномерностей его потребления и производства при переходе к промышленному использованию водорода. Неравномерность потребления газа обуславливается спецификой производства, укладом жизни человека и особенностями климата различных районов страны.

Для крупномасштабного хранения газообразного водорода целесообразно использовать подземные хранилища, созданные:

- истощенных нефтяных или газовых месторождениях;
- в ловушках пластовых водонапорных систем (по примеру хранения природных газов и углеводородных жидкостей);
- подземных емкостях в солевых отложениях;
- в отложениях многолетнемерзлых пород.

Естественно эти способы могут эффективно применяться, если соответствующие объекты сооружаются вблизи крупных потребителей водорода.

Водород, в силу меньшей вязкости и плотности, обладает большей подвижностью, чем природный газ. Поэтому утечки водорода через различные уплотнения или покрышку хранилища могут происходить в большей степени [2].

ХРАНЕНИЕ ВОДОРОДА В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

С целью установления возможных отличий фильтрационных течений водорода от фильтрационных течений природного газа в пористой среде проведены экспериментальные исследования и осуществлено математическое моделирование ряда задач. Проведены опыты по фильтрации различных газов в пористой среде. Результаты, получаемые при использовании водорода, сравниваются с данными, получаемыми при использовании азота. Азот многими исследователями-экспериментаторами рассматривается в качестве аналога природного газа с большим содержанием метана.

Результаты опытов показали, что при низких скоростях фильтрация водорода, также как и природного газа, описывается законом Дарси. С увеличением скорости фильтрации возрастает роль инерционных потерь. В этом случае процесс фильтрации водорода подчиняется двучленному закону сопротивления.

За счет меньшей вязкости водорода коэффициент фильтрационного сопротивления при линейном члене в уравнении притока снижается почти в два раза по сравнению с азотом. Значение коэффициента проницаемости пористой среды, определенное по результатам опытов по фильтрации водорода, в среднем оказалось на 7% выше, чем при фильтрации азота.

Результаты опытов показали, что явление проскальзывания газа для исследуемого ядра практически исчезает при давлении 10 кгс/см². При давлениях ниже 10 кгс/см² коэффициент проницаемости ядра увеличивается в большей степени для газа, молекулы которого имеют большую длину свободного пробега, т.е. для гелия. Увеличение коэффициента проницаемости при низких давлениях происходит в результате того, что размер капилляра становится соизмеримым со средней длиной свободного пробега молекул.

Хранение газообразного водорода в выработанных месторождениях нефти и газа будет сопровождаться загрязнением водорода углеводородами и пластовыми водами и, следовательно, необходимостью строительства дорогостоящих установок очистки и осушки водорода, а также значительными его потерями в пласте.

Сравнение физических свойств H₂, CH₄, CO₂ приведено в таблице 1 [3].

В ряде случаев целесообразно хранить смесь водорода с углекислым газом (Киотский протокол). Значение коэффициента динамической вязкости такой смеси выше, чем у чистого водорода и близок к значению коэффициента динамической вязкости метана (рис. 1).

ХРАНЕНИЕ ВОДОРОДА В ВОДОНОСНЫХ ПЛАСТАХ

При создании и эксплуатации подземного газохранилища в водоносном пласте имеют место циклические процессы вытеснения воды газом и газа водой. От эффективности этих процессов непосредственно зависят такие важные технологические показатели, как соотношение активного и буферного объемов газа, потери микро- и макрозаемленного газа, темпы и количество выбывающих из эксплуатации обводняющихся скважин.

Водоносные пласты, используемые для создания подземных газохранилищ, имеют сложную структуру (рис. 2). Поверхностное натяжение на границе раздела фаз предопределяет интенсивность капиллярных процессов при вытеснении жидкости газом и газа жидкостью, так как величина капиллярного давления непосредственно зависит от поверхностного натяжения.

ТАБЛИЦА 1.

Параметр		H ₂	CH ₄	CO ₂
Молекулярные	Масса	2,016	16,043	44,011
	объем, 10 ⁻³ м ³	22,43	22,36	22,26
Плотность, кг/м ³	при T= 273,16 K	0,0899	0,717	1,977
	при T=293,16 K	0,0837	0,668	1,842
Критические параметры	плотность, кг/м ³	33,25	162	304,2
	температура, K	1,325	190,55	7,527
Растворимость в воде	при T=273 K	0,0215	0,0556	1,713
Температура кипения, K		20	111,86	194,7
Вязкость, 10 ⁷ Па·с, при T=250 °C и P _{атм}		108,5	110,8	148,6
Теплоемкость при T =273,16 K, Дж/кг·град	Cp = const	3,3904	0,5172	0,1946
	Cv = const	2,4045	0,39361	0,1946
Теплопроводность при T=273,16 K, Вт/м·град		0,148	0,026	0,012

При эксплуатации подземных газовых хранилищ температура пласта изменяется незначительно и остается практически постоянной и равной начальной [2]. Однако хранилища создаются на разных глубинах, поэтому для каждого конкретного газохранилища изменение величины коэффициента поверхностного натяжения определяется текущими значениями пластового давления в циклах отбора и закачки газа.

Для водорода капиллярное давление выше, чем для метана при прочих равных условиях. Следовательно, при закачке этих газов в водоносный пласт эффективность вытеснения воды их пористой среды будет ниже, чем при закачке природного газа. Отрицательно влияние капиллярных сил при извлечении закачанного газа больше скажется при отборе водорода по сравнению с метаном.

Из графиков, изображенных на рис. 3, следует, что при всех температурах растворимость водорода повы-

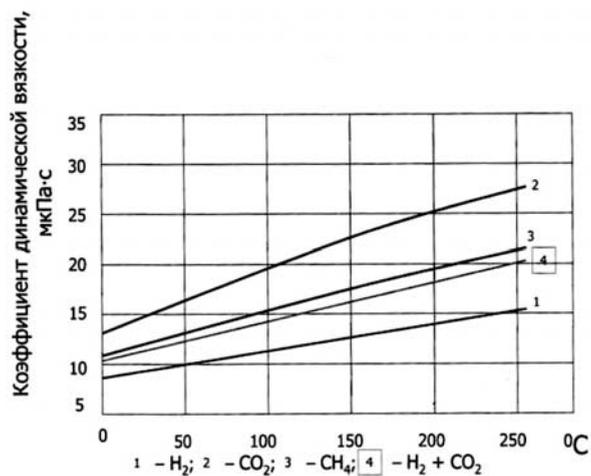


Рис. 1.

Диаграмма зависимости коэффициента динамической вязкости от температуры при атмосферном давлении для H₂, CH₄, CO₂ и для смеси H₂ с CO₂

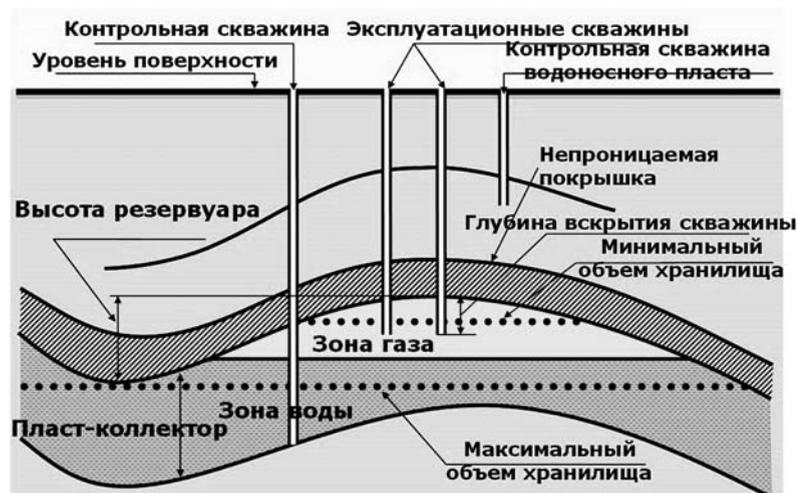


Рис. 2.

Пример подземного газохранилища в водоносном пласте

шается с ростом давления, но по-разному [4]. Сопоставление растворимостей водорода и метана показывает, что в пределах рабочих температур (27–80°С) растворимость водорода меньше растворимости метана. Это свидетельствует о том, что при нагнетании водорода в пласт его «потери» от растворения в остаточной воде уступают «потерям» метана.

Следует иметь виду, что в циклах закачки возможные утечки водорода за пределы ловушки могут оказаться больше, чем в случае природного газа. В циклах же отбора для хранилища водорода будет присуще снижение активного объема.

Важно учитывать гравитационный фактор. В реальных хранилищах данный фактор предопределяет закономерности поведения границы раздела газ-вода в циклах закачки и отбора газа (вследствие большой разности плотностей газа и пластовой воды).

Сопоставление показателей работы хранилищ водорода и метана показало, что водород ввиду его меньшей плотности в большей степени растекается по кровле пласта, чем метан [2]. К моменту выхода хранилища на циклическую эксплуатацию отличия в положении границы раздела водород-вода и метан-вода увеличиваются.

На форму границы раздела водорода с водой можно воздействовать за счет размещения эксплуатационно-нагнетательных скважин по площади хранилища.

ХРАНЕНИЕ ВОДОРОДА В ПОДЗЕМНЫХ СОЛЕВЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ

При покрытии пиковых потребностей наиболее перспективным является хранение водорода в подземных резервуарах, сооружаемых в отложениях каменной соли. Оно основано на их практической непроницаемости, способности выдерживать значительные избыточные давления (в интервале глубин заложения выработки-емкости 400–1200 м избыточное давление может достигнуть 7–20 МПа соответственно) и высокие скорости закачки и отбора газа, что необходимо для принятых режимов эксплуатации, а также химической инертности каменной соли к хранимым продуктам. Практическая непроницаемость, способность выдерживать значительные избыточные давления, возможность эксплуатации хранилища в условиях быстрой смены режимов отбора и закачки газа, а также химическая инертность каменной соли к хранимым продуктам делают наиболее перспективным хранение водорода в подземных солевых отложениях для покрытия пиковых потребностей.

Как показал опыт эксплуатации ПХГ в отложениях каменной соли, изменение параметров хранилища в процессе эксплуатации происходит монотонно и достаточно медленно [6].

Стоимость сооружения хранилищ в месторождениях каменной соли по зарубежным оценкам в 1,4–1,8

P	Температура, °С													
	0	10	20	25	30	40	50	60	70	75	80	90	100	
МПа														
2,53	536,3			436			406,7			400,1			401,5	
5,07	1076	978,3	904,8	867	851,8	817,6	809	799,2	811,6	810	836,3	871,6	911,6	
10,13	2131	1935	1790	1728	1690	1628	1612	1603	1629	1643	1675	1734	1805	
20,27	4187	3796	3510	3390	3314	3197	3165	3156	3210	3240	3300	3412	3541	
40,53	8009	7302	6785	6570	6432	6223	6166	6155	6255	6308	6416	6618	6841	
60,80	11626	10620	9887	9580	9387	9091	9017	8997	9141	9220	9372	9662	9994	
81,06	15013	13760	12840	12460	12210	11840	11735	11720	11900	12003	12190	12560	12980	
101,33	18001	16920	16000	15700	15340	14800	14404	14390	14460	14686	14720	15170	15775	

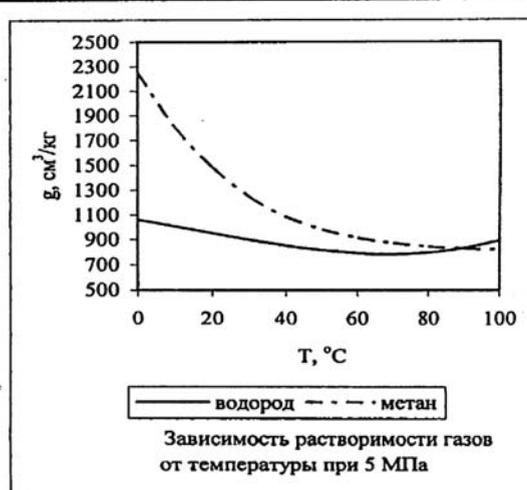
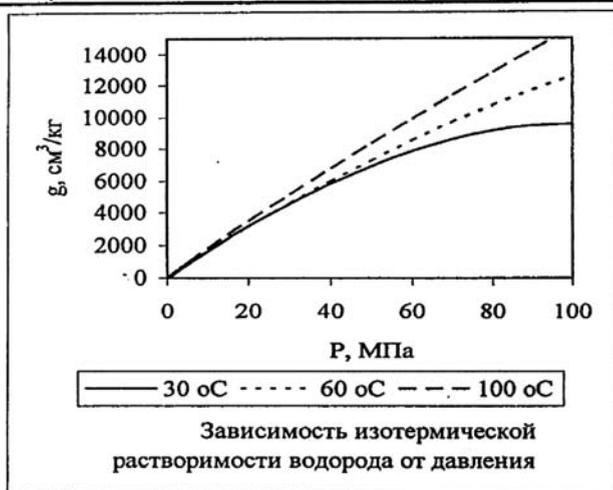


Рис. 3.

Растворимость водорода в воде. Зависимость изотермической растворимости водорода в воде от давления и изобарической растворимости водорода и метана при различных температурах

раза превосходит стоимость сооружения хранилища того же объема в выработанных нефтяных и газовых месторождениях, но эксплуатационные затраты при хранении водорода в резервуарах, созданных в каменной соли, существенно ниже [4].

Примеры некоторых подземных хранилищ в каменной соли представлены в таблице 2 [1].

Подземные месторождения каменной соли различной формы залегания широко распространены на территории нашей страны. По оценкам специалистов, площадь распространения месторождений достигает нескольких десятков и даже сотен тысяч квадратных километров (например, Подмосковное – 50 тыс. км²). Месторождения каменной соли встречаются в Прикаспийском регионе, центральной части России, на территориях Тульской, Белгородской и Иркутской областей, а также на Урале, в Якутии и других районах страны.

Перспективным направлением использования подземных резервуаров, создаваемых в каменной соли, для покрытия неравномерностей энергопотребления, является накопление и хранение водорода. Технико-экономические расчеты, проведенные в России и за рубежом, показали, что при суточном, недельном и месячном режимах производства водорода его хранение в подземных резервуарах, созданных в каменной соли, значительно эффективнее, чем хранение в наземных резервуарах в газообразном или жидком состоянии.

В настоящее время есть опыт эксплуатации подземного хранилища водорода, созданного в каменной соли. В Биллингеме (Англия) на глубине 365 м создано подземное хранилище водорода в каменной соли, состоящее из трех резервуаров вместимостью по водороду 2,2 млн м³ каждый, с давлением хранения 5 МПа.

Комбинированная технология сооружения подземной выработки-емкости.

Особенностью комбинированного способа создания выработок-емкостей (рис. 3) является последовательное применение двух технологических схем сооружения выработок-емкостей, осуществляемых по вариантам растворения массива каменной соли слоями снизу-вверх и сверху-вниз. Основная часть выработки-емкости сооружается с применением технологической схемы создания выработок-емкостей ступенями снизу-вверх без перемещения подвесных колонн (заглубленная водоподача). Потолочина выработки-емкости формируется с применением технологической схемы сооружения выработок-емкостей ступенями сверху-вниз и также без перемещения подвесных колонн.

Эта технология позволяет надежно формировать выработку-емкость проектных размеров и получать высококонцентрированный рассол.

Принципиальная возможность хранения газообразного водорода в соляных кавернах, создаваемых путём растворения соли водой через буровые скважины, показана на рис. 5.

ВЫВОДЫ

Водород универсален, он является и горючим, и химическим сырьем. Транспортирование водорода по примерной оценке только на 20–50% дороже транспортирования природного газа. Потери энергии при компримировании водорода при его транспортировании по трубопроводам составляют примерно 1% переносимой энергии, а стоимость транспортирования равна примерно 10% стоимости передаваемого газа. Водород удобен при хранении, дает возможность гибкого реше-

ТАБЛИЦА 2.

Наименование (место размещения)	Государство	Объём подземного резервуара, тыс.м ³	Интервал заложения, м	Продукт хранения
Яр-Бишкадакское (Башкирия)	РФ	20-75	550-750	Светлые нефтепродукты
Камеры Яр-Бишкадакское	РФ	90-140	750-800	Светлые нефтепродукты
Кашкарское 1 (башкирия)	РФ	50-200	540-750	Сжиженные газы
Кашкарское 2 (Башкирия)	РФ	35-70	540-750	Этилен
Казаякское (Башкирия)	РФ	80-220	410-540	Светлые нефтепродукты
Зиминское	РФ	17-22	1300-1350	Этилен
Оренбургское	РФ	20-75	550-750	Гелиевый конденсат
Астраханское	РФ	90-140	750-800	Газовый конденсат
Площадка №5	РФ	50-200	540-750	Светлые нефтепродукты
Объект 630	Украина	35-70	540-750	Светлые нефтепродукты
Объект 102	Украина	80-220	410-540	Светлые нефтепродукты
Хранилище природного газа	Армения	17-22	1300-1350	Природный газ
Хранилище бутана	Армения	50	850-970	Сжиженный газ

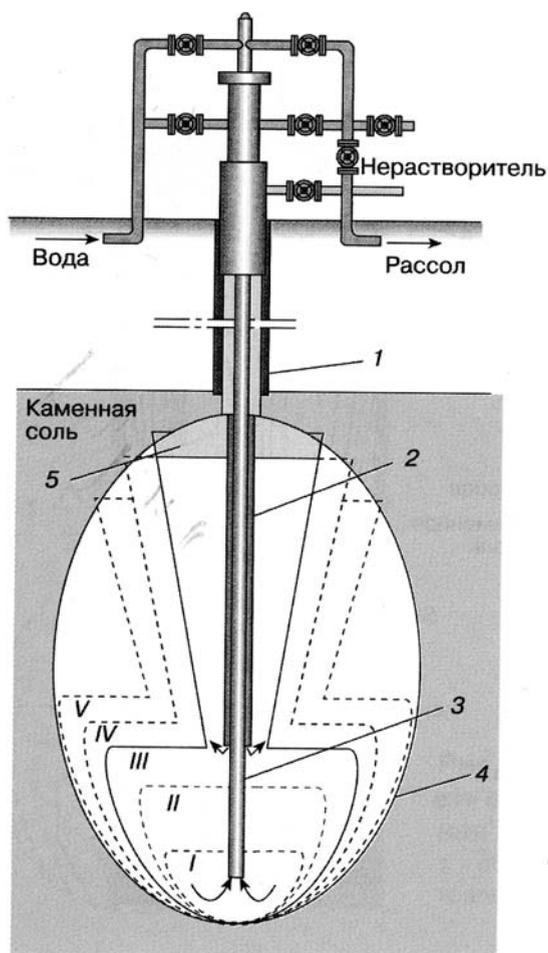


Рис. 4.

Схема комбинированного метода сооружения подземной выработки-емкости: I-V – ступени; 1 – обсадная колонна труб; 2 – внешняя подвесная колонна труб; 3 – центральная подвесная колонна труб; 4 – контур проектной выработки-емкости; 5 – нерастворитель

ния проблемы отбора энергии в условиях переменной потребности в нем, имеет высокую теплоту сгорания.

При значительном по масштабам производстве водорода потребуется осуществлять его подземное хранение.

Наиболее подходящими для водородных ПХГ будут отложения каменных солей, выработанные газовые и газоконденсатные месторождения, характеризующиеся различными температурами, давлениями и минерализацией остаточной воды, а также водоносные структуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. БАСНИЕВ К.С., БУЛАТОВ Г.Г., ЗАКИРОВ С.Н., ДАГУЖИЕВ Р.Ю. Исследование возможностей создания подземных хранилищ водорода. РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, ИПНГ РАН. М., 2006.
2. БУЛАТОВ Г.Г. Подземное хранение водорода. Диссертация на соискание ученой степени кандидата наук. М., 1979.
3. Водород. Свойства, получение, применение, транс-

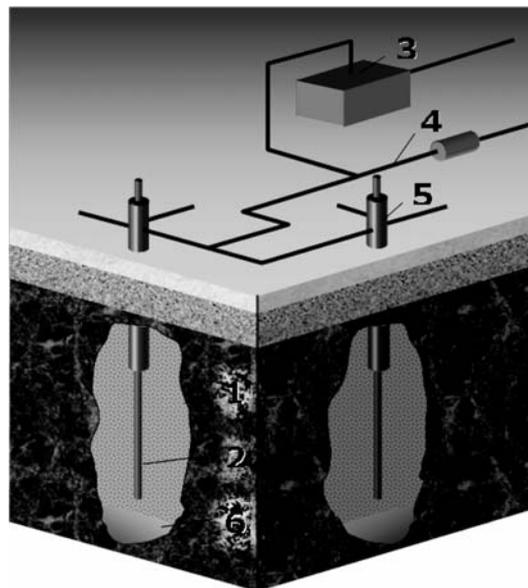


Рис. 5.

Принципиальная возможность хранения газообразного водорода в соляных кавернах, создаваемых путем растворения соли водой через буровые скважины.

Схема: 1 – подземная емкость; 2 – центральная колонна; 3 – компрессорная станция; 4 – шлейф к потребителю; 5 – фонтанная арматура; 6 – остаточный рассол.

портировка, хранение. Справочник. М.: Химия, 1989. 671 с.

4. КАЗАРЯН В.А. Подземное хранение газов и жидкостей. М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина. Ижевск: Институт компьютерных исследований. 2006.
5. КУЗЫК Б.Н., ЯКОВЕЦ Ю.В. Россия: стратегия перехода к водородной энергетике. М.: Институт экономических стратегий, 2007.
6. Подземное хранение углеводородов в солевых отложениях. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2006. 464 с.

Федорова Надежда Павловна,
аспирант Института проблем нефти и газа РАН

☎ 1174376, г. Москва, ул. Академика Волгина, д. 2, корп. 2,
тел.: +7 (967) 033-19-00, e-mail: nf_rhpc@yahoo.com

УДК 622.775

ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОСТРУЙНЫХ АППАРАТОВ В ТЕХНОЛОГИИ ГИДРОРАЗРЫВ ПЛАСТА

Н.Г. Малухин, И.У. Халимов

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГЕОЛОГО-
РАЗВЕДОЧНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ СЕРГО
ОРАДЖОНИКИДЗЕ

Водоструйные аппараты используются во многих отраслях промышленности: горной, строительной, инженерной химии, гидрологии и др.

Водоструйный аппарат не имеет движущих механических частей, подает в напорный трубопровод достаточно крупный материал и способен создавать в напорном транспортном трубопроводе необходимые напоры (давление) для создания условий для гидроразрыва продуктивного пласта и надежного закрепления (расклинки) образовавшихся трещин.

Ключевые слова: скважинное подземное выщелачивание; гидравлический напор, кольматация скважин, производительность технологических скважин, водоструйный аппарат, гидроразрыв пласта.

Для закрепления трещин гидроразрыва обычно используются буровые насосы типа БН-32, с помощью которого в скважину подается расклинивающий материал – капроновая крошка. Известно, что буровые насосы подают в скважину гомогенные буровые растворы – бентониты для выноса шлама при бурении. Использование буровых насосов для транспортирования зернового материала связано с частыми закупорками проточной части и последующей их поломки.

Наиболее эффективно осуществлять напорную подачу в скважину крупного зернового материала для расклинивания трещин гидроразрыва, с использованием водоструйных аппаратов – гидроэлеваторов.

Водоструйный аппарат не имеет движущих механических частей, подает в напорный трубопровод достаточно крупный материал и способен создавать в напорном транспортном трубопроводе необходимые напоры (давление) для создания условий для гидроразрыва продуктивного пласта и надежного закрепления (расклинки) образовавшихся трещин.

SUBSTANTIATION FOR THE USE OF WATER-JET DEVICES IN HYDRAULIC FRACTURING TECHNOLOGY

N.G. MALUKHIN, I.U. HALIMOV

Waterjet machines used in many industries: mining, construction, engineering chemistry, hydrology.

Waterjet machine has no moving mechanical parts, falls into the discharge line is big enough material and is able to create in the pressure transport pipeline pump head (pressure) to create conditions for the hydraulic reservoir and properly secured formed cracks.

KEYWORDS: *situ leaching, hydraulic head, mudding wells, the performance of technology wells, water jet machine, hydraulic fracturing.*

Водоструйные аппараты используются во многих отраслях промышленности: горной, строительной, инженерной химии, гидрологии и др.

В связи со сложными специфическими для данной технологии способом закрепления трещин твердым материалом, выявилась необходимость в многофакторном анализе эксплуатационных возможностей такой технологической схемы гидроразрыва пласта с использованием водоструйных аппаратов. Как показали исследования водоструйных аппаратов, в настоящее время не существует надежной методики проектирования таких аппаратов, не только для специфических условий гидроразрыва пласта (ГРП), но и для значительно более простых эксплуатационных требований их использования. Возникла необходимость проведения экспертной оценки достоверности и надежности основных практических рекомендаций и базовых положений теории использования водоструйных аппаратов коллективами научно-исследовательских лабораторий и отдельных ученых, достигших в этом

направлении передовых позиций в мире как в практическом, так и теоретическом направлении.

Наиболее существенный путь практического прогноза эксплуатационных возможностей использования водоструйных аппаратов для закрепления трещин при ГРП является аналитическая оценка энергетического баланса активного и пассивного потоков, а также сил сопротивления (трения), возникающих в динамике процесса эжектирования и нагнетания.

Причем, основа аналитического выражения процесса струйного нагнетания представлена единым принципом баланса всех действующих сил с учетом:

- уравнения неразрывности разнофазных потоков;
- закона сохранения энергии в различных вариациях (изменение кинетической энергии, количества движения, полных давлений, во взаимосвязи с градиентом сил, действующих в поперечном сечении проточной части).

Сложность в обосновании расходно–напорных параметров водоструйного аппарата заключается в том, что при использовании их в технологии ГРП, необходимо выявить не просто рабочую характеристику этого аппарата, а определить месторасположение на ней оптимальных режимов, как по напору нагнетания, так и по его эжектирующей способности.

При работе водоструйного аппарата при заданных начальных параметрах рабочего и эжектируемого потоков в зависимости от напора нагнетания выделяются три режима его эксплуатации:

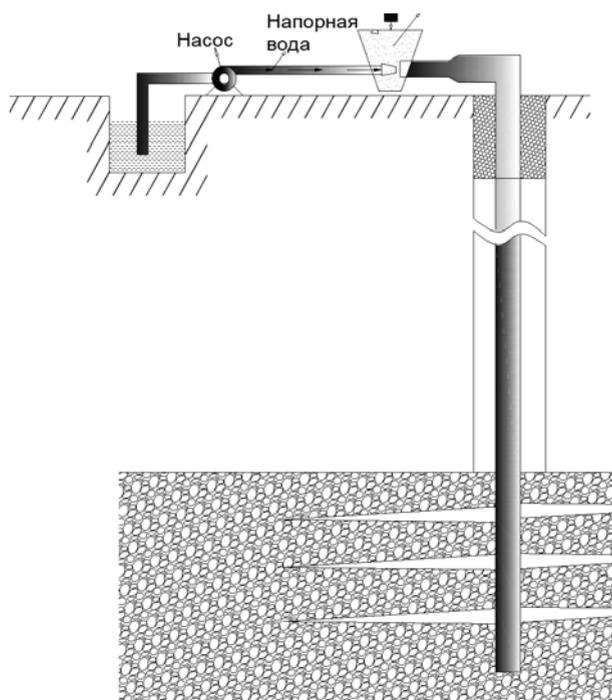


Рис. 1.

Схема водоструйного аппарата в технологии гидроразрыва пласта (ГРП)

а. режим максимальной эжектирующей способности.

Изменение напора нагнетания водоструйного аппарата, (увеличение, в частности) не влияет на эжектирующую способность этого аппарата. Наблюдается режим развитой кавитации. Этот режим характеризуется довольно устойчивой работой водоструйного аппарата как по напору нагнетания, так и по эжектирующей способности;

б. оптимальный режим работы водоструйного аппарата.

Наблюдаются устойчивые режимы затухания (задавливания) кавитации, но появились первые признаки уменьшения эжектируемого расхода;

в. режим затухания кавитации.

Режим характеризуется увеличением высоты нагнетания с одновременным уменьшением эжектируемого расхода. Увеличение напора нагнетания (что необходимо для гидроразрыва пласта) приводит к перемещению верхней границы камеры разряжения (очага кавитации) в сторону камеры смещения при одновременном уменьшении эжектируемого потока.

Предлагаемая методика расчета водоструйного аппарата основана на работе этого аппарата в оптимальном режиме (при максимальном КПД). Т.е. обосновывается проектирование водоструйного аппарата с максимальной эжектирующей способностью.

Ранее было установлено [1], что максимальное КПД водоструйного аппарата соответствует соотношению

$$\eta_{\max} = \frac{1}{4} ab \quad , \quad (1)$$

где η_{\max} максимальное КПД водоструйного аппарата; a, b отрезки, отсекаемые расходно–напорной характеристикой водоструйного аппарата на координатных осях.

Б.Э. Фридман [2] в результате проведенных опытов установил, что отрезок отсекаемый расходно–напорной зависимостью водоструйного аппарата $\beta = f(a)$ на координатной оси β связан с основным геометрическим параметром m следующим образом:

$$b = 0.51b \cdot m + 0.34 \quad . \quad (2)$$

На основании многочисленных опытных данных Фридманом Б.Э. установлено, что отрезок отсекаемый зависимости $\beta = f(a)$ на оси a равен

$$\alpha = \frac{2.346m + 1.547}{m^2 + 2m} \quad . \quad (3)$$

Используя выражения (2) и (3), а также установленное ранее нами правило отыскания оптимального режима эксплуатации водоструйного аппарата

$$\alpha = \frac{\alpha}{2} \text{ и } \beta = \frac{\beta}{2}, \text{ а КПД } \eta_{\max} = \frac{ab}{4} \quad (4)$$

$$\eta_{\max} = \frac{1}{4} \cdot \frac{(2.348m + 1.547)(0.516m + 0.34)}{m^2 + 2m} \quad (5)$$

Выражение (5) определяет максимальное значения КПД (η_{\max}) для водоструйного аппарата при новом значении основного геометрического параметра m :

$$\begin{aligned} (\alpha \cdot \beta)' = & [2.346(0.516m + 0.34) + \\ & + 0.516(2.348m + 1.547)(m^2 + 2m)] - \\ & - (2.348m + 1.547)(0.516m + 0.34)(2m + 2) = 0. \end{aligned}$$

Взяв производную по выражению (5) и приравняв ее к нулю, определим оптимальное значения основного геометрического параметра $m_{\text{опт}}$ среди η_{\max} при множестве значений m .

После несложных алгебраических преобразований, получим

$$0.83m^2 - 1.05m - 1.05 = 0 \quad ,$$

$$m = \frac{1.05 + \sqrt{1.1 + 3.5}}{2 \cdot 0.83} = \frac{3.17}{1.66} = 1.91 \quad .$$

Таким образом, оптимальное значения основного геометрического параметра m , равно

$$m = \frac{F_2}{F_1} = 1.91 \quad \text{и} \quad \frac{D_2}{D_1} = 1.38 \quad .$$

Значение основного геометрического параметра $m = 1.91$ соответствует работе водоструйного аппарата с максимально возможным КПД (η_{\max}) среди всех возможных типоразмеров m .

Подставив полученное значение основного геометрического параметра $m = 1.91$ в выражение (5), получим практически достижимый КПД водоструйного аппарата:

$$\alpha \cdot \beta = \frac{1}{4} ab, \quad m = 1.91 \quad .$$

Используя оптимальное значение относительного коэффициента напора β , получим напорное соотношение водоструйного аппарата при

$$\begin{aligned} m_{\text{опт}} &= 1.91, \\ \beta &= \frac{1}{m} = \frac{1}{1.91} = 0.524. \end{aligned}$$

Таким образом, чтобы создать в зоне ГРП необходимый напор, например, $H_2 = 400$ м (40 атм.), давление на водяном насосе должно соответствовать

$$H_0 = \frac{H_2}{0.524} = \frac{400}{0.524} = 763 \text{ м или } 76.3 \text{ атм.}$$

ВЫВОД

Предлагаемая методика расчета водоструйного аппарата основана на работе этого аппарата в оптимальном режиме (при максимальном КПД). Т.е. обосновывается проектирование водоструйного аппарата с максимальной эжектирующей способностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. МАНЬЖОВ И.А. Методика расчета струйных насосов гидроэлеваторов // Тр. ТИСИ. 1968. Т. 14, С. 323–333.
2. МУСТАФИН Х.Ш. Исследование управления водяного эжектора // Тр. ВНИИНефуд. Нефудные строительные материалы. 1970, №28. С. 29–36.
3. ФРИДМАН Б.Э. Гидроэлеваторы. М.: Машгиз, 1960. С. 323.

Николай Григорьевич Малухин,
д.т.н., профессор Российского государственного геолого-разведочного университета имени Серго Орджоникидзе

Илхом Убайдуллоевич Халимов,
аспирант Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе

☎ 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23,
тел.: +7 (495) 433-62-33 (доб. 1246),
e-mail: maluhin@mail.ru

УДК 622.271.4

ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ВСАСЫВАНИЯ ПРИ СКВАЖИННОЙ ГИДРОДОБЫЧЕ

Н. Г. Малухин, Р. В. КудряшовРОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ

Скважинная гидродобыча включает основные технологические процессы: гидроразрыв, гидротранспорт по почве очистных камер, пульпоприготовление, всасывание и гидродоъем. Процесс пульпоприготовления и всасывания к настоящему времени является наименее изученным. Вместе с тем от этих процессов зависит эффективность гидродоюза и всей технологии скважинной гидродобычи. В статье рассматривается струйное гидровзвешивание горной массы перед всасыванием. Текущая скорость затопленной струи должна соответствовать гидравлической крупности всасываемого материала.

Ключевые слова: *пульпоприготовление, эрлифт, земснаряд, гидравлическое рыхление, гидросмесь, гидравлическая крупность.*

Одним из основных технологических процессов скважинной гидродобычи является процесс пульпоприготовления и всасывания. В то же время одним из слабых узлов используемых гидродобычных агрегатов является отсутствие устройств, управляющих поступлением во всасывающее отверстие твердого и недостаточная зона захвата последнего. В результате происходит заполнение зумпфа подъемного аппарата (в частности эрлифта) твердым и аварийная обстановка при всасывании, т.к. в эрлифт поступает только вода без твердого.

Все это вызывает необходимость комплексного решения вопроса схемы отработки продуктивного массива, доставки размытого твердого к зумпфу эрлифта, создание подвижного состояния горной массы, окружающей всас (псевдооживление – пульпоприготовление), с учетом заданной (или планируемой) производительностью эрлифта по горной массе. Рассмотрим эту сложную, но решаемую задачу поэтапно.

Процесс всасывания при СГД коренным образом отличается от всасывания из-под воды грунтонасосами, землесосами или песковыми насосами. Там,

SUBSTANTIATION OF EFFICIENCY OF PROCESSES SUCTIONS FOR HYDRAULIC BOREHOLE MINING

N.G. MALUKHIN, R.V. KUDRYASHOV

The basic processes for the application of borehole mining are: hydraulic cutting of the flooding jet, slurry's prepare, suction and lifting. The processes for slurry's prepare and suction is a less studied. Today these processes are one of the principal ways of efficiency borehole mining. This article deal with jet hydraulifting of the cutting rock. Current jet velocity of the bleeding one have to corresponding for settle velocity of the suction material.

KEYWORDS: *slurry's prepare, airlift, dredger, hydraulic loosening, slurry, hydraulic size.*

всасываемый материал сразу восполняется новым за счет перемещения земснаряда (например, добыча в водоемах песчано-гравийного материала) или постоянное подгребание твердого бульдозером, например, в зумпф всасывающего устройства (работа гидроэлеваторов при разработке россыпей). Эксплуатация морских земснарядов или эрлифтов так же связана с постоянным перемещением к всасу материала специальными устройствами или технологическими приемами, связанными с горизонтальным перемещением (скрепование, волочатый по дну всас и т.д.)

Всасывание при СГД является процессом локальным и непосредственно связано с зумпфом эксплуатационной скважины. Исходя из этого, всасывание может быть свободное (рис. 1 а) и всасывание «из-под слоя» (рис. 1 б).

Свободное всасывание, как правило, происходит при неправильно выбранной технологии отработки продуктивного массива – «сверху вниз». В этом случае плоскость всасывания эрлифта всегда находится выше уровня горной массы (рис. 1 а). Плоскость

наибольших величин всасывающих скоростей как бы «убегает» от плоскости расположения горной массы.

При этом вектор силы всасываемого скоростного потока $F_{ск}$ направлен горизонтально плоскости расположения твердого, а вектор силы тяжести частицы P направлен вертикально, т.е. под углом 90° к вектору силы всасываемого потока (рис. 1 а). Практика показывает, что поднять частицу (оторвать от плоскости) при таком расположении сил взаимодействия крайне сложно уже при ее диаметре $d_t > 3$ мм, т.е. при свободном всасывании можно перемещать только мелкодисперсные частицы.

Это обстоятельство подтверждают и все расчетные выражения при напорном гидротранспорте по трубам. Где также сила скоростного потока и сила тяжести частицы не имеют результирующую силу. Поэтому в расчетном выражении для критических скоростей (минимально возможная скорость трогания частицы) при горизонтальном гидротранспорте для мелкодисперсных частиц ($d_{тв} < 3$ мм) присутствует их диаметр

$$U_{кр} = A_1 \cdot \sqrt[3]{aS \cdot U_{ос} \cdot gD}, \quad (1)$$

а для грубодисперсных частиц ($d_{тв} > 3$ мм), диаметр отсутствует

$$U_{кр} = A_2 \sqrt{aSgD}, \quad (2)$$

где A_1 и A_2 – опытные коэффициенты, D – диаметр трубопровода, м.

Это свидетельствует о том, что твердые частицы, диаметром $d_{тв} > 3 \div 5$ мм (в зависимости от их плотности) транспортируется по трубопроводу перекачиванием, но от дна не отрывается (такое обстоятельство подтверждено многолетней практикой гидротранспорта в России и за рубежом).

Для того, чтобы частицу поднять необходимо зону всасывания обеспечить механическими или гидравлическими рыхлителями (взвешивающие частицу во всасываемом потоке). Гидравлическое рыхление (более правильный термин – гидровзвешивание) горной массы (псевдооживление) вокруг всасывающего отверстия можно эффективно использовать при работе эрлифтной подъемной трубы, погруженной в слой горной массы (рис. 1 б) (режим всасывания «из-под слоя»). При этом всасываемый поток, прежде чем он поступит в эрлифтную трубу должен профильтроваться через слой горной массы. Причем, скорость фильтрационного потока, значительно больше скорости потока при свободном всасывании (рис. 1 а), причем сила потока действует на частицу с одной стороны, а сила фильтрационного потока воздействует на частицу со всех сторон, в том числе и соосно с силой веса частицы, тем самым взвешивая ее, что невозможно при свободном всасывании. Если увеличивать производительность эрлифта по воде, тем самым повышаются скорости фильтрационного потока от ламинарного режима через турбулентный до разрушающих скоростей фильтрации (фильтрационному потоку ставится

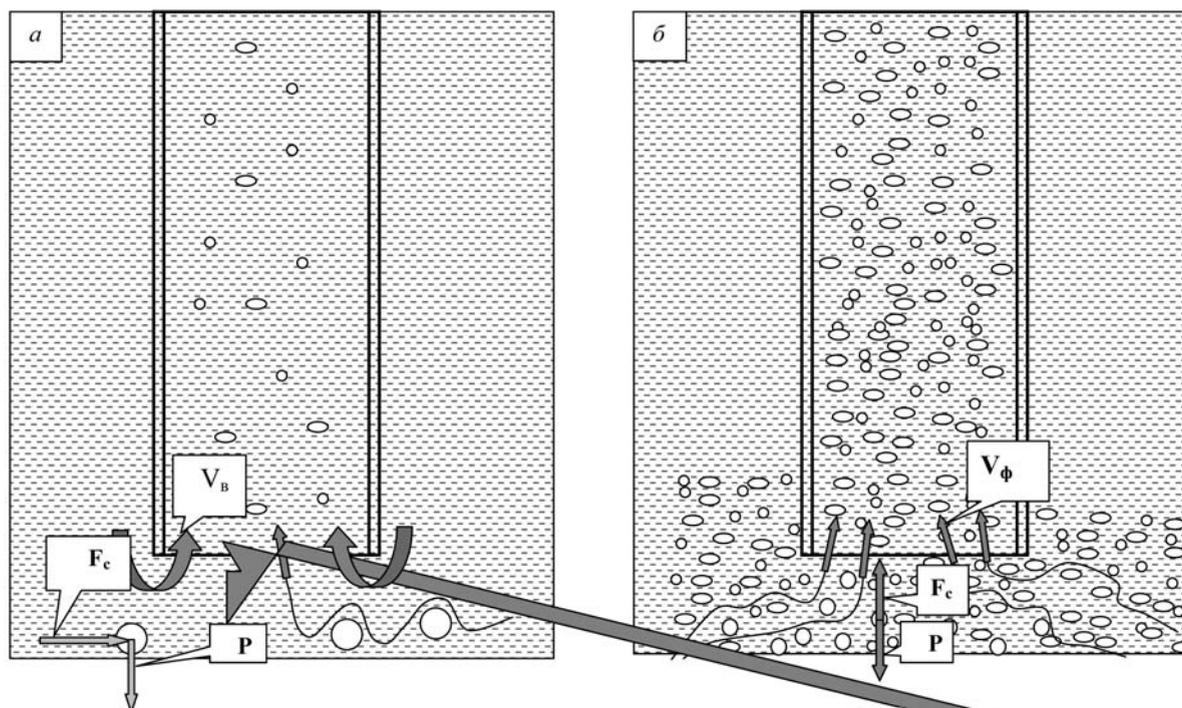


РИС. 1.

Схема взаимодействия силы скоростного всасываемого потока воды и силы тяжести твердого.
а – при свободном всасывании, б – при всасывании «из-под слоя»

«тесно» в поровых каналах горной массы, которые расширяются потоком, т.е. горная масса гидровзвешивается).

Разрушающие скорости фильтрации как показывает практика, соответствуют гидравлической крупности твердого, взвешиваемого потоком:

– для взвешивания одиночной частицы

$$U_{cs} = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{\rho_T - \rho_0}{\rho_0} \frac{gd_T}{\psi}}, \quad (3)$$

– при взвешивании частицы во всем объеме горной массы, расположенной вокруг эрлифтной трубы

$$U_{cs} = (1-S)^{2.39} \sqrt{\frac{4}{3} \frac{\rho_T - \rho_0}{\rho_0} \frac{gd_T}{\psi}}, \quad (4)$$

где ρ_T , ρ_0 – соответственно плотность твердого ($\rho_T=2650$ кг/м³) и воды ($\rho_0=1000$ кг/м³), кг/м³; d_T – диаметр твердого, м; ψ – коэффициент лобового сопротивления (для $d_T > 3$ мм, $\psi=0.44$); $(1-S)$ – порозность горной массы ($(1-S)=(0.38 \div 0.4)$); D – диаметр трубопровода, м; S – содержание твердого (в долях) в объеме гидросмеси или объеме горной массы, расположенной вокруг всасывающего наконечника.

Сравнивая расчетные выражения скоростей трогания для горизонтального перемещения частиц (1) и (2) $U_{кр}$ и для вертикального (3) и (4) заметим, что критические скорости трогания при горизонтальном воздействии всасывающего потока на частицу повышаются с увеличением содержания горной массы S . При вертикальном движении всасываемого потока, процесс гидровзвешивания (псевдооживления) начинается при меньших скоростях при повышенном содержании горной массы вокруг всасывающего наконечника выражения ((1) и (2)). При свободном всасывании с использованием выдвинутого гидромонитора с отклонителем, процесс разрушения (размыва) продуктивных песков (горной массы) не связан с зоной всасывания, поэтому поднять эти пески до плоскости всасывания сложно.

Частица песка при взаимодействии с потоком жидкости характеризуется ее гидравлической крупностью, т.е. скоростью падения твердого в воде. Ранее было показано, что гидравлическая крупность при падении одиночной частицы, определяется по выражению (3), а при движении твердого в объеме гидросмеси – по выражению (4). На практике искомые скорости в плоскости всасывания должны составлять $3.0 \div 4.0$ м/с, т.к. при удалении от всасываемого отверстия, скорости всасывания интенсивно снижаются.

При скорости гидросмеси в эрлифтной трубе даже 4 м/с, на расстоянии от этой трубы всего в один диаметр, потенциально гидровзвешиваются и способны перемещаться только мелкие частицы.

Режим всасывания «из-под слоя» в условиях полного завала горной массы (песком) эрлифтной трубы позволяет постоянно находиться частицам песка (несвязной рудной массы) в плоскости всасывания, т.е. в зоне максимальных скоростей. Всасываемые частицы песка (руды) из плоскости всасывания замещаются новыми, интенсивно поступающими в гидровзвешенном состоянии из общего объема горной массы. Как уже было отмечено выше, состояние подвижности (гидровзвешивания) песка (несвязной горной массы) обеспечивается разрушающими скоростями фильтрации по поровым каналам и воздействием на песок (несвязную горную массу) гидромониторной струей максимально приближенным к забою.

Основной движущей силой в процессе всасывания является разность давлений (градиент давлений) вне и внутри всасывающей трубы. За счет градиента происходит перемещение жидкости из внешнего потока внутрь всасывающей трубы. Причем, обязательным условием эффективного протекания процесса всасывания является равенство производительности гидродобычного агрегата (ГДА), расхода жидкости, подтекающей к наконечнику из окружающего его пространства. Несоответствие производительностей вне и внутри трубы ведет либо к всасыванию малонасыщенной твердым гидросмеси, либо к забитке горной массой всасывающего наконечника из-за небольших скоростей всасывающего потока, не обладающего достаточной транспортирующей способностью.

В связи с вышеизложенным, предлагается рассмотреть возможность формирования принудительного процесса гидровзвешивания несвязной рудной массы (т.е. перевод ее в псевдооживленное состояние) в плоскости всасывания (вокруг плоскости всасывания) за счет использования гидравлических струй спутных всасываемому потоку, формируемых специальным гидромонитором от отдельного напорного водовода.

Исходные данные гидродобычного агрегата для СГД скважины №1Д:

- производительность эрлифта $Q = 114$ м³/час;
- производительность забойного двигателя $q = 7$ м³/час;
- диаметр напорного водовода $d = 73(65,5)$ мм.

Процесс всасывания в эрлифт происходит «из-под» завала разуплотненной горной массы, поступающей при гидроразмыве рыхлых и слабосцементированных руд. Эффективность всасывания твердого определяется возможностью и необходимостью гидровзвешивания несвязной горной рудной массы. Таким образом, в плоскости всасывания должна находиться псевдооживленная горная масса, со всеми, присущими капельной жидкости свойствами: текучестью, консистенцией и вязкостью, с тем, чтобы процесс всасывания эрлифтом горной массы был бы неизбежен с учетом собственных скоростей вертикального потока в эрлифте.

Процесс гидровзвешивания горной массы вокруг плоскости всасывания эрлифта должен осуществляться с использованием гидравлических струй, формируемых гидромонитором от отдельного напорного водовода, размещенного внутри пульповода эрлифта. Сложность управления этим процессом заключается в том, чтобы струйный поток воды позволял создавать в объеме горной массы разрушающие скорости фильтрации (но не транспортирующие) с одной стороны и не препятствовал формированию всасывающего потока эрлифта. Для этих целей необходимо создать комбинированную гидромониторную насадку, с помощью которой можно было бы формировать компактную струю с одной стороны и отраженный спутный поток (спутный всасывающему) для гидровзвешивания горной массы, заданного гранулометрического состава в плоскости всасывания, соответствующего транспортирующей скорости вертикального потока в пульповоде эрлифта.

Методика расчета процесса всасывания представлена в следующем порядке:

1. Диаметр насадки для гидровзвешивания:

$$d_0 = \sqrt{\frac{Q}{0,785U_0}} = \sqrt{\frac{107/3600}{0,785 \cdot 42,1}} = 0,29 \text{ мм},$$

где Q – производительность водовода системы гидровзвешивания по воде, м³/ч; U_0 – скорость вылета струи из насадки, м/с; H – напор перед насадкой, м ($H=100$ м).

2. Скорость струи у отражателя:

$$U_{нов} = U_0 \times \frac{0,41 \times 7,68}{(1 + S_s) \times \frac{l_1}{d_0}} = 42,1 \times 0,41 \times \frac{7,08}{(1 + 0,84) \times \frac{0,116}{0,029}} = 16,6 \text{ м/с} \quad (6)$$

где l_1 – длина струи ($l_1=4d_0=0,116$), м; S_s – весовое содержание твердого в горной массе (при плотной упаковке).

3. Длина отраженной части струи (до плоскости всасывания):

$$L_2 = \frac{L_1}{\sin \alpha} = \frac{0,116}{\sin 60} = 0,134 \text{ м}, \quad (7)$$

где α – угол отклонения отраженной струи.

4. Диаметр струи у отражателя:

5. $D_1 = d_0 + 0,43 \cdot L_1 = 0,029 + 0,43 \cdot 0,058 = 0,054$ м

6. Скорость отраженной струи в плоскости всасывания:

$$U_6 = U_{нов} \times \frac{1}{0,9 + 0,4 \left(\frac{L_2}{D_1} \right)} = 16,6 \times \frac{1}{0,9 + 0,4 \cdot \left(\frac{0,134}{0,074} \right)^2} = 7,5 \text{ м/с} \quad (8)$$

6. С учетом поправки на отклонение струи от вертикали

$$U_6 = 7,5/1,65 = 4,55 \text{ м/с}.$$

1. Критическая скорость вертикального подъема частиц твердого при $d_t = 4,5$ мм:

Гидравлическая крупность твердого при ($S=0,1$)

$$U_{cm} = (1 - S_0)^{2,39} \times \sqrt{\frac{4}{3} \times \frac{\rho_m - \rho_0}{\rho_0} \times \frac{gd_m}{\Psi}} = (1 - 0,1)^{2,39} \times \sqrt{\frac{4}{3} \times \frac{3600 - 1000}{1000} \times \frac{9,81 \times 0,045}{0,45}} = 1,43 \text{ м/с} \quad (9)$$

Здесь Ψ – коэффициент лобового сопротивления (для $d_t > 3$ мм, $\Psi=0,44$) ($1 - S$) пористость горной массы, S – содержание твердого (в долях) в объеме гидросмеси или объеме горной массы, расположенной вокруг всасывающего наконечника. (Разрушающие скорости фильтрации соответствуют, как правило, гидравлической крупности твердого, взвешиваемого потоком).

Критическая скорость в вертикальном трубопроводе:

$$U_{кр} = U_{cm} + 3,5 \sqrt{a S g D} = 1,43 + 3,5 \sqrt{2,6 \cdot 0,1 \cdot 9,81 \cdot 0,116} = 1,43 + 1,904 = 3,33 \text{ м/с} \quad (10)$$

Таким образом, при длине струи $L_1 = 0,116$ мм скорость гидровзвешивающего потока – 4,55 м/с, скорость вертикального потока в эрлифте 3,0 м/с и критическая скорость подъема твердого при $d_t = 4,5$ мм (3,33 м/с) становятся соизмеримыми. Имеющиеся возможности вертикального перемещения става гидромонитора при эксплуатации агрегата СГД позволяет установить оптимальное расстояние выдвижения комбинированного гидромонитора ниже плоскости всасывания эрлифта.

Николай Григорьевич Малухин,
д.т.н., профессор Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе

Руслан Валерьевич Кудряшов,
аспирант Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе

✉ 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23,
тел. +7 (495) 433-62-33 доб. 1246, e-mail: maluhin@mail.ru

УДК: 622.24

ВОЗНИКНОВЕНИЕ СТАБИЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПСЕВДООЖИЖЕНИЯ ГОРНОЙ МАССЫ В ОБЪЕМЕ ЗАГРУЗОЧНОГО АППАРАТА ПРИ НАПОРНОМ ГИДРОТРАНСПОРТИРОВАНИИ

А.А. Вильмис¹,
В.П. Дробаденко¹,
Г.Н. Малухин², Р.В. Кудряшов¹,
Н.Г. Малухин¹

¹РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ,
²ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОМИССИЯ
ПО ЗАПАСАМ

При работе загрузочных аппаратов для гидротранспорта особую роль имеет возникновение и поддержание процесса псевдооживления горной массы в объеме аппарата. Такое состояние возникает при скорости восходящего потока, равного гидравлической крупности твердого материала. Кроме того, расход воды, поступающей на процессе псевдооживления горной массы в камере транспортного аппарата должен быть равным производительности гидротранспорта по твердому материалу. При этом, концентрация гидросмеси поступающая в гидротранспортный трубопровод может составлять до 70% по весу.

Ключевые слова: *загрузочный аппарат, гидравлический транспорт, всасывание.*

Наиболее благоприятные условия вытеснения горной массы в напорный трубопровод загрузочно-транспортным аппаратом имеют место при использовании разгрузочного узла в виде центробежной насадки с внутренней транспортной трубой. При этом, при начальной подаче напорной жидкости в кольцевую щель в виде закрученного потока создается локальное повышение давления у разгрузочного узла.

Жидкость двигается в область более низкого давления (меньшего от начального), которое может быть только в двух областях:

- в транспортном трубопроводе;
- в верхней части камеры загрузочного аппарата.

BEGINNING STABILITY OF PROCESS FLUIDIZATION FOR MINED MATERIAL INTO A LOADING APPARATUS FOR PRESSURE HYDROTRANSPORT

A.L. VILMIS, V.P. DROBADENKO,
G.N. MALUKHIN, R.V. KUDRYASHOV,
N.G. MALUKHIN

Efficiency of the loading apparatus for the application of hydrotransport are: beginning and continuation a process of fluidization mined material into the apparatus. It is very important that the hoisting velocity though material is equals of the settle velocity of particles.

KEYWORDS: *loading apparat, hydraulic transports, suction.*

По длине гидротранспортного трубопровода потери давления будут значительно больше, чем потери давления при восходящем движении жидкости через плотный поровый слой (с порозностью около 0,38) горной массы в верхнюю часть камеры.

При движении жидкости снизу вверх через слой горной массы в камере загрузочного аппарата, ее перемещение в промежутках между частицами (поровым каналам) сопровождается потерями напора.

При последующем повышении давления подаваемой жидкости в центробежную насадку, увеличивается ее расход, а, следовательно, при постоянном диаметре камеры можно утверждать, что при повы-

шении скорости восходящего потока, потери напора постепенно возрастают и, наконец, достигается такое состояние горной массы, при котором сила трения при обтекании частиц (при восходящей фильтрации), действующей снизу вверх, становится равной весу частицы, и слой как бы теряет вес (рис. 1).

При небольшом превышении этой критической скорости гидровзвешивания частиц горной массы, сила трения при обтекании частиц возрастает и превышает, силу тяжести. Возникает процесс разрушающих скоростей восходящей фильтрации (жидкость раздвигает частицы), т.е. порозность слоя горной массы увеличивается, а скорость в промежутках между частицами уменьшается до тех пор, пока не уравновесятся силы, действующие на частицу. При дальнейшем повышении скорости жидкости, еще больше увеличивается порозность слоя горной массы, но давление, необходимое для гидровзвешивания (псевдооживления) слоя останется неизменным.

Несмотря на то что гравитационные свойства частицы и жидкости определяют характер процесса псевдооживления, целый ряд факторов влияет на интенсивность перемещения частиц горной массы и степень неоднородности слоя: геометрия слоя; скорость жидкости; тип ввода жидкости (тангенциально; как спутный соосный поток и т.д.) внутренняя геометрия камеры загрузочного аппарата.

Таким образом, объем горной массы в камере загрузочного аппарата может находиться в трех рабочих состояниях:

- псевдооживленный;
- разрыхленный;
- фонтанирующий.

В последующем перепад давлений (градиент) у выхода кольцевой струи всегда будет больше, чем в верхней части камеры, т.е. псевдооживленная масса будет

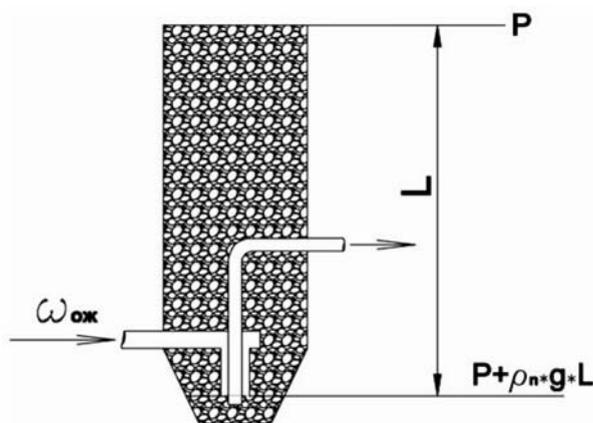


Рис. 1.

Схема процесса псевдооживления в камере загрузочно-транспортного аппарата

свободно вытесняться в пульпопровод и далее по нему транспортироваться.

Избыточный напор, необходимый для создания режима псевдооживления в камере при высоте слоя твердого в ней L определяется следующим образом.

Сопrotивление восходящему потоку жидкости равно весу горной массы

$$\rho_0 \cdot g \cdot \Delta H \cdot \omega_{ож} = \omega_{ож} \cdot L \cdot \rho_n \cdot g, \quad (1)$$

где ρ_0 , ρ_n – соответственно, плотность воды и горной массы в объеме аппарата, кг/м³, ΔH – перепад напора в камере аппарата, м, L – высота горной массы в камере аппарата, м, $\omega_{ож}$ – площадь поперечного сечения псевдооживления в плоскости выхода кольцевой струи центробежной насадки, м².

Исходя из закона неразрывности, объемной расход жидкости Q равен объемному расходу гидросмеси Q_w в транспортном трубопроводе

$$Q = Q_w, \quad (2)$$

а расход твердого в транспортном трубопроводе соответствует расходу воды, псевдооживляющей горную массу в плоскости выхода кольцевой струи.

$$Q_m = Q_{ож} \quad (3)$$

где Q_w , Q_m – соответственно расход воды выходящей через центробежную насадку и расход гидросмеси в транспортном трубопроводе, м³/с, Q_w , $Q_{ож}$ – соответственно расход твердого в транспортном трубопроводе (производительность загрузочного аппарата по твердому) и расход воды, отделяющихся на выходе кольцевой струи и идущей на создание вертикального фильтрационного потока по всей высоте слоя горной массы в камере загрузочного аппарата, м³/с.

Так как расход жидкости через центробежную насадку при максимальном режиме ее истечения равен

$$Q = Q_n = \varepsilon^{1.5} \cdot \sqrt{2g\Delta H} \cdot \omega_0 \quad (4)$$

или

$$\frac{\varepsilon^{1.5}}{1 - \varepsilon} = \frac{Q_n}{\pi \left(\frac{D}{2} + \delta \right)^2 \cdot \sqrt{2g\Delta H}}. \quad (5)$$

Определим коэффициент заполнения сечения кольцевой струи и затем основные геометрические размеры центробежной насадки во взаимосвязи с параметрами внутренней транспортной трубы (пульповодом).

$$\varepsilon = \frac{R_0^2 - R_n^2}{R_0^2}, \quad (6)$$

где ε – коэффициент заполнения сечения кольцевой струи центробежной насадки; D – внутренний диаметр пульповода, м; δ – толщина стенки пульповода, м; R_n – наружный радиус пульповода

$$\left(R_n = \frac{D + 2\delta}{2} \right), \text{ м;}$$

R_0 —радиус центробежной насадки

$$(R_0 = \frac{h_n}{\sqrt{1-\varepsilon}}), \text{ м.}$$

Длина кольцевой струи l определяется исходя из текущей скорости и гидравлической крупности горной массы, по которой распространяется кольцевая струя с изменяющейся геометрией.

Александр Леонидович Вильмис,

к.т.н., доцент Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе

Валерий Павлович Дробаденко,

д.т.н., профессор, Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе

Григорий Николаевич Малухин,

к.т.н. начальник отдела Государственной комиссии по запасам (ГКЗ)

Руслан Валерьевич Кудряшов,

аспирант Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе

Николай Григорьевич Малухин,

д.т.н., профессор Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе

☎ 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23,
тел.: +7 (495) 438-15-03

УДК: 622.24

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ИСТЕЧЕНИЯ СТРУЙ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСАДОК В ЗАГРУЗОЧНЫХ АППАРАТАХ НАПОРНОГО ГИДРОТРАНСПОРТА

А.А. Вильмис,
В.П. Дробаденко,
Р.В. Кудряшов, Н.Г. Малухин

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГЕОЛОГО-
РАЗВЕДОЧНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ СЕРГО
ОРДЖОНИКИДЗЕ

Загрузочные аппараты используются для подачи высококонцентрированной гидросмеси в напорный гидротранспортный трубопровод. Одним из важных элементов таких аппаратов является узел разгрузки, который предлагается использовать в виде центробежной насадки с внутренней транспортной трубой. В статье показано, что конструктивное исполнение таких насадок должно соответствовать максимальному расходу истечения жидкости.

Ключевые слова: гидравлический транспорт, всасывание, наконечник для всасывания.

Процесс всасывания и пульпоприготовления горной массы предшествует процессу напорного гидротранспортирования и в значительной степени определяет его основные технологические параметры:

- крупность твердого;
- концентрацию твердого в объеме гидросмеси;
- плотность перемещаемого твердого;
- форму кусков твердого.

Если для расчета гидротранспорта исследователями предложено множество методов расчета для различных условий, то для процесса всасывания и пульпоприготовления методики расчета практически отсутствуют. Сложность заключается в том, что эта методика должна учитывать не только технологические (расходно-напорные) параметры гидротранспортирования, но и геометрические характеристики всасывающего наконечника и зумпфа всасывания во взаимосвязи с гравитационным перемещением твердого и фильтрационным движением воды в поровом (активном) пространстве (каналах).

THE PECULIARITY JET STREAM OF THE SWIVEL NOZZLES FOR A LOADING PRESSURE HYDROTRANSPORT APPARATUS

A.L. VILMIS, V.P. DROBADENKO,
R.V. KUDRYASHOV, N.G. MALUKHIN

A loading pressure hydro transport apparatus have been used for transporting of the mined material with high concentration into special tubes. To considerable extent as most impotent unit for this apparatus is the discharging one as means of the swivel nozzle with the inside transporting tube. This article deal with optimal design due to a maximum water flow through a swivel nozzle.

KEYWORDS: hydraulic transport, suction, tip for suction.

Опытом установлено, что всасывающий наконечник должен быть запроектирован грушевидной формы, заимствованной у всасывающих органов живых организмов. Установлено также, что форма всасывающего органа изменяется в зависимости от плотности и вязкости жидкости, наличия твердого в ней.

С другой стороны, если при гидротранспорте необходимая энергия зависит от размеров трубопровода (длины трассы и диаметра трубы), скорости гидросмеси, ее плотности и зернового состава, то энергоемкость процесса пульпоприготовления и всасывания кроме этого зависит еще от степени приближения всасывающего наконечника к забою, скорости перемещения относительно забоя, конфигурации забоя и наконечника, формы частиц и плотности их упаковки в объеме всасываемого твердого.

При этом, минимальные энергозатраты при всасывании возможны при условии:

- погружения всасывающего наконечника в псевдовзвешенный насыпной материал-режим всасывания «из-под слоя»;

– создание демпфирующего (изменяющегося) водяного всасывающего наконечника. Например, тангенциальный подвод напорной всасывающей жидкости через кольцевую щель создает у устья (плоскости всасывания – вытеснения) соосно всасывающей труде сферическую поверхность кольцевого закрученного потока с изменяющейся геометрией;

– создание искусственных каналов в объеме всасываемого материала (слабо или совсем не фильтруемого) для ускоренного перемещения воды из верхних слоев в зону всасывания с учетом необходимо-достаточного расхода для гидровзвешивания твердого.

Движущей силой при всасывании является наличие перепада давления внутри и вне всасывающей трубы. Такой градиент давления может быть создан:

– за счет создания разряжения транспортным аппаратом (насосом, гидроэлеватором и т.д.). Теоретически этот перепад давления может быть максимален и равен 1 ат., а практически (0,5–0,2) ат. с учетом глубины погружения всасывающего наконечника в слой твердый;

– за счет избыточного давления вне трубы, вытеснения (загрузочный аппарат или эрлифт).

Избыточное давление может быть создано в специальной герметичной закрываемой камере, где погружен в несвязный твердый материал (горную массу) всасывающий наконечник с тангенциальным подводом напорной жидкости (рис. 1).

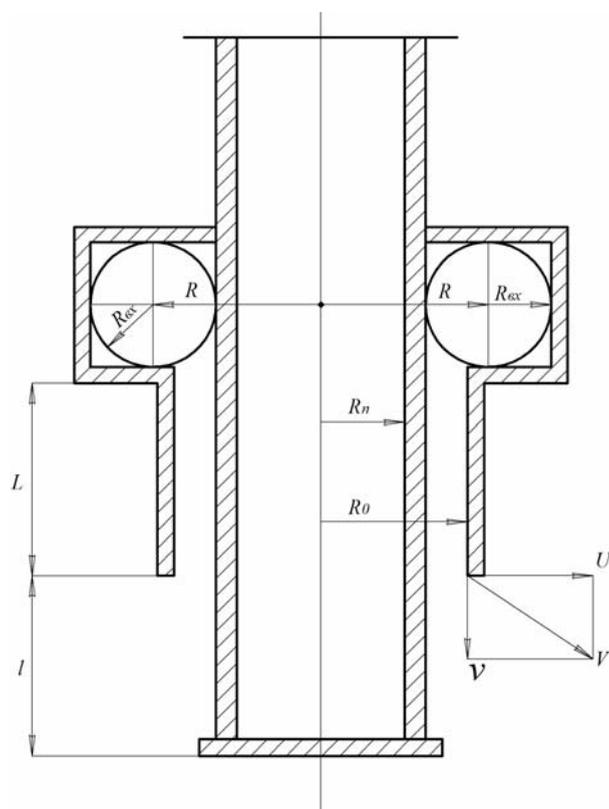


РИС. 1.

Схема истечения напорной жидкости через кольцевую центробежную насадку с внутренней транспортируемой трубой

Напор истечения через кольцевую центробежную насадку

$$\Delta H = \frac{V + U}{2g}, \quad (1)$$

где ΔH – избыточный напор жидкости в камере закручивания, м. вод. ст.; V, U – соответственно осевая и тангенциальная скорость струи при выходе из кольцевой насадки, м/с.

Выражая тангенциальную скорость U через V и исходя из уравнения момента количества движения центробежной насадки

$$Q \cdot \rho \cdot R \cdot V_{ex} = Q \cdot \rho \cdot U \cdot R_n, \quad (2)$$

R – радиус закрутки потока, м; V_{ex} – входная скорость напорного потока, м/с.

Осевая скорость истечения через кольцевую щель равна

$$V = \frac{1}{\sqrt{1 + A^2 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}\right)^2}} \cdot \sqrt{2g\Delta H}, \quad (3)$$

где Q – расход жидкости, поступающей во входной патрубок центробежной насадки, м³/ч (рис. 1); ε – коэффициент сжатия кольцевой струи центробежной насадки (коэффициент заполнения сечения струи).

$$\varepsilon = \frac{R_0^2 - R_n^2}{R_0^2}, \quad (4)$$

R_0, R_n – соответственно, наружный радиус кольцевой струи и наружный радиус транспортного пульповода, м; A – геометрический параметр центробежной насадки

$$A = \frac{R_n}{R_{ex}} \cdot \left(1 + \frac{R_n}{R_{ex}}\right), \quad (5)$$

где R_{ex} – радиус входного патрубка центробежной насадки, м.

С учетом значения коэффициента сжатия по выражению (4) расход жидкости через центробежную насадку равен

$$Q = \frac{1}{\sqrt{1 + A^2 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}\right)^2}} \cdot \sqrt{2g\Delta H} \cdot \omega_0, \quad (6)$$

где ω_0 – площадь поперечного сечения потока жидкости центробежной насадки м² (рис. 1).

Таким образом коэффициент расхода μ центробежной насадки равен

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{1 + A^2 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}\right)^2}} \quad (7)$$

Исследуя эту функцию на экстремум, выясняем, что расход жидкости через центробежную насадку, формирующую кольцевую струю, имеет место максимум расхода

$$Q_{\max} = \varepsilon^{1,5} \sqrt{2g\Delta H} \cdot \omega_0 \quad (8)$$

Особенности использования закрученного потока в загрузочном аппарате при полном погружении всасывающего наконечника в объем горной массы является то, что создаваемый кольцевой водяной вихрь должен с минимальными потерями сохранить первоначально созданный момент количества движения.

Для этого должны быть конструктивно учтены особенности истечения жидкости из центробежной насадки:

- длина насадки L должна быть необходимой и достаточной для формирования закрученного потока при минимальных потерях на трение;
- центробежная насадка должна иметь максимальный коэффициент расхода при радиусе воздушного вихря, соответствующему радиусу пульповода.

Александр Леонидович Вильмис,
 к.т.н., доцент Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе

Валерий Павлович Дробаденко,
 д.т.н., профессор Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе

Руслан Валерьевич Кудряшов,
 аспирант Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе

Николай Григорьевич Малухин,
 д.т.н., профессор Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе

☎ 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23,
 тел.: +7 (495) 438-15-03

УДК: 622.24

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ГЕОТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОТРАБОТКИ БАКЧАРСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО ПРОЯВЛЕНИЯ

А.В. Григорьевич¹,
И.И. Михайлович²

¹Национального исследовательского университета ресурсоэффективных технологий «ТПУ»,

²Департамент по недропользованию и развитию нефтегазодобывающего комплекса Администрации Томской области

Изложены перспективные технологии освоения Бакчарского железорудного поля методами скважинной технологии подземного выщелачивания и подземной гидродобычи (СПВ и СГА) позволяющиекратно уменьшить: капитальные вложения в предприятия, сроки их строительства и повысить качество конечной продукции при повышении экологической и технической безопасности.

Ключевые слова: железные руды, подземное выщелачивание, скважинная технология, техническая безопасность.

Бакчарский «рудный узел», именуемый иногда месторождением, входит в состав Западно-Сибирского железорудного бассейна в пределах Томской области и является наиболее изученным в геологическом отношении объектом. Месторождение расположено в 200 км к западу от города Томска в междуречье рек Андарма и Икса вблизи автомобильной дороги, линий электропередач и уже готовых инфраструктур жизнедеятельности.

Среднее содержание железа в рудах колеблется от 34,72 до 52,00% (при среднем 43,09%). В смешанной технологической пробе среднее содержание железа общего составило 38,53%. Химический состав железных руд месторождения по качеству не уступает разрабатываемым месторождениям аналогичного генезиса – Керченскому, Аятской группе месторождений, месторождениям Германии и Франции. Отличительной особенностью бакчарских руд является более высокое содержание фосфора и ванадия. Суммарные предпо-

USING PHYSICOCHEMICAL GEOTECHNOLOGY FOR TESTING BAKCHAR IRON MANIFESTATIONS

V.G. LUKJANOV, I.M. IVANJUK

Outlined the development of promising technologies Bakchar iron ore field using in-situ leaching technology mining of underground hydraulic mining (LTM and UHM) allowing multiple reduce: capital investments in companies, the timing of construction and improve the quality of the final product with an increase in environmental and technical safety.

KEYWORDS: iron ore, underground leaching, downhole technology, technical security.

лагаемые ресурсы составляют около 23 млрд т. Практически единственным недостатком месторождения традиционно считалось его расположение на территории знаменитых Васюганских болот, относительно большие глубины продуктивных пластов – 180–250 м и сложное гидрогеологическое строение.

В России 93% железной руды добывается с применением открытого способа разработки при содержании железа в рудах от 12 до 40%, залегающих в сложных горно-геологических условиях (при средней глубине разработки 250–280 м) в местах с достаточно суровыми природно-климатическими условиями их освоения. Основные зарубежные производители железорудного сырья (Бразилия, Австралия) разрабатывают месторождения с содержанием железа свыше 60% и с минимальными и объёмами вскрышных работ, что позволяет им в широком диапазоне изменять цены на зарубежных рынках сырья и конкуренции с Российскими поставщиками.

Освоение подобных богатых железных руд в короткие сжатые сроки в течение 2–4 лет возможно осуществить двумя экологически чистыми способами: подземное выщелачивание и скважинная гидродобыча (гидротехнология).

ПОДЗЕМНОЕ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ (ПВ)

Метод широко применяется при эксплуатации месторождений урана, некоторых месторождений золота.

ПВ [4, 5, 6] является более дешевым способом разработки, чем шахтный или карьерный. Путем выщелачивания возможно добывать не только железо, но и другие минеральные ресурсы, которые содержатся в составе Бакчарского железорудного узла, например ванадий, фосфор, золото.

По оценке ФГУП «ВНИИ химической технологии» (г. Москва) применение метода ПВ в условиях Бакчара возможно. Содержание железа в полученных сернокислотных растворах составит 5–10 г/л.

Удельный расход серной кислоты при использовании ПВ будет не ниже 30 кг на 1 кг железа. При стоимости серной кислоты 1000–1500 руб./т, стоимость получаемого концентрата будет на уровне 30–45 руб./кг, только по расходу серной кислоты.

С расходами на бурение и энергозатратами на подъем и транспортировку продуктивных растворов удельные расходы будут не менее 100 руб. на 1 кг железа без учета технологического передела.

СКВАЖИННАЯ ГИДРОТЕХНОЛОГИЯ

Технология скважинной гидродобычи (СГД) [1, 2, 3, 5] позволяет избежать многих отрицательных экологических последствий, характерных для традиционных способов добычи:

- отсутствие отвалов вскрышных пород, хвостохранилищ, дробильно-измельчительных переделов, магнитной сепарации, буровзрывных работ, мощных пылегазовых выбросов и, как следствие, загрязнения значительных площадей, в том числе и сельхоз назначения, тяжелыми металлами и радионуклидами;

- не нарушается режим подземных и поверхностных вод и не требуется значительного отчуждения земель под промышленное строительство;

- процесс добычи руды осуществляется без присутствия людей в горных выработках с исключением тяжелых и опасных для жизни людей операций, сопряженных с проходкой горных выработок и ведение добычных работ;

- не отчуждаются дополнительно земли под отвалы, которые при открытой разработке могут занимать большие территории.

Технология СГД от 4 до 6 раз дешевле традиционных методов освоения за счет вскрытия месторождения скважинами, которые сооружаются за 3–3,5 месяца и вводятся в эксплуатацию через 10–15 дней после окончания их бурения.

Особо следует отметить, что технология СГД поддается полной автоматизации производственных

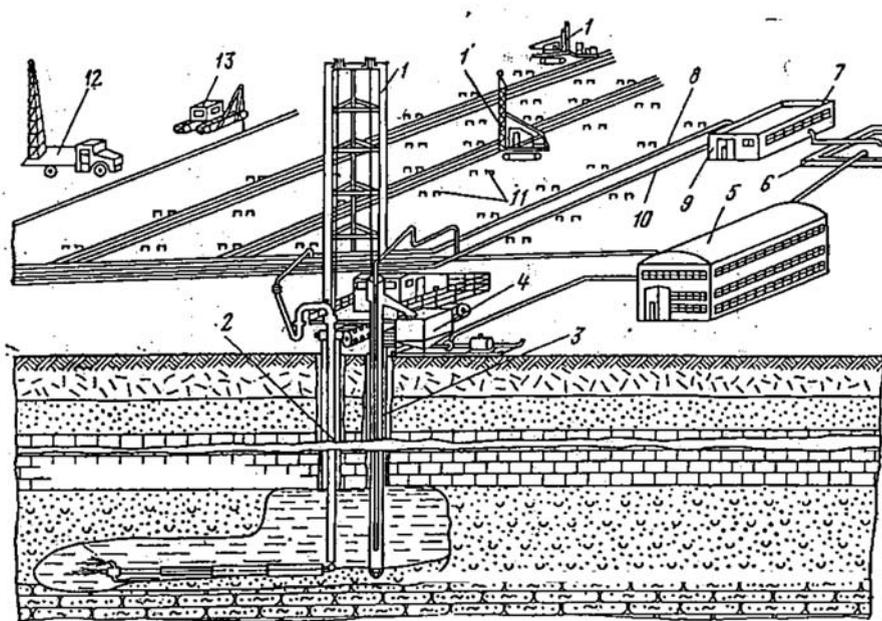


Рис. 1.

Типовая схема скважинной гидродобычи полезных ископаемых [3]: 1 (11) – гидродобычные агрегаты; 2 – скважинный гидромонитор; 3 – пульпоподъемный механизм; 4 – землесос; 5 – обогащительная фабрика; 6 – водоприемный бассейн; 7 – насосная; 8 – водопроводы; 9 – компрессоры; 10 – воздухопроводы; 11 – добычные скважины; 12 – буровые станки; 13 – трубоукладчики

процессов, т.к. инструментом воздействия на рудный массив в недрах является гидродобывочный агрегат, состоящий из трубной технологической оснастки скважины, пульпоподъемной колонны и колонны насосно-компрессорных труб, забойного гидромонитора.

Размыв руды производится высоконапорной (давлением до 200 атмосфер) струей забойного гидромонитора, вода на который подается насосами по насосно-компрессорным трубам. Забойный гидромонитор переводит рыхлые и полускальные руды в состояние подвижной гидросмеси, которую эрлифтом выдают на дневную поверхность. Выданная на поверхность трехфазная гидросмесь разделяется на сжатый воздух, руду и воду. Вода после отстоя (в пруде осветленной воды) от взвешенных минеральных частиц поступает в резервуар оборотного водоснабжения и снова высоконапорными насосами подается в гидродобывочные агрегаты на разрушение руды в забое скважины. В настоящее время суточная производительность СГД слабосвязанного минерального сырья из одной выемочной камеры достигает 1 тыс. м³/сут.

Достижение промышленных объемов добычи полезного ископаемого (миллионы тонн в год) с помощью СГД обеспечивается формированием добычных участков, на которых по определенной схеме одновременно отрабатываются десятки и сотни выемочных камер.

Таким образом, в технологии добычных работ исключается дополнительный передел по очистке высокоминерализованных вод рудно-кристаллического горизонта до требований предельно-допустимых концентраций, т.к. они возвращаются на тот же горизонт, с которого были подняты на поверхность, при этом затраты электроэнергии на 1 т товарной руды ниже в 2–2,3 раза, чем на предприятиях с традиционными способами ведения добычных работ. Затраты на добычу одной тонны руд составят ориентировочно 80 рублей.

Автоматизация и компьютеризация технологии СГД, позволяет создать практически безлюдные, экологически наименее опасные горнодобывающие предприятия на глубокозалегающих обводненных, с неустойчивыми вмещающими породами и рудами.

ЛИТЕРАТУРА

1. **БАБИЧЕВ Н.И., НИКОЛАЕВ А.Н.** Скважинная гидравлическая технология – основа высокоэкономичных малых предприятий по добыче твердых полезных ископаемых // Горный журнал. 1996. № 4. С. 5–9.
2. **ЛИБЕР Ю.В.** Разработка титан-цирконовых песков Тарского месторождения // Горный журнал. 1996. № 4. С. 12–17.
3. **ЛЕВЧЕНКО Е.Н., БЕСЧАСТНЫХ А.М.** Технология комплексной переработки редкометалльных песков

при добыче способом СГД // Горный журнал. 1996. № 4. С. 17–19.

4. Справочник по обогащению руд. В 3-х т./ Гл. ред. О.С. Богданов. Т. 2 «Основные и вспомогательные процессы», 4.1 «Основные процессы». М.: Недра, 1974. С. 97.
5. **ТЕПЛЯКОВ И.М., ДОМАРЕНКО В.А., МОЛЧАНОВ В.И.** Геотехнологические методы разработки железорудных месторождений Западно-Сибирского бассейна // Геология и минеральные ресурсы Центральной Сибири. Вып. 2. Красноярск: КНИИГИМС, 2001. С. 169–175.
6. **ЧИНАКАЛ Н.А., БАРЫШНИКОВ Ф.А., РУЗИНОВА И.А.** Извлечение железа из окисленных руд методом выщелачивания // ФТПРПИ, 1967. № 2. С. 88–91.

Лукьянов Виктор Григорьевич,
д.т.н., профессор Национального исследовательского университета ресурсоэффективных технологий «ТПУ»

☎ тел.: +7 (3822) 418-826 доп.105.

Иванюк Игорь Михайлович,
заместитель председателя комитета по недропользованию Департамента по недропользованию и развитию нефтегазодобывающего комплекса Администрации Томской области, горный инженер, соискатель Национального исследовательского университета ресурсоэффективных технологий «ТПУ»

☎ тел.: +7 (3822) 653-845, e-mail: imi@tomsk.gov.ru,

☎ 634050 г. Томск, пр. Ленина, д. 30, ТПУ,
Институт природных ресурсов

УДК: 622.24

ПЕРСПЕКТИВЫ ОСВОЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ШЕЛЬФОВЫХ ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ КОНКРЕЦИЙ В БАЛТИЙСКОМ МОРЕ

А.С. Журавлев, М.Ю. Козлов,
Д.С. Морозов

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ

Анализируются результаты исследований связанных с освоением нетрадиционного минерального сырья железомарганцевых конкреция (ЖМК) в акватории Балтийского моря. Приводятся, краткий анализ испытаний проведенных ООО «Петротранс» в Балтийском море и экспериментальные исследования МГРИ-РГГРУ по сравнительной оценке гидроподъема ЖМК по дезинтеграции грунтонасосом и эрлифом. Даются рекомендации для технико-экономического обоснования проектирования морских комплексов с использованием эрлифтной установки.

Ключевые слова: шельфовые месторождения, шельфовые железомарганцевые конкреции, центробежный грунтовой насос, земснаряд, эрлифт, гидроподъем, дезинтеграция, экспериментальный стенд.

Проблема освоения минерально-сырьевых ресурсов твердых полезных ископаемых (ТПИ) на шельфе и в глубоководных районах Мирового океана периодически рассматривается в научно-технических кругах и различных печатных изданиях. Однако до настоящего времени она остается нерешенной и продвижений в этом направлении в принципе нет.

Шельф и континентальный склон в России являются самыми обширными в мире по площади 6,2 млн км², что соответствует 22% всей площади шельфа Мирового океана. Эта территория может быть увеличена на 1,2 млн км², если ООН одобрит заявку РФ на расширение внешних границ Арктики России за счет подводных хребтов Ломоносова и Менделеева, которую наша страна представит уже в 2014 году.

Как известно на шельфе Северного Ледовитого океана РФ скрыты под водой месторождения алмазов, золота, олова, марганца и многих других полез-

FUTURE TRENDS OF FIELDS OF SHELF FERROMANGANESE CONCRETIONS IN THE BALTIC SEA

A.S. GURAVLEV,
M.Y. KOZLOV, D.S. MOROZOV

Results of researches connected with development of nonconventional mineral raw materials ferromanganese concretion (ZhMK) in the water area of the Baltic Sea are analyzed. Are brought, the short analysis of tests carried out by JSC «Petrotrans» in the Baltic Sea and pilot studies of MGRI-RGGRU on a comparative assessment of hydrolifting of ZhMK on disintegration centrifugal soil pump and airlift. Recommendations for the feasibility study on design of sea complexes with use of airlift installation are made.

KEYWORDS: shelf deposits, shelf ferromanganese nodules, centrifugal soil pump, extraction technology, airlift, hydraulic hoisting, disintegration, experimental stand.

ных ископаемых. Российский потенциал золота в шельфовой области сопоставим с его ресурсами в крупных золотоносных районах континентальной части страны.

Янтарь на побережье Балтийского моря является одним из самых крупных и чистых в мире месторождений расположенных в Приморском янтареносном районе с 16 залежами, содержащими в сумме 470 тыс. т запасов.

В металлогеническом (оловоносном) отношении представляет большой интерес шельф Западно-Ляховского района (море Лаптевых) со средним содержанием касситерита 1,13–1,9 кг/м³ и прогнозными запасами порядка 150 тыс. т касситерита. Изменение в настоящее время мировых цен на олово приблизительно 27 тыс. долларов США за тонну отражает общую тенденцию роста его потребности. Это предопределяет проведение оценки технико-экономи-

ческой возможности и целесообразности освоения данного района.

Первые опытно-промышленные работы по разработке оловоносных россыпей в этом районе были предприняты «Минцветметом» СССР в 70-е годы в прибрежной зоне моря Лаптевых (месторождение Чокурдатское). Однако этот опыт оказался не совсем удачным, т.к. не были в полной мере учтены горно-технические условия и технологические возможности технических средств добычи. Но эти работы дали положительный результат – доказали возможность работы морского плавучего горно-обогачительного комплекса для получения оловянного концентрата и показали необходимость совершенствования технических средств и технологий в этих сложных горно-геологических условиях.

Немаловажным фактором является также слабое развитие инфраструктуры и в первую очередь транспортная система – это Северный морской путь, связывающий воедино огромные пространства Арктической континентальной окраины РФ.

В связи с этим, исходя из климатических и горно-геологических условий в настоящее время в ближайшей перспективе можно считать освоение россыпных месторождений шельфа Балтийского моря, которое является исключительно мелководным (средние глубины 48 м), где выявлены вполне доступные залежи шельфовых железомарганцевых конкреций (ШЖМК)

и они уже сейчас могут быть вовлечены в процессы добычи и переработки для получения ферромарганца [3].

Шельфовые скопления ЖМК отмечаются во всех морях России при глубинах моря от 5–10 до 200–300 м. В Арктических морях площади скопления ЖМК составляют сотни и тысячи квадратных километров; плотность залегания конкреций изменяются при средних показателях от 2–5 до 10–13 кг/м². Размер конкреций – 3–5 мм, реже до 12–15 мм в поперечнике (табл. 1) [1].

Содержание ценных компонентов по данным Л.З. Быховского отражено в таблице 2 [1]. Количество таких рудных элементов как Co, Ni, Cu, Mo в ЖМК не превышает тысячных долей %, что сильно отличает их от глубоководных (3000–6000 м) Тихоокеанских конкреций, где суммарная доля элементов превышает 1%.

Таким образом, анализ распространения ШЖМК в акватории морей РФ показал, что на современном этапе исследований наиболее перспективны минералогические содержания Fe/Mn и высокие плотности залегания конкреций Балтийского моря.

Поисково-разведочные работы на ЖМК в Российской части акватории Финского залива проводились в 2000-х годах ООО «Петротранс» по отбору крупномасштабных проб ЖМК на нескольких залежах в Балтийском море. Были разведаны и поставлены на государственный баланс 4 месторождения ШЖМК.



РИС. 1.
Схема расположения полей ШЖМК на акваториях морей России

Суммарные запасы влажных ШЖМК категорий С₁+С₂ по этим месторождениям составляют 4,5 млн т.

В 2004 г. руды ЖМК впервые были учтены Государственным балансом запасов полезных ископаемых РФ и проведены горно-разведочные работы по отбору

крупнообъемной технологической пробы, обогащению и переделу руды. Первая крупнотоннажная проба ЖМК была поднята в 2000 г. на одной из залежей Копорского месторождения при помощи земснаряда «Ленинградский-1». При этом поднято и доставлено

ТАБЛИЦА 1.

Краткая характеристика шельфовых железомарганцевых образований (ЖМО)

Моря	Район размещения скоплений ЖМО	Глубина размещения ЖМО, м	Плотность ЖМО, кг/м ²
1. Черное	Рудные поля: Каламитское, Рионское	80–110	2,5
2. Балтийское	Заливы: Финский, Рижский	29–78 13–37	от 0,5 до 25–50
3. Белое	Рудные поля: Двинское, Кандалакшское	28–181	нет данных
4. Баренцево	Рудные поля: Шпицбергенское, Северобаренцево-морское, Новоземельское, Печорское	70–362	нет данных
5. Карское	Центрально-Карское рудное поле	38–95	13,0
6. Лаптевых и Восточно-Сибирское	Рудные поля: море Лаптевых. Восточно-Сибирское море – Индигирское поле	50–100	200-300 экз./м ²
7. Чукотское	Врангелевское рудное поле	14–194	500 экз./м ²
8. Берингово	не установлены		Конкреций не обнаружено
9. Охотское	ЖМО встречены в юго-восточной части моря	600–2000	нет данных
11. Каспийское	Подводный вал между Баку и мысом Куули	200	нет данных

ТАБЛИЦА 2.

Содержание элементов (%) в железомарганцевых конкрециях шельфовых морей

Элементы	Содержание элементов, %					
	в глубоководных частях Мирового океана [6]	в шельфовых областях морей				
		Белое и Баренцево	Карское	Восточно-Сибирское и Лаптевых	Балтийское (Финский залив)*	Черное
Fe	12,2–13,5	3,5–16,0	2,5–9,2	3,9–26,4	1,54–41,31 20,66	25,5
Mn	30,0–42,0	0,3–0,6 (до 10–12)	0,8–7,9	0,5–5,0 (до 10–12)	0,68–34,68 15,71	7,7
P	0,15–1,1	0,6–2,3	0,9	6–10 и более	0,14–3,92 1,75	6,4
Ni	0,6–1,4	Тысячные доли				
Co	0,2–0,8					
Cu	0,4–1,2					

*В знаменателе – средневзвешенное значение

на берег около 3 тыс. т неотмытой руды — смеси песка и ЖМК. На основании этих работ и результатов, морских поисково-оценочных исследований, а также анализа полученных материалов запасы ЖМК четырех месторождений — Кургальского, Копорского, Вихревого и Рондо решением ГКЗ МПР РФ были отнесены к оцененным [4].

Параллельно с этим, по заказу института «Гиредмет» коллективом кафедры геотехнологии и комплексного освоения месторождений полезных ископаемых МГРИ-РГГРУ проводились исследования по дезинтеграции ЖМК при работе грунтового насоса и эрлифтной установки, была разработана и испытана технологическая схема с использованием эрлифта в комплексе с дуговым грохотом (вместо воздухоотделителя) для классификации горной массы по граничному зерну и гидротранспортом обесшламленного продукта к месту складирования. На рис. 2 представлен крупномасштабный стенд с устройством пульпоприготовления при всасывании и дезинтеграции смеси состоит из базовой емкости, подъемной трубы эрлифта с всасывающим наконечником в нижней части.

Сжатый воздух подается от компрессора по воздухопроводу к смесителю. С подъемной эрлифтной трубой жестко соединен дуговой грохот, в котором происходит процесс воздухоотделения в комплексе с обезвоживанием и классификацией минерального сырья на сите с ячейкой 5 мм.

Общая концепция экспериментальных работ состояла в отработке взаимосвязи и управляемости смежных технологических процессов подводной добычи: процесса грунтозабора, пульпоприготовления, всасывания, эрлифтного гидроподъема, воздухоотделения (дегазации трехфазной смеси), классификации, обезвоживания и обесшламливания.

В первую очередь на экспериментальном стенде изучался процесс всасывания, который был разработан с учетом активного управления пульпоприготовления в режиме пульсационного воздействия воздухом за счет расположения смесителя в плоскости всасывания.

Исследование эрлифтного подъема осуществлялось на рабочем участке эксплуатационной характеристики эрлифта: в режимах максимального КПД и максимальной производительности.

Опытные исследования показали, что при вертикальном эрлифтом подъеме конкреций с глубин от 12 до 72 м идет последовательный процесс разрушения конкреций класса — 10+7 мм и увеличение выхода шламовой фракции — 5 мм соответственно от 3 до 9%.

Зависимость интенсивности дезинтеграции конкреций от глубины разработки при вертикальном эрлифтом подъеме выражается линейной функцией.

Основная дезинтеграция частиц перекачиваемой горной массы в процессе грунтонасосного подъема происходит при прохождении через рабочие колеса и проточные части насосов. Опытные исследования по-

казали, что выход шламовой фракции -5мм составил 14,5% при перекачивании гидросмеси грунтонасосом по сравнению с эрлифтом (рис. 3).

К основным факторам, влияющим на процесс дезинтеграции частиц горной массы, относятся их крупность (d_T), прочность ($\sigma_{сж}$) и скорость гидросмеси ($u_{см}$). Сотрудниками кафедры геотехнологии и комплексного освоения месторождений полезных ископаемых была предложено уравнение для расчета предела прочности на сжатие минеральной частицы диаметром d_T при ударе о верхнюю стенку дугового грохота на выходе из подъемной трубы эрлифта и стенку улитки грунтонасоса в зоне наибольшего износа металла.

В итоге, анализ технологических схем с использованием центробежных грунтовых насосов было выявлено ряд существенных недостатков:

- недостаточная всасывающая способность при работе на больших глубинах с крупнозернистыми породами;

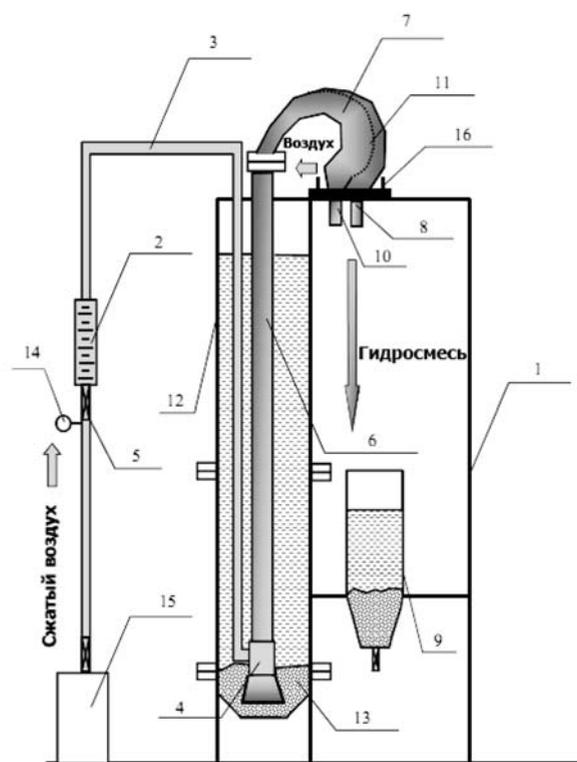


РИС. 2.

Схема экспериментального стенда: 1 – компрессор; 2 – ротаметр; 3 – воздухопровод; 4 – смеситель; 5 – задвижка; 6 – подъемная труба; 7 – дуговой грохот; 8 – подситовый слив; 9 – буферная емкость; 10 – надситовый слив; 11 – шпальтовое сито; 12 – емкость; 13 – исходный материал; 14 – манометр; 15 – компрессор; 16 – резьбовые опоры

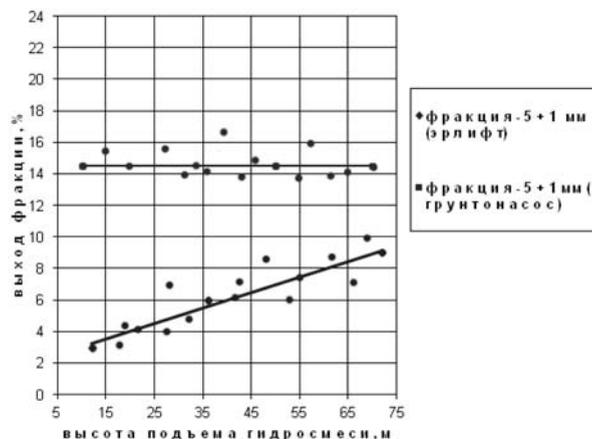


Рис. 3.

Зависимость степени дезинтеграции ЖМК от способа подъема

- трудность обеспечения герметизации всасывающей линии (при использовании погружных грунтонасосов);
- интенсивное изнашивание в процессе эксплуатации;
- повышенный удельный расход электроэнергии.

Скорость вращения рабочего колеса грунтового насоса составляет 600–900 об/мин, что оказывает значительные динамические нагрузки на конкреции при движении по криволинейной траектории проточной части насоса и способствует интенсивному разрушению ЖМК.

Как известно, использование погружного грунтового насоса под водой требует установки на раме электрических кабелей, а также герметичной капсулы, встроенной в верхнюю часть грунтозаборного устройства, что крайне затрудняет его эксплуатацию, усложняет конструкцию и приводит к уменьшению коэффициента использования рабочего времени [2].

Таким образом, хотя КПД совместной работы с погружным насосом достаточно высок, этот добычный комплекс характеризуется невысокой надежностью и требует достаточно высокой технологической дисциплины обслуживающего персонала.

Вышеперечисленные недостатки грунтовых насосов и малые прочностные (прочность на сжатие 66–110 кПа) характеристики ЖМК Финского залива приводят к ряду ограничений к применяемому оборудованию, оно должно сохранять качество добываемого и транспортируемого полезного продукта, то есть свести к минимуму дезинтеграцию железомарганцевых конкреций. Для реализации последнего фактора необходим технологический цикл без использования движущихся механических частей, то есть применение процесса эрлифтного трубопроводного гидроподъема.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быховский А.З., Терентьев А.Б., Тигунов А.П. Железомарганцевые образования Мирового океана и морского шельфа – минеральное сырье многоцелевого назначения // Минеральное сырье. Серия геолого-экономическая. № 31, М.: Изд-во ВИМС, 2010. 108 с.
2. Дробаденко В.П., Калинин И.С., Малухин Н.Г. Методика и техника морских геологоразведочных и горных работ: Учебн. для студ. высш. учеб. заведений. Волгоград: Издательский Дом «Ин-Фолио», 2010. 352 с.
3. Иванов А.М., Смирнов А.Н., Рогов В.С., Мотов А.П., Никольская Н.С., Пальшин К.В. Шельфовые железомарганцевые конкреции – новый вид минерального сырья // Минеральные ресурсы России. 2006. № 6.
4. Рогов В.С., Фролов В.В., Никольская Н.С., Титов А.А. Опыт добычи и промышленного использования железомарганцевых конкреций // Горный журнал. 2012. № 3. С. 50–55.

Журавлев Александр Сергеевич,
к.т.н., доцент Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе,

Козлов Максим Юрьевич,
аспирант Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе,

Морозов Дмитрий Сергеевич,
студент Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе

✉ 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23,
тел.: +7 (495) 438-15-03

УДК: 622.24

МОРСКИЕ ИСПЫТАНИЯ НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОДВОДНОЙ ДОБЫЧИ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩИХ ПОРОД НА ШЕЛЬФЕ НАМИБИИ

В. П. ДРОБАДЕНКО,
Н. Г. МАЛУХИН, А. Л. ВИЛЬМИС,
М. Ю. КОЗЛОВ

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ

Эффективность загрузочного аппарата для гидротранспорта: начало и продолжение процесса псевдооживления горной массы в объеме аппарата. Очень важно, чтобы скорость восходящего потока равнялась гидравлической крупности материала.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: добычное устройство, грунтозаборное устройство, эрлифт, алмазосодержащие породы, гидровзвешивание, морские испытания, гидротранспорт, гидравлическое разрыхление горных пород.

Горноразведочные работы на морском дне шельфа Намибии велись посредством проходки скважин большого диаметра буровой установкой, смонтированной на судне «Zacharias».

Производительность по бурению скважин по данным компании «Namko» составляет 20 скважин в сутки при диаметре бурения 1,8 м (площадь поперечного сечения забоя скважины – 2,5 м²) при глубине алмазосодержащей толщи пород, равной 8 м. В итоге производительность опробования в процессе бурения составляет около 16,7 м³ /ч извлеченной горной массы.

Следует заметить, что сохранность алмазов при выемке посредством бурения скважин большого диаметра значительно меньшая, чем в процессе всасывания эрлифтами, где фактически отсутствует какое-либо механическое воздействие на горную массу.

Выемка алмазосодержащих пород морского дна эрлифтами на судне «Namibian Gem» осуществляется двумя установками с диаметром подъемной трубы 508 мм и 400 мм. Производительность добычи составляла 30–50 т/ч по горной массе. Мощность продуктивной донной толщи, обрабатываемой с использованием

SEA TESTS OF NEW TECHNOLOGY OF UNDERWATER PRODUCTION OF DIAMOND-BEARING BREEDS ON A SHELF OF NAMIBIA

V.P. DROBADENKO, G.N. MALUKHIN,
A.L. VILMIS, M.Y. KOZLOV

The results of full-scale testing of the new soil intake device for airlift dredge conducted in 2004 at the Namibian shelf are presented in this article. The main aim was attained, as real delivery of diamond containing pebbly gravel material per hour ran up to 500 - 550 ton. Such ratio is 2,9 times higher than existing one.

KEYWORDS: mining device, soil intake device, airlift, diamond-bearing breeds, hydroweighings, sea tests, underwater production of soil, hydraulic transport, hydraulic loosening rocks.

эрлифта около 4–5 м. Ограничение по глубине разработки, по нашему мнению, в основном было связано с пассивным процессом всасывания. Всасывающий наконечник представлял собой раструб шириной по забою около 2 м и шириной щели 250 мм. В процессе работы всасывающий наконечник скользит по дну на выступающих ребрах – перегородках всасывающих окон, размер которых составляет 210×250 (рис. 1 А).

Расход воздуха при эрлифтном подъеме с глубины 96 м составлял 57 м³ /мин., при этом расчетная энергоемкость процесса подъема равна 347 кВт.

Грунтозабор осуществляется за счет контакта устройства, имеющего профиль полусферы, с забоем донных отложений, в результате чего всасывающий поток осуществляет лишь смыв горной массы в межреберное пространство устройства.

Такая технология грунтозабора являлась неэффективной по следующим причинам:

1. Значительное количество воды, поступающее в эрлифт, не участвует в процессе пульпоприготовления, т.к. всасывающее устройство перемещается по поверхности донных отложений.

2. Необходимые скорости всасываемого потока для размыва негабаритных кусков, формирующиеся в плоскости всасывания превышают их гидравлическую крупность. Поэтому для перемещения твердого, лежащего в плоскости всасывания, необходимо затратить значительно большие усилия, чем при восходящем потоке в подъемной трубе эрлифта.

3. Вода при рассматриваемой технологии всасывания, как правило, не может взвешивать частицы, а при известных условиях пригружает эти частицы. Пригружающее давление воды является главным сопротивлением, которое должно быть преодолено для приведения частиц твердого в движение в межреберном пространстве.

МГРИ-РГГРУ был разработан опытно-промышленный образец эрлифтного грунтозаборного устройства, которое было изготовлено, смонтировано, отлажено и испытано на борту судна «Samicor», бывшем «Namibian Gem».

Корабль был снабжен двумя эрлифтными установками с диаметром пульпоподъемного трубопровода 500 мм, которые располагались на разных его бортах. Одна из них оснащена «традиционным» грунтозаборным устройством, существующем на судне несколько лет. Другая установка – опытным грунтозаборным устройством нового типа с маятниковым «фартуком» и предварительным гидровзвешиванием добываемых рыхлых пород. Кроме того, корабль включал обогатительный комплекс перерабатывающий рыхлый материал с обеих эрлифтных установок одновременно. Работа эрлифтов и обогатительной фабрики обеспечивалась необходимым количеством генераторов, дизельных компрессоров и водяных электронасосов.

Новое всасывающее грунтозаборное устройство с активизацией процесса пульпоприготовления имело ширину 2 м и 8 окон размером 180×220 мм, общей площадью в 1,47 раз превышающей поперечное сечение подъемного трубопровода эрлифта d 500 мм. Однако принципиальные отличия заключаются в том, что его конструкция снабжена контактирующей с забоем качающейся рамой, имеющей в нижней части ряд полуцилиндрических всасывающих каналов, равномерно распределенных по всему периметру рамы, предотвращающие доступ излишней воды в эрлифт (рис. 1 Б).

Кроме того, в центральной части установлены зубья для механического рыхления, смещенные в горизонтальной плоскости друг относительно друга.

Для гидрорыхления крупнозернистого материала имеются 4 напорные насадки с напором 60 м вод.ст.

Конструктивные особенности нового грунтозаборного устройства определяют его основные преимущества:

1. Исключается пригружающее действие толщи воды.

2. Создаются благоприятные условия для гидровзвешивания и всасывания предварительно механически разрыхленных пород за счет гидродинамического воздействия напорных струй, истекающих из насадок со скоростью 33 м/с.

3. Скорости всасывания в плоскости грунтозабора составляют около 2,7 м/с, что позволяет перемещать и всасывать достаточно крупный материал, предотвращающий в значительной степени закупорку устройства.

4. Грунтозаборное устройство эксплуатируется в режиме всасывания «из-под слоя грунта», поэтому всасываемый поток прежде чем попасть в окна должен фильтроваться в турбулентном режиме критических скоростей через поровый объем горной массы, псевдооживая ее.

5. За счет воздействия напорных гидроструй, происходит опережающее гидровзвешивание алмазосодержащего мелкого материала вокруг больших негабаритных валунов.

6. Предлагаемое грунтозаборное устройство позволяет частично производить механическое разрушение плотика и тем самым всасывать наиболее обогащенных алмазами материал.

Гидродинамические и качественные показатели перемещения многофазных потоков по проточной части грунтозаборного устройства (движется 2-х фазная смесь) и эрлифта (движется 3-х фазная смесь) и на выходе из него принципиально различны, как и различен энергетический баланс, оцениваемый по этим характеристикам. Вместе с тем, основные энергетические показатели перемещаемой гидросмеси (потери давления от трения, от поддержания твердого во взвеси (потери в грунтозаборном устройстве), местные потери) оцениваются по расходным параметрам потока на выходе, а не по истинным в проточной части гидродобычного агрегата по всей высоте подъемной трубы эрлифта.

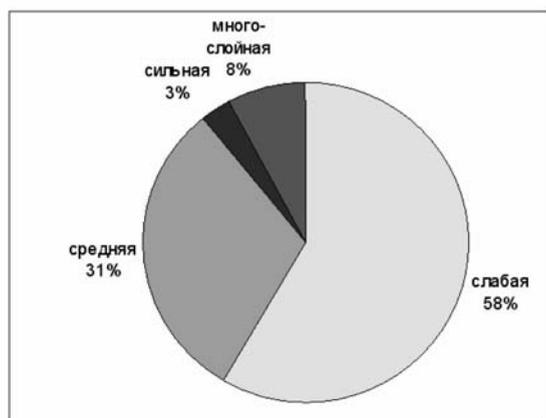
Следовательно, необходимость отработки глубоководных донных отложений (где в значительной степени возрастут потери на трение), крупногалечных пород (где определяющая роль будет представлена потерям на поддержание твердого во взвеси и в грунтозаборном устройстве) требует оценки энергетического баланса гидроподъема на основе истинной гидродинамической ситуации по длине подъемной трубы эрлифта, а не по расходным показателям потока на выходе.

Исходя из этого, проектирование эрлифтной системы гидроподъема, как по производительности, так и по оценке необходимого расхода воздуха, проводилось в следующей последовательности:

- наружное давление в плоскости всасывания грунтозаборного устройства;
- потери на трение в грунтозаборном устройстве и на выходе потока гидросмеси в плоскости всасывания;



А)



Б)

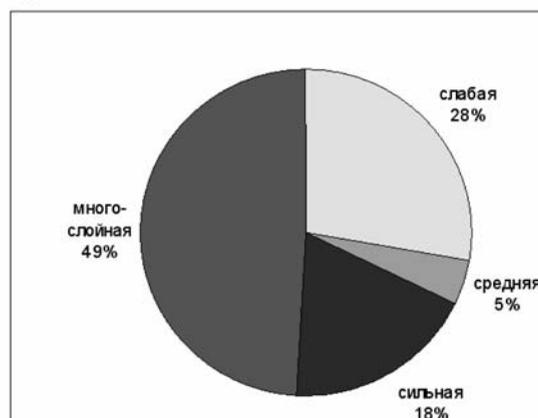


РИС. 1.

Степень и продолжительность загрузки виброгрохотов существующим (А) и новым (Б) грунтозаборным устройствами. Степень загрузки виброгрохотов: слабая – материал закрывает 15% виброгрохота, средняя – 50%, сильная – 100%, много-слойная – 200% и более

- гидростатическое давление от веса гидросмеси во всасывающей линии эрлифта;
- полные потери давления 2-х фазного потока гидросмеси во всасывающей линии эрлифта;
- динамическое давление, создаваемое эрлифтом в процессе его работы;

гидростатическое давление от веса 3-х фазной смеси (вода+твердое+ газ) над смесителем эрлифта.

Составление баланса давлений по длине проточной части эрлифта и последующий расчет показал, что минимально необходимый расход воздуха для эффективной работы эрлифта должен составлять не менее $V_0=96 \text{ м}^3/\text{мин}$.

Производительность эрлифта по гидросмеси при глубине отработки 100 м составляет $Q=2800 \text{ м}^3/\text{ч}$, а при глубине отработки 50 м – $Q=2600 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Основные технические данные нового грунтозаборного устройства представаны в табл. 1.

Основной целью испытаний являлось обеспечение максимальной часовой производительности при добыче гравийно-галечно-песчаных алмазосодержащих пород. Испытания проведены в акватории г. Людсрец (Намибия), выбор конкретных полигонов размером 250x200 м проводился по следующим критериям: глубина залегания, характер геологического строения и наличие фактических данных опробования рыхлых донных отложений, мощности и содержания алмазов. Было выбрано 6 участков на разных глубинах: 45–50 м; 65–70 м; 90–95 м, при мощностях отложений от 1,5 м до 5 м (по 3 участка на каждой лицензии). Характер геологических разрезов рыхлых отложений, глубина их залегания, содержание алмазов и параметры отобранных проб фиксировались геологическими колонками, построенными по данным шарошечного бурения.

Необходимо отметить, что на корабле не было измерительной аппаратуры для определения количества

ТАБЛИЦА 1.

Технические данные нового грунтозаборного устройства

Производительность эрлифта, м ³ /ч	2500±300	
Диаметр эрлифтной трубы, мм	500	
Максимальная глубина отработки, м	100	
Гидрорыхление :		
подача Q _p , м ³ /ч	450	
напор у насадков, м вод.ст.	60	
количество насадков, шт	4	
среднее расстояние от насадка до забоя, мм	50	
отношение кинетической энергии струи при контакте с забоем к начальному значению энергии струи	0,68	
Водогрунтозаборник с полуцилиндрическими щелями по периметру:		
сечение щели, мм	0,5d80	0,5d50
количество щелей, шт	34	34
площадь полуцилиндрических щелей, м ²	0,085	0,033
общая площадь всех щелей, м ²	0,1	0,05
скорость в щелях при подсосываемом расходе Q _п =Q _{сум.} - Q _p =2800-450=2350 м ³ /ч	6,5	13
способ рабочих перемещений водогрунтоприёмника	маятниковый за счет горизонтальной составляющей в подвеске, без перекрытия ранее отработанного участка или с перекрытием, но без водогрунтозаборника	вертикальный, с периодическим горизонтальным перемещением после отрыва водогрунто-приемника от забоя, без перекрытия ранее отработанного участка
Зона контакта водогрунтозаборника с забоем:		
длина, м	2,1	
ширина, м	0,5	
площадь, м ²	1,0	
Размер решетки а горловине всасывающего оголовка в свету, мм	180x200	
Угол поворота водогрунтозаборника относительно всасывающего оголовка с конфузуром, град	±25	
Скорость при Q _{сум.} =2800 м ³ /ч, м/с:		
в решетчатой горловине всасывающего оголовка	2,7	
в пульпопроводе Ду 500	4,0	
Масса водогрунтоприемника, кг	2070	2090

твёрдого материала поступающего по эрлифтным установкам на решетки виброгрохотов. Поэтому наблюдение за работой эрлифтных установок и количеством твёрдого обломочного материала поступающего с эрлифтных установок проводилось с использованием визуальной оценки и видеосъёмки поступления всей

поднимаемой горной массы на грохот за определённый промежуток времени.

В ходе испытаний была проведена экспертная оценка получения горной массы на вибрационный грохот независимыми экспертами, в том числе учитывался грансостав ранее определённого геологического разреза».

Кроме того, производительность оценивалась также в процентах: 0% – пустой грохот, 100% – грохот полностью заполненный одним слоем твердого материала (без наложения кусков друг на друга), 200% – двумя слоями и т.д. Оценка производительности осуществлялась по классу 12 мм+1,6 мм, хотя учет по «просеянной» фракции занижал объем горной массы. Как известно, любой грохот рассчитан на определенную производительность надрешетного и подрешетного материала, поэтому увеличение ее приводит к накоплению на грохоте материала и, как следствие, к сливу (потерям) «рабочей» фракции – 12 мм.

В ходе испытаний интенсивность поступления материала была различной, а плотность его на сите изменялась от слабой (грохот закрыт обломочным материалом на 15–20%), средней (25–45%), сильной (50–80%) до сплошной (100%) «ковровой» дорожки толщиной от 5–6 см до 20–25 см. При этом грохот на последних 3-х м длины и по всей его ширине закрыт обломочным материалом полностью. Как правило, «ковровая» дорожка появлялась, когда грунтозаборное устройство углублялось в песчаный щебнисто-глибово-дресвяный слой и продолжалось до контакта с плитком.

Результаты хронометражных наблюдений показали, что степень загрузки виброгрохотов была нестабильной. Так многослойная загрузка при работе нового грунтозаборного устройства наблюдалась гораздо чаще (49% рабочего времени против 8% у существующего). На рис. 1 представлены диаграммы, характеризующие продолжительность и количество материал на грохоте 12 мм.

Слабая загрузка означает, что материал закрывает 15% решеток, средняя – 50%, сильная – 100%, многослойная – 200% и более.

Таким образом, результаты приведенных испытаний, основанных на различных экспертных оценках производительности эрлифта с новым грунтозаборным устройством показали увеличение часовой производительности по твердому в среднем в 2,9 раза; продолжительность (стабильность подачи) высокой часовой производительности по горной массе составляет ~ 67% против 12% существующей конструкции.

Валерий Павлович Дробаденко,
д.т.н., профессор, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе

Николай Григорьевич Малухин,
д.т.н., проф., Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе

Александр Леонидович Вильмис,
к.т.н., доцент, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе

Козлов Максим Юрьевич,
аспирант, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе

✉ 117997, г. Москва ул. Миклухо-Маклая, д. 23,
тел.: +7 (495) 438-15-03

УДК 669,21/23;579,66; 622

ИССЛЕДОВАНИЯ БАКТЕРИАЛЬНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ
УПОРНЫХ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ КОНЦЕНТРАТОВВ. П. Мязин¹, В. В. Баранов²¹ ЗАБАЙКАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ,² ЗАО «СЖС Восток Лимитед»

Рассматривается возможность применения метода бактериального окисления перед операцией цианирования упорных золотосодержащих концентратов с целью повышения из них извлечения золота и серебра.

Ключевые слова: бактериальное окисление, упорные концентраты, извлечение, содержание.

На сегодняшний день в России остается весьма актуальная проблема переработки упорных сульфидных золотосодержащих концентратов. Упорность концентратов обусловлена наличием в них тонковкрапленного и диспергированного золота, неизвлекаемого даже при их сверхтонком измельчении – 15 мкм. Повысить эффективность переработки упорных концентратов можно применением операции предварительного обжига, автоклавного и бактериального окисления. [1]. Обжиговая технология в настоящее время находит ограниченное применение из-за несоответствия требованиям природоохранного законодательства. Наиболее перспективными являются технологии автоклавного и бактериального окисления.

Целью настоящей работы является изыскание приемов обработки бактериальным окислением (BioOx) упорных золотосодержащих концентратов с последующим цианированием кексов BioOx.

Объектом исследований являлись флотационные концентраты проб TS-1 и TS-2, полученные при переработке золотосодержащей руды Дальневосточного региона сульфидного и полуюкисленного (переходного) типа. Химический состав концентратов приведен в табл. 1.

Для переработки концентратов были испытаны следующие технологические приемы:

- прямое цианирование концентратов;
- сорбционное цианирование концентратов;
- цианирование концентратов после доизмельчения (табл. 2).

STUDY OF BACTERIAL LEACHING
OF REFRACTORY GOLD BEARING
CONCENTRATES

V. P. MYAZIN, V. V. BARANOV

The test work is conducted to determine the effect of bacterial oxidation of the refractory concentrates on the gold recovery prior to cyanidation. The purpose is to increase the silver and gold recovery.

KEYWORDS: bacterial oxidation, refractory concentrates, recovery, assay.

Условия цианирования и результаты тестов приведены в табл. 2. По данным выполненных исследований выявлено, что исследуемые концентраты относятся к числу упорных. При прямом цианировании концентратов извлечение золота составило 1,53% (проба TS-1) и 46,5% проба (TS-2), серебра 22,47% и 42,33 соответственно. В тестах по сорбционному цианированию с доизмельчением концентратов показатели цианирования концентратов повышаются только на 2–5% по золоту и до 38% по серебру при цианировании сульфидного концентрата. Извлечение не превышает 5% и 51% соответственно переходного. Упорность концентрата к цианистому процессу обуславливается входением золота в кристаллическую решетку сульфидных минералов. Из вредных примесей обнаружен органический углерод и мышьяк.

В результате анализа полученных данных установлено, что при цианировании сульфидного концентрата (TS-1) получены низкие показатели. Извлечение золота, даже при тонком помоле и сорбционном цианировании составило всего 5,54%. При цианировании концентрата переходной пробы (TS-2) извлечение золота составило 50,12%.

Для повышения эффективности переработки упорных концентратов дополнительно проведены тесты по бактериальному окислению концентратов с последующим извлечением Au и Ag из кексов BioOx методом сорбционного цианирования.

ТАБЛИЦА 1.

Химический состав флотоконцентратов

Название пробы	Содержание									
	Au, г/т	Ag, г/т	As, %	Sb, %	Fe, %	Сорг, %	S, %	S _{супт} , %	SiO ₂ , %	CO ₃ , %
TS-1	69,4	13,4	4,6	0,65	18,5	1,26	17,7	16,6	24,25	1,24
TS-2	93,6	6,9	4,6	0,16	20,4	0,60	20,6	19,7	38,0	–

ТАБЛИЦА 2.

Результаты лабораторных исследований по цианированию

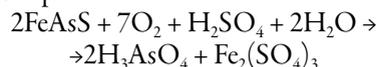
Расход, г/т		Результаты опыта						Содержание, г/т		Извлечение, %	
		Раствор, мг/л		Смола, г/т		Кек, г/т					
NaCN	CaO	Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag
TS-1 (сульфидная) 83% класса -0,045 мм, смола 20 г/т содер. тв 33%											
7,79	4,88	0,1	0,5	54,2	71,2	63,7	13,1	64,8	16,4	3,6	22,78
TS-1 (сульфидная) 100% класса -0,045 мм, смола 20 г/т содер. тв 33%											
9,62	4,56	0,1	0,7	81,9	82,8	59,8	3,1	64,8	16,4	5,54	60,69
TS-1 (сульфидная) 83% класса -0,045 мм содер. тв 33%											
12,98	4,56	0,5	1,9	0	0	66,2	13,5	64,8	16,4	1,53	22,47
TS-2 (переходная) 85% класса -0,045 мм, смола 20 г/т содер. тв 33%											
13,52	5,28	0,6	0,5	1070	65,8	42,7	4,4	93,6	6,9	51,26	45,79
TS-2 (переходная) 100% класса -0,045 мм, смола 20г/т содер. тв 33%											
13	5,86	0,5	0,4	1040	73,6	42,8	3,9	93,6	6,9	50,12	49,76
TS-2 (переходная) 85% класса -0,045 мм, содер. тв 33%											
14,78	5,87	21,1	1,6	0	0	50,2	2	93,6	6,9	46,5	42,33

Бактериальное окисление осуществлялось в реакторе при периодическом режиме (рис. 1) с аэрацией воздухом пульпы 300 мл/мин. В качестве посевного материала использовали 6 суточную культуру автотрофных умеренно-термофильных бактерий *Acidithiobacillus Ferroxidans*, *Acidithiobacillus Thiooxidans* и *Leptospirillum Ferroxidans*.

Для стабильного поддержания температуры использована водяная баня 39° С. Перемешивание пульпы осуществлялось с помощью механических мешалок при скорости 230 об./мин. Исследования выполнены при плотности пульпы 19% твердого. В качестве питательной среды использовали соль мора 1,29 кг/т концентрата. Процесс окисления концентратов осуществлялся в течение 28 дней. Для математической обработке полученных данных использован метод Стьюдента.

Процесс биоокисления сульфидов оценивается на основе реакций прямого и непрямого окисления:

Арсенопирит:



Пирит:

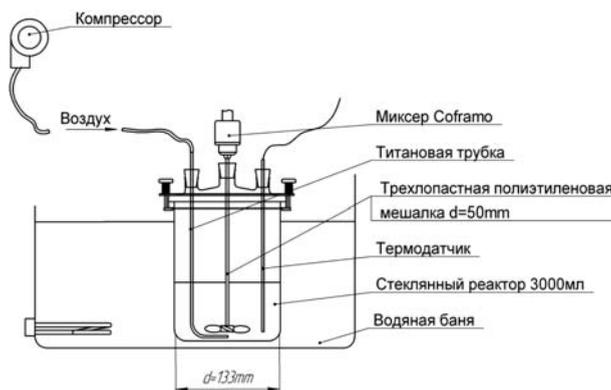


РИС. 1.

Реактор бактериального окисления

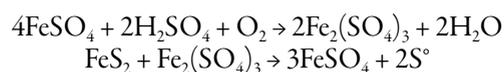
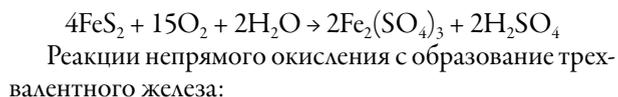


ТАБЛИЦА 3.
Результаты тестов

	TS-1 (сульфид.)	TS-2 (переход.)
Время окисления (дней)	28	28
Потеря массы входе процесса био-окисления (%)	37–38	36–37
Расход кислоты (кг/т)	9,6	9,6
Расход CaCO ₃ (кг/т)	220	186
Нетто-генерация потребления кислоты (кг/т)	-206,5	-172,7

Результаты выполненных тестов представлены в табл. 3.

Установлено, что в результате биоокисления было регенерировано 206,5 кг/т серной кислоты из сульфидных минералов, сульфидного концентрата и 172,7 кг/т переходного. При этом потеря масс концентратов произошла как за счет окисления сульфидных минералов, так и выщелачивания других компонентов. Для поддержания значений pH (1,2–1,5) среды использовался CaCO₃ при расходе его для переходного концентрата 186 кг/т, а для сульфидного концентрата 220,5 кг/т.

Степень окисления сульфидов переходного концентрата в результате их биоокисления составила 99,5%. Степень окисления сульфидного концентрата 99,4%. Переход мышьяка в жидкую фазу для первого концентрата пробы составил 89,5%, в то время как для второго концентрата – 79,5%. Результаты анализа хи-

мического состава продуктов бактериального окисления представлены в обобщенном виде в табл. 4, 5.

В результате можно заключить, что в кеках бактериального окисления концентратов сульфидной пробы содержание сурьмы снизилось в 2,5 раза, мышьяка в 13,5 раза. Изменения содержания мышьяка для второй пробы незначительные. Содержание золота в кеках за счет потери массы увеличилось в пробе TS-1 на 5,8 г/т, а в пробе TS-2 на 5,9 г/т. при биоокислении. Результаты биоокисления кеков после цианирования представлены в табл. 6

Полученные результаты тестов по цианированию приведены в табл. 7.

По результатам выполненных исследований установлено, что применение предварительного бактериального окисления концентратов перед последующим их цианированием позволяет повысить

ТАБЛИЦА 4.
Химический состав кеков бактериального окисления

Проба	Химический анализ кека бактериального выщелачивания, %											
	Au г/т	Ag г/т	C _{общ}	C _{орг}	S _{общ}	S ²⁻	S ⁰	Fe _{общ}	As	Sb	Hg	SiO ₂
TS-1 (сульфид.)	75,2	11,3	1,33	1,11	7,42	0,12	0,13	2,22	0,35	0,26	2,18	41,1
TS-2 (переход.)	99,5	8,4	1,27	0,93	5,12	0,13	0,14	2,64	1,0	0,13	3,35	48,8

ТАБЛИЦА 5.
Химический состав растворов бактериального окисления

Тип концентрата	Результаты анализа раствора бактериального выщелачивания, г/л					
	Fe ⁺²	Fe ⁺³	Fe _{общ}	As	SO ₄	Sb
TS-1 (сульфид.)	0	55,75	55,75	4,49	4,08	0,468
TS-2 (переход.)	0	35,25	35,25	4,28	6,34	0,106

ТАБЛИЦА 6.

Расход реагентов и условия режима сорбционного цианирования

№ Теста	Время агитации, часы	Смола, г/л	Расход, кг/т		Результаты опыта					
			NaCN	CaO	Раствор, мг/л		Смола, г/л		Кек, г/т	
					Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag
TS-1 (сульфид.)	24	20	10,97	15,6	<0,40	<0,80	1300	115	2,120	<1,9
	48	20	19,6	20,4	<0,30	<0,60	1330	137	2,050	<1,5
TS-2 (переход.)	24	20	10,2	12,6	<1,10	<0,80	1540	128	10,200	<0,80
	48	20	20,0	19,4	<0,80	<0,70	2170	140	9,570	<1,0

ТАБЛИЦА 7.

Потеря массы, степень окисления, извлечение и содержание при цианировании продуктов

№ Теста	Исходное содержание г/т		Извлечение, %		Степень окисления S, %
	Au	Ag	Au	Ag	
TS-1 (сульфид.)	75,2	11,300	96,0	78,4	99,2
TS-2 (переход.)	75,2	11,300	96,2	82,8	99,2
	99,200	8,400	86,4	88,3	99,4
	99,200	8,400	90,3	90,9	99,4

извлечение золота и серебра из кеков BioOx в пробе TS-1 на 91% и 22%, а в пробе TS-2 – на 39 и 45% соответственно.

Полученные данные подтверждают перспективность использования данного метода для повышения извлечения золота и серебра из упорных золото-мышьяковистых концентратов (с тонковкрапленным золотом).

Мязин Виктор Петрович,
д.т.н., профессор Забайкальского государственного университета

☞ г. Чита, ул. Кастринская, д. 1,
тел.: +7 (3022) 26-02-83, e-mail: myazinvpchita@mail.ru

Баранов Владимир Валентинович,
аспирант Забайкальского государственного университета
ЗАО «СЖС Восток Лимитед»

☞ e-mail: vladimirbaranov_@mail.ru

УДК 622.7

ГЛУБОКАЯ ПЕРЕРАБОТКА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

Г.А. ПАХОМОВА,
А.Р. МАКАВЕЦКАС, И.Н. БАБИЧ,
М.А. РЯЗАНОВ, А.А. КУРНЕВ,
Е.А. ТЕРЕНТЬЕВАНАУЧНО-ВНЕДРЕНЧЕСКОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
ЦЕНТР ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО АУДИТА
НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ

Использование микроорганизмов позволяет утилизировать техногенные отходы металлургического производства. Авторами изучена возможность переработки свинцово-цинковых и медно-цинковых шлаков. Комбинирование механических и биогидрометаллургических методов переработки дает возможность получать высококачественные концентраты.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бактериальное выщелачивание, металлургические отходы, глубокая утилизация, доизвлечение ценных компонентов.

Растущее потребление минеральных ресурсов сопровождается увеличением объемов образования техногенного сырья, часть которого является трудным объектом для вторичной переработки. Поиски рентабельных способов глубокой переработки техногенного минерального сырья привели к появлению нового направления – биометаллургии.

Биометаллургия на настоящий момент может решать такие важнейшие задачи, как вскрытие ценного компонента (биоокисление) и биовыщелачивание (подземное, кучное, кюветное, чановое). Бактерии могут способствовать снижению сорбционной активности измельченного сырья, кондиционированию концентратов по вредным примесям, обеззараживанию продуктов цианирования и промышленных стоков.

С использованием микроорганизмов возможна глубокая переработка сложного комплексного минерального сырья и полная утилизация техногенных отходов.

Применение биотехнологических способов перспективно, прежде всего, там, где традиционные технологии бессильны перед экономическими и экологическими требованиями.

Вторичная переработка отходов металлургического производства проводится с целью возвращения металла в процесс. Как правило, при этом степень до из-

DEEP PROCESSING
OF METALLURGICAL WASTESA.G. PAKHOMOVA, A.R. MAKAVESKAS,
I.N. BABICH, M.A. RJAZANOV,
A.A. KURNEV, E.A. TERENTJEVA

The use of microorganisms allows to utilize man-caused waste products of metallurgical manufacture. The authors studied the possibility of processing of lead-zinc and copper-zinc slags. Combining of mechanical and biohydrometallurgical processing methods gives the possibility to receive high-quality concentrates.

KEYWORDS: bacterial leaching, metallurgical waste, waste recycling, slag.

влечения ценных компонентов редко превышает 55%, основная часть теряется с силикатной фазой. Металлургические шлаки содержат в своем составе, помимо оксида кремния, железо, цинк, свинец, медь, а также драгоценные металлы.

В статье отражены результаты использования биотехнологических приемов в схемах переработки шлаков свинцово-цинковых и медно-цинковых производств.

Шлаки свинцово-цинкового производства, полученные в процессе переработки руд месторождения Трещка, используются в качестве абразивного порошка. По химическому составу шлаков, представленному в табл. 1, виден их высокий потенциал по извлекаемой ценности.

В процессе гравитационно-магнитного фракционирования (ГМФ) была определена высокая контрастность гравитационных и магнитных свойств, позволившая обосновать схему и аппараты обогатительного цикла. На винтовом шлюзе удалось получить свинцовый концентрат, содержащий более 60% свинца. Доводка концентрата с помощью магнитной сепарации позволила повысить его качество до 94,5%, содержание серебра составило порядка 1000 г/т. Хвосты гравитационного обогащения были направлены на бактериальное выщелачивание.

ТАБЛИЦА 1.

Химический состав исходных шлаков

Компонент	Содержание, %	Компонент	Содержание, %
Fe ₂ O ₃	33,5	Co	0,006
Al ₂ O ₃	2,57	Ni	0,014
SiO ₂	15,0	Cu	0,30
MgO	0,77	Zn	6,70
Na ₂ O	0,85	Pb	11,0
K ₂ O	0,30	Bi	0,063
CaO	14,0	Sr	0,028
TiO ₂	0,40	Zr	0,025
MnO	0,66	Ag, г/т	170,0
P ₂ O ₅	0,03	Sb	0,210
S _{общ}	3,0	Ba	0,190
V ₂ O ₅	0,01	П.п.п.	8,760
Cr ₂ O ₃	0,13	Сумма	98,516

Крупность хвостов винтового шлюза составляла менее 0,5 мм. В их химическом составе установлены следующие компоненты, (%): SiO₂ – 20,30; Fe₂O₃ – 38,70; CaO – 17,10; Zn – 5,80; Pb – 3,0; MgO – 1,90; Ag – <0,005.

Была поставлена задача удаления цинка с использованием биотехнологии.

Из материала пробы выделили активную ассоциацию микроорганизмов, соответствующую собственному биоценозу. Особенности бактериального комплекса явились высокая устойчивость к тяжелым металлам, позволяющая выдерживать концентрации до 90 г/л железа в растворах, а также высокая эффективность выщелачивания цинка в раствор. Условия опыта: Т:Ж=1:5, постоянная аэрация, периодическая смена раствора, температура окружающей среды 15–22° С. В начальный период наблюдали повышение рН до 3,8–4,1, через 15 суток кислотность стабилизировалась, окислительно-восстановительный потенциал повышался на протяжении всего опыта с 597,5 до 810,0 мВ. Наблюдения за опытом показали, что с накоплением бактерий в пульпе возрастает концентрация железа и цинка. Максимальная концентрация цинка в растворе составила 6,6 г/л на 20-е сутки, затем отмечено снижение на фоне повышения содержания трехвалентного железа (Fe(III)). Анализ кека бактериального выщелачивания показал, что остаточное содержание цинка составило 0,51%, таким образом, извлечение цинка в раствор достигло 95,6%.

Авторами были исследованы также гранулированные шлаки медеплавильного производства. Химический состав шлаков представлен в табл. 2.

При изучении особенностей вещественного состава шлаков установлено, что благоприятными фак-

ТАБЛИЦА 2.

Химический состав исходных гранулированных шлаков

Компонент	Содержание, %	Компонент	Содержание, %
SiO ₂	36,50	K ₂ O	0,70
P ₂ O ₅	0,11	Na ₂ O	0,80
Al ₂ O ₃	3,93	Zn	4,80
TiO ₂	0,29	Cu	0,44
Fe ₂ O ₃ _{общ} / Fe, в т.ч.:	43,83/30,63	H ₂ O	<0,05
- FeO	38,94	S _{общ}	1,48
- Fe ₂ O ₃	0,57	SO ₃	<0,05
- Fe _{магн}	<0,10	CO ₂	<0,10
CaO	7,76	п.п.п.	увел.
MgO	2,77	Сумма	99,66
MnO	0,42		

торами для биовыщелачивания гранулированных карбашских шлаков являются:

- присутствие в шлаках железа преимущественно в двухвалентной форме (по данным фазового анализа составляющего 98,68% от количества всего железа);
- наличие остаточного сульфида цинка;
- нахождение в шлаках цинка в виде феррита цинка (по данным фазового анализа составляющего 70% от количества всего цинка).

Бактериальное выщелачивание шлаков проводилось тремя способами: чановым, кучным и в тонком слое.

Сравнительный анализ концентрации цинка в растворах при различных тестовых вариантах бактериального выщелачивания приведен в табл. 3.

Разница в величинах концентрации цинка при различных вариантах биовыщелачивания объясняется различными условиями ведения процесса, в первую очередь – соотношения твердого и жидкого (Т:Ж). В чановом варианте растворы «разубожены», в кучном варианте и тонком слое – более концентрированные, но меньшего объема.

В табл. 4 приведен сравнительный анализ кеков выщелачивания различными способами.

Более высокое содержание меди и цинка в кеках выщелачивания в кучном варианте и тонком слое по сравнению с чановым обусловлено недостаточным временем выщелачивания, так как процессы в кучном варианте и в тонком слое являются более длительными по времени.

На рис. 1 представлены изображения гранулированного шлака до и после бактериального выщелачивания.

В процессе бактериального выщелачивания образуются так называемые «новообразования» (вто-

ТАБЛИЦА 3.

Динамика изменения концентрации цинка в растворах выщелачивания

Продолжительность процесса, сутки	Способ выщелачивания		
	чановый	кучный	тонкий слой
	Концентрация цинка, мг/л		
0	3,7	38,0	25,0
15	7,7	41,0	52,0
30	24,0	226,0	484,0
60	49,2	255,0	715,0
90	41,4	318,0	815,0
110	31,25	385,0	896,0



А



Б

РИС. 1.

А – Исходный гранулированный шлак; Б – агрегат гидроксидов железа с реликтовыми зернами первичных шлаков после бактериального выщелачивания в кучном варианте. Изображение под стереомикроскопом

ТАБЛИЦА 4.

Анализ кеков выщелачивания

Показатели	Способ выщелачивания		
	чановый	кучный	тонкий слой
Исходное содержание в шлаке, %:			
Zn	4,80	4,80	4,80
Cu	0,44	0,44	0,44
SiO ₂	36,50	36,50	36,50
Fe ₂ O ₃	43,83	43,83	43,83
Содержание в кеке, %:			
Zn	0,37	1,40	2,04
Cu	0,13	0,23	0,32
SiO ₂	4,90	22,60	27,60
Fe ₂ O ₃	38,60	41,90	38,20
Извлечение в раствор, %:			
Zn	92,00	70,83	57,50
Cu	70,00	47,73	27,27
SiO ₂	86,60	38,08	24,38
Остаток твердого, %	6,00	50,00	50,00

ZLS.TXT 21s 31.12.2002

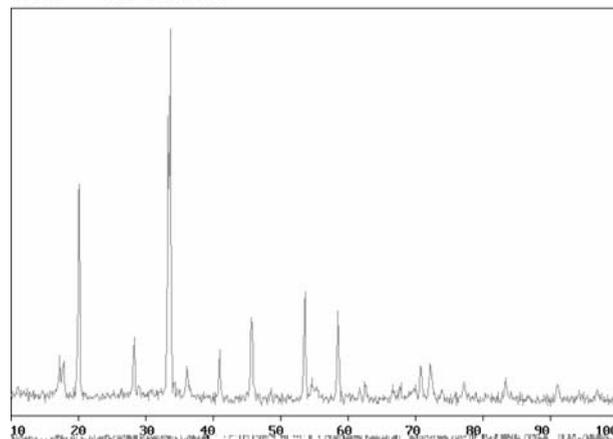


РИС. 2.

Дифрактограмма новообразований после воздействия на шлак бактериальными растворами

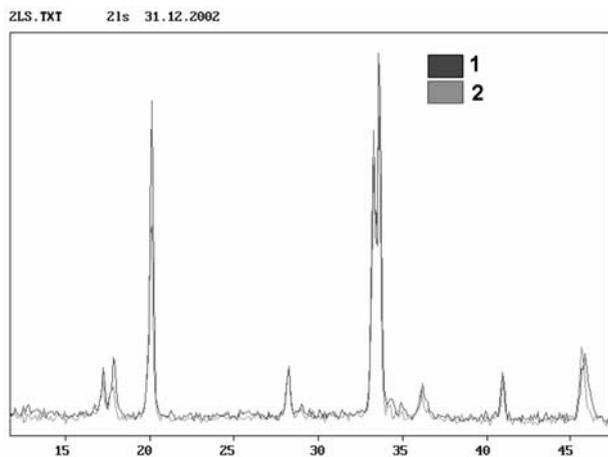


Рис. 3.

Фрагмент совмещения двух дифрактограмм: 1 – дифрактограмма новообразований после воздействия на шлак бактериальными растворами в течение 60 суток; 2 – дифрактограмма новообразований после воздействия на шлак бактериальными растворами в течение 110 суток

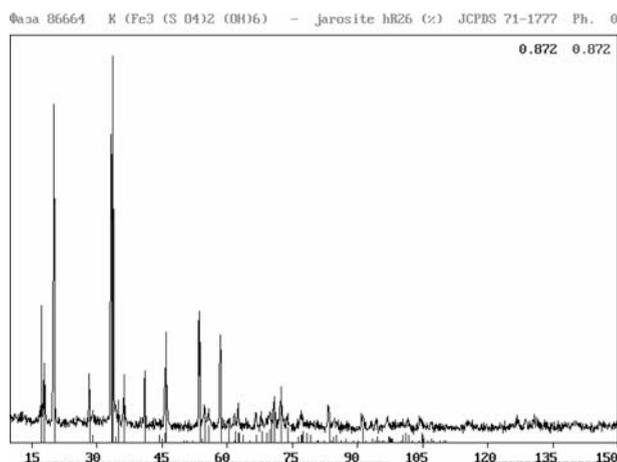


Рис. 4.

Дифрактограмма ярозита

ричные продукты, образовавшиеся в результате воздействия микроорганизмов на первичные минералы, и продукты жизнедеятельности бактерий). Для установления минеральных фаз «новообразований» был выполнен рентгеноструктурный анализ указанных продуктов. Полученные дифрактограммы (рис. 2–5) свидетельствуют о присутствии в их составе обоих продуктов ярозита и водного сульфата железа. Зафиксированные под стереомикроскопом частицы кремнезема и установленный химическим анализом оксид кремния не нашли отражения на дифрактограммах в силу того, что названная фаза находится в кристалло-аморфном состоянии.

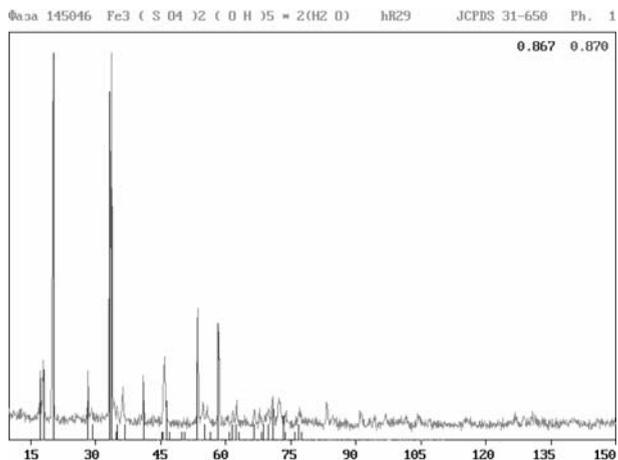


Рис. 5.

Дифрактограмма водного сульфата железа

Предлагаемые технологии переработки шлаков позволяют путем комбинирования методов механического обогащения и биогидрометаллургического передела независимо от исходного содержания ценных компонентов достигать решения задач их безотходной утилизации.

Пахомова Галина Алексеевна,
заместитель директора по науке ООО «Научно-внедренческое предприятие Центр экспертных систем технологического аудита недропользования»

Макавецкас Альгис Римантасович,
научный сотрудник ООО «Научно-внедренческое предприятие Центр экспертных систем технологического аудита недропользования»

Бабич Игорь Николаевич,
инженер ООО «Научно-внедренческое предприятие Центр экспертных систем технологического аудита недропользования»

Рязанов Максим Андреевич,
инженер ООО «Научно-внедренческое предприятие Центр экспертных систем технологического аудита недропользования»

Курнев Артем Алексеевич,
инженер ООО «Научно-внедренческое предприятие Центр экспертных систем технологического аудита недропользования»

Терентьева Евгения Александровна,
инженер ООО «Научно-внедренческое предприятие Центр экспертных систем технологического аудита недропользования»

☎ 117463, г. Москва, ул. Ясногорская, д. 13, к. 1, кв. 228,
тел.: +7 (499) 236-56-54, e-mail: ashirbaeva@bk.ru

УДК 622.7

ОБЕЗЖЕЛЕЗНЕНИЕ КВАРЦЕВЫХ ПЕСКОВ
В УСЛОВИЯХ ЕСТЕСТВЕННОГО ЗАЛЕГАНИЯЛ.С. КАЛИНИЧЕНКО,
Е.А. АШИРБАЕВА,
А.В. КАНАРСКАЯ

ООО «НВП ЦЕНТР-ЭСТАГЕО»

Процесс обезжелезнения кварцевых песков позволяет вовлекать в производство пески с повышенным содержанием железа. Изучено использование штаммов гетеротрофных бактерий. Технология бактериального выщелачивания железа экологически безопасна для человека и окружающей среды, ее достоинство также заключается в простоте технологической схемы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бактериальное выщелачивание, кварцевый песок, микроорганизмы, экологически безопасный способ.

Многочисленными исследованиями установлена роль микроорганизмов в преобразовании месторождений. В настоящее время использование биотехнологии приобретает особую актуальность в случае переработки сложного труднообогатимого нерудного сырья.

Вовлечению кварцевых песков в стекольное производство мешает высокое содержание железа, трудноудаляемое механическими традиционными способами обогащения, такими, как обесшламливание, оттирка, гравитация и магнитная сепарация.

В природе под воздействием микроорганизмов железо постепенно выщелачивается, в естественных условиях на месторождениях образуются участки с низким содержанием железа, но процесс обезжелезнения может длиться тысячи лет.

Изучение авторами микрофлоры различных месторождений кварцевых песков показало многообразие видового состава на каждом из них, но общим было преобладающее количество представителей родов *Aspergillus*, *Penicillium*, *Bacillus* и *Pseudomonas* — $2,5 \times 10^4 \div 7 \cdot 10^5$ клеток на 1 г (кл./г). Выявлено присутствие *Actinomyces*, *Mycobacterium*, *Mycococcus*, *Muxococcus*, *Bacterium*, *Saccharomyces*, *Micrococcus* и *Sarcina* (рис. 1). Установлены сезонные колебания в развитии микроорганизмов — в осенний период их количество

REMOVAL OF IRON FROM QUARTZ
SAND IN A NATURAL OCCURRENCEL.S. KALINCHENKO,
E.A. ASHIRBAEVA, A.V. KANARSKAJA

Removal of iron from quartz sand allows to involve into production Sands with high content of iron. Studied the use of strain of heterotrophic bacteria

Technology of bacterial leaching of iron is ecologically safe for humans and the environment, and also its advantage is the simplicity of the technological scheme.

KEYWORDS: bacterial leaching, quartz sand, microorganisms, environmentally safe way.

снижается на 1–2 порядка, а весной наблюдается высокая активность.

В процессе многочисленных испытаний были выделены штаммы самых распространенных культур и проверена их способность выщелачивать железо. Из наиболее активных составили ассоциации с учетом природных биоценозов для каждого вида сырья.

Микробиологические исследования кварцевых песков различных месторождений (Ореховая роща, Егановское, Чулковское, Сухобезводненское и др.) выполнены с целью выявления культур, способных разрушать различные соединения железа. Были выделены штаммы, соответствующие собственному биоценозу, и проверена их способность выщелачивать железо. Применение ассоциаций микроорганизмов (бактериальных комплексов) способствует получению более высоких показателей по сравнению с применением монокультур, что отражено в табл. 1.

Установлено, что биопроцесс можно проводить чановым, блочным и перколяционным способами выщелачивания, но блочный способ наиболее приближен к естественным условиям. Период накопления микроорганизмов в блоках составляет 4–5 суток, тогда как в чанах и перколяторах — 7–8 суток. До накопления бактерий железо в растворах отсутствует

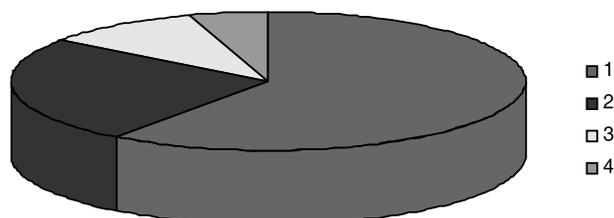


Рис. 1. Соотношение различных групп микроорганизмов. 1 – *Saccharomyces*, 2 – *Bacillus*, 3 – *Bacterium*, 4 – *Oidium*

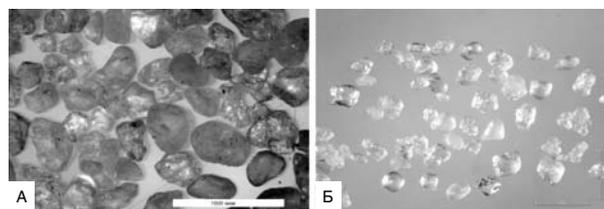


Рис. 2. А – исходный кварцевый песок; Б – поверхность зерен кварца под воздействием микроорганизмов

ТАБЛИЦА 1.
Технологические показатели

Месторождение	Монокультура	Бактериальный комплекс
	Извлечение железа в раствор, %	
Ореховая роща	56,12	87,0–96,0
Егановское	34,29	66,67
Сухобезводненское	48,37	82,80
Йошкар-Олинское	21,00	50,00

и появляется только по достижении их численности свыше 10^8 – 10^9 клеток/г.

Контроль за процессом выщелачивания вели по показателям численности микроорганизмов, рН, окислительно-восстановительному потенциалу (Еh), выходу железа, степени обесцвечивания и при постоянном наблюдении минеральных фаз оптическими методами. В осветленных пробах определяли остаточное содержание железа. В процессе обезжелезнения во всех бактериальных вариантах происходит снижение рН и Еh. В одних вариантах рН снижался на 3,5–4,0, в других – на 1,5–2,0, Еh – на 250–300 мВ (милливольт). Отмечена корреляция кислотности культуральной жидкости с растворением железа: чем активнее протекает процесс кислотообразования, тем интенсивнее протекает обезжелезнение песков. Проведенные исследования показали возможность выщелачивания железа с помощью микроорганизмов до 96% при его исходных содержаниях от 0,3% и выше, остаточное содержание железа составляет порядка 0,04%.

Опытным путем было установлено, что процесс облагораживания песков можно значительно интенсифицировать путем внесения в питательную среду определенных катализаторов. Добавление катализатора даже в ничтожных количествах ускоряет развитие бактерий и увеличивает их активность.

На рис. 2 представлены изображения кварцевого песка до и после бактериального выщелачивания гетеротрофными бактериями. Поверхность зерен кварца под воздействием микроорганизмов очистилась, зерна стали прозрачными, что позволило увидеть в еди-

ничных кристаллах субмикроскопические включения темноцветных минералов, обуславливающих остаточное незначительное количество железа.

Полученный эффект открыл новые возможности биотехнологической подготовки кварцевых песков для последующего минералого-технологического изучения. Визуализация внутренних включений после биообработки песков повышает эффективность как диагностики, так и обоснования оптимальной технологии обогащения. Например, расположение включений магнетита в приповерхностном пространстве кварцевых зерен является благоприятным фактором для их выделения методом магнитной сепарацией; тонкая, рассеянная вкрапленность магнетита в кварце не будет способствовать данному процессу и т.д.

Биотехнологический способ обезжелезнения не требует значительных капитальных и эксплуатационных затрат, его достоинство заключается в простоте технологической схемы, аппаратурного оформления и эксплуатации.

Технология отличается экологической чистотой, так как перевод железа в раствор происходит при температуре и давлении окружающей среды, без применения токсичных реагентов и под воздействием микроорганизмов, взятых из природы, а потому безопасных для окружающей среды и Человека.

Калиниченко Людмила Степановна,
к.г.-м.н., старший научный сотрудник-минералог ООО «Научно-внедренческое предприятие Центр экспертных систем технологического аудита недропользования»

Канарская Алёна Владимировна,
инженер ООО «Научно-внедренческое предприятие Центр экспертных систем технологического аудита недропользования»

Аширбаева Евгения Александровна,
инженер ООО «Научно-внедренческое предприятие Центр экспертных систем технологического аудита недропользования»

☎ 117463, г. Москва, ул. Ясногорская, д. 13, к. 1,
тел.: +7 (499) 236-56-54

УДК 622.7

ИЗВЛЕЧЕНИЕ НИКЕЛЯ ИЗ УПОРНЫХ РУД

Т.В. БАШЛЫКОВА,
Е.А. АШИРБАЕВА,
Ю.Ю. ФИЩЕНКО, М.В. ПИНЯСОВ,
А.А. ДУНАЕВА, Е.Н. БАРАНОВА

ООО «НВП ЦЕНТР-ЭСТАГЕО»

Бактериальное выщелачивание позволяет вовлекать в процесс переработки упорные для традиционного обогащения руды. Основная роль в этом процессе отводится микроорганизмам, способным переводить цветные металлы в раствор.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бактериальное выщелачивание, никелевые руды, микроорганизмы, минералогический мониторинг.

В последнее время при переработке труднообогащаемых руд все более широкое применение находят «нетрадиционные» способы, в частности, бактериальное выщелачивание. В качестве выщелачивающего агента применяются микроорганизмы, наибольшее использование получили бактерии *Ac. Ferrooxidans* и *Ac. Thiioxidans*.

К основным преимуществам бактериального выщелачивания можно отнести селективность процесса, простоту в его управлении, минимальное воздействие на окружающую среду, относительно низкие капитальные затраты, возможность вовлечения в переработку труднообогащаемого и техногенного сырья.

Основные недостатки биовыщелачивания обусловлены сравнительно низкой скоростью выщелачивания металлов (по сравнению с традиционной гидро- и пирометаллургией), также возможным увеличением объемов дренажа кислых вод, что при недостаточном контроле может привести к избыточному закислению окружающих грунтов.

Авторами изучалась проба силикатной никелевой руды, представленная серпентином (хризотил-асбест, антигорит) – 73,68%, хлоритом – 9,86%, амфиболами – 2,95%, пироксенами – 2,61%. Содержание сульфидов (пентландита, минералов меди) составляет 1,11%, магнетита – 6,96%. Данная руда характеризуется присутствием значительного количества хризотил-асбеста, обладающего высокоразвитой поверхностью и повышенной сорбционной активностью, а также наличием различных по качеству сростков пентландита

EXTRACTION OF NICKEL
FROM REFRACTORY OREST.V. BASHLYKOVA, E.A. ASHIRBAEVA,
JU. JU. FISHHENKO, A.A. DUNAIEVA,
E.N. BARANOVA

Bacterial leaching allows to involve in the process of processing refractory ore, which are difficult to enrich with traditional ways. The main role in this process is given to microorganisms, capable to translate non-ferrous metals in solution.

KEYWORDS: bacterial leaching, nickel ores, microorganisms, mineralogical monitoring.

с магнетитом преимущественно закрытого типа. Главным ценным компонентом пробы является никель, присутствующий в сульфидной, в силикатной и оксидной формах. Содержание никеля в руде не превышает 0,3–0,4%, меди – 0,049%, кобальта – 0,016–0,031%.

Основные проблемы при выборе процесса обогащения обусловлены очень тонкой вкрапленностью рудных минералов, наличием части никеля в силикатной форме (при низком его содержании в исходной руде), присутствием в составе руды значительного количества (до 40–60%) хризотил-асбеста, не позволяющего вести процессы в водной среде. Сухие методы обогащения с целью выделения хризотил-асбеста также неэффективны из-за значительных потерь никеля с промежуточными продуктами каждой перемешивающей операции. Эффективность переработки медно-никелевых руд, содержащих хризотил-асбест, механическими методами обогащения минимальна. Гидрометаллургические методы, в том числе сернокислотное выщелачивание исходной руды, дают ничтожно малое извлечение никеля в раствор, имеющий гелеобразное состояние из-за образующейся кремниескислоты.

Присутствие в породах различных генераций пентландита, тонкая вкрапленность зерен не позволяет добиться его высокого извлечения обычными методами механического обогащения. Для флотационного обогащения основную трудность создает необходимость тонкого измельчения руды для селективного раскрытия никельсодержащих фаз, а также наличие нефлотуруемой ксантагенатом силикатной фазы никеля, что

приводит к неизбежным потерям ценного компонента.

Авторами изучалась возможность извлечения цветных металлов различными способами бактериального выщелачивания. Экспериментальным путем из руды месторождения выделены штаммы, соответствующие собственному биоценозу; получена активная ассоциация микроорганизмов, экологически и генетически адаптированная к вещественному составу руды. В процессе исследований установлено, что хризотил-асбест не влияет на эффективность процесса бактериального выщелачивания, его повышенное содержание в данном случае можно отнести к благоприятным факторам, так как в слабокислых средах он одномоментно «набухает», а затем постепенно растворяется, тем самым обеспечивая больший доступ бактерий-металлургов к никельсодержащим фазам. Максимальное извлечение никеля получено на пробах с наиболее высоким содержанием хризотил-асбеста (СК-0 – минимальное содержание хризотил-асбеста, СКП – среднее содержание; СК-3 – максимальное содержание, табл. 1).

Минералогическим мониторингом установлена последовательность выщелачивания минеральных фаз: серпентин → пентландит → халькопирит → магнетит, обусловленная кристаллохимическими особенностями минералов и парагенетической ассоциацией, которую они образуют в руде. При наличии сростков и включений пентландита в магнетите (рис. 1) после биовскрытия магнетита в раствор переходит никель из вскрытой сульфидной фазы.

Использование бактериального комплекса СоН-11, полученного экспериментальным путем, при проведении опытов в различных вариантах позволило получить извлечение в продуктивный раствор: никеля – до 94,87%, меди – до 67,35%, кобальта – до 70,87%.

Исследования кучного биовыщелачивания проводились при различной крупности материала. Максимальное извлечение никеля, меди и кобальта было получено при биовыщелачивании материала крупностью -5 мм, но в данном варианте отмечалась повышенная «слеживаемость» руды и снижение проницаемости раствора. Продолжительность процесса выщелачивания при крупности материала – 20 мм значительно увеличивается. Оптимальная крупность руды, укладываемой в штабель, установлена опытным путем и составила – 10 мм. Максимальная концентрация никеля в продуктивном растворе, достигнутая в ходе опыта, составила 1 г/л. На рис. 2 графически представлена зависимость концентрации никеля в продуктивном растворе от времени выщелачивания.

Исследования кучного биовыщелачивания проводились при различной крупности материала. Максимальное извлечение никеля, меди и кобальта было получено при биовыщелачивании материала крупностью -5 мм, но в данном варианте отмечалась повышенная «слеживаемость» руды и снижение проницаемости раствора. Продолжительность процесса выщелачивания при крупности материала – 20 мм значительно увеличивается. Оптимальная крупность руды, укладываемой в штабель, установлена опытным путем и составила – 10 мм. Максимальная концентрация никеля в продуктивном растворе, достигнутая в ходе опыта, составила 1 г/л. На рис. 2 графически представлена зависимость концентрации никеля в продуктивном растворе от времени выщелачивания.

ТАБЛИЦА 1.

Сравнительный химический анализ исходных проб с различным содержанием хризотил-асбеста и кеков выщелачивания

Компоненты	Содержание, %					
	Исходная проба СКП	Кек выщелачивания СКП	Исходная проба СК-0	Кек выщелачивания СК-0	Исходная проба СК-3	Кек выщелачивания СК-3
CoO/Co	0,04/0,031	0,019/0,015	0,039/0,03	0,02/0,016	0,039/0,03	0,019/0,015
NiO/Ni	0,37/0,29	0,089/0,070	0,36/0,28	0,11/0,089	0,38/0,30	0,069/0,054
CuO/Cu	0,061/0,049	0,044/0,035	0,058/0,046	0,051/0,041	0,063/0,050	0,045/0,036

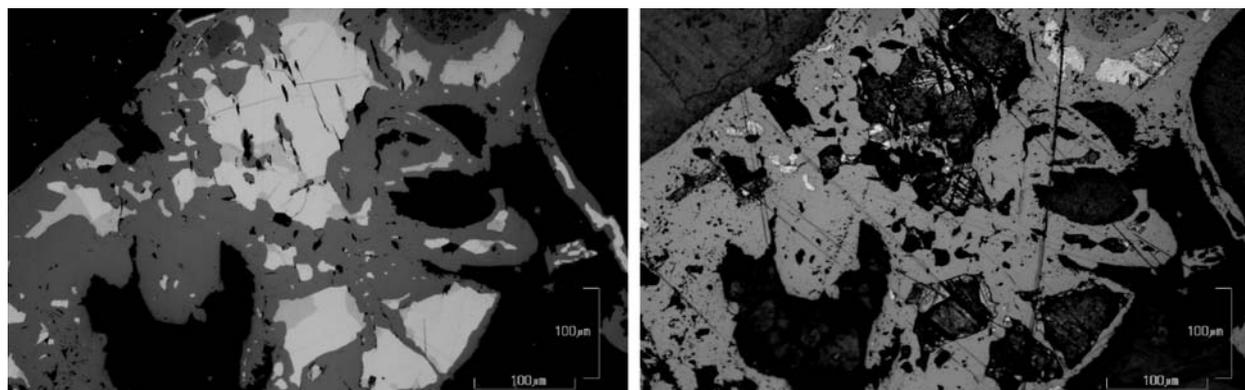


РИС. 1.

Пентландит (белое) и халькопирит (желтое) в магнетитовой матрице до (а) и после (б) бактериального воздействия; изображение в отраженном свете

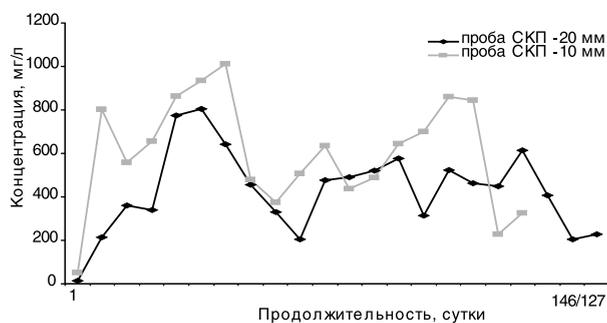


Рис. 2.

Зависимость концентрации никеля от времени выщелачивания. По оси абсцисс: продолжительность выщелачивания пробы крупностью – 20 мм/продолжительность выщелачивания пробы крупностью – 10 мм

Т.В. БАШЛЫКОВА, Е.А. АШИРБАЕВА,
Ю.Ю. ФИЩЕНКО, М.В. ПИНЯСОВ,
А.А. ДУНАЕВА, Е.Н. БАРАНОВА
ИЗВЛЕЧЕНИЕ НИКЕЛЯ ИЗ УПОРНЫХ РУД

Для изученной необогатимой традиционными способами медно-никелевой руды рекомендованный способ реализации в промышленности – кучное бактериальное выщелачивание. Продолжительность процесса биовыщелачивания руды кучным способом составит от 12 до 18 месяцев, при этом прогнозируемое извлечение никеля при его исходном содержании на уровне 0,34% составит не менее 80%.

Предлагаемая технология кучного бактериального выщелачивания является устойчивой к изменению вещественного состава руды, позволяющей извлекать все фазы цветных металлов, экологически безопасной и экономически выгодной.

Башлыкова Татьяна Викторовна,
директор ООО «Научно-внедренческое предприятие Центр экспертных систем технологического аудита недропользования»

Аширбаева Евгения Александровна,
инженер ООО «Научно-внедренческое предприятие Центр экспертных систем технологического аудита недропользования»

Фищенко Юлия Юрьевна,
инженер-минералог ООО «Научно-внедренческое предприятие Центр экспертных систем технологического аудита недропользования»

☎ 117463, г. Москва, ул. Ясногорская, д. 13, к. 1,
тел.: +7 (499) 236-56-54, e-mail: ashirbaeva@bk.ru

УДК: 546.49:547.26,13:546.3-31

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И МАТЕРИАЛОВ НА ИХ ОСНОВЕ

Д.В. ДРОБОТ

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ТОНКИХ ХИМИЧЕСКИХ
ТЕХНОЛОГИЙ ИМ. М.В. ЛОМОНОСОВА

Настоящее сообщение обобщает некоторые перспективные направления в химии и технологии редких и рассеянных элементов, выполненные сотрудниками (руководители направлений указаны в тексте) кафедры химии и технологии редких и рассеянных элементов им. К.А. Большакова в последнее время.

Прогресс в технологии редких и рассеянных элементов (РРЭ – каноническое определение отсутствует, их число колеблется от 40 до 44 в зависимости от классификации) и функциональных материалов на их основе с необходимостью предполагает вовлечение в сферу практического использования современных достижений фундаментальных исследований в химии и металлургии этих металлов. Технологический аспект проблемы объединяет задачи извлечения, разделения и очистки соединений РРЭ при переработке первичного и техногенного сырья с задачей ориентированного поиска и создания воспроизводимых технологий получения функциональных материалов нового поколения на их основе, обладающих необходимым комплексом потребительских свойств и качеств.

Ключевые слова: редкие, рассеянные элементы, химия, технология, платиновые металлы.

НОВЫЕ ЭКСТРАГЕНТЫ В ТЕХНОЛОГИИ РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ (А.М. Резник, В.И. Букин, С.А. Семенов)

Россия занимает лидирующее положение по сырьевым ресурсам редких металлов, однако наши руды, как правило, беднее зарубежных. Поэтому важное значение приобретает комплексное использование минерального сырья с извлечением всех ценных компонентов. К такому типу сырья относятся алюминиевые руды – бокситы и нефелины. Они содержат ряд важных для промышленности рассеянных элементов: галлий, ванадий, скандий, рубидий и цезий.

PROMISING DIRECTIONS IN THE TECHNOLOGY OF RARE ELEMENTS AND MATERIALS BASED ON THEM

D.V. DROBOT

The present report summarizes some promising directions in the chemistry and technology of rare and trace elements, made by the employees (heads of the directions are mentioned in the text) of the Department of Chemistry and Technology of Rare and trace elements named after K.A. Bolshakov, recently.

Progress in the technology of rare and trace elements (RRE – no canonical definition, their number varies from 40 to 44 depending on the classification) and functional materials based on them necessarily supposes involvement in the area of practical use of modern achievements in fundamental research in chemistry and metallurgy of these metals. Technological aspect of the problem combines objectives of extraction, separation and purification of the RRE compounds in the processing of primary and technogenic raw materials with the task of oriented search and creation reproducible technologies to produce a new generation of functional materials based on them with the necessary complex of consumer properties and qualities.

KEYWORD: rare, dispersed elements, chemistry, technology, platinum metals.

Несмотря на низкое содержание редких элементов в алюминиевых рудах, многотоннажность производства глинозема делает актуальной и перспективной проблему комплексной переработки алюминиевых руд с попутным извлечением указанных элементов. В качестве примера, подтверждающего этот тезис, можно отметить, что только с бокситами ежегодно вводится в процесс переработки 700–1400 т скандия. Не говоря уже о галлии, т.к. около 90% мирового производства галлия обеспечивается алюминиевым производством. Анализ технологических схем производства глинозема показывает, что основное количество

галлия переходит в оборотные щелочные растворы процесса Байера при переработке бокситов или оборотные поташные маточники при переработке нефелинов. Концентрация галлия в таких растворах колеблется от 0,05 до 0,3 г/л.

Для выделения галлия из щелочных растворов перспективно использование жидкостной экстракции, однако, выбор экстрагентов для извлечения галлия из растворов с высокой (> 1 М) концентрацией щелочи мал.

Нами в качестве экстрагентов галлия предложены азотсодержащий олигомер БАФФО, где R – C₄H₉ (рис. 1) и N-(2-гидрокси-5-нонилбензил)-β,β-дигидроксиэтиламин (НБЭА) (рис. 2).

Исследование экстракции галлия из щелочных растворов олигомером БАФФО показало, что галлий эффективно экстрагируется БАФФО только из слабощелочных растворов. При увеличении концентрации щелочи в растворе, то есть при приближении состава растворов к реальным для глиноземного производства, коэффициент распределения галлия резко падает. Однако установлено, что введение в раствор высаливателя карбоната калия значительно увеличивает коэффициент распределения галлия. Такое поведение экстракционной системы позволяет использовать БАФФО для извлечения галлия из поташных маточников глиноземного производства, содержащих до 1000 г/л карбоната калия, однако, для растворов процесса Байера, в которых отсутствует высаливатель (карбонат калия) применять олигомер БАФФО для извлечения галлия невозможно.

Учитывая, что в отсутствие карбоната калия галлий практически не экстрагируется из сильнощелочных растворов, для его реэкстракции можно применять 5М NaOH и сразу же получать реэкстракт пригодный для электролиза или цементации галлия на галламе алюминия. Это существенно отличает олигомерный экстрагент от реагента Kelch, для которого необходима солянокислая реэкстракция.

На основании проведенных исследований разработана технологическая схема экстракционного извлечения галлия из поташных маточных растворов, получаемых при комплексной переработке нефелина.

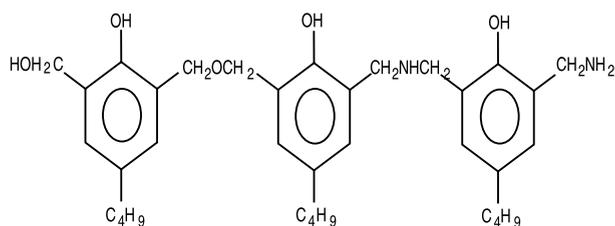


Рис. 1.

П-трет. бутиламинофенолформальдегидный олигомер (БАФФО)

Ее проверка на ППГО «Глинозем» показала, что из поташного маточника в реэкстракт было извлечено 95,0% Ga. Полученный реэкстракт был использован для цементации Ga на галламе алюминия. За 1 час в металл было восстановлено 99,5% Ga, причем расход алюминия сократился приблизительно в 1,5 раза по сравнению с обычным процессом. Столь высокие показатели цементации и отсутствия шламаобразования, связаны с отсутствием примесей в полученном реэкстрате [1].

Для экстракции галлия из щелочных растворов процесса Байера был опробован экстрагент НБЭА. Было установлено, что НБЭА эффективно извлекает галлий в широком диапазоне концентраций NaOH: коэффициент распределения галлия (D_{Ga}) при CNaOH ~ 0,5–5 М составляет ~ 15–98, что соответствует степени извлечения ~ 94–98%.

Для оценки возможности использования НБЭА для извлечения галлия из алюминатных растворов была изучена экстракция галлия из модельных Байеровских растворов с массовым соотношением Al/Ga ~ 100/1. При экстракции из оборотных растворов, вследствие медленного накопления в них галлия, оптимальная степень его извлечения составляет ~30%. Полученные значения E_{Ga} ~ 20–58% при V_о:V_в = 1:5–1:1, дают возможность использовать НБЭА для экстракционного извлечения галлия из оборотных алюминатных растворов глиноземного производства, извлекающийся в органическую фазу алюминий целесообразно отделять от галлия на стадии реэкстракции [2]. На основании полученных данных была разработана технологическая схема извлечения галлия из оборотных алюминатных растворов процесса Байера (рис. 3).

Кроме того были разработаны методы извлечения V и Sc из промпродуктов глиноземного производства с высокими технологическими показателями.

Интересным направлением в экстракционной технологии является использование экстракции для синтеза новых веществ. Образующиеся в органической

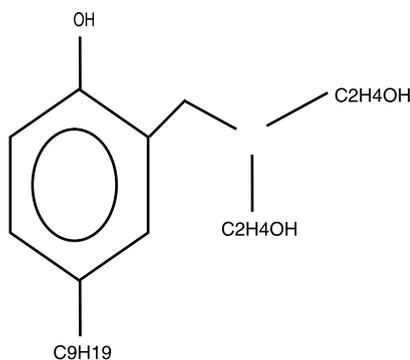


Рис. 2.

N-(2-гидрокси-5-нонилбензил)-β,β-дигидроксиэтиламин (НБЭА)

фазе металлокомплексы, после удаления растворителя могут найти самостоятельное применение.

В качестве олигомеров для синтеза металлокомплексов использовали азотсодержащий олигомер - БАФФО. Основываясь на данных по распределению переходных металлов в системах с олигомерными реагентами, была разработана универсальная технологическая схема получения комплексов переходных металлов с олигомерами [3]. Полученный после экстракции водный раствор, содержащий металл, возвращается на стадию приготовления исходного раствора, где происходит его корректировка до необходимой концентрации по металлу и другим составляющим и вновь направляется на экстракцию. Полученный после дистилляции толуол возвращается на операцию приготовления органического раствора олигомера и вновь используется на стадии экстракции. Таким образом, реализуется безотходная схема получения олигомерных металлокомплексов переходных металлов. Представленная схема является универсальной, так как, используя перечисленные операции можно получить олигомерные металлокомплексы всех экстрагирующихся металлов.

Используя разработанные условия синтеза, получены опытные образцы комплексов V, Cu, Ni, Co, Cd, Mn и Fe. Образцы комплексов металлов с БАФФО использованы в резиновых смесях на основе изопренового каучука СКИ-3 в качестве модификаторов, способствующих увеличению прочности связи резин с текстильными материалами. Полученные данные показали, что введение в резиновые смеси, синтезированных олигомерных металлокомплексов способствует повышению прочности связи резины с текстильным кордом. Наиболее эффективными оказались металлокомплексы, содержащие никель, ванадий и кобальт. Так, олигомерный комплекс никеля с БАФФО позволяет ~1,5 раза увеличить прочность связи резины с кордом, а, следовательно, прочность и долговечность автомобильных шин [3].

Даже при хороших показателях, полученных для рассмотренных выше экстрагентов, важно разработать новые более эффективные. Для этого были привлечены методы молекулярного дизайна экстрагентов фенольного типа.

Поиск и разработка новых и эффективных экстрагентов является важной научной и

практической задачей. При использовании экстракционного метода для извлечения металлов к экстрагенту предъявляется ряд требований. Важнейшие из них – это обеспечение достаточно высоких коэффициентов распределения целевых металлов (D) и коэффициентов разделения целевого металла от сопутствующих, минимальная растворимость экстрагента в водной фазе, быстрое расслаивание фаз после осуществления процесса экстракции, легкость проведения реэкстракции и регенерации экстрагента,

достаточно высокая емкость экстрагента по извлекаемому компоненту, невысокие плотность и вязкость экстрагента, оптимальное межфазное натяжение на границе раздела фаз, стабильность экстрагента, низкое давление его паров, высокая температура вспышки, высокое значение предельно допустимой концентрации (ПДК). Практически, однако, трудно подобрать экстрагент, соответствующий всем перечисленным выше требованиям, поэтому обычно принимают компромиссное решение.

Большое значение в расширении ассортимента экстрагентов для извлечения металлов имеет испытание в качестве экстрагентов веществ, применяемых в других областях промышленности [4]. В качестве экстрагентов предложено использовать алкилпроизводные фенолов, применяющиеся в промышленности синтетического каучука, пластмасс, эластомеров и др. [5] (рис. 1, 2). Однако, несмотря на перспективность этого направления, необходимо учитывать тот факт, что реагенты, разработанные для других целей, могут не отвечать вышеперечисленным требованиям к экстрагентам. Поэтому возникает задача дизайна (конструирования) молекулы экстрагента, отвечающего указанным требованиям. Развитие компьютерной техники, происшедшее в последнее время, позволяет подойти к решению этой задачи, используя расчетные методы: методы квантовой химии, метод групповых вкладов и др. Разработка нового, более эффективного экстрагента позволит снизить затраты на извлечение редких металлов и откроет новые перспективы в использовании некоторых металлов, которые сейчас применяются в ограниченном масштабе из-за своей высокой цены (например, скандий).

Ранее молекулярный дизайн экстрагента использовали для устранения недостатков трибутилфосфата при аффинажной экстракции плутония и для разработки экстрагента с повышенной экстракционной способностью (ЭС) по отношению к трехвалентным актинидам и одновременно с пониженной ЭС по отношению к азотной кислоте [6].

Недостатком указанных разработок являются большие затраты времени и материальных средств, связанных с конструированием молекулы экстрагента, поскольку молекулярный дизайн осуществляли путем синтеза опытных партий алкилфосфатов и проверки их экспериментальных свойств. Расчетные методы, использованные в выполненной работе, позволяют значительно сократить затраты, связанные с промежуточным синтезом, т.к. они предполагают осуществлять синтез лишь на конечной стадии конструирования.

В работах [7, 8] при молекулярном дизайне экстрагентов рассматриваются термодинамические критерии: энергия взаимодействия рецептор-ион [7] и константы экстракции, коэффициенты распределения и коэффициенты разделения экстрагируемых металлов [8]. Причем не термодинамические факторы, такие как ПДК экстрагентов, не учитываются.

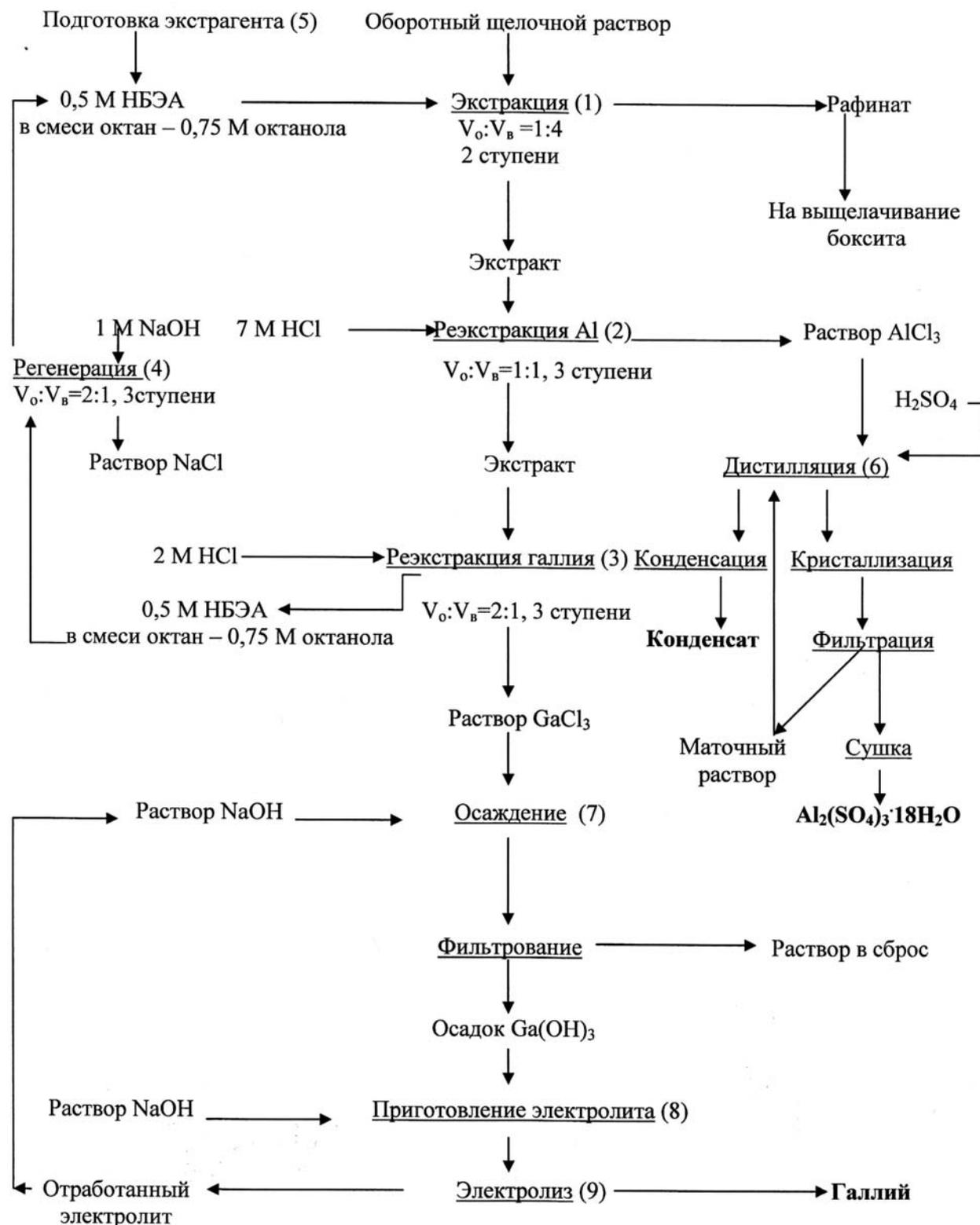


Рис. 3. Технологическая схема извлечения галлия из оборотных алюминатных растворов процесса Байера

Целью выполненной на кафедре работы являлась разработка метода оптимизации структуры новых экстрагентов с использованием функции желательности, предложенной ранее Харрингтоном для оптимизации процессов, характеризующихся несколькими функциями отклика (рис. 2) [9, 10].

Согласно Харрингтону, функция желательности представляет собой безразмерную шкалу, при помощи которой любой отклик может быть преобразован так, чтобы его можно было интерпретировать в терминах полезности или желательности для любого специфического применения. Для односторонних ограничений вида $y \leq y_{\max}$ или $y \geq y_{\min}$ (y – функция отклика) удобной формой преобразования y в d (частная функция желательности) служит экспоненциальная зависимость:

$$d = \exp[-\exp(-y)],$$

где $y = b_0 + b_1 y$.

Коэффициенты b_0 и b_1 можно определить, если задать для двух значений свойства y соответствующие значения желательности d предпочтительно в интервале $0.2 < d < 0.8$.

Имея несколько откликов, преобразованных в шкалу d , можно при помощи арифметических операций скомбинировать из этих различных d обобщенный показатель желательности D

$$D = \sqrt[k]{d_1 d_2 \dots d_k}.$$

Разработанный метод оптимизации структуры новых экстрагентов использован для конструирования экстрагентов фенольного типа (класс N-(2-гидрокси-5-нонилбензил)-диалкиламинов). Для молекулярного дизайна экстрагентов фенольного типа в качестве контролируемых параметров, определяющих их эффективность, предложено использовать рассчитываемые заряд на атоме азота (q), энтальпию диссоциации фенольной группы (ΔH_λ), логарифм коэффициента рас-

пределения экстрагента между водой и октанолом (lgP) и ПДК о-замещенных фенолов [11–13] (табл. 1).

В ходе оптимизации структуры экстрагентов варьировалось количество алкильных заместителей у атома азота, число атомов углерода в этих заместителях и электроотрицательные заместители в о-положении к фенольной группе.

В результате молекулярного дизайна экстрагентов фенольного типа была найдена оптимальная структура: N-(2,3-дигидрокси-5-нонилбензил)-дидециламин, в максимальной степени удовлетворяющий всем рассмотренным требованиям к промышленным экстрагентам (рис. 4).

Предложенный экстрагент после синтеза и экспериментальной проверки планируется использовать в технологии извлечения редких металлов, например скандия, рения, галлия, ванадия, кобальта и некоторых других металлов.

ТЕХНОЛОГИЯ «МОЛЕКУЛЯРНОГО
РАСПОЗНАВАНИЯ – ПЕРСПЕКТИВНАЯ ТЕХНО-
ЛОГИЯ АФФИНАЖА МЕТАЛЛОВ ПЛАТИНОВОЙ
ГРУППЫ (Т.М. БУСЛАЕВА, Е.В. ВОЛЧКОВА)

Существующая в России технология аффинажа платиновых металлов базируется преимущественно на осадительных методах и приемах. Осаждение труднорастворимых соединений неизбежно сопровождается образованием промежуточных продуктов и маточных растворов, что делает технологию многооперационной и уменьшает сквозное извлечение драгоценных металлов. Обеспечение потребности в металлах платиновой группы, их соединениях и платиносодержащих материалах возможно при условии внедрения в производство высокоэффективных технологических процессов переработки первичного и вторичного сырья. В этой связи технология, предусматривающая селективное извлечение металлов платиновой группы, независимо от того, какими методами она реализуется

ТАБЛИЦА 1.

Расчет обобщенной функции желательности

Заместители в о-положении	Частные функции желательности				Обобщенные функции желательности	
	$d_1 (q)$	$d_2 (lgP)$	$d_3 (\Delta H_\lambda)$	$d_4 (PDK_w)$	$D_3^*)$	$D_4^{**})$
без заместителя	0,645	0,689	0,400	0,290	0,649	0,476
NO ₂	0,466	0,400	0,700	0,500	0,508	0,505
F	0,538	0,726	0,588	–	0,613	–
Cl	0,466	0,771	0,671	0,250	0,623	0,495
Br	0,499	0,792	0,564	–	0,607	–
I	0,530	0,81	0,515	–	0,605	–
ОН	0,500	0,600	0,440	0,650	0,513	0,541

*) D_3 рассчитан по уравнению $D_3 = (d_1 \times d_2 \times d_3)^{1/3}$.

***) D_4 рассчитан по уравнению $D = (d_1 \times d_2 \times d_3 \times d_4)^{1/4}$.

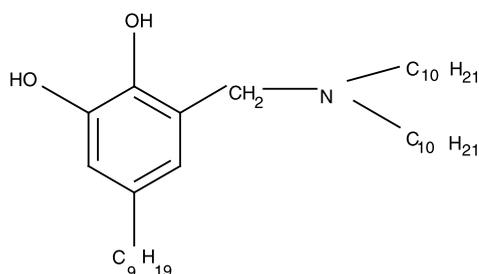


Рис. 4.
N-(2,3-дигидрокси-5-нонилбензил)-дидециламин

– экстракция или сорбция, имеет серьезные перспективы для развития и применения.

Такой технологией в настоящее время, без сомнения, можно считать технологию «молекулярного распознавания» (ТМР).

Технологическая значимость этого направления состоит в том, что для селективного выделения близких по свойствам металлов платиновой группы используют макроциклические соединения, либо в виде растворов в органических разбавителях с целью экстракционного извлечения, либо в виде привитых функциональных групп – в процессах сорбции. В качестве матрицы для нанесения органических лигандов применяются неорганические носители – силикагели – и органические типа полиакрилата и полистирена.

Следует выделить, по крайней мере, четыре уникальные особенности ТМР [14]:

1. ТМР использует для селективного извлечения ионов химию «гость – хозяин», основанную на сочетании многочисленных параметров, таких как размер иона, геометрия лиганда, тип координации лиганда, в противоположность классической химии, учитывающей какой-либо один параметр. Поэтому она позволяет различать извлекаемые ионы металлов даже, если они находятся в растворе на уровне ppm при высоких концентрациях иных форм (от 0,1 до 100 г/л), в том числе, в сильнокислой среде и на фоне различных комплексообразующих реагентов.

2. Технологии «молекулярного распознавания» доступно разнообразие лигандов, способных селективно связываться с катионами либо анионами.

3. Насыщение сорбента ценным компонентом происходит быстро с пиком на кривой насыщения, что обеспечивает высокую скорость подачи исходного раствора, причем извлечение может быть достигнуто за один проход раствора.

4. Реэкстракция (элюирование) проводится в сравнительно небольшом объеме раствора. В качестве элюентов берут обычные реагенты типа аммиака, тиокарбамида, соляной кислоты, хлорида натрия и т.п.

При извлечении платиновых металлов из солянокислых (хлоридных) сред одновременно достигается и их разделение (рис. 5).

Метод «молекулярного распознавания» – одна из ветвей супрамолекулярной химии. У ее истоков стоят работы трех Нобелевских лауреатов 1987 года – американцев Чарльза Педерсена и Дональда Крама и французца Жан – Мари Лена. Ж. – М. Лен определил супрамолекулярную химию как химию межмолекулярных связей, изучающую ассоциацию двух и более химических частиц, а также структуру подобных ассоциаций.

Начало супрамолекулярной химии было фактически положено работами Ч. Педерсена по синтезу гетероциклических соединений класса простых эфиров, особенностью которых являлось наличие нескольких атомов кислорода, связанных мостиками CH_2CH_2 . С целью упрощения номенклатуры подобных циклов ученый предложил называть их краун – эфирами (от англ. crown – корона). Открытие краун – эфиров стимулировало создание так называемой «контейнерной химии», или химии «гость – хозяин».

Следует отметить, что O-содержащие краун – эфиры не перспективны для разделения платиновых металлов. Металлы платиновой группы, в частности, палладий, интерес к которому в нашей стране неизменно растет – это халькофильные элементы. Поэтому для извлечения платиновых металлов целесообразно выбирать краун – эфиры более сложного строения, содержащие, наряду с атомами кислорода, также донорные атомы серы, азота, фосфора [15].

Макроциклические соединения сразу нашли применение во многих сферах, но прежде всего – для разделения близких по свойствам щелочных и щелочноземельных металлов. Коэффициент разделения при этом может достигать фантастической величины - 10^{10} . Подобной селективности просто невозможно было добиться даже при использовании хелатообразующих реагентов, нашедших широкое применение в аналитической химии.

Как отмечалось выше, технология «молекулярного распознавания» может быть реализована в экстракционном либо сорбционном вариантах. Последний, безусловно, предпочтительнее. Для осуществления процесса сорбции необходимо прикрепить («пришить») лиганд к поверхности носителя – неорганического либо полимерного. Необходимо подчеркнуть, что сорбенты на основе минерального носителя – силикагеля – с химически привитыми к его поверхности комплексообразующими соединениями получили в последнее время широкое распространение для извлечения ионов металлов из растворов. Силикагель (гидратированный диоксид кремния) в отличие от органических полимерных носителей не растворим в воде, кислотах (кроме плавиковой), органических растворителях, он гидрофилен, обладает жесткой широкопористой структурой и доступностью хелатирующих группировок для ионов металлов. Установление равновесия между раствором и поверхностью силикагеля, как правило, достигается уже

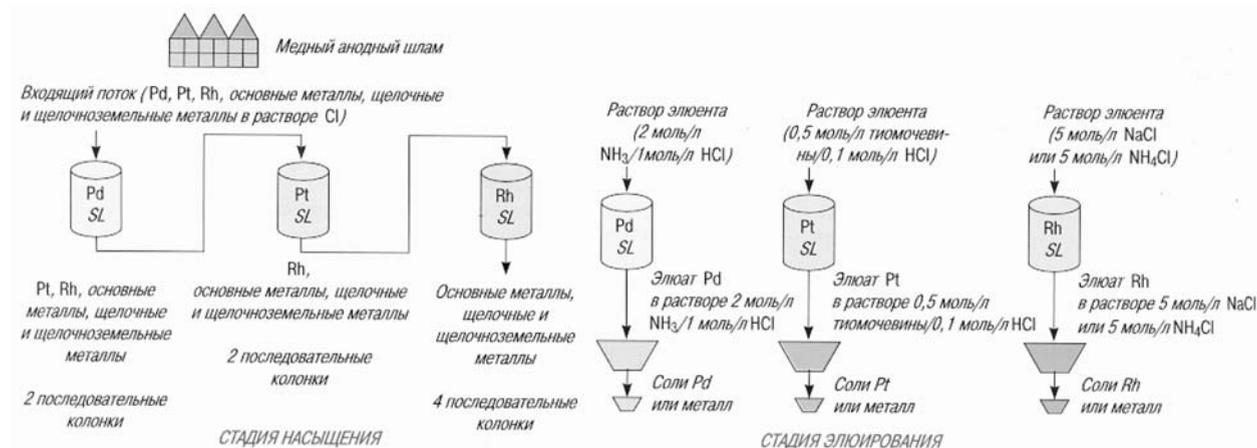


Рис. 5. Технологическая схема разделения платиновых металлов

через несколько минут. Увеличивается прочность связывания ионов металлов, полнота извлечения, становится излишней стадия набухания. Кроме того, силикагель имеет низкую стоимость и высокую механическую прочность [16].

Нами проведены исследования, которые позволили разработать принципиально новый подход к закреплению на поверхности кремнезема соединений, способных селективно связывать ионы палладия по механизму молекулярного распознавания. Разработанные методики обеспечивают достижение высокой поверхностной концентрации целевых групп (и, следовательно, высокой сорбционной емкости) при минимизации концентрации побочных групп, могущих повлиять на селективность процесса. В качестве носителя использовали кремнезем с поверхностью 120 м²/г и средним диаметром пор 40 нм. Использование кремнезёмов с большей поверхностью позволит получить сорбенты большей емкости, однако с ростом удельной поверхности происходит уменьшение диаметра пор, что, начиная с определенного значения, будет препятствовать прививке объемных молекул макрогетероциклических соединений. При оптимизации характеристик носителя необходимо учитывать не только структурные параметры, но и его чистоту, механическую прочность, доступность и, конечно, стоимость.

Предложен сорбент, который обладает высоким сродством к ионам палладия(II) в широком интервале кислотности раствора [17]. Он получен «пришивкой» к силикагелю Силохром – 120 органической молекулы, содержащей «сульфидную» серу и OH – группы и имитирующей «половину» макрогетероцикла (рис. 6).

При этом сорбция ионов цветных металлов, в частности, меди(II), пренебрежимо мала, что позволяет рекомендовать этот сорбент для селективного извлечения палладия из технологических растворов.

МЕТОДЫ «МЯГКОЙ» ХИМИИ В ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ РЕНИЯ И D- ЭЛЕМЕНТОВ V-VIII ГРУПП (Д. В. Дробот, О. В. Чернышова, Г. А. Сейсенбаева, В. Г. Кесслер – SLU, UPSALA, ШВЕЦИЯ)

В последние десятилетия в решении задач материаловедения, связанных с разработкой методов получения функциональных материалов, существенно возросла роль так называемых химических методов. Их интенсивное развитие определяется тем, что возникновение новых и совершенствование уже существующих отраслей техники требует создания новых материалов с регулируемыми свойствами. При этом существенно повышаются требования к степени химической и фазовой однородности функциональных материалов, от которых в значительной степени зависят их свойства. Важным фактором в развитии этих методов является также необходимость управления гранулометрическим составом, вплоть до получения материалов в нанодисперсном состоянии, обладающих уникальными свойствами.

Основные области применения рения – изготовление конструкционных сплавов с другими тугоплавки-

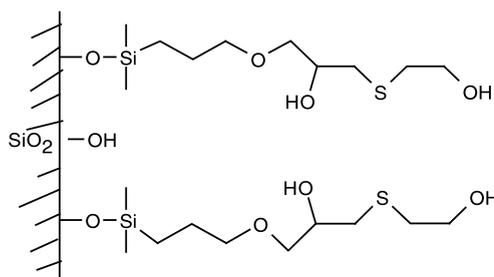


Рис. 6. Строение сорбента на основе модифицированного кремнезема

ми металлами (в том числе с молибденом, вольфрамом, ниобием, танталом, никелем, кобальтом) обладающих уникальными механическими характеристиками и устойчивостью к действию высоких температур и агрессивных сред. Они признаны лучшими материалами для изготовления ракетных двигателей, газовых турбин, ответственных деталей в прецизионном машиностроении, ядерной технике, самолетостроении, электровакуумной, электрической и электронной технике. Важная область применения рения и его соединений – изготовление катализаторов¹⁸⁻²⁰.

Высокая температура плавления металла приводит к тому, что традиционные методы получения сплавов на основе рения с другими тугоплавкими металлами, а именно, порошковая металлургия, электроннолучевая, индукционная и электродуговая плавка обладают существенными недостатками. Это определяет актуальность работ, направленных на разработку новых путей получения ренийсодержащих металлических и оксидных материалов. Одним из относительно новых подходов к получению материалов с заданным комплексом свойств являются методы «мягкой» химии, и в частности алкоксотехнология, главная идея которой состоит в гидролитическом или термическом разложении алкоксопроизводных (а также родственным им оксоалкоксопроизводных) металлов. Применение алкоксопроизводных апробировано в технологической практике для получения сегнетоэлектриков и родственных им материалов, диэлектриков, твердых электролитов, жаростойких материалов, высокотемпературных сверхпроводников, защитных покрытий, пленок с особыми оптическими и электрофизическими свойствами, катализаторов. Применительно к материалам на основе рения это направление стало развиваться сравнительно недавно, с 1990-х годов.

Общая идея метода иллюстрируется рис. 7.

Разработано два подхода к получению алкоксопроизводных – реакции с участием оксида рения (VII) и электрохимический метод.

Взаимодействие Re_2O_7 со спиртами (эфирами) или алкоксопроизводными металлов позволяет получать моно- и гетерометаллические алкоксопроизводные. Показано, что взаимодействие Re_2O_7 с алкоксопроизводными металлов (Mo, W, Nb, Ta) является эффективным путем получения гетерометаллических алкоксопроизводных²¹⁻²⁴. Этим методом впервые получены триметаллические ренийсодержащие соединения: $Nb_{4x}Ta_xO_2(OMe)_{14}(ReO_4)_2$ и $Nb_{2x}Ta_x(OMe)_8(ReO_4)_2$.

Разработано два подхода к получению алкоксопроизводных – реакции с участием оксида рения (VII) и электрохимический метод.

Первые данные по использованию электрохимического метода получения производных рения опубликованы в 1995 г.: получены: $Re_4O_6(OMe)_{12}$, $Re_4O_2(OMe)_{16}$, $Re_4O_{6y}(OMe)_{12+4y}$, $Re_4O_6(OPri)_{10}$, $ReMoO_2(OMe)_7$, $Re_4xMo_xO_{6y}(OMe)_{12+4y}$, $Re_4xWxO_{6y}(OMe)_{12+4y}$.

Совокупность полученных результатов суммирована рис. 8.

Процессы термического разложения моно-, би- и триметаллических алкоксопроизводных рения и d-элементов составляют основу алкоксотехнологии получения материалов на основе рения и позволяют получать материалы с воспроизводимым комплексом заданных свойств (рис. 9). Основные особенности этих процессов состоят в следующем.

1. Низкая температура разложения указанных соединений позволяет получать тонкодисперсные (в том числе с размером частиц в несколько нанометров) оксидные и металлические материалы – индивидуальные металлы и сплавы тугоплавких металлов при низких ($\leq 500^\circ C$) температурах. В процессе термообработки происходит укрупнение частиц, что дает возможность путем варьирования условий управлять микроструктурой синтезированных продуктов и получать образцы с размером частиц от нескольких нанометров до нескольких микрометров.

2. В случае би- и триметаллических систем применение алкоксотехнологии позволяет достичь сохранения заданного состава (соотношения металлов) и высокой степени однородности на протяжении всего технологического процесса. Разложение би- и триметаллических комплексов с составом, переменным в широком диапазоне соотношения металлов, позволяет получать материалы заранее заданного состава.

3. Низкая температура разложения алкоксопроизводных в сочетании с высокой степенью их химической однородности позволяет существенно снизить температуру и продолжительность получения оксидных и металлических материалов. В частности, данный подход существенно снижает энергоемкость отдельных стадий синтеза сплавов на основе тугоплавких металлов по сравнению с традиционными методами. Однофазные образцы сплавов на основе рения удается получить при температуре, которая более чем на $2000^\circ C$ ниже температуры плавления рения.

ТЕПЛОЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ (ТЗП) НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ (И.В. Мазилин, Л.Х. Балдаев, Д.В. Дробот)

Основная идея – целенаправленный выбор предшественников (анализ фазовых диаграмм $ZrO_2 - Ln_2O_3$; условий существования, строения, термической стабильности и других характеристик существующих в них фаз) и создание промышленной технологии получения теплозащитных покрытий (ТЗП), предназначенных для защиты деталей горячего тракта авиационных и наземных газотурбинных установок, эксплуатируемых при температурах более $1200^\circ C$.

Методом высокоскоростного газопламенного напыления впервые получены покрытия на основе сплава NiCoCrAlTaY. Методами оптической и электронной микроскопии изучена микроструктура по-

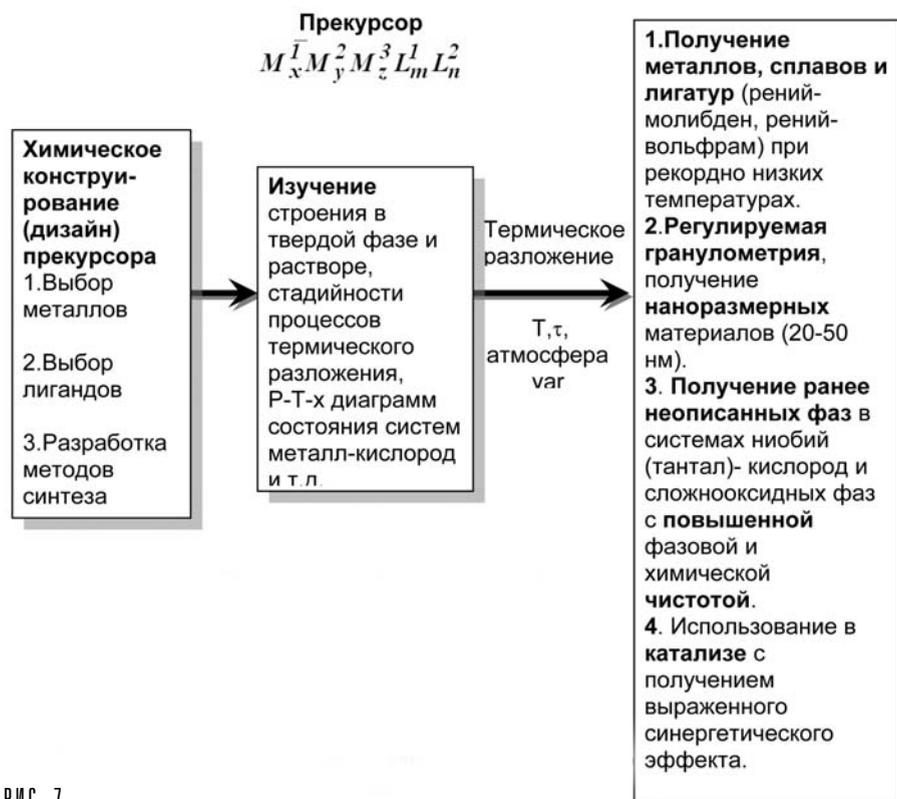


Рис. 7.

M – металл, L – лиганд

Методы синтеза ренийсодержащих алкоксипроизводных

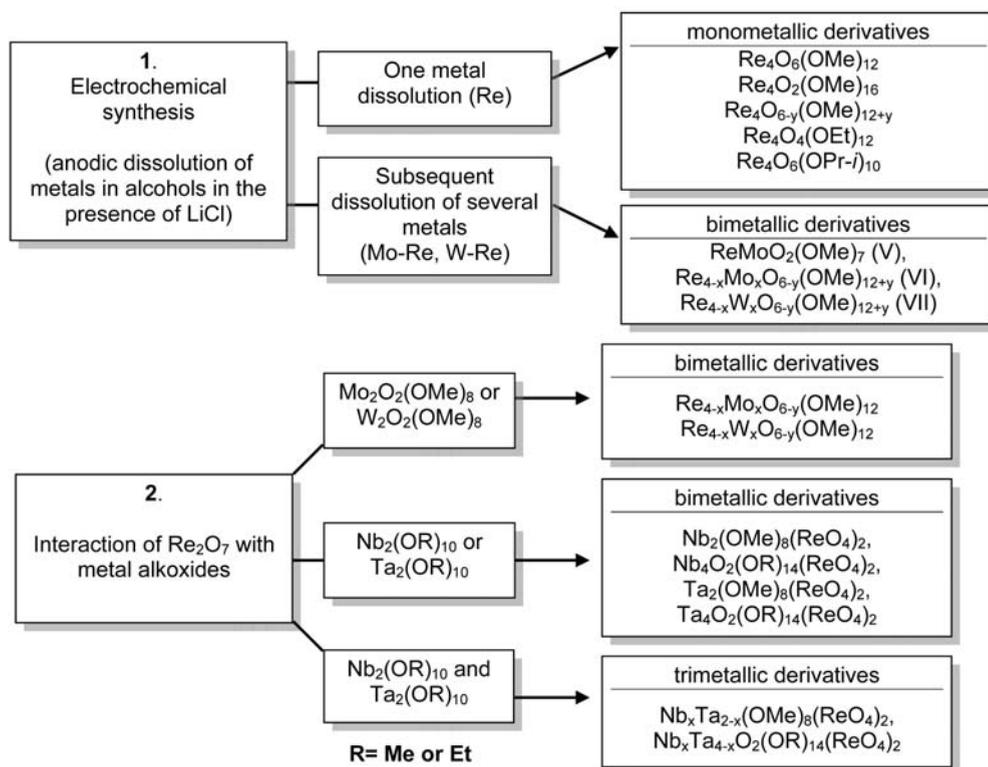


Рис 8.

Методы получения алкоксидов рения и d-металлов

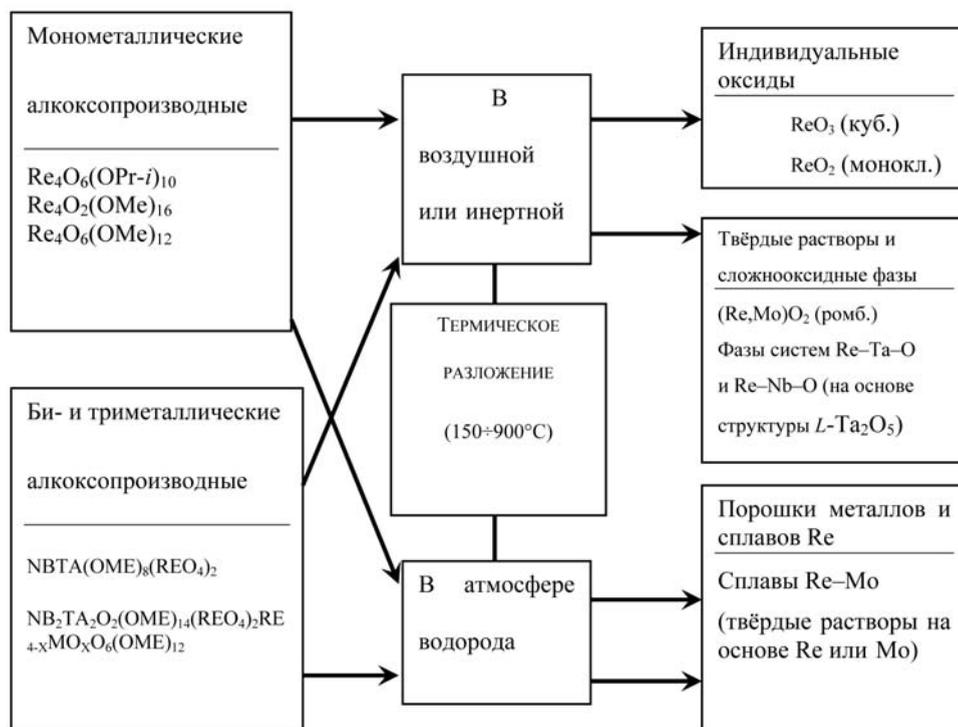


Рис. 9.
Получение материалов из алкоксидов

крытий, методами химического и рентгенофазового анализа изучен состав, распределение элементов и кристаллическая структура покрытий. Установлены закономерности влияния свойств предшественников и технологических параметров напыления на свойства покрытий, выбраны условия термической обработки для формирования на поверхности покрытия стабильной защитной плёнки на основе $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Методом плазменного напыления впервые получены покрытия на основе диоксида циркония, стабилизированного оксидами иттрия, неодима, гадолиния и самария ($\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Nd}_2\text{O}_3\text{-Sm}_2\text{O}_3$ и $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Nd}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3$). Методами оптической и электронной микроскопии изучена микроструктура покрытий, методами химического и рентгенофазового анализа изучен состав, распределение элементов и кристаллическая структура покрытий. Методом лазерной вспышки изучены теплофизические свойства покрытий (температуропроводность, теплоёмкость) в диапазоне температур 20–1100° С. Показано, что легирование $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ оксидами неодимом, самарием и гадолинием приводит к снижению теплопроводности на ~ 10% и повышению фазовой стабильности ТЗП. Установлены закономерности влияния свойств предшественников и технологических параметров напыления на свойства покрытий.

Методом плазменного напыления впервые получены покрытия на основе цирконатов лантана ($\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$), неодима ($\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$), самария ($\text{Sm}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$) и гадолиния ($\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$). Методами оптической и электронной микроскопии изучена микроструктура покрытий, методами химического и рентгенофазового анализа изучен состав, распределение элементов и кристаллическая структура покрытий. Показано, что в процессе плазменного напыления происходит частичное испарение РЗЭ, которое вместе с крайне высокой скоростью охлаждения (~ 10⁶ К/с) приводит к изменению структуры с пироклора на флюорит. Методами лазерной вспышки и высокотемпературной дилатометрии изучены теплофизические свойства покрытий (температуропроводность, теплоёмкость, коэффициент термического расширения) в диапазоне температур 20–1100° С. Показано, что покрытия на основе цирконатов РЗЭ имеют теплопроводность 0,33–0,5 Вт/м·К. Установлены закономерности влияния свойств предшественников и технологических параметров напыления на свойства покрытий.

Изучены процессы, протекающие при длительной термообработке покрытий на основе цирконатов лантана ($\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$), неодима ($\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$), самария ($\text{Sm}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$) и гадолиния ($\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$). Показано, что

теплопроводность покрытий резко увеличивается в течение первых часов термообработки.

Автор выражает благодарность коллегам, аспирантам и магистрам, выполнившим отдельные этапы работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Букин В., Лысакова Е., Резник А. О возможности извлечения некоторых редких металлов при комплексной переработке алюминиевого сырья // Национальная металлургия. 2003. № 1. С. 61–65.
2. Хатин Г.Д., Букин В.И., Ситдикова Ю.С. Экстракция галлия из щелочных растворов N-(2-гидрокси-5-нонилбензил)-β,β-дигидроксиэтиламином. Известия вузов. Цветная металлургия, 2003, № 6. С. 29–36.
3. Букин В.И., Дробот Д.В., Резник А.М. Координационные соединения редких металлов с органическими лигандами в процессах извлечения, разделения и получения материалов // V Междунар. конф. «Наукоемкие химические технологии». Программа и тез. пленарн. докл. Ярославль: ЯГТУ, 1998. С. 54–56.
4. Золотов Ю.А. Радиохимия. 1982. Т. 24. № 6. С. 729.
5. Букин В.И., Резник А.М., Семенов С.А. Фундаментальные проблемы российской металлургии на пороге XXI века.: Т. 3. Металлургия редких и рассеянных элементов / Отв. Ред. Д.В.Дробот. М.: РАЕН, 1999. С. 116–154.
6. Розен А.М., Крупнов Б.В. Успехи химии. 1996. Т. 65. № 11. С. 1052.
7. Най В.Р. Proc. Intern. Solvent Extraction Conf. (ISEC). Montreal: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2008. P. 1011.
8. Varnek A. Proc. Intern. Solvent Extraction Conf. (ISEC). Montreal: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2008. P. 1023.
9. HARRINGTON E.C. Industr. Quality Control. 1965. V.21. N 10. P. 494.
10. Ахназарова С.А., Кафаров В.В. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии. М.: Высш. школа, 1978. 319 с.
11. Чернышев А.К., Лубис Б.А., Гусев В.К. и др. Показатели опасности веществ и материалов. Т. 4. М.: Фонд им. И.Д.Сытина, 2005. С. 63.
12. Чернышев А.К., Лубис Б.А., Гусев В.К. и др. Показатели опасности веществ и материалов. Т.1. М.: Фонд им. И.Д.Сытина, 1999. С. 431.
13. Чернышев А.К., Лубис Б.А., Гусев В.К. и др. Показатели опасности веществ и материалов. Т. 3. М.: Фонд им. И.Д.Сытина, 2004. С. 617.
14. Буслаева Т.М., Дробот Д.В. Технология «молекулярного распознавания» в аффинаже металлов платиновой группы // Цветные металлы. 2005. №10. С. 77–80.
15. DMITRIEVA S.N., SIDORENKO N.I., VEDERNIKOV A.I. ET AL. Synthesis and crystal structure of cis and trans complexes of benzodithia-18(21)-crown-6(7) ethers with PdCl₂ // Mendeleev Commun. 2009. V. 19. P. 21–23.
16. Модифицированные кремнеземы в сорбции, катализе и хроматографии / Под ред. Лисичкина Г.В. М.: Наука, 1986. 246 с.
17. Буслаева Т.М., Эрлих Г.В., Лисичкин Г.В., Дробот Д. В. и др. Патент РФ №2354448 «Сорбент на основе модифицированного кремнезема и его использование для извлечения ионов палладия». Приор. от 07.04.2008. Опубл.10.05.2009.
18. TUFFIAS R.H., KAPLAN R.B., APPEL M.A. Rhenium and Rhenium Alloys // Proceedings of the International Symposium (Orlando, Florida, USA. 10–13 Feb. 1997). Ed. B. D. Bryskin. Publ. TMS. P. 275.
19. BROOMFIELD R.W., FORD D.A., BHANGU H.K., THOMAS M.C., FRASIER D.J., BURKHOLDER P.S., HARRIS K., ERICKSON G.L., WAHL J.B. IBID. P. 731.
20. РЯШЕНЦЕВА М.А., МИНАЧЕВ Х.М. Рений и его соединения в гетерогенном катализе, М.: Наука, 1983, 248 с.
21. SEISENBAEVA G.A., SHEVELKOV A.V., TEGENFELDT J., KLOO L., DROBOT D.V., KESSLER V.G. Chem J. Soc. Dalton Trans. 2001. 2762.
22. SHCHEGLOV P.A., DROBOT D.V., SEISENBAEVA G.A., GOHIL S., KESSLER V.G. Chem. Mater. 2002, 14, 2378.
23. SHCHEGLOV P.A., SEISENBAEVA G.A., GOHIL S., DROBOT D.V., KESSLER V.G. Polyhedron. 2002. V. 21, 2317.
24. Патент РФ 2227788; Бюл. изобрет. 2004, №12.
25. МАЗИЛИН И.В., БАЛДАЕВ Л.Х., ДРОБОТ Д.В., АХМЕТГАРЕЕВА А.М., ЖУКОВ А.О., ХИСМАТУЛИН А.Г. Термические и теплофизические свойства теплозащитных покрытий на основе цирконата лантана // Перспективные материалы, 2013. №7. С. 21–30.

Дмитрий Васильевич Дробот,
д.т.н., профессор Московского государственного университета тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова

✉ 119571, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 86,
e-mail: dvdrobot@mail.ru

УДК 330.15.91

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ВОДЫ ИЗ ЛУННЫХ ГРУНТОВ

П. П. Ананьев¹, О. М. Гридин²,
А. В. Плотникова³,
Ю. В. Смирнова³

¹Некомерческое партнерство «Центр инновационных горных технологий»

²Московский государственный горный университет.

³ООО «ГАН»

Проведен обзор современных технологий извлечения воды из лунного грунта. Показано, что извлечение воды из лунного грунта технически возможно, но требует значительных затрат. Изложены результаты совместных исследований Научно-образовательного центра «Инновационные горные технологии» при Московском Государственном Горном Университете и компании ООО «ГАН», которые свидетельствуют о возможности эффективной добычи воды из лунного грунта на основе магнитно-импульсной технологии. Масса разрабатываемого технологического модуля в 9,45 раз меньше, производительность по перерабатываемому грунту в 1,25 раза больше, а по выходу воды в 3,75 раза больше чем у аналога NASA RASSOR Excavator.

Ключевые слова: добыча полезных ископаемых, космическое пространство, магнитно-импульсная обработка, добыча воды, Луна.

Добыча полезных ископаемых вне Земли – неизбежное будущее для человечества. О возможности такой добычи существует масса публикаций в различных источниках. Но экономические показатели ставят свои условия для добычи и переработке полезных ископаемых в космосе. Доставка 1 кг груза на околоземную орбиту составляет около десяти тысяч долларов США, доставка того же груза на Луну – двадцать тысяч долларов США. Еще дороже обойдется доставка космических полезных ископаемых для переработки на Землю. В то же время, по оценкам специалистов НАСА доставка того же количества груза из пояса астероидов или с Марса на орбиту Луны потребует гораздо меньших затрат. Таким образом, можно предположить, что именно Луна явится в обозримом будущем объектом добычи и переработки полезных ископаемых вне Земли. Для обеспечения такой деятельности на Луне необходи-

PROMISING TECHNOLOGY TO EXTRACT WATER FROM THE MOON

P. P. ANANJEV, O. M. GRIDIN,
A. V. PLOTNIKOVA, JU. V. SMIRNOV

The review of modern technologies of extraction of water from lunar soil is carried out. It is shown that water extraction from lunar soil technically feasible, but demands considerable expenses. Results of joint researches of the Scientific and educational center «Innovative Mountain Technologies» at the Moscow State Mining University and «GUN» LTD, which testify to possibility of effective production of water from lunar soil on the basis of magnetic-pulse technology. The mass of the developed technological module is 9.45 times less, productivity on processed soil is 1.25 times more, and on an exit of water is 3.75 times more than at analog of NASA RASSOR Excavator.

KEYWORDS: mining, space, magnetic pulse treatment, water production, moon.

мо обеспечить получение из местного сырья воды и кислорода, наличие которых позволит решить основную логистическую задачу – получение водородного ракетного топлива.

Группа геохимиков во главе с Джереми Бойсом из Калифорнийского технологического института доказала наличие воды в форме гидроксильных групп, входящих в структуру фосфорсодержащих минералов апатитов, которые были привезены на Землю миссией «Аполлон-14» [1].

Российские ученые, с помощью созданного ими прибора LEND, установленного на зонде LRO, выявили участки Луны, наиболее богатые водородом. На основании этих данных НАСА выбрало место для проведения бомбардировки Луны зондом LCROSS. После проведения эксперимента, 13 ноября 2009 года НАСА сообщило об обнаружении в кратере Кабеус в районе южного полюса воды в виде льда.

Согласно данным, переданным радаром Mini-SAR, установленном на индийском лунном аппарате Чандраян-1, в регионе северного полюса обнаружено не менее 600 млн тонн воды, большая часть которой находится в виде ледяных глыб, покоящихся на дне лунных кратеров. Вода была обнаружена в более чем 40 кратерах, диаметр которых варьирует от 2 до 15 км. Сейчас уже нет никаких сомнений в том, что найденный лед – это именно водный лед [2].

Местами недра Луны содержат больше воды, чем некоторые участки земной мантии. Об этом свидетельствует анализ образцов лунного грунта, доставленных американскими астронавтами в ходе миссий по программе «Аполлон» в конце 60-х – начале 70-х годов. Исследователи использовали метод так называемого ионного микрозондирования, который позволяет обнаруживать содержание самых малых следов воды с очень высокой точностью [3].

Истолченные образцы расплавных включений они облучали тонким пучком ионов цезия, что позволило собрать достаточное количество данных, свидетельствующих, что вода там содержится в количествах, превышающих прежние оценки в сто раз. Если данное предположение подтвердится, то можно надеяться на извлечение до 100 литров воды из одной тонны грунта.

Наличие в лунной породе химически связанной воды проявляется только при ее нагревании; она обуславливает изменение свойств породы при высоких температурах. Вследствие нарушения кристаллической решетки минералов при выделении из них химически связанной воды происходит ослабление и разрушение пород, а в ряде случаев их упрочнение (глины). Известно, что химически связанная вода наряду с другими молекулами и ионами входит в состав кристаллической решетки минералов; удаление такой воды приводит к разрушению минерала, превращению его в другое, безводное соединение. Вода, находящаяся в кристаллической решетке в виде молекул, называется кристаллизационной. Она характерна, например, для гипса ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), опала ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), карналита ($\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) и многих других минералов. Кристаллизационная вода, как правило, удаляется при температуре 200–600° С. Воду, образующуюся при нагреве из входящих в кристаллическую решетку гидроксильных ионов (OH^- и H^+), называют конституционной, температура ее выделения до 1300° С. Ее наличие характерно для таких минералов, как тальк, малахит, каолинит и др. [4].

Одна из самых ранних идей извлечения лунной воды принадлежит Фрицу Звицки (Fritz Zwicky), американскому астрофизику швейцарского происхождения. Основным источником энергии для лунной установки Звицки служит Солнце. Его лучи с помощью специальных движущихся зеркал постоянно фокусируются на камере из прозрачного пластика, внутри которой находится лунный грунт. Большинство лунных пород имеет вулканическое происхождение и потому

должны содержать и себе, по мнению Ф. Звицки, от 1 до 10% кристаллизационной воды. Когда лунные минералы будут нагреты Солнцем до температуры примерно 3000° С, вода начнет выпариваться из породы. Водяной пар прежде его конденсации можно использовать для привода турбины с целью выработки электроэнергии. Сконденсированный пар дает питьевую воду, часть которой используют и для полива лунных растений. Предполагается, что из некоторых лунных пород удастся получить и азот [5]. Неточности в данных можно объяснить отсутствием в то время сведений о составе лунного грунта, в котором нет карбонатов. Есть неточности и в температурных показателях.

Большой интерес представляют заявления и проекты ближайшего будущего компаний:

Американская компания SpaceX (AstroboticTechnology) занимается разработкой двух луноходов и посадочного модуля. Один из луноходов будет предназначен для добычи воды на полюсах Луны, второй – для изучения средних широт Луны. Спускаемый модуль предназначен для автономного перелета к Луне и мягкой посадки с луноходом на борту. Компания уже зарезервировала старт ракеты-носителя Falcon 9 (Серия ракет-носителей, разработанных американской компанией SpaceX) в 2015 году [6].

NASA (США) разрабатывает проект по созданию специализированного робота-погрузчика массой 45 кг, максимальная скорость передвижения не превышает 4 сантиметра в секунду, грузоподъемность (по грунту) 18 кг, место переработки грунта – технологическая платформа массой 900 кг. По расчетам, чтобы заправить одну ракету топливом, получаемым гидролизом из лунной воды (кислород и водород), одному RASSOR Excavator'у потребуется работать пять лет по 16 часов в сутки. Завершение указанного ОКР планируется на 2014 год [7].

Американская энергетическая компания «Шеклтон» ведет исследования, направленные на разработку горных месторождений Луны в течение ближайших нескольких лет. Планы компании предполагают плавление льда и очистку воды, превращение воды в кислород и перекись водорода, а затем конденсацию газов в жидкий водород, жидкий кислород и перекись водорода, которые являются потенциальным ракетным топливом.

Добываемая вода будет использоваться исключительно в качестве ракетного топлива, чтобы обеспечить операции внутри низкой околоземной орбиты – например, космический туризм и удаление космического мусора, а также для деятельности на Луне и в более удаленном космическом пространстве. В настоящий момент компанией реализуется первый этап, включающий в себя создание команды для миссии, поиск инвесторов для финансирования, а также детальное планирование дальнейшей работы.

Второй этап предполагает запуск на Луну двух беспилотных вездеходов для разведки водных месторож-

дений. В дальнейшем планируется создать несколько станций по заправке и техническому обслуживанию на низкой околоземной орбите [8].

В настоящий момент Научно-образовательный центр «Инновационные горные технологии» (НП ЦИГТ), созданный при участии Московского государственного горного университета и Института проблем комплексного освоения недр РАН, приступил совместно с ООО «ГАН» к разработке технологии извлечения воды из обезвоженных грунтов.

Рассматриваются два основных направления по возможным способам добычи воды на космических объектах:

– получение воды из льда. Этот метод является наиболее перспективным, но может иметь серьезные недостатки, связанные с необходимостью разведки и сложностью проведения горных работ;

– получение воды из имеющегося грунта, который, как правило, является обезвоженным.

Существующие исследования структуры и свойств воды в космических грунтах в настоящий момент не могут дать достаточно информации о ее свойствах. Предположительно, вода в грунте представляет собой кристаллическую модификацию похожую на лед в виде физически связанной воды или находится в гидроксиде.

НП ЦИГТ совместно с ООО «ГАН» разрабатывает технологии, основанные на ряде физических воздействий. Использование электромагнитных воздействий может обеспечить ослабление связей в физически и химически связанной воде. Предлагается разработать технологию и ее аппаратное обеспечение, основанную на воздействии на грунт электромагнитных полей различных частот и интенсивностей. Предварительные эксперименты на земных аналогах космических грунтов показали возможность значительного повышения извлечения воды.

Для реализации указанных эффектов, планируется создание макета технологического модуля, способного в непрерывном режиме извлекать из обезвоженного грунта воду.

Ожидаемые технические характеристики разрабатываемого модуля по сравнению с аналогом NASA приведены в табл. 1.

Выводы: Предварительные результаты экспериментальных исследований показали перспективность использования импульсных электромагнитных воздействий в технологии извлечения воды. Имеются предпосылки по увеличению извлечения воды в 1,5–1,7 раза и снижению температуры выпаривания в

П. П. АНАНЬЕВ, О. М. ГРИДИН,
А. В. ПЛОТНИКОВА, Ю. В. СМЕРНОВА
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ИЗВЛЕЧЕНИЯ ВОДЫ ИЗ ЛУННЫХ ГРУНТОВ

1,5 ÷ 2,5 раза по сравнению с заявленными методами получения воды из грунтов природных космических объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ученые нашли новый источник воды на Луне // Weekend: 23–25 июля 2010 года (130). РИА Новости <http://ria.ru/science/20100721/257098290.html#ixzz2Xd10fCbC>.
2. Луна. Википедия. 13.06.2013. Российские ученые указали на потенциальные локации воды на Луне.
3. ЭЙМОС Д. Научный отдел Би-Би-Си. «На Луне нашли значительное количество воды»
4. HAURI E.H., WEINREICH T., SAAL A.E., RUTHERFORD M.C., VAN ORMAN J.A. High pre-eruptive water contents preserved in lunar melt inclusions. Published Online May 26 2011 Science 2011. Vol. 333. № 6039. P. 213-215.
5. ЗИГЕЛЬ Ф.Ю. Можно ли жить на Луне? <http://astro-nautica.ru/polety-v-kosmos/osvoenie-luny/289.html>.
6. ШЕВЧЕНКО В.В. Лунная база / Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Космонавтика, астрономия». № 6. М.: Знание, 1991. 64 с.
7. Химики придумали, как получить кислород на Луне. 13 августа 2009. Наука/Корреспондент.net.
8. НАСА создает робота для добычи воды на луне (26.07.2013). <http://compulenta.computerra.ru/tehnika/robotics/10004210/>.
9. Добыча ископаемых на Луне может стать реальностью (26.07.2013). <http://tainy.net/22924-dobycha-iskopaemyx-na-lune-mozhet-stat-realnostyu.html>.
10. Микроволновые пушки помогут добывать воду на Луне и на Марсе – ученый (26.07.2013). <http://ria.ru/science/20081006/151915934.html>.

Ананьев Павел Петрович, к.т.н., генеральный директор Некоммерческого партнерства «Научно-образовательный центр «Инновационные горные технологии»
☎ тел.: +7 (915) 308-76-00, e-mail: cigt@mail.ru

Гридин Олег Михайлович, д.т.н., профессор Московского государственного горного университета
☎ тел.: +7 (910) 462-21-25, e-mail: gridinom@yandex.ru

Плотникова Анна Валерьевна, с.н.с. Некоммерческого партнерства «Научно-образовательный центр «Инновационные горные технологии», старший преподаватель Московского государственного горного университета
☎ тел.: +7 (926) 387-69-37, e-mail: cigt@mail.ru

Смирнова Юлия Владимировна, заместитель директора ООО «ГАН»
☎ 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 6
тел.: +7 (910) 445-52-74, e-mail: gun_post@mail.ru

ТАБЛИЦА 1.

Сравнение технических характеристик

Наименование	Масса	Производительность при переработке грунта	Выход воды
Разрабатываемый технологический модуль	100 кг	100 кг/ч	1,5 л/час
RASSOR Excavator	945 кг	80 кг/ч	0,4 л/час

УДК 681.2.082

МЕТОДИКА ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЯ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ИХ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ*

П. П. АНАНЬЕВ¹, С. Ф. ЛЕСКОВ¹,
В. А. ЗЕНТИНОВ²,
Е. И. КУДРЯВЦЕВА²

¹Некоммерческое партнерство «Центр инновационных горных технологий»,
²Московский государственный горный университет

Рассмотрен информативный и экономичный метод экспресс-контроля вещественного состава магнитных руд полиминерального состава на основе измерения магнитных свойств в полях различной интенсивности.

Ключевые слова: магнитные руды, магнитные свойства, неоднородные поля, экспресс-методы, вещественный состав.

Управление процессом шихтования при обогащении железных руд требует заблаговременного определения свойств рудного материала, движущегося в потоке, либо находящегося в массиве.

Наиболее распространенные способы экспресс-контроля свойств руды, содержащей магнитные минералы, основаны на измерении начальной магнитной проницаемости (восприимчивости). Данные методы имеют большую погрешность. Одна из причин больших погрешностей заключается в затруднениях учета магнитных свойств руд, имеющих в своем составе различные магнитные минералы.

Предлагается осуществлять экспресс-контроль рудных материалов в полях различной интенсивности, так как это создает предпосылки для выявления влияния состава полиминеральных руд на магнитные свойства горной породы, что в свою очередь может повышать информативность метода контроля и снизить погрешность измерения.

Использование магнитных весов в качестве прибора для измерения магнитной проницаемости материалов в полях различной интенсивности, в том числе различных руд, полученных из бурового шлама в различных

TECHNIQUE OF EXPRESS MONITORING OF IRON-ORE MATERIALS ON THE BASIS OF THEIR MAGNETIC PROPERTIES

P. P. ANANJEV,
S. F. LESKOV, E. I. KUDRJAVCEVA

Considered informative and economical method for express control of the material composition of the magnetic ores polymineral composition based on the measurement of the magnetic properties in the varying intensity fields.

KEYWORDS: magnetic ore, magnetic properties non-uniform magnetic field, rapid methods, material composition.

точках месторождения и хвостов магнитной сепарации, может позволить определить восприимчивость данного рудного материала к технологической операции магнитной сепарации, так как применяемая методика основывается на определении силы взаимодействия материала с неоднородным магнитным полем.

Природные магнитные минералы являются по своей сути ферромагнетиками [1]. Значения их магнитных параметров лежат в пределах между значениями ферромагнетиков (самородных магнитных металлов) и антиферромагнетиков (окислов металлов). Так, например $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ (гематит) является антиферромагнетиком, обладает низкими значениями намагниченности и магнитной восприимчивости. Магнетит (Fe_3O_4), строение которого определяется структурой формулой $\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$, является ферромагнетиком. Для многих природных минералов характерна переходная форма. Пирит Fe_2S является антиферромагнетиком, а пирротин $\text{Fe}_{1-x}\text{S}_x$ – ферромагнетиком, и т.д.

В основу методики измерения магнитной восприимчивости [2] в полях различной интенсивности положены следующие известные закономерности:

$$\Delta P_i = \frac{P_i - P_0}{P_0} = \frac{F_i}{m_0 \cdot g} \quad (1)$$

где ΔP_i – прирост веса образца в магнитном поле с пространственным градиентом; P_i – вес образца в маг-

* Работа выполнена при поддержке «Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере», контракт №1-0397р/18653

нитном поле с пространственным градиентом при напряженности магнитного поля H_p ; H ; P_0 – вес образца, H ; m_0 – масса образца, кг; F_i – сила действующая на образец и обусловленная магнитным полем с пространственным градиентом, H ; g – ускорение свободного падения, m/c^2 .

$$F_i = \frac{d}{dz} (\mu_0 \cdot J_i \cdot H_i \cdot V), \quad (2)$$

где: μ_0 – магнитная постоянная ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м); J – намагниченность образца, А/м; H_i – напряженность магнитного поля, А/м; V – объем образца, m^3 .

$$\frac{F_i}{P_i \cdot g} = \frac{d}{dz} (J_i \cdot H_i) \cdot \frac{V \cdot \mu_0}{V \cdot \rho \cdot g} \quad (3)$$

где: ρ – плотность образца, кг/м³.

Используя выражение (3), получаем взаимосвязь дифференциала магнитной энергии образца (dW) поля с приростом веса образца в неоднородном внешнем магнитном поле [3]:

$$H \cdot \frac{dJ}{dH} + J = \frac{\Delta P}{P} \cdot \rho \cdot V. \quad (4)$$

Используя данные таблицы 1, имеется возможность аппроксимировать взаимосвязь, приведенную в выражении (4) в виде полинома:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dH} (J \cdot H) &= H \cdot \frac{dJ}{dH} + J = \\ &= A_0 + A_1 \cdot H + A_2 \cdot H^2 + A_3 \cdot H^3 \end{aligned} \quad (5)$$

где $A_0 = 0$; A_1, A_2, A_3 – эмпирические коэффициенты аппроксимации.

ТАБЛИЦА 1.

Результаты определения содержания железа магнетита в рудных материалах в сопоставлении с результатами химического анализа

№ образца	Вес пробы, г	Относительный прирост веса (ΔP), при			Хим. анализ	Fe мг	Абс. ошибка
		H_1	H_2	H_3	Fe мг		
1	198,22	0,00035	0,00172	0,00394	4,4	4,5	0,1
2	200,15	0,00035	0,00175	0,00405	4,4	4,6	0,2
3	199,65	0,00035	0,00150	0,00346	4,2	4,2	0,0
4	199,54	0,00035	0,00165	0,00381	4,2	4,4	0,2
5	200,59	0,00045	0,00179	0,00429	4,4	4,7	0,3
6	201,79	0,00040	0,00193	0,00436	4,4	4,6	0,2
7	201,29	0,00065	0,00233	0,00502	4,6	4,7	0,1
8	200,01	0,00050	0,00200	0,00470	4,6	4,8	0,2
9	238,46	0,00042	0,00180	0,00403	4,2	4,5	0,3
10	269,89	0,00041	0,00174	0,00400	4,6	4,5	0,1
Средняя ошибка по 10-ти измерениям							0,2

П. П. АНАНЬЕВ, С. Ф. ЛЕСКОВ,
В. А. ЗЕНТИНОВ, Е. И. КУДРЯВЦЕВА
МЕТОДИКА ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЯ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ
МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ИХ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ

Результаты по определению содержания железа магнетитового и по результатам химического анализа приведены в табл. 1.

Сопоставление значений содержания железа в магнитных рудах, полученных на основе измерения магнитной восприимчивости в полях различной интенсивности с данными о содержании железа магнитного, полученных химическим способом (ГОСТ), дало возможность утверждать, что предлагаемая методика позволяет осуществлять измерения в пределах погрешности химического способа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бозорт Р.М. Ферромагнетизм / М.: Изда-во Иностранной литературы, 1956. С. 784.
2. Вонсовский С. В. Современное учение о магнетизме. М.-Л., 1952.
3. Кудрявцева Г. П. Ферримагнетизм природных оксидов. М.: Недра, 1988. 232 с.

Ананьев Павел Петрович, к.т.н., генеральный директор «Некоммерческое партнерство «Центр инновационных горных технологий»,
☎ тел.: +7 (915) 308-76-00, e-mail: cigt@mail.ru

Лесков Сергей Феликсович, с.н.с. «Некоммерческое партнерство «Центр инновационных горных технологий»,
☎ тел.: +7 (910) 423-02-24

Зентинов Виктор Алексеевич, аспирант ФБГОУ ВПО МГГУ
☎ тел.: +7 (915) 317-58-07, e-mail: vzentinov@gmail.com

Кудрявцева Елизавета Игоревна, студент ФБГОУ ВПО МГГУ
☎ тел.: +7 (963) 768-49-36
119415, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 6, к. «в»

УДК 681.2.082

СЕЛЕКТИВНОЕ ПРЕДРАЗРУШЕНИЕ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД НА ОСНОВЕ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ*

А. В. Плотникова

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Рассмотрены экспериментальные результаты селективного разрушения железных руд подвергнутые предварительной магнитно импульсной обработке и последующей механической дезинтеграции.

Ключевые слова: импульсные электромагнитные поля, железные руды, межзеренные границы, разрушение.

Процесс рудоподготовки в технологии обогащения различных руд преследует цель создания условий, обеспечивающих максимальную степень извлечения полезного компонента при минимально возможных затратах. Как правило, этот процесс связан с измельчением руды до крупности меньше размера зерна полезного компонента с последующим его извлечением тем или иным физическим или химическим способом [1].

Самым энергоемким и дорогостоящим процессом при добыче и обогащении минерального сырья является их разрушение. Например, на железорудных ГОКах России, на долю этого процесса приходится 70% всех энергозатрат (~30 кВт·ч/т руды).

В золотодобывающей отрасли, а так же при добыче полиметаллических руд, измельчение является одним из затратных технологических процессов. Это связано, прежде всего, с тем, что в настоящее время около 50% золота в России добывается из коренных месторождений.

Основная цель при модернизации технологического процесса переработки железорудного сырья (ЖРС) заключается, в первую очередь, в увеличении объема производства товарной продукции. Поэтому, сниженные энергоемкости измельчения, за счет использования МИО однозначно позволит повысить объемы переработки ЖРС, при условии, что технологические

* Работа выполнена при поддержке «Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере»

SELECTIVE PRE-FRACTURE IRON ORE ON THE BASIS OF MAGNETIC-PULSE TREATMENT

A.V. Plotnikova

Good results of experiments selective destruction iron ore that has been previously subjected to a magnetic pulse processing, and thereafter the mechanical disintegration.

KEYWORDS: pulsed electromagnetic fields, iron ore, grain boundaries, the destruction of.

свойства сырья (обогащаемость, измельчаемость) не изменится. Это возможно, лишь в том случае, если есть дополнительные резервы высококачественной руды. Как правило, это условие трудновыполнимо в рамках действующих российских предприятий. При формировании рудной шихты доля труднообогащаемых руд весьма ограничена, так как ее увеличение однозначно приведет к снижению качества готовой продукции (снижение содержания железа в концентрате), либо к снижению производительности фабрики, за счет необходимости повышения степени измельчения рудного материала, для получения кондиционного концентрата (с требуемым содержанием железа) [2].

Кроме того, имеется общая тенденция снижения доли легкообогащаемых руд, что требует поиска новых технологических решений, направленных на возможность вовлечения в переработку труднообогащаемых железных руд, без ущерба для качества товарной продукции.

Эффективность магнитно-импульсной обработки труднообогащаемых железных руд может оцениваться с точки зрения следующих критериев [3]:

- повышение показателей обогащаемости труднообогащаемых руд, что может позволить увеличить их долю в составе рудной шихты, поступающей в переработку;
- снижение энергозатрат на разрушение на этапе рудоподготовки.

Так как МИО должна обеспечивать разупрочнение границы срастания рудной и нерудной фаз, то

можно ожидать, что даже при одинаковой степени дезагрегации рудного материала содержание раскрытых рудных зерен в концентрате, полученном с помощью МИО, увеличится по сравнению с концентратом, полученном без использования МИО.

Для подтверждения этого предположения были проведены лабораторные эксперименты, позволяющие сравнить содержание раскрытых рудных зерен и содержание железа в концентратах, полученных из руд месторождений Дальневосточного региона с использованием и без использования МИО при одинаковой степени механической дезагрегации (табл. 1).

Анализ результатов, приведенный в таблице 1 дает возможность утверждать, что предварительная МИО содействует процессам предразрушения на границах фаз и обеспечивает протекание селективного разрушения при последующей механической дезинтеграции железных руд.

ЛИТЕРАТУРА

1. **БАРАНОВ В.Ф.** Обзор мировых достижений и проектов рудоподготовки новейших зарубежных фабрик. М.
2. **РЕВНИЦЕВ В.И.** Задачи научно-исследовательских и опытно-конструкторских организаций по совершенствованию рудоподготовки // Обогащение руд. 1977. № 6 (134). С. 4–7.
3. **ГОНЧАРОВ С.А., АНАНЬЕВ П.П., БРУЕВ В.П.** Математическое моделирование процесса разупрочнения железистых кварцитов при их магнитно-импульсной обработке (МИО) Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. №10. С. 5–9.

ТАБЛИЦА 1.

Сравнительный анализ раскрытия рудной фазы и качества концентратов полученных с использованием и без использования МИО

№		Содерж. класса -40 мкм	Концентр. $F_{\text{ек-те}}$	Свобд. рудные	Свобод. нерудные	Сростки	Исходный продукт		Примечание
							$Fe_{\text{общ.}}$	$Fe_{\text{мг.}}$	
1	Без МИО	91,0	52,6	70,6	14	15,4	20,0	10,6	Гематит-магнетитовая
2	МИО	91,4	55,0	75,3	11,7	13	19,5	11,4	Магнетитовая
	Без МИО	89,4	52,7	67,5	13,6	18,9	28,4	22,8	
3	МИО	89,8	53,9	70	12,5	17,5	28,2	22,1	Лимонитовая
	Без МИО	89,2	54,7	73,5	16,7	9,8	16,7	3,6	
	МИО	89,0	55,5	74,6	15,7	9,7	16,5	3,4	

Плотникова Анна Валериевна,
старший преподаватель кафедры «ФГПиП» Московского государственного горного университета

☎ 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 6
тел. +7 (926) 387-69-37, e-mail: plotnikovaav@inbox.ru

УДК 628.16.081

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГИДРОМИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ РОССИИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЙОДИДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ЗОЛОТОДОБЫЧЕ

В.В. Мазин, Е.А. Полищук

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ОТКРЫТЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. В.С. ЧЕРНОМЫДИНА

В статье рассматривается современное состояние и перспективы производства и потребления рассеянных элементов и редких металлов, добываемых с использованием гидроминерального сырья (йода, брома и др.) и возможного использования йода для выщелачивания золота.

Ключевые слова: гидроминеральное сырье, подземные промышленные воды.

Освоение гидроминеральных сырьевых ресурсов (подземных промышленных вод) может обеспечить индустриальное производство лития, йода, брома, соединений бора и стронция, солей натрия, кальция, магния в необходимых количествах для развития отдельных отраслей народного хозяйства. Целесообразность использования гидроминеральных сырьевых ресурсов (минерализованных подземных вод и рассолов) для получения товарной продукции подтверждается зарубежной практикой. В развитых и развивающихся странах сохраняется четкая тенденция к увеличению объемов производства продукции и расширению ее номенклатуры на базе использования гидроминерального сырья. В России наблюдается существенное отставание от развитых зарубежных стран как по объемам добычи и уровню разработки технологических процессов переработки гидроминерального сырья, так и по масштабам использования связанных с этим сырьем редких элементов и минеральных солей в новых областях техники и технологии в ответственных отраслях промышленности. В том числе и для выщелачивания благородных металлов с использованием йодидной системы применительно к геотехнологическим способам добычи полезных компонентов.

Разработка проблем изучения и освоения месторождений гидроминерального сырья ранее в СССР, начиная с 1981 г., осуществлялась в планомерном по-

DEVELOPMENT PROSPECTS HYDROMINERAL RESOURCE BASE RUSSIA AND USE OF COMPOUNDS IODIDE IN GOLD MINING

V.V. MAZIN, E.A. POLISHCHUK

The article discusses the current state and prospects of production and consumption of trace elements and rare metals extracted using hydromineral resources (iodine, bromine, etc.) and the possible use of iodine for gold leaching.

KEYWORDS: raw, industrial underground water.

рядке в рамках Общесоюзной научно-технической программы 0.85.08, а также в соответствии с подпрограммой 1.5 «Комплексное изучение и освоение месторождений гидроминерального сырья», целевой комплексной программы «Рациональное комплексное использование минерально-сырьевых ресурсов в народном хозяйстве на 1987–1990 гг. и на период до 2000 г.» Госплана СССР.

Целью указанных работ являлось создание новой гидроминеральной сырьевой базы редких металлов, рассеянных элементов и минеральных солей, разработка и внедрение новой техники и принципиально новой технологии переработки гидроминерального сырья.

В 1981–1988 гг. была выполнена региональная оценка прогнозных ресурсов и эксплуатационных запасов гидроминерального сырья, позволившая выявить наиболее крупные месторождения и оценить их потенциальные возможности. Была разработана и проведена технология селективного извлечения редких элементов и комплексной переработки гидроминерального сырья с доведением технологических разработок до уровня проектирования опытно-промышленного производства редких элементов и минеральных солей, в частности, в Дагестане и в Ставропольском крае. Однако в связи с перестройкой народного хозяйства и последующей ликвидацией ГКНТ, Госплана СССР

и Министерства геологии СССР, начиная с 1989 г., такие работы были фактически прекращены.

Тем не менее, выполненные ранее и выполняемые в настоящее время исследования и разработки подтверждают высокую эффективность освоения месторождений гидроминерального сырья. Эти исследования создали объективные предпосылки для дальнейшего расширения и детализации научно-исследовательских, геологоразведочных и технологических работ этого направления в России.

В настоящем сообщении рассматриваются состояние и перспективы производства и потребления рассеянных элементов и редких металлов, добываемых с использованием гидроминерального сырья (йода и брома, и в меньшей степени щелочных металлов и минеральных солей). Обзор составлен сотрудниками Института проблем гидроминеральных ресурсов при Московском государственном открытом университете и Акционерного общества по изучению и освоению месторождений гидроминерального сырья «ГИДРЕМС». При этом в основном использованы материалы этих организаций, балансы производства йода и брома ВНИИЙодобром (г. Саки, Крым, Украина), данные ВСЕГИНГЕО, а также данные, любезно предоставленные в 1992 г. господином Л. Линтоном CENTRAL RESOURCEY CORPORATION, Нью-Йорк, США).

Следует отметить, что с 1992–1993 гг. резко сократилось число публикаций по затрагиваемым вопросам; прекратился также выпуск балансов производства йода и брома ВНИИЙодобром, перешедшим под юрисдикцию Украины.

В настоящее время природные минеральные воды и рассолы являются источниками получения в промышленных масштабах натрия, кальция, калия, магния, хлора, брома, йода, бора и ряда других элементов и их соединений. В ряде развитых стран (США, Япония, Италия, Германия) добыча редких элементов из гидроминерального сырья превысила в денежном выражении 2 млрд долл. в год и составляет значительную долю от их общей мировой добычи.

Пока удерживают первое место в мире по производству из гидроминерального сырья: США – карбоната лития (около 35 тыс.т/год), брома (до 180 тыс.т/год), окиси магния (до 750 тыс.т/год, поваренной соли (около 16000 тыс.т/год); Япония – йода (до 7,5 тыс.т/год); Италия – боратов (около 35 тыс.т/год).

В СНГ в настоящее время гидроминеральное сырье используется в Туркмении для добычи йода (порядка 300 т/год) и брома (1500 т/год). Причем такое сырье является единственным источником получения йода и основным – брома. В небольших количествах из озер приморского и континентального типа (Кара-Богаз-гол, Баскунчак, Кучук, Сиваш и др.) добываются поваренная соль, окись магния, бром, сульфат натрия, соли калия.

В. В. МАЗИН, Е. А. ПОЛИЩУК
ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
ГИДРОМИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ
БАЗЫ РОССИИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ЙОДИДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ЗОЛОТОДОБЫЧЕ

Дефицит в производстве бора составляет около 60 тыс.т/год V_2O_5 . Производство стронция базируется на импортируемой стронциевой руде, хотя в нашей стране имеются свои разведанные месторождения такой руды. Дополнительная потребность в литии составляет в настоящее время 12–15 тыс. т/год карбоната. Дефицит в производстве указанной продукции

тормозит научно-технический прогресс в ряде отраслей народного хозяйства: в производстве алюминия, стекла и керамики, в нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности.

Следует отметить, что основное производство йода и брома сосредоточено в Туркмении; на территории России производство йода прекращено. Планировавшееся Миннефтехимпромом СССР резкое увеличение производства йода и брома и ликвидация в 1995 г. разрыва между потребностью и уровнем производства этой продукции теперь уже нереальны и невозможны. Между тем гидроминеральные сырьевые ресурсы России в целом позволяют обеспечить производство йода и брома в любом реально потребном количестве. Основными районами расширения или организации такого производства в России являются: по йоду – Краснодарский край и Тюменская область, по бромю Волго-Уральский регион, Красноярский край и Иркутская область.

Мировое производство йода базируется преимущественно на переработке подземных вод и частично селитры. Мировые запасы йода оцениваются примерно в 15 млн т.

Производство йода в Японии составляет почти половину мирового. Основным сырьевым источником являются подземные воды мощной (до 2800 м и более) песчано-глинистой толщи плиоценового возраста. Минерализация подземных вод не превышает 35 г/л; по составу воды хлоридно-натриевые; содержание йода колеблется от 40 до 120 мг/л; максимальные концентрации достигают 160 мг/л. Добыча йода осуществляется шестью компаниями на 17 заводах в трех префектурах. Основным источником получения йода в Чили остаются месторождения калиево-натриевых нитратных солей (селитры) в пустыне Атакама. Крупнейшим производителем йода в стране является компания «Sociedad Quimica y Minera de Chile» (SOQUI-MICH); на принадлежащих ей заводах Мария-Элана и Падре-де-Валадавия ежегодно производится до 3000 т неочищенного йода из нитратных растворов и до 1000 т из йодистых растворов, получаемых при кучном выщелачивании старых отвалов. Компания «ACF Chemical y Mineral del Alba» производит до 1000 т неочищенного йода в год.

В США йод производится из подземных вод компаниями «Dow Chem» (импортирует продукцию в Германию) и «Woodward Lodin Corp.» (субсидируется японской формой «Asahi Glass Co.»). Потребность йода в этой стране (3,5–3,9 тыс.т/год) значительно

превышает производство (1,2 тыс./год), в связи с чем эта продукция импортируется из Японии и Чили.

В целом потребление йода и спрос на него за рубежом возрастают. Европейские страны, как и США, решают этот спрос за счет импорта. Дефицит в потреблении йода по разным данным составляет 900–1500 т/год.

Количество йода, необходимое для удовлетворения нужд российских предприятий разного профиля, указано в табл. 1. При сокращении существующего уровня производства дефицит йода в России составил 1995 г. – 1040 т, в 2000 г. – 1210 т, в 2005 г. – 1340 т, в 2010 г. – 1460 т.

В таблице не указана возможная потребность в йоде для целей выщелачивания золота.

Основное производство йода сосредоточено, как указывалось, в Туркмении. Поэтому целесообразна и необходима организация нового крупнотоннажного производства йода именно в России, так как изменение государственного устройства страны и переход бывших союзных йодо-бромных предприятий под юрисдикцию суверенных республик способствует обострению дефицита в потреблении йода и его производных.

Следует отметить, что единый порядок определения действительной потребности в продуктах йодо-бромного производства отсутствует. В балансах производства и потребления йода и брома, составляющихся бывшим Миннефтехимпромом СССР и институтом «ВНИИЙодобром», обычно фигурирует так называемая «принятая» потребность, ориентированная на существующие и планируемые к вводу

новые производственные мощности йодо-бромных предприятий. Такая потребность существенно занижена по сравнению с фактической.

Из изложенного выше можно сделать следующие выводы:

- в СНГ наблюдается дебаланс в производстве йода, выражающийся в существенном отставании уровня его добычи от потребности. Особо острый дефицит йода и его производных – в Российской Федерации;

- удовлетворение текущей и перспективной потребности народного хозяйства России в йоде и его соединениях возможно лишь путями организации нового производства на базе перспективных месторождений подземных промышленных вод.

В настоящее время выщелачивание цианидами является основным способом переработки золотосодержащих руд. Однако, учитывая высокую токсичность цианидов, возросшие требования к охране окружающей среды, малую эффективность по отношению к сульфидным, сурьму, медьсодержащим рудам, большой практический интерес представляет изучение возможности применения нецианидных реагентов.

В качестве наиболее перспективной альтернативы цианидному процессу для выщелачивания золота является йод-йодидная система, где йод необходим как окислитель, а йодид – как лиганд, образующий с золотом прочный комплекс. Йод-йодидная система имеет ряд преимуществ, таких как низкая токсичность и относительная безвредность, высокая стабильность растворенных комплексов и более низкий окислительно-восстановительный потенциал по сравнению

ТАБЛИЦА 1.

Потребность в йоде России (данные ВНИИЙодобром, 1992 г.)

Потребители йода	Заявленная потребность, т/год			
	1995 г.	2000 г.	2005 г.	2010 г.
Медицина и здравоохранение	284	272	289	303
Ветеринария	370	403	448	500
Производство синтетического каучука	241	261	261	261
Производство особо чистых солей	55	88	88	90
Редкие металлы	17	20	25	30
Анилиновые красители	9	9	9	9
Уксусная кислота	23	23	64	87
Кино- и фотопромышленность	9	43	60	88
Йодистоводородная кислота	42	43	44	44
Канифольные эмульгаторы	180	180	180	180
Мелкотоннажные реактивы	13	13	13	13

с другими нецианидными (галогенными, тиосульфатными) системами выщелачивания золота.

По результатам исследования, проведенным в институте ВНИИХТ под руководством М.И. Фазлулина можно сделать вывод, что процесс выщелачивания золота в иод-иодидной системе является наиболее перспективной альтернативой процессу цианирования.

Исследования проводились на примере окисленных руд месторождений Воронцовское и Радужное, высокосульфидных концентратов месторождения Этара и Свирских продуктов обжига сульфидных руд.

Проведенные лабораторные исследования по выщелачиванию золота иод-иодидными растворами показали принципиальную возможность их применения как для окисленных руд, так и для сульфидсодержащих и техногенных продуктов обжига сульфидных руд:

- при интенсивном характере процесса для руд месторождения Воронцовское достигнуто высокоэффективное извлечение золота (87–95%) при попутном извлечении серебра 12–20%. Высокая степень окисленности исследуемых руд обусловила низкий удельный расход реагента (~ 1 кг/т руды);

- для окисленных убогосульфидных руд месторождения Радужное извлечение золота на уровне 70%, попутного серебра – 13–30% при расходе иод-иодида – 4,0–4,5 кг/т руды; из сульфидных концентратов месторождения Этара извлечено 91–97% золота;

- из Свирских пиритных огарков извлечение золота составило 69% при расходе йода-иодида ~ 1 кг/т продукта.

В.В. МАЗИН, Е.А. ПОЛИЩУК
ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
ГИДРОМИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ
БАЗЫ РОССИИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ЙОДИДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ЗОЛОТОДОБЫЧЕ

Предварительные лабораторные исследования показали принципиальную возможность электролитического извлечения золота из иод-иодидных растворов от выщелачивания окисленных руд и сульфидных концентратов.

Осадительная схема извлечения предпочтительна для извлечения золота из иод-иодидных растворов от выщелачивания техногенных продуктов и скрапа электронных приборов.

В заключении нужно отметить, что при соответствующем развитии и освоении гидроминеральных сырьевых ресурсов России, в том числе и йодных, появится возможность внедрения новых технологий как в золотодобыче, так и в других отраслях промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бондаренко С.С., Ефремочкин Н.В., Каспаров С.М.** Состояние и перспективы расширения использования гидроминеральных сырьевых ресурсов России // Материалы совещания руководящих работников организаций и предприятий РАО «Газпром». Ставрополь, 1994. С. 69–82.
2. **Фазлулин М.И., Рысев В.П.** Разработка технологии выщелачивания благородных металлов с использованием иодидной системы применительно к геотехнологическим способам добычи полезных компонентов. Промежуточный отчет. М.: 1993. 31 с.

Мазин Владимир Владимирович,
заведующий кафедрой геологии и гидрогеологии Московского государственного открытого университета им. В.С. Черномырдина

Полищук Евгения Александровна,
аспирантка кафедры геологии и гидрогеологии Московского государственного открытого университета им. В.С. Черномырдина

✉ 107996, г. Москва, ул. Павла Корчагина, д. 22.
e-mail: gigmgou@mail.ru

УДК 551.463

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ВАРИАЦИЙ НА ГЛУБИННЫЙ ТЕПЛОВЫЙ ПОТОК

В.Р. АХМЕДЗЯНОВ,
М.Д. ХУТОРСКОЙ

Геологический институт РАН

Геотермические исследования в ходе морских рейсов на шельфе Баренцева моря показали сильное влияние внешних факторов (климат и придонные течения) на измерения глубинного теплового потока. Предлагаются два алгоритма по устранению этого влияния: с помощью измерений ниже нейтрального слоя или с помощью внесения прогнозной поправки на момент измерения.

Ключевые слова: *глубинный тепловой поток, климатические вариации, шельф Баренцева моря.*

В последние годы Геологическим институтом РАН велись морские исследования в основном в Западно-Арктическом регионе (архипелаги Шпицберген и Земля Франца-Иосифа). С 2006 года было организовано четыре экспедиции в данный регион научно-исследовательского судна «Академик Николай Страхов». Измерения выполнялись телеметрическим многоканальным зондом «ГЕОС-М» [8].

Большая часть работ была сосредоточена в районе хребта Книповича и в западной части Свальбардской плиты. В ходе экспедиционных работ были получены 66 новых измерений теплового потока, убедительно показавших связь геотермического поля с локализацией месторождений углеводородов [7].

Однако в 28-м рейсе НИС (2011 г.) районом работ была юго-западная часть Баренцева моря. Измерения теплового потока на своде Федьинского при глубинах моря не более 300 м продемонстрировали очень мощное влияние экзогенных факторов на глубинный тепловой поток. Сказывалось воздействие сезонных периодических колебаний температуры дна моря за счет инсоляции, а также придонных течений с большим дебитом. Особенно этот фактор заметен в южной части Баренцева моря, где сказывается влияние Норвежско-Кольской ветви Гольфстрима. В связи с этим, прямые зондовые измерения не позволили получить кондиционные оценки глубинного фонового теплового потока, т.к. проблематично было вычлени-

CLIMATIC VARIATIONS INFLUENCE ON THE DEEP HEAT FLOW

V.R. AKHMEDZYANOV,
M.D. KHUTORSKOY

There was obtained strong influence of exogenous factors (climate and sea bottom fluxes) on the deep heat flow values during its measurement on Barents sea shelf. Here are offered two algorithms to avoid this influence using measurements below «the neutral layer» or applying forecast correction.

KEYWORDS: *deep heat flow, climatic variations, Barents sea shelf.*

глубинный геотермический градиент на фоне мощных экзогенных температурных аномалий (рис 1а).

Для получения кондиционных измерений теплового потока на акваториях стараются исследовать районы с большими глубинами (более 500 м) и отсутствием сильных придонных течений, т.е. там, где формируется изотермический придонный слой воды (рис. 1б). Однако подавляющая площадь шельфовых акваторий Баренцева и Карского морей, где эти условия отсутствуют, остаются привлекательными с точки зрения прогнозирования и поиска углеводородов. Поэтому существует необходимость продолжения геотермических исследований в этих районах. Геотермические исследования позволяют определять глубину категорического температурного интервала (110–180° С), где органическое вещество преобразуется в углеводороды. Кроме того, все уже разведанные месторождения в Баренцево-Карском регионе приурочены к аномалиям геотермического поля, что можно рассматривать, как один из поисковых признаков. Влияние экзогенных факторов при исследованиях приходится учитывать с помощью модельных поправок или измерением на глубине ниже нейтрального слоя.

На практике в основу исследования геотермического режима шельфа был положен анализ экспериментальных данных в контактной зоне вода-донные осадки [7, 6]. Для вычисления температурной поправки на этой границе или глубины «нейтрального слоя»,

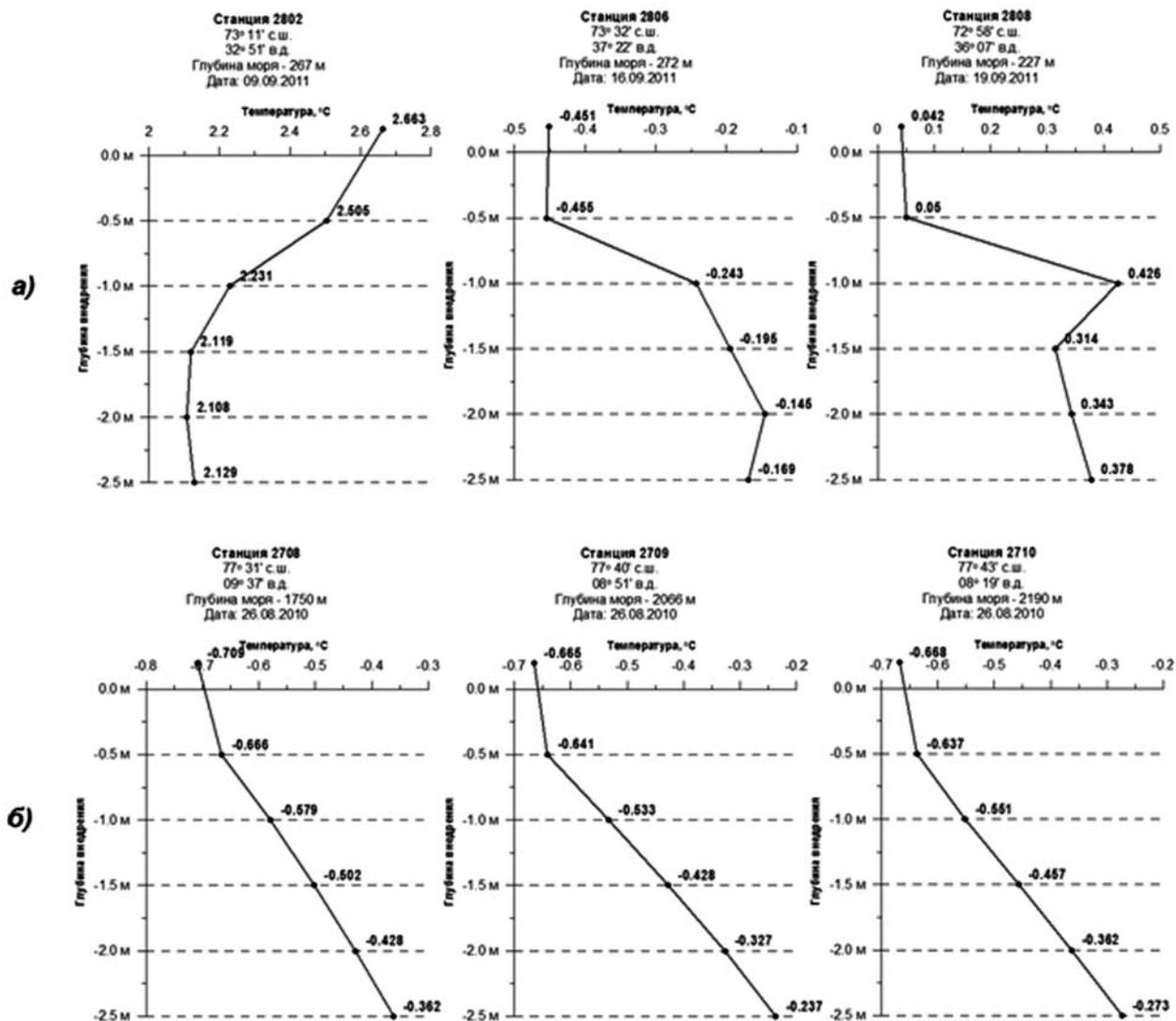


Рис. 1.

Примеры термограмм в грунте, полученные в ходе рейсов НИС «Академик Николай Страхов» в акваториях Западно-Арктического региона: а) 28-й рейс (сентябрь 2011 г.); б) 27-й рейс (август 2010 г.)

где не сказывается влияние экзогенного фактора, необходимо иметь режимные измерения температуры у дна в течение нескольких лет. Поскольку в Российской части шельфа существует развитая сеть гидрологических станций, занимающихся исследованием свойств воды на различных глубинных горизонтах [3], то основа для подобных вычислений имеется.

Недостатком указанных в литературе методик является то, что входные параметры для формул (амплитуда и период колебаний) задаются, исходя из статистических оценок, что накладывает определенную долю ошибки в итоговую модель. Это, конечно, не очень удобно, поскольку период колебаний и амплитуда – есть искомые параметры. Для устранения данных недостатков предлагается использовать метод гармонического анализа.

При разложении функция отображается в виде тригонометрического ряда [3]:

$$T(t) = a_0 - 2 \sum_{m=1}^{N-1} \left(a_m \cos \frac{m2\pi t}{L} + b_m \sin \frac{m2\pi t}{L} \right) + a_N \cos \frac{N2\pi t}{L}$$

где a_0 – средняя температура за период времени L ; $N = \frac{N}{2}$ – количество гармоник (N – количество измерений); m – номер гармоники; L – период времени, в течение которого производились наблюдения; a_m , b_m – искомые константы.

Иногда это выражение удобнее записывать в виде

$$T(t) = A_0 - 2 \sum_{m=1}^{N-1} A_m \cos(\omega_m t + \varphi_m) + A_N \cos \omega_N t$$

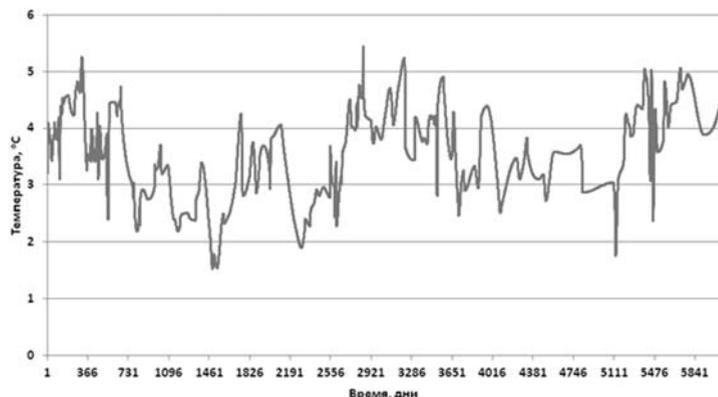


Рис. 2. Измерения придонной температуры с февраля 1975 по май 1991 г.

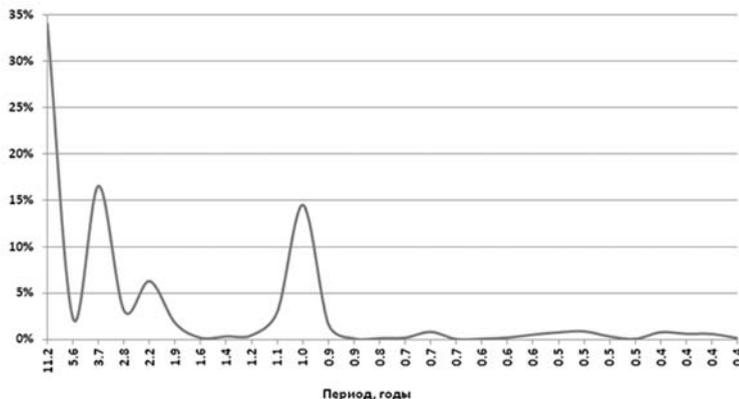


Рис. 3. Вклад (%) в переменную мощность сигнала (первые 27 гармоник)

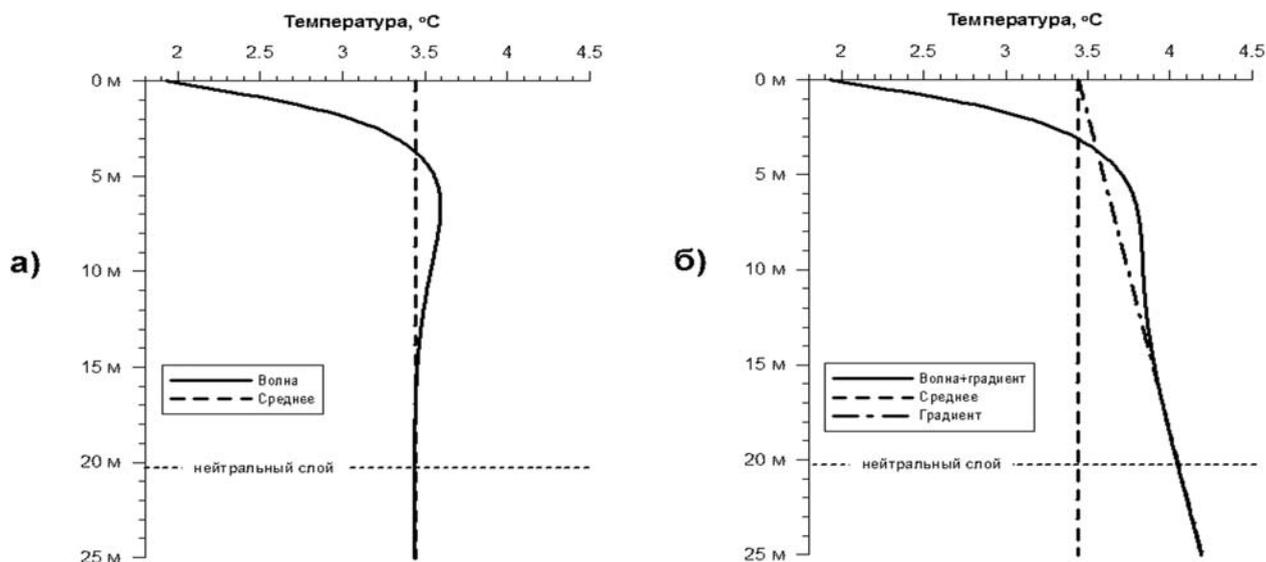


Рис. 4. Распространение поверхностной температурной волны в грунте (прогноз на 01 августа 2015 г.) а) без градиента; б) при наличии градиента

где $A_m = \sqrt{a_m^2 + b_m^2}$ амплитуда m -й гармоники на поверхности вода-грунт;

$\varphi_m = \text{arctg} \left(-\frac{b_m}{a_m} \right)$ фаза m -й гармоники;

$\omega_m = \frac{m2\pi}{T}$ — частота m -й гармоники.

Определив гармонические колебания на поверхности, можно оценить их затухание в грунте:

$$T(z, t) = A_0 - 2 \sum_{m=1}^{M-1} A_m \cdot e^{-k_m z} \cdot$$

$$\cdot \cos(\omega_m t - k_m z + \varphi_m) +$$

$$+ A_m \cdot e^{-k_m z} \cdot \cos(\omega_m t - k_m z),$$

где $k_m = \sqrt{\frac{\omega_m}{2\chi}}$ пространственная

частота (χ — температуропроводность).

Для нахождения нейтрального слоя достаточно определить максимально возможную глубину проникновения этих колебаний. Поэтому ограничимся глубиной, где сумма амплитуд по всем гармоникам ($M > 0$) $\Delta \Sigma$ меньше или равна заданной погрешности ΔT .

$$A_z(z) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} A_{n1} \cdot e^{-(k_n z)} + A_{n2} \cdot e^{-(k_n z)}$$

Для практической реализации данного метода, можно использовать данные по придонной температуре воды, которые представлены в электронном атласе «Климат морей России и ключевых районов Мирового океана. Баренцево море» [3]. В большей части Баренцева моря существует придонный изотермический слой водных масс толщиной до 4–8 м в зависимости от глубины моря. При глубине моря более 150 м температура придонной воды совпадает с температурой поверхности дна с погрешностью 0,03–0,04°С, что позволяет использовать данные температурного режима придонных вод в качестве граничных условий [2]. В указанном электронном атласе, который представляет собой режимно-справочное пособие, содержатся сведения о климатических характеристиках морской среды Баренцева моря. К сожалению, измерения представлены только в виде осредненных по месяцам значений. Полный временной ряд недоступен для пользователей. Поэтому проанализировать можно только годовые колебания.

В качестве примера рассмотрим временной ряд измерений придонной температуры на шельфе Баренцева моря за 17 лет, любезно предоставленный нам Л.М. Галеркиным (ИО РАН им. П.П. Ширшова). Измерения производились в квадрате 1°×1° с координатами левого верхнего угла – 71° в.д., 34° с.ш.; правого нижнего – 72° в.д.; 33° с.ш. После посуточного осреднения (поскольку измерения носили непериодический характер) и интерполяции получился ряд, представленный на рисунке 2. Всего получилось 6100 значений температур. Для анализа методом быстрого преобразования Фурье использовались первые 4096 значений (2¹²) [4].

Из спектра видно, что основными гармониками являются колебания с периодами: 11,2 года, 3,7 года и 1 год (рис. 3). Амплитуды, соответственно, 0,652°С, 0,456°, 0,426°С. Полученные циклы хорошо согласуются со значениями по Северной Атлантике, приведенными в литературе [1].

В результате анализа временного ряда расчетная глубина нейтрального слоя получается равной 20,5 м (при температуропроводности осадков 2×10⁻⁷ м²/с). На этой глубине поверхностные колебания температуры будут влиять на значение геотемпературы менее, чем на 0,01°С. Но это достаточно большая глубина для измерения теплового потока. В настоящее время отсутствуют зондовые приборы, способные к измерениям на таких глубинах. То есть необходимо бурение неглубоких скважин и их каротаж, что на порядок более трудоемко по сравнению с зондовыми измерениями.

Вместе с тем можно использовать другой подход на основе прогнозных расчетов по распространению

температурной волны в грунте на момент измерений. Этот подход позволяет проводить исследования с традиционной зондовой аппаратурой, но в окончательный результат по определению глубинного теплового потока вносится дополнительная прогнозная погрешность.

Например, если мы планируем проведение экспедиционных исследований в вышеуказанном районе Баренцева моря в августе 2015 г., то необходимо сделать уже обратное преобразование Фурье на основе полученного спектра и экстраполировать временной ряд на интересующую дату.

Начальной точкой временного отсчета в нашем случае является 13 февраля 1975 г., поэтому все последующие прогнозы должны отталкиваться от этого момента (иначе изменятся начальные фазы гармоник). Для даты 01 августа 2015 г. необходимо ввести t=14 568 дня. При этом получается, что на глубине 2 м температура должна быть равна 3,060°С (рис. 4а).

Однако в общем случае значение температурного поля в грунте S(z, t) зависит от суммы двух составляющих: внешнего воздействия T(z, t) и глубинного источника тепла G(z).

$$S(z, t) = T(z, t) + G(z)$$

На момент времени t:

$$S(z) = \left[A_0 + 2 \sum_{n=1}^{n-1} A_{n1} \cdot e^{-(k_n z)} \cdot \cos(\omega_n t - k_n z + \varphi_n) + A_{n2} \cdot e^{-(k_n z)} \cdot \cos(\omega_n t - k_n z) \right] + [g \cdot z]$$

где g – геотемпературный градиент (рис. 4б).

Таким образом, если в исследуемой точке есть измерения температуры по глубине S(z) и велись регулярные измерения температуры на поверхности T(z=0, t), то в ней можно рассчитать значение геотемпературного градиента g.

$$g = \frac{S(z) - \left[A_0 + 2 \sum_{n=1}^{n-1} A_{n1} \cdot e^{-(k_n z)} \cdot \cos(\omega_n t - k_n z + \varphi_n) + A_{n2} \cdot e^{-(k_n z)} \cdot \cos(\omega_n t - k_n z) \right]}{z}$$

Этот параметр чрезвычайно важен для дальнейшего определения глубинного теплового потока.

Конечно, на практике в итоговом результате будет присутствовать определенная доля ошибки: за счет погрешности измерений, за счет аппроксимации временного ряда, да и сам по себе прогноз – величина вероятностная. Но, в отсутствие прямых измерений неискаженного глубинного теплового потока, предлагаемый алгоритм дает оценочное значение этой ве-

личины.

Заметим, что гармонический анализ Фурье не является универсальным инструментом для изучения термических условий на границе «дно-вода». Данный метод хорошо разработан и неплохо зарекомендовал себя при работе со стационарными моделями, но вот в случае с непериодическим изменением параметра во времени лучше использовать частотно-временное представление сигнала. Эффективным подходом в данном случае может быть применение вейвлет-преобразования [9]. Хотя, если требуется определить только значение глубины нейтрального слоя, то вполне достаточно спектральной характеристики, полученной с помощью преобразования Фурье.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бочков Ю.А.** Крупномасштабные колебания температуры воды на разрезе «кольский меридиан» и их прогнозирование // 100 лет океанографических наблюдений на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море. Сб. докл. Междунар. симпозиума. Мурманск: Изд. ПИНРО, 2005.
2. **ДЖЕНКИНС Г., ВАТТС Д.** Спектральный анализ и его приложения. Пер. Писаренко В.Ф. М.: Мир, 1971. 316 с.
3. Климат морей России и ключевых районов Мирового океана. Баренцево море. Электронный атлас: http://data.oceaninfo.info/atlas/Bar/3_watertemp_tr-ows_map.html.
4. **Князев Б.А., Черкасский В.С.** Дискретное преобразование Фурье – как это делается // Вестник НГУ. Сер. Физика. 2008. Т. 3, № 4. С. 74–86.
5. **Левашкевич В.Г.** Закономерности распределения геотермического поля окраин восточно-европейской платформы (Баренцевоморский и Белорусско-Прибалтийский регионы). Диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. Институт геохимии и геофизики Национальной академии наук Беларуси. Минск, 2005. 329 с.
6. **Суетнов В.В., Никкульшина Е.А.** Результаты исследования параметров нейтрального слоя в донных осадках южной части Баренцева моря // Геотермические исследования на дне акваторий. М.: Наука, 1988. С. 128–134.
7. **Хуторской М.Д., Вискунова К.Г., Подгорных Л.В., Супруненко О.И., Ахмедзянов В.Р.** Геотемпературная модель земной коры Баренцева моря: исследования вдоль геотраверсов // Геотектоника. 2008. №2, С. 36–54.
8. **Хуторской М.Д., Леонов Ю.Г., Ермаков А.В., Ахмедзянов В.Р.** Аномальный тепловой поток и природа желобов в северной части Свальбардской плиты // Докл. РАН. 2009. Т. 424, № 2. С. 318–323.
9. **Рову Ролікар.** Введение в вейвлет-преобразование. Пер. Грибунин В.Г. СПб.: АВТЭКС, www.autex.spb.ru

Ахмедзянов Виталий Раульевич
к.г.-м.н., с.н.с. Геологического института РАН

Хуторской Михаил Давыдович,
д.г.-м.н., профессор, зав. лабораторией тепломассопереноса Геологического института РАН

☎ 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 7
тел.: +7 (495) 953-18-19, факс: +7 (495) 951-0443
e-mail: ahvit@yandex.ru

УДК 551.463

ТЕРМИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ВОДНОЙ ТОЛЩИ ЗАПАДНО-АРКТИЧЕСКОГО БАСЕЙНА КАК КЛИМАТООБРАЗУЮЩИЙ ФАКТОР

Е.А. Сухих

Геологический институт РАН

В работе, на основе данных, полученных в 25–28 рейсах НИС «Академик Николай Страхов», а также литературных данных, исследуется термическое состояние водной толщи различных участков акватории Северного Ледовитого океана. Описываются пространственные особенности температурного распределения, сезонная и межгодовая изменчивость теплосодержания океана. Современные изменения климата полярных районов рассматриваются в свете происходящих в океане термохалинных процессов.

Ключевые слова: термохалинная стратификация, климатическая система, перенос тепла, изменчивость, Северный Ледовитый океан.

В настоящее время значительные усилия направлены на изучение состояния климатической системы, как на современном этапе ее развития, так и в более древние эпохи. Наибольший интерес связан с механизмами, вызывающими переход системы из одного устойчивого состояния в другое, а также ее чувствительность к различным внешним воздействиям, ведущим за собой изменениям каких-либо составляющих планетарного теплового баланса.

Амплитуды температурных колебаний максимальны для высоких широт, таким образом, состояние различных компонент арктической климатической системы может служить индикатором современных глобальных изменений климата. Поскольку океан является основным аккумулятором и переносчиком тепла на поверхности планеты, то в качестве показателей состояния климатической системы и динамики ее изменений мы будем использовать температурные и соленостные характеристики водных масс Северного Ледовитого океана (СЛО).

Еще в работах Книповича [4] и Нансена [6], выполненных в начале XX столетия, в качестве характерной черты стратификации Западно-Арктического

OCEANIC THERMAL STRUCTURE IN THE WESTERN ARCTIC OCEAN AND ITS IMPACT ON THE CLIMATE VARIABILITY

Е.А. СУНИН

According to the data obtained during the 25–28 cruises of RV «Akademic Nikolaj Strakhov» and published data the oceanic thermal structure in the different parts of the Arctic Ocean is examined. Spatial features of temperature distribution, and also seasonal and interannual heat content variability in the water column are described. Recent climate changes in the high latitude areas are considered in light of the current oceanic thermohaline processes.

KEYWORDS: thermohaline stratification, climate system, heat transport, variability, Arctic Ocean.

бассейна описывался температурный максимум в промежуточном горизонте, который соответствует ядру атлантической водной массы (АВМ). Действительно, АВМ является основным источником тепла для арктических районов, географическое положение которых обуславливает пониженное поступление солнечной радиации к поверхности СЛО.

Тепловой импульс распространяется вместе с АВМ, которая образует вдольсклоновое циклоническое течение внутри Арктического бассейна и его глубоководных котловин [7, 9]. По мере продвижения мощность импульса затухает, однако ядро АВМ прослеживается также и в Канадской котловине по температурному максимуму на фоне вмещающих водных масс [5].

АВМ поступает в Арктический бассейн двумя путями: через пролив Фрама в составе Западно-Шпицбергенского течения (ветвь пролива Фрама) и через Баренцево море (Баренцевоморская ветвь). Севернее архипелага Северная Земля ветви встречаются вновь, и, несмотря на единый генезис, их ТS-характеристики в значительной степени отличаются [8, 9]. Это обусловлено разными условиями трансформа-

ции АВМ. Западно-Шпицбергенское течение, следуя вдоль континентального склона, т.е. над довольно значительными глубинами, поступает в Арктический бассейн севернее архипелага Шпицберген, где от взаимодействия с атмосферой и быстрого выхолаживания защищается ледовым покровом. Таким образом, термохалинные характеристики АВМ ветви пролива Фрама (FSBW, Fram Strait brunch water) меняются лишь незначительно. Напротив, АВМ Баренцевоморской ветви (BSBW, Barents Sea Brunch Water) подвергается жесткой трансформации на мелководной шельфовой акватории. ТС-характеристики BSBW обладают высокой межгодовой изменчивостью и зависят от начальных свойств материнской водной массы, интенсивности выхолаживания водной толщи при взаимодействии с атмосферой, площади ледового покрова. Соответственно, при взаимодействии модифицированных ветвей, свойства BSBW влияют на термохалинные характеристики FSBW и могут либо усилить тепловой импульс, перемещающийся вглубь Арктического бассейна в составе FSBW, либо, наоборот, подавить его [3].

Температурная стратификация Баренцевоморского бассейна рассматривается в работе на примере данных, полученных в ходе геотермических измерений в 25–28 рейсах НИС «Академик Николай Страхов», проводившихся на акватории архипелага Шпицберген, а также в южной части Баренцева моря в различные сезоны в период с 2007 по 2011 гг.

Температурные кривые 26 и 27 рейсов, характеризующие термическое состояние водной толщи от поверхности до дна, описывают ее стратификацию над континентальным склоном в проливе Фрама. Профили и трехмерные модели, построенные по данным измерений 25 рейса, отражают термическое состояние водной толщи в трогах Орла и Франц-Виктория. Таким образом, существует возможность описать ТС-характеристики и их изменчивость для FSBW на различных этапах ее следования.

Важной особенностью, выявленной в ходе сравнения температурных кривых для станций, имеющих приблизительно одинаковые географические координаты, выполненных на полигоне «трог Орла» в сентябре 2007 и 2011 гг., является сильная положительная температурная аномалия в промежуточном слое, т.е. в слое распространения АВМ, соответствующая измерениям 2007 г.

Привлеченные литературные данные указывают на то, что этот мощный тепловой импульс атлантического генезиса регистрировался в проливе Фрама в 2006 г. [10]. Подобные события обладают периодичностью, однако импульс 2006 года носит выдающийся характер. С подобным событием начала 1990-х годов связан минимум площади морского льда 2007 г. [5]. По данным последних исследований, термохалинные характеристики АВМ, поступающей в Арктический бассейн, в значительной мере снизились [7].

Район исследований 28 рейса – южная часть Баренцева моря, что позволяет рассматривать свойства BSBW на момент исследований (сентябрь 2011 г.). На температурных кривых, а также на трехмерной модели отчетливо выделяются холодные плотные воды (cold deep water, CDW), являющиеся важной особенностью стратификации Баренцева моря. CDW формируются в результате осенне-зимней конвекции над баренцевоморскими банками и, как следует из результатов работы, оказывают охлаждающее воздействие на поступающую с запада BSBW, то есть данный фактор также способен оказывать воздействие на термохалинные характеристики атлантического импульса, распространяющегося внутри Арктического бассейна. Стоит отметить, что интенсивность формирования CDW обладает значительной межгодовой изменчивостью [2].

Одна из компонент теплового баланса океана – глубинный тепловой поток Земли, поступающий от поверхности дна в придонные горизонты. Относительно величины потока, поступающего с солнечной радиацией к поверхности океана, который составляет ~ 200 Вт/м², вклад геотермического нагрева весьма не велик: 50–100 мВт/м² [1]. Однако, несмотря на относительно незначительность вклада, данный фактор может играть важную роль в формировании резких изменений климата, т.е. при переходе климатической системы из одного состояния в другое. В докладе будут рассмотрены характеристики и роль донного теплового потока при современной стратификации водной толщи Атлантики и при стратификации во времена последнего ледникового максимума.

ЛИТЕРАТУРА

1. ADKINS J.F., INGERSOLL A.P., PASQUERO C. Rapid climate change and conditional instability of the glacial deep ocean from the thermobaric effect and geothermal heating. // *Quaternary Sci. Rev.* 2005. V. 24. P. 581–594.
2. ARTHUN M., INGVALDSEN R.B., SMEDSRUD L.H., SCHRUM C. Dense water formation and circulation in the Barents Sea // *Deep-Sea Research I*, 2011. V. 58. P. 801–817.
3. GERDES R., KARCHER M.J., KAUKER F., SCHAUER U. Causes and development of repeated Arctic Ocean warming events // *Geophysical Research Letters*. 2003. Vol. 30, N 19. doi:10.1029/2003GL018080.
4. KNIPOWITSCH N. Hydrologische Untersuchungen im Europäischen Eismeer. // *Annalen der Hydrographie und Maritimen Meteorologie*, 33, 1905. P. 241–260.
5. MCLAUGHLIN, F.A., CARMACK E.C., WILLIAMS W.J., ZIMMERMANN S., SHIMADA K., ИТОН M. Joint effects of boundary currents and thermohaline intrusions on the warming of Atlantic water in the Canada Basin, 1993–2007 // *J. Geophys. Res.*, 2009. V. 114, C00A12, doi:10.1029/2008JC005001.

6. **NANSEN F.** Oceanography of the North Polar Basin // The Norwegian North Polar Expedition 1893–1896. Scientific Results. 1902. (9), 427 pp.
7. **RUDELS B.** Arctic Ocean circulation and variability – advection and external forcing encounter constraints and local processes // *Ocean Sci.* 2012. Vol. 8, P. 261–286.
8. **RUDELS B., JONES E.P., SCHAUER U., ERICSSON P.** Atlantic sources of the Arctic Ocean surface and halocline waters // *Polar Research*, Vol. 23, 2, 2004. P. 181–208.
9. **WOODGATE R.A., AAGAARD K., MUENCH R.D., GUNN J., BJORK G., RUDELS B., ROACH A.T., U. SCHAUER.** The Arctic Ocean boundary current along the Eurasian slope and the adjacent Lomonosov Ridge: Water mass properties, transports and transformations from moored instruments // *Deep-Sea Res.* Vol. 48, 2001. P. 1757–1792.
10. <http://www.iopan.gda.pl/hydrodynamics/po/cruises.html> – Institute of Oceanology Polish Academy of Sciences. Cruise Reports R/V «Oceania», AREX 2010, 2011.

Сухих Елена Александровна,
м.н.с. Геологического института РАН

☎ 119017, г. Москва, Пыжевский пер, д. 7
тел.: +7 (495) 953-18-19, факс: +7 (495) 951-0443,
e-mail: sukhikh_ea@mail.ru

УДК 551.463

ГЕОТЕРМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ БАРЕНЦЕВО-КАРСКОЙ ПЛИТЫ

А. В. ЕРМАКОВ

Геологический институт РАН

Рассматриваются новые геотермические данные в северной части Баренцево-Карской плиты. Более тридцати измерений плотности теплового потока, получены нами в 25 и 27 рейсах НИС «Академик Николай Страхов» на акватории между архипелагами Шпицберген и Земля Франца-Иосифа. Вместе с некоторыми известными геохимическими и вулканологическими данными а также с измерениями теплового потока в скважинах полученные данные дают представление о геотермических условиях коры рассматриваемого региона.

Ключевые слова: тепловой поток, Баренцево море, Шпицберген, Земля Франца-Иосифа.

Геотермические исследования в акватории Баренцева моря ведутся с 1976 г., когда впервые были выполнены станции изучения плотности теплового потока (ТП) по субмеридиональному профилю Мурманск – Земля Франца-Иосифа. По оценке авторов, кондиционные измерения были получены ими лишь в северной части профиля; значения ТП составили, в среднем, 54 мВт/м^2 [8].

В геотермическом отношении наиболее изученной до недавнего времени была южная часть Баренцево-Карской плиты, где такие исследования проводились как в скважинах на акватории, так и в осадках. Акватория центральной и северной частей плиты были в геотермическом отношении почти не изучена из-за относительно небольших глубин моря и интенсивной деятельности течений, и сложной ледовой обстановки, соответственно. Имевшиеся в северной части плиты измерения ТП были выполнены в скважинах на островах архипелагов Земля Франца-Иосифа и Шпицберген. В результате экспедиционных работ Лаборатории теплопереноса Геологического института РАН в 2007–2011 гг. на НИС «Академик Николай Страхов» в этой части плиты было дополнительно получено более 30 новых измерений ТП (рис. 1).

В тектоническом отношении северная часть Баренцево-Карской плиты неоднородна; здесь выде-

HEAT FLOW AT NORTHERN PART OF BARENTS-KARA PLATE

A. V. ERMAKOV

We discuss a new marine heat flow data at the northern part of Barents-Kara Plate. More than 30 measurements of heat flow density are prepared in 25 and 27 cruises of R/V Akademik Nikolaj Strakhov in region between Svalbard and Frants-Josef Land archipelagoes. Coupled with some geochemical and volcanological facts and terrestrial heat flow measurements our data give us an understanding of thermal conditions in crust of the region.

KEYWORDS: heat flow, Barents sea, Svalbard, Frants-Josef Land.

ляется система поднятий (архипелаги Шпицберген, Земля Франца-Иосифа, Северная Земля острова Белый и Виктории) и разделяющих их депрессий субмеридионального простирания (желоба Орла, Франца-Виктории, св. Анны, Воронина), а также ряд трогов меньшего порядка (Бок-фьорд, Вуд-фьорд, Хинлоппен, пролив Британский Канал). Структуры желобов и трогов часто описываются как рифты или грабены, при этом разными исследователями в систему таких грабенов включаются те или иные депрессии, в зависимости от их постулируемой взаимосвязи с другими структурами [1, 2, 9, 10, 11]. Ряд признаков, таких как вулканическая активность, повышенные концентрации углеводородных газов и гелия в донных осадках, снижение мощности гранитного слоя коры, активная тектоника, по-видимому, указывают на характерный для рифтогенеза комплекс явлений (подъем астеносферы, тектоно-магматическая активизация, повышение плотности теплового потока (ТП), образование углеводородов). Распределение плотности ТП, очевидно, должно отражать эти структурные особенности строения северной части плиты.

Действительно, повышенный ТП характерен для структур депрессий, а поднятия отличаются более спокойными, «фоновыми» значениями. Для архипелага Земля Франца-Иосифа имеется три значения в

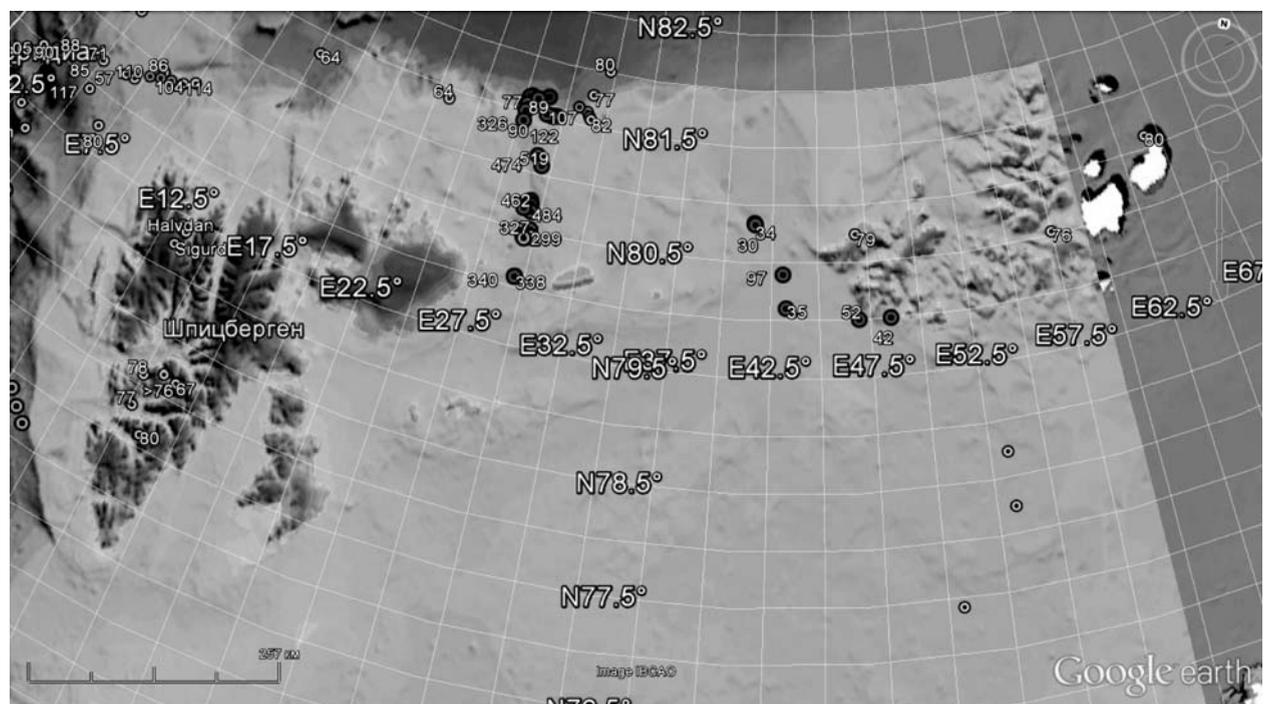


Рис. 1.

Станции измерения теплового потока и скважины в северной части Баренцево-Карской плиты. Значения плотности ТП в мВт/м² вынесены у меток

79, 76 и 80 мВт/м², полученных в глубоких параметрических скважинах Нагурская, Хейса и Северная [13]. На Шпицбергене, по данным тех же авторов, значения ТП получены в скважинах Грумандская, Вассаленская (78,4 и 76,8 мВт/м²). Другие исследователи приводят сходные значения. Для скважины Янссонхауген получено значение ТП 67 мВт/м² [16]. Оценку значения ТП в >76 мВт/м² для района Адвент-фьорда (Лонгбир) также можно получить по результатам термометрии скважины Dh4 [15] и средним теплопроводностям сланцев и песчаников по скважине Dh1 [18].

Морские измерения ТП известны для континентального склона и его подножия [17, 19] и демонстрируют тенденцию к уменьшению значений по направлению к абиссали от 109 до 64 мВт/м². Первые измерения ТП непосредственно на шельфе, в структурах трогов Орла и Франц-Виктории принесли неожиданные результаты. В трого Орла, значения ТП достигали аномальных 519 мВт/м², в трого Франц-Виктории максимальное полученное значение – 97 мВт/м² [5, 6, 12]. Стоит отметить, что трог Франц-Виктории является одним из основных путей поступления атлантических вод в акваторию Баренцева моря, и отличается сложностью гидрологических условий, поэтому для некоторых станций полученные значения ТП могут отражать значительное влияние экзогенного фактора. В то же время, измерения в трого Орла с разницей в 3 года

показали, что полученные высокие значения ТП являются стабильными. Отсутствие значимой корреляции значений ТП с глубиной, позволяет считать полученные результаты отражающими глубинную составляющую теплового потока.

Кроме того, ряд зафиксированных геохимических аномалий и проявлений магматизма косвенно свидетельствуют о более высоком ТП в депрессиях. В центральной части девонского грабена Шпицбергена по линии простирания фьордов Бокк-фьорда и Вуд-фьорда описаны вулканические постройки Сигурд, Сверре, жерловый нект Халвдан, возраст которых определен как четвертичный, термальные источники Троль и Йотун [4]. А в пробах донных осадков желобов Франц-Виктории и Св. Анны а также внутренних проливов архипелага Земля Франца-Иосифа (ЗФИ) отмечено повышенное содержание углеводородных газов, а также гелия [7, 14].

Еще одним явлением, которое могло бы привести к увеличению ТП, можно считать существенное сокращение мощности коры в желобах Франц-Виктории и Св. Анны; по сравнению с поднятиями Земли Франца-Иосифа, Северной Земли и островов Ушакова и Визе [3].

Таким образом, особенности формирования геотермических условий в северной части Баренцево-Карской плиты можно считать следствием рифтогенной деятельности в этом районе.

ЛИТЕРАТУРА

1. БОГДАНОВ Н.А. Тектоника Арктического океана // Геотектоника. 2004. № 3. С. 13–30.
2. ВЕРБА М.А. Современное билатеральное растяжение земной коры в Баренцево-Карском регионе и его роль при оценке перспектив нефтегазоносности. // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2007. Т 2. <http://www.ngtr.ru/gub/4/026.pdf>.
3. ГРАМБЕРГ И.С., ВОЛК В.Э., ЗАРХИДЗЕ В.С., КУЛАКОВ Ю.Н., ШКОЛА И.В., ЯШИН Д.С. Геологическое строение Арктической континентальной окраины СССР // Геология Арктики. 27-й международный геологический конгресс. Т. 4. М.: Наука, 1984. 168 с.
4. ЕВДОКИМОВ А.Н. Вулканы Шпицбергена. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2000. 123 с.
5. ЗАЙОНЧЕК А.В., СОКОЛОВ С.Ю., МАЗАРОВИЧ А.О., ЕРМАКОВ А.В., РАЗУМОВСКИЙ А.А., АХМЕДЗЯНОВ В.Р., БАРАНЦЕВ А.А., ЖУРАВКО Н.С., МОРОЗ Е.А., СУХИХ Е.А., ФЕДОРОВ М.М., ЯМПОЛЬСКИЙ К.П. Строение зоны перехода от хребта Хогвард к плато Шпицберген (по данным 27-го рейса НИС «Академик Николай Страхов» // Докл. РАН. 2011. Т. 439. № 4. С. 514–519.
6. ЗАЙОНЧЕК А.В., МАЗАРОВИЧ А.О., ЛАВРУШИН В.Ю., СОКОЛОВ С.Ю., ХУТОРСКОЙ М.Д., АБРАМОВА А.С., АЛИУЛОВ Р.Х., АХМЕДЗЯНОВ В.Р., ЗАРАЙСКАЯ Ю.А., ЕРМАКОВ А.В., ЕФИМОВ В.Н., МОРОЗ Е.А., ПЕЙВЕ А.А., ПРОХОРОВ Д.А., РАДИОНОВА Э.П., РАЗНИЦЫН Ю.Н., РАЗУМОВСКИЙ А.А., ЧЕРНЫХ А.А., ЯМПОЛЬСКИЙ К.П. Геолого-геофизические работы 25 рейса НИС «Академик Николай Страхов» на севере Баренцева моря и на континентальном склоне Северного Ледовитого океана // Докл. РАН. 2009. Т. 427. № 1. С. 67–72.
7. КЛУБОВ Б.А., РОГОЗИНА Е.А., ШКАТОВ Е.П. Геохимические признаки нефтегазоносности акваториальной части архипелага Земля Франца-Иосифа // Геология нефти и газа. 1999. № 5–6. С. 46–50.
8. МЕРКУШЕВ В.Н., ПОДГОРНЫХ Л.В., СМЕРНОВ Я.Б., ТРОЦЮК В.Я. Северный Ледовитый океан // Методические и экспериментальные основы геотермии. М.: Наука, 1983. 230 с.
9. МУСАТОВ Е.Е., МУСАТОВ Ю.Е. К проблеме происхождения фиордов (на примере Западной Арктики) // Бюл. МОИП. Отд. геол. 1992. Т. 67. Вып. 3. С. 28–33.
10. ПОГРЕБИЦКИЙ Ю.Е. Переходные зоны «материк-океан» в геодинамической системе Северного Ледовитого океана // 27-й международный геологический конгресс. Т. 7. Секция С. 07. Тектоника. М.: Наука, 1984. 193 с.
11. СЕНИН Б.В., ШИПИЛОВ Э.В. Рифтовые системы, их роль в формировании геологической структуры Арктики // Геодинамика и нефтегазоносность Арктики. М.: Недра, 1993. 323 с.
12. ХУТОРСКОЙ М.Д., ЛЕОНОВ Ю.Г., ЕРМАКОВ А.В., АХМЕДЗЯНОВ В.Р. Аномальный тепловой поток и природа желобов в северной части Свальбардской плиты. Докл. РАН. 2009. Т. 424. № 2. С. 227–233.
13. ЦЫБУЛЯ Л.А., ЛЕВАШКЕВИЧ В.Г. Тепловое поле Баренцевоморского региона. Апатиты, 1992. 114 с.
14. ШКАТОВ Е.П., СТАРК А.Г., КАЧУРИНА Н.В., БЕЗРУКОВ В.М., ВИНОКУРОВ И.Ю. К вопросу о перспективах нефтегазоносности северных областей Баренцево-Карского шельфа (желоб Франц-Виктория) // Геология нефти и газа. 2001. № 4.
15. ELVEBAKK H. Results of borehole logging in well LYB CO2, Dh4 of 2009, Longyearbyen, Svalbard // NGU Report 2010.018. Trondheim, 2010. 35 p.
16. ISAKSEN K., MÜHLL D., GUBLER H., KOHL T., SOLLID J. Ground surface-temperature reconstruction based on data from a deep borehole in permafrost at Janssonhaugen, Svalbard // Annals of Glaciology. 2000. Vol. 31, № 1. P. 287–29.
17. OKAY N., CRANE K. Thermal rejuvenation of the Yermak Plateau // Mar. Geophys. Res. 1992. Vol. 15. №4. P. 243–263.
18. PASCAL C., BALLING N., BARRERE C., DAVIDSEN B., EBBING J., ELVEBAKK H., MESLI M., ROBERTS D., SLAGSTAD T., WILLEMOES-WISSING B. HeatBar Final Report 2010. Basement heat generation and heat flow in the western Barents Sea - Importance for hydrocarbon systems // NGU Report 2010.030. Trondheim, 2010. 91 p.
19. SUNDVOR E., GIDSKEHANG A., MYHRE A.M. ELDHOLM O. Marine geophysical survey on the Northern Svalbard Margin. Univ. Bergen Seismol. Observ. Sci. Rep. 1978. 5. 46 pp.

Александр Валерьевич Ермаков,
н.с. Геологического института РАН,

☎ 119017, г. Москва, Пыжевский пер, д. 7,
e-mail: a.v.ermakov@gmail.com

УДК 551.463

ГИДРОТЕРМЫ ЧУКОТКИ

Б. Г. Поляк, В. Ю. Лаврушин,
А. Л. Чешко

Геологический институт РАН

Выявлены черты термальных источников, разгружающихся в центре Чукотского полуострова. Газы, выделяющиеся в источниках, обогащены CO_2 , мантийным гелием, ^{40}Ar и неатмосферным азотом $\delta^{15}\text{N} > 0$, тогда как воды источников резко обеднены D и ^{18}O и дают максимальные оценки температур в геотермальных резервуарах гидрохимическими геотермометрами. Взятые вместе, все эти особенности указывают на генетическую связь этих флюидов с тепломагассопотоком из мантии.

Ключевые слова: Чукотский полуостров, термальные источники, вечная мерзлота.

Чукотский полуостров отличается сочетанием двух контрастных геотермических особенностей: (1) повсеместным развитием толщи многолетнемерзлых пород, естественным в регионе с отрицательными среднегодовыми температурами дневной поверхности, и (2) присутствием термоминеральных источников, в самых горячих из которых температура вод на выходе достигает 97°C . Разгружающиеся круглогодично, все такие источники выносят внутриземное тепло, дополняя фоновые кондуктивные теплопотери, и поэтому в геофизическом смысле являются термальными. В зимнее время они формируют широко распространенные в арктических и субарктических районах наледи, обычно приписываемые в речных долинах разгрузке подрусловых потоков грунтовых вод.

Известные с XVIII века, некоторые из этих источников исследовались Российской Академией наук еще в 1909–1910 гг., Арктическим институтом Главсевморпути в 1930-х, курортологами МинЗдрава СССР в 1950-х, геологами-съемщиками и гидрогеологами МинГео в 1950–1980-х, а уже в XXI веке – специалистами ФГУП «ГЕОРЕГИОН» (г. Анадырь).

Местоположение термальных источников и особенности состава разгружающихся в них флюидов отражают региональные особенности строения и эволюции геологических структур. Воды этих источников, в том числе с температурой немногим выше 0°C , как правило, содержат заметные количества раство-

THERMAL SPRINGS
IN THE CHUKOTKA PENINSULAB. G. POLYAK, V. YU. LAVRUSHIN,
A. L. CHESHKO

Features of thermal springs discharged in the center of the Chukotka Peninsula were revealed. Gases issued from the springs are enriched in CO_2 , mantle helium, ^{40}Ar and non-atmospheric nitrogen with $\delta^{15}\text{N} > 0$, whereas spring waters are sharply depleted in D and ^{18}O and give highest evaluations reservoir temperatures by solute geothermometers. Coupled together, all of these peculiarities indicate genetic relationship of these fluids with heat mass transfer from the mantle.

KEYWORDS: Chukchi Peninsula, permafrost, thermal springs.

ренных солей, а состав газов, выделяющихся из этих вод, отличается от воздушного. Выявление в этих флюидах глубинных компонентов было задачей исследований сотрудников Лаборатории тепломагассопереноса ГИН РАН. (результаты этих исследований частично опубликованы в [5–8] и др. С этой целью использовались образцы, взятые в 17 группах источников нами и еще в 16 – сотрудниками ФГУП «ГЕОРЕГИОН» под руководством А. Д. Киевского и О. В. Ладного, любезно предоставивших их нам для изучения. Общий и изотопный состав флюидов определялся в ГИН РАН, а также в лабораториях ГИ КНЦ РАН (Апатиты), ФГУП «Всегеи» (Санкт-Петербург) и Национального Института геофизики и вулканологии Италии (INGV, Палермо, Италия). Местоположение пунктов опробования показано на рис. 1.

Величина минерализации вод источников, в основном, хлоридно-натриевой, варьирует от 50–80 мг/л до ~20 г/л, а местами достигает 36–37 г/л, что больше, чем в морях, омывающих полуостров. Она не коррелирует с температурой вод источников (варьирующей от $\sim 2^\circ\text{C}$ до 97°C), причем оба параметра не обнаруживают и никакой пространственной упорядоченности. В составе свободно выделяющихся газов в большинстве случаев преобладает N_2 ; его концентрация в 22 группах источников больше 50% об., причем в 16 – больше 90% об. Остальная часть газовой фазы представлена, главным образом, CO_2 . Содержание последней на-

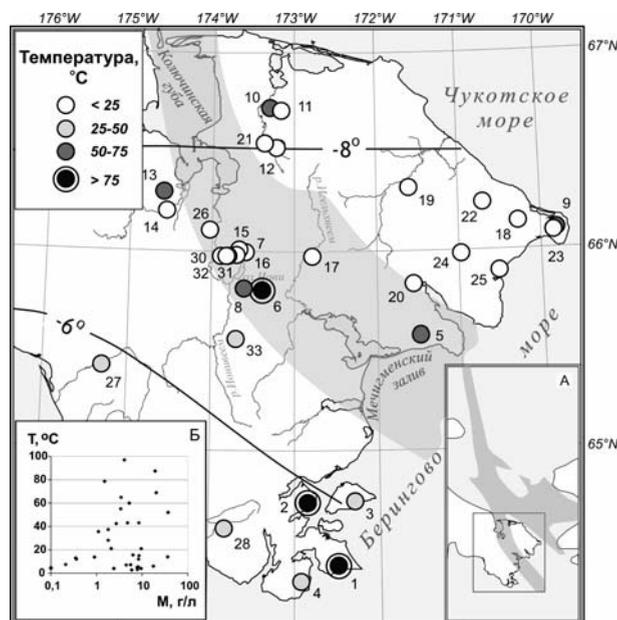


Рис. 1.

Размещение тер-мальных источников на Чукотском полуострове. Цифры – номера групп, затушевана Колючинско-Мечигменская де-прессия (согласно [3]). На врезке А показана Чукотско-Берингово-морская система новей-ших грабен-рифтов (по [1]), на врезке Б – соотношение тем-пературы и минерализации вод источников

много увеличивается в секущей полуостровов Колючинско-Мечигменской депрессии (КМД), достигая в ее центре близ оз. Иони максимума в источниках Бабушкины Очки (95% об.). Эта CO_2 по изотопному составу углерода ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ от -5.3‰ до -8.7‰) близка к вулканической ($-2 - -6\text{‰}$), тогда как в азотных термах она намного легче и ближе к образующейся при окислении органического вещества.

Во всех источниках заметна примесь мантийного гелия, составляющая от 2,2% до 14% общего количества He в газе. Остальное – радиогенный гелий, образующийся в коре. Различия величин R в разных группах отражают латеральную изменчивость изотопного состава гелия в газах источников. Наибольшая примесь мантийного He отличает газы КМД. He-Sr изотопная систематика продуктов вулканической и гидротермальной активности в Италии, Индонезии, Андах и других районах мира показала, что оба элемента поставляются в кору магматическими расплавами [4].

Мантийному гелию в углекислых газах чукотских терм сопутствует радиогенный аргон, образующийся в коре из ^{40}K , и избыточный (неатмогенный) азот, который изотопно тяжелее воздушного ($\delta^{15}\text{N} > 0$), тогда как в азотных термах содержатся только атмосферные Ar и N_2 . Значения $\delta^{15}\text{N}$ в чукотских газах положитель-

но коррелируют с концентрацией CO_2 . Это отражает общий генезис углекислоты и избыточного азота, обогащенных тяжелыми изотопами ^{13}C и ^{15}N , и подчеркивает специфику современных глубинных процессов в Колючинско-Мечигменской депрессии.

Оценки температуры в гидротермальных резервуарах с помощью гидрохимических геотермометров выявили их региональные различия: на юге полуострова расчетные температуры заметно ниже по сравнению с КМД.

Воды чукотских источников резко отличаются от морских по изотопному составу водорода и кислорода [5, 7]. Воды, максимально обедненные тяжелыми изотопами D и ^{18}O , отличают углекислые источники, разгружающиеся близ оз. Иони в центре КМД. Наиболее вероятная причина обогащения этих вод легкими изотопами кислорода и водорода – таяние подземных льдов, в которых δD и $\delta^{18}\text{O}$ уменьшаются на Чукотке местами до -223‰ и -29.2‰ , соответственно [2].

Выявленные особенности Чукотских гидротерм согласованно объясняются одной причиной – восходящим тепломассопотоком из недр в пределах Колючинско-Мечигменской депрессии. Маркированный примесью мантийного гелия, такой локализованный адвективный тепломассопоток привносит из мантии в кору дополнительную тепловую энергию. Он повышает температуру недр и стимулирует, с одной стороны, метаморфизм пород коры, который приводит к выделению из них изотопно тяжелых углекислоты и азота и высвобождению образующегося в них радиогенного аргона, а с другой – таяние подземных льдов, усугубляя современную деградацию вечной мерзлоты.

Гидротермы Чукотки представляют собой потенциальную базу для освоения геотермальных ресурсов, как теплоэнергетического, что особенно важно в арктическом климате полуострова, так и рекреационно-бальнеологического. Их использование возможно не только в КМД, где выявлены признаки разгрузки тепломассопотока из глубоких недр и изливаются самые горячие Мечигменские (Хельмымлевские, или Гильмимлинские) источники с температурой на выходе до 97°C (точка 6 на рис. 1), но и за ее пределами, где местами с этой целью уже велись разведочные буровые работы. Это Чаплинские источники (т. 1) с температурой 88°C , Дежневские (т. 9, 69°C) и Кукуньские (т. 5, 69°C). Перспективны также Сенявинские источники (т. 2, 78°C). Последние, однако, как и соседние Чаплинские, а также Мечигменские, расположены вдали от населенных пунктов, так что целесообразность их освоения требует соответствующего технико-экономического обоснования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Астахов А.С., Босин А.А., Колесник А.Н. и др. Геологические исследования в Чукотском море и примыкающих районах Северного Ледовитого оке-

- ана в экспедициях RUSALCA-2009 // Тихоок. геол. 2010. Т. 29. № 6. С. 110–116.
2. **Васильчук Ю.К., Котляков В.М.** Основы изотопной геокриологии и гляциологии. М.: МГУ, 2000. 614 с.
 3. **Жуланова И.Л.** Земная кора Северо-Востока Азии в докембрии и фанерозое. М.: Наука, 1990. 302 с.
 4. **Поляк Б.Г.** Природа массопотока из мантии в свете геотермических и изотопно-гелиевых данных // М-лы Всероссийского симпозиума «Флюидные потоки в земной коре и мантии» (26–28 февраля 2002 г., Москва, ИГЕМ). М.: ИГЕМ, 2002. С. 32–37.
 5. **Поляк Б.Г., Дубинина Е.О., Лаврушин В.Ю., Чешко А.Л.** Изотопный состав воды гидротерм Чукотки // Литология и полезн. ископ. 2008. № 5. С. 480–504.
 6. **Поляк Б.Г., Лаврушин В.Ю., Чешко А.Л., Прасолов Э.М., Каменский И.Л.** Новейшая тектоно-магматическая активизация Колючинско-Мечигменской зоны Чукотского полуострова (по данным о составе газов гидротерм) // Геотектоника. 2010. № 6. С. 102–114.
 7. **Чешко А.Л., Дубинина Е.О., Вакин Е.А., Лаврушин В.Ю., Поляк Б.Г.** Первые данные об изотопном составе водорода и кислорода в термоминеральных водах Восточной Чукотки // Докл. РАН. 2004. Т. 395. № 5. С. 676–680.
 8. **Polyak B.G., Prasolov E.M., Lavrushin V.Yu., Chesko A.L., Kamenskii I.L.** He, Ar, S and N isotopes in thermal springs of the Chukchi Peninsula: geochemical evidence of the recent rifting in the NE Asia // Chem. Geology. 2013. Vol. 339. P. 127–140.

Поляк Борис Григорьевич

д.г.-м.н., г.н.с. Геологического института РАН

☎ тел.: +7 (495) 959-34-89, e-mail: polyak@ginras.ru

Лаврушин Василий Юрьевич,

д.г.-м.н., в.н.с. Геологического института РАН

Чешко Андрей Львович,

к.г.-м.н., с.н.с. Геологического института РАН

☎ 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 7

УДК 551.463

ГЕОЛОГО-ГЕОТЕРМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СОЗДАНИЯ КРУПНЫХ ГЕОТЭС НА ТЕРРИТОРИИ ЧЕЧЕНСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

А.А. АБДРАХМАНОВ¹,
В.А. ВАСИЛЬЕВ², Р.М. АЛИЕВ³,
Г.Б. БАДАВОВ⁴

¹ООО «ТРАНСЭНЕРГОПРОМ»,

²ОАО «ЭНИН»,

³ОАО «ГЕОТЕРМНЕФТЕГАЗ»,

⁴ООО «КАСПИЙЭКОСЕРВИС»

Показано, что в трещинных коллекторах известняков сосредоточены значительные запасы геотермальных вод с температурой 150–180° С, которые представляют большой практический интерес для создания ГеоТЭС на базе мощных высокопроизводительных ПЭС. Данный факт в сочетании с наличием около 100 готовых скважин на выработанных нефтяных месторождениях (Эльдарово, Старогрозненское, Октябрьское, Брагуны, Гудермес и др.) позволяет создать несколько крупных ГеоТЭС общей мощностью 300 МВт.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Чеченская Республика, выработанные нефтяные и газовые месторождения, трещинный коллектор, геологические изыскания, геотермальные ресурсы, подземная циркуляционная система, бинарные геотермальные электростанции.

Постановлением Правительства РФ «О квалификации генерирующего объекта, функционирующего на основе использования ВИЭ» от 3 июня 2008 г. № 426 заданы целевые показатели объема производства и потребления электрической энергии с использованием возобновляемых источников энергии.

В настоящее время в мире работают геотермальные электростанции, базирующиеся в основном на паровых и пароводяных месторождениях и в вулканических районах. В России это Камчатка и Курильские острова. В США имеется несколько небольших ГеоТЭС, использующих горячие термальные воды, поступающие самоизливом (фонтанный способ эксплуатации) по скважинам из подземных пластов. Однако фонтанная эксплуатация приводит к быстрому истощению запасов месторождения, имеются также

GEOLOGICAL AND GEOTHERMAL JUSTIFICATION OF CREATION OF LARGE GEOTHERMAL POWER PLANTS IN THE TERRITORY OF THE CHECHEN REPUBLIC

A.A. ABDRAKHMANOV, V.A. VASILYEV,
R.M. ALIYEV, G.B. BADAVOV

It is shown that in the fractured limestone reservoirs with considerable reserves of geothermal water with a temperature of 150–180° C, which are of great practical interest for a Geothermal power plants based on high-power high-performance DSP. This fact, coupled with the presence of about 100 wells in the finished developed oil fields (Eldarov, Starogroznskoe, October, Braguny, Gudermes, and others) allows you to create several large Geothermal power plants with total capacity of 300 MW.

KEYWORDS: the Chechen Republic, the developed oil and gas fields, crack collectors, geological researches, geothermal resources, underground circulating system, binary geothermal power plants.

ограничения по сбросу отработанной высокоминерализованной воды.

Эти недостатки устраняются при использовании впервые предложенной в нашей стране циркуляционной технологии, реализуемой путем создания подземных циркуляционных систем (ПЭС), в которых термальная вода поступает на поверхность по эксплуатационным скважинам и после охлаждения на ГеоТЭС возвращается в пласт. При этом поддерживается постоянный дебит скважин и используется не только тепло самой термальной воды, но и водовмещающих горных пород. Извлекаемые запасы тепла при циркуляционной технологии в 40–50 раз выше, чем при фонтанной эксплуатации [1, 2].

Особенно перспективно применение циркуляционной технологии на месторождениях с карбонат-

ными водовмещающими породами (известняки и доломиты), где можно с помощью дешевых кислотных обработок в 5–6 раз повысить дебит скважин и соответственно сократить затраты на бурение. Объединение циркуляционной технологии с энергоустановками на низкокипящих рабочих телах позволит создать ГеоТЭС, конкурентоспособные с традиционными топливными электростанциями.

В Чеченской Республике в трещинных коллекторах верхнемеловых известняков сосредоточены значительные запасы геотермальных теплоносителей с температурой 150–180° С. Данный факт в сочетании с наличием около 100 готовых скважин на выработанных нефтяных и газовых месторождениях (Эльдарово, Старогрозненское Октябрьское, Брагуны, Гудермес и др.) позволяет создать несколько крупных ГеоТЭС общей мощностью 300 МВт. Термальные воды этих месторождений обладают термодинамическим потенциалом, достаточным для работы энергоустановок с низкокипящими рабочими телами и воздухоохлаждаемыми конденсаторами. Преимуществами таких энергоустановок являются:

- отсутствие потребности в воде для охлаждения конденсатора;
- увеличение выработки энергии при низких температурах воздуха в зимний период.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПЛОЩАДИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ГЕОТЭС

В пределах Чеченской Республики наиболее интересными с точки зрения использования геотермальных вод для выработки электроэнергии путем создания ПЦС, являются зоны тектонического дробления верхнемеловых известняков. В верхнемеловых отложениях встречаются зоны трещиноватых известняков, имеющих локальный характер развития по площади. Практически полная гидродинамическая изолированность, высокая продуктивность и приемистость скважин, возможность регулирования в них пластовых давлений, делают эти зоны очень удобными для создания крупных и экономичных геотехнологических систем извлечения и использования геотермальных ресурсов. Технично-экономические расчеты показывают, что наиболее эффективные ПЦС для выработки электроэнергии могут быть созданы в зонах, где пласты-коллектора имеют значения температур выше 150° С, залегают на глубинах не более 5000 м, при проницаемости не менее 20 мД и эффективных мощностях не менее 50 м. При этом обеспечиваются высокая приемистость нагнетательных скважин при наиболее низких давлениях реинъекции. Верхнемеловые отложения имеют почти повсеместное распространение в пределах Чеченской Республики, характеризуются сравнительной литологической однородностью, представлены известняками с прослоями мергелей и карбонатных глин. Общая мощность этих отложений

А.А. АБРАХМАНОВ, В.А. ВАСИЛЬЕВ,
Р.М. АЛИЕВ, Г.Б. БАДАВОВ
ГЕОЛОГО-ГЕОТЕРМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ
СОЗДАНИЯ КРУПНЫХ ГЕОТЭС
НА ТЕРРИТОРИИ ЧЕЧЕНСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

в пределах изученных месторождений колеблется от 250 до 600 м и более. Ниже приводятся сведения о месторождениях, наиболее приемлемых для создания ГеоТЭС.

Месторождение Брагуны расположено в восточной части Передовых хребтов. Непосредственно на территории месторождения находится селение Толстой-Юрт, а на некотором удалении от западной границы района – станица Горячеисточненская. В пределах площади разведочными скважинами вскрыт разрез от антропогенных до нижнемеловых отложений. Меловые отложения представлены двумя отделами: верхний и нижний. Общая мощность верхнемеловых отложений составляет 380 м.

По геотемпературным условиям Брагунская площадь входит в зону развития высоких температур в подмайкапской теплопроводящей толще. В верхнемеловых отложениях значение температуры колеблется от 160 до 175° С. Температурные исследования проведены во многих скважинах залежи. Значение удельного теплового потенциала меняется от 150 до 180 ГДж/м².

Результаты замеров пластовых давлений и температур систематизированы по данным исследований, проведенных в институте СевКавНИПИнефть и Производственным объединением «Грознефть» (табл. 1).

В настоящее время на месторождении находятся следующие скважины: 46, 65, 52, 91, 82, 34, 63, 40, 59, 49, 86, 41. Скважины 70, 64, 60, 73, 81, 85, 57, 78, 84, 178, 67 используются как нагнетательные, а скважины 83, 61, 55, 35 и 76 – как наблюдательные. Все эти скважины находятся в технически исправном состоянии и их можно использовать в качестве испытательных и эксплуатационных для извлечения геотермальной энергии.

Правобережное месторождение административно входит в состав Грозненского сельского и Наурского районов Чеченской Республики. Месторождение находится в 30–35 км к северу от г. Грозного и располагается на правом и левом берегах р. Терек. Ближайшими населенными пунктами являются станицы Николаевская, Калиновская, пос. Правобережный и село Терское. К югу от рассматриваемого месторождения располагаются месторождения Северо-Минеральное, Хаян-Корт и Брагунское.

Сведения о воде верхнемеловой залежи Правобережной площади получены по скважинам №№ 147, 144, 132, 134, 114, 127, 145, 150 северной антиклинали и по скважинам №№ 135, 139, 115 южной антиклинали.

Ханкальская площадь расположена в 25 км к востоку от города Грозного. В непосредственной близости от площади находится г. Аргун, селения Комсомольское и Мескер-Юрт, далее к востоку – селения Октябрьское, Новая жизнь и Курчалой. Гидрографическая сеть представлена реками Аргун, Басс, Джалка, Хулуулау.

ТАБЛИЦА 1.

Результаты замеров пластовых давлений и температур

№ скв.	Глубина за- мера, Н, м	Пластовое давление, МПа		Забойное давление на глубине замера, МПа	Температура на глубине замера, °С
		на глубине замера	приведенное к отметке – 4600		
Месторождение Брагуны					
48	3500	35,8	44,5	–	150
49	3650	33,0	39,6	–	155
63	4150	39,2	–	–	155
52	4000	–	–	59,6	157
35	4350	69,8	74,8	–	160
43	4480	–	–	35,5	160
76	4500	41,8	–	–	160
59	4500	37,2	–	–	161
55	4600	47,1	38,9	36,8	162
41	4500	37,2	39,3	–	165
40	4250	46,3	48,6	40,3	168
39	4550	71,2	72,9	–	170
8	4900	79,3	–	–	170
46	4400	46,9	48,9	–	170
58	4950	–	–	39,1	170
178	4450	69,4	71,3	–	183
Месторождение Правобережное					
111	4550	7,3	7,6	7,3	170
141	4800	7,5	7,7	–	173
142	4650	7,5	7,9	7,5	174
127	4680	–	–	5,0	175
129	4950	81	8,1	–	175
132	5100	8,1	8,1	–	175
144	5250	7,8	7,6	–	175
139	5400	7,7	7,5	–	178
131	4600	7,6	7,8	–	180
135	5451	8,3	8,1	–	180
147	5400	7,8	7,6	7,8	181
133	5370	–	–	–	188
Месторождение Ханкальское					
3	5250	–	–	64,3	165
1	5300	–	–	78,2	170

В результате бурения поисковой (№ 1) и разведочных скважин (№№ 3, 5, 6, 7) полностью вскрыт разрез кайнозойских отложений и верхнемеловые на глубине 5230–5476 м общей толщиной от 246 м (№ 7) и до 324 м (№ 6). Толща представлена серыми и светло-серыми, крепкими, однородными, с раковистым изломом известняками, с единичными трещинами. Размеры

структуры по изогипсе – 5600 м составляют 25,6×3 км. Углы падения северного и южного крыльев оцениваются примерно в 33° и 42°.

Начальное пластовое давление 78 МПа на отметке – 5100 м, текущее – 63,8 МПа. Режим залежи упруго-водонапорный при замкнутой нефтеводоносной системе. Пористость меняется от 0,026% до 0,5%.

Температура меняется от 165 до 175° С на глубинах 5000–5500 м. Удельные тепловые ресурсы заключены между 153 и 162 ГДж/м².

Эльдаровская площадь входит в состав Надтеречного района и находится в 60 км к северо-западу от г. Грозного. Ближайшими населенными пунктами являются поселок Горагорский и село Нижний Калаус. В орографическом отношении площадь представляет собой возвышенность, которая является ветвью центральной части Терского хребта.

Эльдаровский хребет прослеживается в западном-северо-западном направлении. В 12–18 км севернее района протекает р. Терек. Отложения расчленяются на датский, маастрихский, кампанский, сантонский, коньякский, туронский и сеноманский ярусы. Представлены они трещиноватыми известняками с плотными прослоями мергелей и глин. Суммарная толщина верхнемеловых отложений составляет 300–355 м. Пористость насыщения изменяется от 0,15% до 10,1%, составляя в среднем 2,6%. Проницаемость пласта меняется от 2,2 до 660 мД. Температура пласта составляет 150–165° С на глубинах порядка 3500–4200 м. Удельные тепловые ресурсы – 105–110 ГДж/м².

Октябрьское месторождение приурочено к трещиновато-кавернозному типу коллектора, входит в Октябрьский район г. Грозного и занимает возвышенность Сюир-Корт, отделенную от Грозненского и Сунженского хребтов р. Сунжей.

Октябрьская антиклиналь простирается в юго-восточном направлении далеко за пределы собственно промысловой площади и охватывает возвышенности Сюир-Корт и Сюиль-Корт, долину р. Аргун, а также возвышенность Гойт-Корт.

Все три возвышенности представляют собой остатки когда-то существовавшего горного хребта, расчлененного в последствии руслами горных рек.

По аналогии с другими месторождениями весь разрез верхнемеловых отложений представлен довольно однообразной карбонатной толщей с резкими и мало-мощными прослоями мергелей и глин. Нормальная мощность в скважине № 217–400 м. Пористость насыщения меняется от 0,1 до 1,6%, среднее значение 0,73%. Пористость матрицы 0,39–3,3%, среднее значение 1,02%. Проницаемость пласта меняется от 10 до 2900 мД. Температура пласта составляет 152–163° С на глубинах порядка 4130–4800 м. Удельные тепловые ресурсы 145–155 ГДж/м².

Гудермесское месторождение располагается на территории Гудермесского района в 35 км к востоку от г. Грозного. С северо-запада к рассматриваемой площади примыкает Брагунское месторождение. В орографическом отношении площадь представлена Гудермесским хребтом протяженностью 32 км и шириной 4–4,5 км. Относительные превышения хребта составляют 300–420 м. В восточном направлении хре-

бет постепенно приближается к Черным горам сливаясь с ними у р. Аксай, в западном – снижается.

Верхнемеловые отложения представлены очень плотными известняками. Для них характерно наличие вторичных пустот. Наибольшая вскрытая мощность составляет 519 м (скв. № 184). Общая пористость меняется в пределах 0,3–4,9%, среднее значение 1,69%. Проницаемость меняется от 0,2 до 172 мД. Температура пласта составляет 160–184° С на глубинах 4820–5550 м. Удельные тепловые ресурсы 180–205 ГДж/м².

Старогрозненская площадь приурочена к одноименной антиклинальной складке, южное крыло которой круче северного – углы падения южного крыла достигают 80°, а северного 45°. Нефтяная залежь является гидродинамически единой с верхнемеловой и имеет размеры: длина – 30,7 км, ширина – 3 км, высота – 790 м.

Верхнемеловой коллектор относится к кавернозно-трещинному типу. Температура на глубине вскрытия верхнемеловых отложений составляет 159° С. Проницаемость известняков колеблется от 30 до 1520 мД и в среднем составляет 207 мД.

Комплексное изучение данных описания и анализов кернов, результатов промыслово-геофизических и гидродинамических исследований скважин, позволили установить, что верхнемеловой коллектор аналогичен коллекторам других месторождений Чеченской Республики и относится к кавернозно-трещинному типу. Верхнемеловые отложения на площади вскрыты 37 скважинами. Из них полностью они пройдены 11 скважинами. В среднем мощность верхнемеловых отложений составляет 350 м.

В пределах площади встречены воды всех четырех типов по Сулину В.В. Общие пределы изменения минерализации составляют 80–1200 мг-экв/л. В составе вод отмечается высокое содержание сульфатного и гидрокарбонатного ионов (до 2–3 г/л).

Геотермические условия в меловых отложениях складываются в основном за счет кондуктивной составляющей глубинного теплового потока.

Меловые отложения площади гидродинамически изолированы от соседних площадей. Отсюда следует, что первоначальный режим разработки залежи был замкнуто-упруго-водонапорный. С началом закачки воды в продуктивный пласт, разработка залежи переводится в водонапорный режим с искусственным питанием законтурной зоны.

В настоящее время залежь находится в завершающей стадии разработки – остаточные извлекаемые запасы нефти составляют 0,04% от начальных извлекаемых запасов.

На верхнемеловые отложения Старогрозненского нефтяного месторождения бурилось 35 скважин с целью его разведки, оконтуривания и эксплуатации. Из этого числа 6 скважин были ликвидированы по техни-

ческим причинам, не достигнув проектного горизонта (№№ 640, 650, 664, 680, 683, 687). Еще одна скважина (№ 670) непригодна для включения в систему ПЦС, так как эксплуатация ее ведется с прихваченными бурильными трубами и бурильным инструментом, что исключает производство ремонтных работ на забое скважины и производство работ по интенсификации притоков.

В табл. 2 указаны средние по скважинам параметры месторождения на начальный момент разработки.

Скважина № 648 после ее обводнения, с верхнего мела переведена на фораминиферовые отложения, что является достаточным основанием для исключения ее из технологической схемы ПЦС.

В процессе эксплуатации верхнемеловой залежи без поддержания пластового давления до начала заводнения (1970 г.) пластовое давление было снижено с 728 атм до 480 атм, что вызвало в ряде скважин смятие эксплуатационных колонн. По этой причине выведены из эксплуатации и ликвидированы скважины №№ 659, 666, 667, 673, 674, 675, 690, 693.

ТАБЛИЦА 2.

Средние параметры месторождения на начальный момент разработки

№ п/п	Наименование параметра	Значение
1	Размеры пласта	30,7×3 км
2	Начальная пластовая температура	145° С
3	Начальное пластовое давление	47,9 МПа
4	Начальная плотность флюида	1015 кг/м ³
5	Удельная теплоемкость флюида	4055 Дж/кг·град
6	Коэффициент фильтрации	2,3×10 ⁻⁵ м/с
7	Коэффициент проницаемости	0,51×10 ⁻¹² м ²
8	Пористость пласта (насыщенная)	1,88%
9	Эффективная мощность пласта	273 м
10	Коэффициент динамич. вязкости	220×10 ⁻⁶ Па·С
11	Минерализация рассола (средняя)	15 г/л
12	Плотность водонасыщенного пласта	2519 кг/м ³
13	Теплоемкость водонасыщенного пласта	2,37×10 ⁶ Дж/м ³ ·град
14	Коэффициент теплопроводности	2,4 Вт/м·град
15	То же, перекрывающих и подстилающих пород	2,4 Вт/м·град

Здесь не учитываются скважины, пробуренные на нижнемеловые отложения и которые по мере стягивания к куполу структуры водонефтяного контакта, в результате их полного обводнения, можно переводить на эксплуатацию верхнемеловых отложений.

Таким образом, технически исправными, пригодными для дальнейшей эксплуатации являются скважины: №№ 641, 644, 665, 668, 671, 676, 677, 679, 686, 691, 694, 696, 697, 698.

Использование скважин нефтяного фонда в системе ПЦС ограничивается затратами на их восстановление. К ним относятся затраты на разбуривание цементных мостов, вызов притока, интенсификацию притока, оборудование устьев скважин. Укрупненные сметные расчеты по верхнемеловым скважинам позволили оценить эти затраты в 20–25 млн руб.

Определяющими стоимостными показателями в этих расчетах являются затраты на электроэнергию, капвложения в теплотрассы и реинжекционное оборудование.

Рассмотрение Старогрозненской структуры с набором технически пригодных к эксплуатации скважин позволяет выделить 3 блока скважин и 2 одиночные скважины, гидродинамическая связь между которыми, хотя и существует, но вследствие значительного удаления друг от друга ослаблена повышенными значениями пластовых гидравлических сопротивлений:

1. 676 («а»)
2. 641, 698, 691, 697, 696, 677, 679 («в»)
3. 694, 671 («с»)
4. 686, 665, 644 («д»)
5. 668 («е»)

Это же обстоятельство позволяет ограничиться рассмотрением внутриблочных продвижений температурных фронтов при расчетах сроков службы ПЦС в заданном режиме. Для определения целевого назначения скважин рассмотрим каждый блок.

Скважина 676 находится на расстоянии 2 км от ближайшей к ней скважины № 641. Наиболее целесообразное ее применение исходя из условия более эффективного использования имеющейся в пласте энергии упругих деформаций в качестве эксплуатационной.

В блоке скважин «в» на периклинали расположены скважины №№ 698, 696, 641. Поэтому целесообразно их использование в качестве эксплуатационных.

Скважины №№ 677, 679 имеют абсолютные отметки на 600 м ниже чем №№ 641, 698, 696, их целевое назначение в качестве нагнетательных не вызывает сомнений.

Высотное расположение скважин №№ 691 и 697 допускает их использование в качестве нагнетательных и эксплуатационных. Из них № 697 целесообразно использовать в качестве нагнетательной, т.к. ее работа в этом качестве создает в области между скважинами № 696 и № 679 зону повышенных давлений на созда-

ние и поддержание в стационарном режиме которого необходимы дополнительные затраты энергетических ресурсов.

Общий вид скважины № 697 показан на рис. 1.

Использование скважины № 691 в качестве нагнетательной неприемлемо по той причине, что питание эксплуатационных скважин №№ 641, 698 и 697 будет осуществляться одной этой скважиной с частичной подпиткой скважины № 697 от нагнетательной скважины № 673. Перемена целевого назначения скважины № 641 и использование скважины № 691 в качестве эксплуатационной устраняет это технологическое несоответствие.

Таким образом, в блоке «в» наиболее совершенный вариант использования скважин следующий: №№ 698, 696, 691, 697 – эксплуатационные, №№ 641, 677, 679 – нагнетательные. Эта схема наиболее полно отвечает требованию равномерного распределения энергетического поля в пласте.

Распределение целевого назначения скважин в блоке «с» очевидно, из-за наличия 150-метровой разницы в абсолютных отметках залегания продуктивных пластов: № 671 – эксплуатационная, № 694 – нагнетательная.

В блоке «д» из скважин №№ 686, 665, 644 выделяется превышением амплитуды залегания верхнего мела на 100–125 м и под остальными скважинами № 686. Это дает основание определить ее назначение в качестве эксплуатационной. Скважины №№ 665 и 644 целесообразно использовать в качестве



Рис. 1.

Старогрозненская площадь. Наблюдательная скважина № 697

нагнетательных, имея в виду равномерное распределение энергетического поля и необходимости подпитки единичной эксплуатационной скважины № 668.

Хорошая изученность осадочной толщи, наличие годных для эксплуатации скважин, емкостные характеристики пластов, наличие высокой температуры в пласте, наличие опыта закачки и др. делает площадь незаменимой для создания ГеоТЭС мощностью не менее 50 МВт [3, 4].

2. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ КОНКРЕТНОГО УЧАСТКА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ОПЫТНОЙ ГЕОТЭС

Создание ПЦС с модернизацией существующих и, возможно, бурением новых скважин требует значительных затрат и поэтому при прочих равных условиях предпочтение должно отдаваться месторождению с наименьшей глубиной залегания кровли верхнемеловых отложений.

При выборе конкретного участка для создания опытно-промышленной ГеоТЭС необходимо учитывать множество факторов и, в первую очередь, возможность максимального использования существующих скважин, что зависит, в основном, от их технического состояния, взаимного расположения, продуктивности подъемных и приемистости нагнетательных при необходимых интенсификационных мероприятиях.

Учитывая наилучшее развитие инфраструктуры и перспективы наращивания мощности ГеоТЭС, Старогрозненское месторождение стоит на первом месте.

Как видно из табл. 3, общая мощность ГеоТЭС Чеченской Республики на хорошо изученных в настоящее время зонах может быть доведена до 300 МВт.

По состоянию на 2011 г. пригодными к эксплуатации были скважины №№ 641, 644, 665, 668, 671, 676, 677, 679, 686, 691, 694, 696, 697, 698. Их расположение показано на рис. 2, номера скважин обведены рамкой. Предварительно можно выделить три участка. Предпочтителен первый (северо-западный) участок. Юго-восточный участок вызывает опасения из-за больших объемов закачки воды и соответствующего охлаждения пласта.

ЛИТЕРАТУРА

1. АЛИЕВ Р.М., ВАСИЛЬЕВ В.А., ИСРАПИЛОВ М.И., БАДАВОВ Г.Б. Перспективы крупномасштабного использования геотермальной энергии в Республике Дагестан // Изв. РАН. Энергетика. 2010. № 5. С. 125–131.
2. ВАСИЛЬЕВ В.А. Методика расчета подземных циркуляционных систем в трещиноватых коллекторах // Научно-технические проблемы комплексного использования возобновляемых источников энергии: Сб. научн. тр. / ЭНИН им. Г.М. Кржижановского. М., 1986. С. 28–33.

ТАБЛИЦА 3.

Предварительная оценка параметров ГеоТЭС на базе выработанных нефтяных месторождений

№ п/п	Месторождение	T _{пласт.} , °C	Глубина пласта, м	G _{цирк.} , в ПЦС воды, т/ч	P _{нагн.} , ПЦС, МПа	N _{общ.} , МВт
1	Старогрозненское	160	3300-3800	120-130	7,5	40-50
2	Эльдарово	170	4300-4500	50-60	7,5	20-30
3	Гудермесское	174	4500-4900	120-130	7,5	50-60
4	Брагуны	172	4500-4800	120-130	7,5	50-60
5	Ястребиное	175	4500-4900	20-30	7,5	10-15
6	Октябрьское	170	4700-4800	170-180	7,5	30-40
7	Правобережное	195	5200-5400	60-70	7,5	40-50
	Всего			560-630		240-305

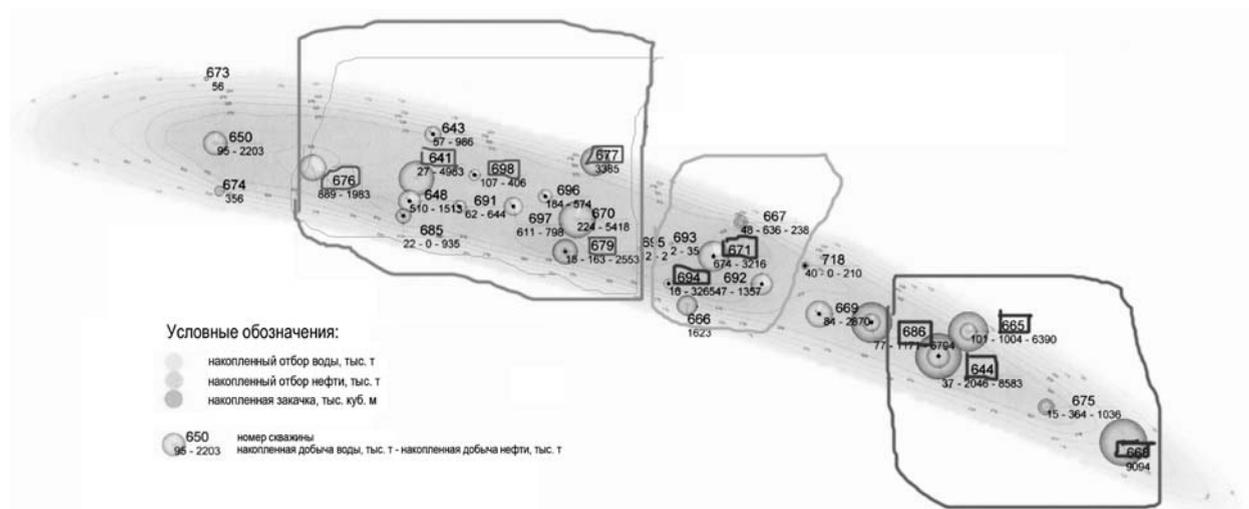


РИС. 2.

Схема расположения возможных участков создания опытно-промышленной ГеоТЭС мощностью 10 МВт

3. Дагестанская ГеоЭС мощностью 10 МВт, возможности и перспективы строительства: Презентация / Сапаров М.И., Васильев В.А., Алиев Р.М., Бадавов Г.Б., Абилов М.Ш., Багатаев Р.М. // Конференция по геотермальной энергетике «Состояние и современные тенденции развития геотермальной технологии в мировой практике». Москва, Центр Международной Торговли, 24-25 октября 2011 г.
4. Рекомендации Совета по науке, наукоемким технологиям и инновационной деятельности при Председателе Государственной Думы Федерального Собрания Российской Федерации, посвященного вопросам развития инновационных технологий эффективного использования геотермальных ресурсов в регионах России. Москва, 28 мая 2009 г.

Абрахманов Алик Арисламбекович,
генеральный директор ООО «Трансэнергпром»,

☎ 119415, г. Москва, пр. Вернадского, 37, корп. 2,
тел.: +7 (903) 363-59-38,
e-mail: transenergoprom@mail.ru

Васильев Виктор Александрович,
к.ф.-м.н., зав. лабораторией ОАО «ЭНИН»,

☎ г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19,
тел.: +7 (926) 129-36-46, e-mail: vasilyev@eninnet.ru,

Алиев Расул Магомедович,
д.т.н., профессор кафедры бурения РГУ нефти и газа им.
И.М. Губкина, генеральный директор ОАО «Геотермнеф-
тегаз»,

☎ г. Махачкала, тел.: +7 (928) 285-94-23,
e-mail: tek-geoterm@yandex.ru,

Бадавов Гасан Басирович,
генеральный директор ООО «Каспийэкосервис»,

☎ г. Махачкала, тел.: +7 (928) 831-11-01,
e-mail: lotos155@yandex.ru

УДК 551.463

ХАРАКТЕРИСТИКА ВЫРАБОТАННЫХ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЧЕЧЕНСКОЙ РЕСПУБЛИКИ, ПЕРСПЕКТИВНЫХ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

А.А. АБДРАХМАНОВ¹,
В.А. ВАСИЛЬЕВ², Р.М. АЛИЕВ³,
Г.Б. БАДАВОВ⁴

¹ООО «Трансэнергопром»,

²ОАО «ЭНИН»,

³ОАО «Геотермнефтегаз»,

⁴ООО «Каспийэкосервис»

По данным бурения скважин и разработки месторождений нефти и газа исследованы геолого-геотермические условия территории Чеченской Республики. Выявлены особенности строения и зоны трещиноватости выработанных глубоких верхнемеловых залежей нефти и газа пригодных для создания промышленных геотермальных электростанций.

Ключевые слова: Чеченская Республика, выработанные нефтяные и газовые месторождения, бинарные геотермальные электростанции.

1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕРХНЕМЕЛОВЫХ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

С 1956 г. в Грозненском нефтедобывающем районе открывались и вводились в разработку массивные нефтяные залежи, приуроченные к трещиновато-кавернозным известнякам верхнемеловых отложений. Залежи приурочены к узким антиклинальным складкам и характеризуются рядом особенностей: большими глубинами залегания (1600–5300 м), большими величинами отношений длины к ширине (от 5 до 20), большими мощностями продуктивных отложений (290–450 м), большими этажами нефтеносности (260–1050 м), большими углами наклона отложений (от 5–10 до 40–55°), аномально высокими пластовыми давлениями (350–770 кгс/см²) и температурами (85–168° С).

Нефть в этих залежах заполняет систему вторичных пустот (трещины, каверны и другие полости различных форм и размеров), а матрица (практически непроницаемая) в основном заполнена водой. Проницаемость обычно уменьшается от свода структуры

CHARACTERISTICS OF DEPLETED OIL FIELDS OF THE CHECHEN REPUBLIC, PROMISING TO CREATE INDUSTRIAL GEOTHERMAL POWER PLANTS

A.A. ABDRAKHMANOV, V.A. VASILYEV,
R.M. ALIYEV, G.B. BADAVOV

According to the drilling and development of oil and gas geological geothermal investigated the conditions of the Chechen Republic. The features of the structure and fracture zone developed deep Upper Cretaceous deposits of oil and gas suitable for the creation of industrial geothermal power plants.

KEYWORDS: the Chechen Republic, the developed oil and gas fields, binary geothermal power plants.

к крыльям и периклиналям. В залежах отмечается увеличение нефтенасыщения породы и количества растворенного в нефти газа в направлении от крыльев к сводам структур.

Свособразны и физико-гидродинамические условия залежей: вязкость пластовых нефтей весьма мала (0,16–1,16 сПз) и, как правило, меньше вязкости воды, значительно различаются плотности воды и нефти в пластовых условиях (разность их достигает 0,5 г/см³), в нефти растворено большое количество газа, в основном от 170 до 445 м³/м³, объемные коэффициенты нефти большие и изменяются от 1,57 до 2,6, давления насыщения газом изменяются от 200 до 360 кгс/см², для залежей характерны высокие дебиты жидкости скважин, которые изменяются от 50–100 до 1000 м³/сутки и более.

Ниже дается краткое описание наиболее крупных верхнемеловых месторождений.

Месторождение Старогрозненское является одним из старейших и расположено в зоне Передовых

хребтов Восточного Предкавказья на территории Старопромыслового района г. Грозного. Нефтяная залежь открыта в 1963 г. и приурочена к узкой антиклинальной складке. В настоящее время находится на поздней стадии разработки.

Продуктивные отложения представлены мощной (350–370 м) толщей трещиновато-кавернозных известняков. Глубина залегания отложений 3800–4500 м. Высота залежи 730 м. Начальное пластовое давление 685 кгс/см². Пластовая температура 143–153° С.

Поддержание пластового давления осуществляется путем приконтурного нагнетания воды. Приемистость нагнетательных скважин изменяется в пределах от 1000 до 2500 м³/сутки. Вода закачивается по насосно-компрессорным трубам и затрубному пространству скважин.

Месторождение Эльдарово. Нефтяная залежь открыта в 1964 г. и приурочена к узкой антиклинальной складке. Углы наклона отложений составляют: на южном крыле 30–350, на северном – 30–400. Продуктивными являются фораминиферовые и верхнемеловые отложения, представленные плотными трещиноватыми мергелями и известняками. Верхнемеловые и фораминиферовые отложения гидродинамически связаны между собой и представляют единую залежь. Общая мощность продуктивной толщи в среднем 385 м. Этаж нефтеносности 700 м. Глубина залегания кровли продуктивных отложений 3600–4300 м. Начальное пластовое давление 630 кгс/см². Пластовая температура 150–156° С.

С 1970 г. осуществляется поддержание пластового давления на уровне давления насыщения путем приконтурного нагнетания воды. Расстояния между нагнетательными скважинами 5–6 км, а их приемистость составляет 1200–2500 м³/сутки. Залежь находится на относительно ранней стадии эксплуатации.

Месторождение Брагуны расположено на территории Грозненского и Гудермесского районов в 25–30 км от г. Грозного. Залежь нефти в верхнемеловых и фораминиферовых отложениях открыта в 1966 г. Верхнемеловые отложения представлены трещиновато-кавернозными известняками, а фораминиферовые – плотными трещиноватыми мергелями. Верхнемеловые и фораминиферовые отложения гидродинамически связаны между собой и представляют один объект разработки. Общая мощность отложений 450 м.

Залежь приурочена к узкой антиклинальной складке. Длина превышает ширину залежи в 8 раз. Углы наклона отложения на крыльях складки достигают 30–55°. Этаж нефтеносности 750 м. Глубина залегания отложений 4100–4850 м. Начальное пластовое давление и температура в залежи были равны соответственно 770 кгс/см² и 168° С.

К 1975 г. пластовое давление снизилось до 360 кгс/см², и с тех пор с целью его поддержания в приконтурную поднефтяную зону закачивают воду.

Средняя приемистость нагнетательных скважин 1500 м³/сутки. Залежь находится на ранней стадии эксплуатации. До настоящего времени отобрано незначительное количество попутной пластовой воды.

Месторождение Ястребиное расположено в 15 км к северу от г. Грозного, вблизи нефтяных месторождений Хаян-Корт и Брагуны. Верхнемеловая залежь нефти открыта в 1968 г. Залежь приурочена к мощной (340 м) толще трещиновато-кавернозных известняков. Изучение имеющихся данных показывает что она ограничена тектоническими нарушениями и фациальными барьерами. Залежь приурочена к узкой антиклинальной складке. Углы наклона отложений достигают 450. Глубина залегания продуктивных горизонтов 4200–4600 м. Этаж нефтеносности 500 м. Начальное пластовое давление и температура составляли соответственно 679 кгс/см² и 157° С.

В процессе эксплуатации отмечено снижение пластового давления. Дебиты жидкости изменялись от 250 до 650 т/сутки при перепадах давления 10–20 кгс/см². Для поддержания пластового давления запроектировано приконтурное нагнетание воды. Залежь находится на ранней стадии эксплуатации, из нее добывается практически безводная нефть.

Месторождение Октябрьское находится в 8 км к юго-востоку от г. Грозного и в 5 км от Старогрозненского месторождения. Залежь открыта в 1966 г. и представляет собой брахиантиклинальную складку, вытянутую с северо-запада на юго-восток. Общая мощность отложений 400 м. Этаж нефтеносности около 900 м. Глубина залегания 4240–4930 м. Пластовое давление и температура в залежи составляют 690 кгс/см² и 168° С.

В процессе разработки отмечается резкое снижение пластового давления. Дебиты скважин изменяются от 500 до 1200 т/сутки при перепадах давления 10–100 кгс/см² и более. Проницаемость, определенная по данным гидродинамических исследований скважин, составляет 10–200 мД. Скважины эксплуатируются фонтанным способом.

2. ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРМОВОДОНОСНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

На территории Чеченской Республики термоводоносность связана с песчаными горизонтами среднемиоценовых отложений и трещинными зонами известняков. В нижележащих стратиграфических толщах (нижний мел, юра) не обнаружено заслуживающих внимания термоводоносных горизонтов. Они литологически защищены глинами и плохопроницаемы. Пока мощные, удовлетворяющие требованиям ПЦС, водоносные горизонты обнаружены в среднемиоценовых и верхнемеловых отложениях.

В настоящее время термальные воды среднего миоцена используются в республике для целей теплоснабжения и горячего водоснабжения, в дальнейшем объ-

смы их использования намечается увеличить. Однако наиболее интересными для создания ГеоТЭС являются верхнемеловые пласты известняков.

Именно в верхнемеловых отложениях развиты зоны повышенной трещиноватости, приуроченные к наиболее гипсометрически повышенным отметкам антиклиналей. Антиклинали и зоны повышенной трещиноватости в Чеченской Республике имеют протяженные размеры. Ширина их небольшая (1,5–2,5 км), а длина отдельных достигает до 100 км (см. рисунок). Максимальная глубина залегания зон трещиноватости обнаружена на площади Правобережная и достигает 5400 м, а замеренные пластовые температуры достигают 195° С. К этим зонам приурочены знаменитые высокопродуктивные нефтяные залежи, такие как Малгобек-Вознесенск-Алиуртовская, Эльдарово, Карабулак-Ачалуки, Гудермес, которые в настоящее время выработаны.

Многие зоны повышенной трещиноватости имеют небольшие глубины залегания и недостаточные для целей создания ГеоТЭС, температуры. Но они, несомненно, являются удобными объектами для создания крупных систем теплоснабжения на базе ПЦС.

Глубоким бурением в пределах Чеченской Республики выявлены следующие зоны повышенной трещиноватости верхнемеловых известняков, пригодные для создания ГеоТЭС и имеющие температуры выше 150° С: Правобережная, Минеральная, Брагуны, Старогрозненская, Октябрьская, Гудермесская, Эльдарово, Ястребиная. Более подробные сведения об этих зонах, динамике разработки залежей, физических характеристиках пласта и пластовых жидкостей изложены в работах [1–4].

Зоны повышенной трещиноватости могут быть еще выявлены также в синклинальных прогибах Бесланской, Петропавловской и др., однако, в настоящее время, достоверно изучены только вышеуказанные зоны.

Как уже говорилось, зоны естественного дробления известняков верхнемелового горизонта Чеченской Республики имеют однотипное строение: все они приурочены к наиболее гипсометрически повышенным зонам антиклиналей, имеют узкие (1,5–2 км) и вытянутые формы, пористость (трещинная) колеблется в пределах 0,35–0,3%, поровое пространство матриц неэффективное и не работает.

Во всех зонах отмечается значительное снижение пластовых давлений (на 300–400 кгс/см²). Этот эффект, вместе с наличием аномально высоких начальных пластовых давлений, бесспорно свидетельствует о практически полной гидродинамической изолированности зон друг от друга и от выходов известняков на дневную поверхность. Наряду с близостью к крупным населенным пунктам и к г. Грозному, такое положение является весьма благоприятным для создания в них высокоэкономичных ПЦС с регулируемым пластовым давлением и относительно легкими условиями эксплуатации. Очень благоприятны также и температурные условия. Пластовые температуры в большинстве зон превышают 160–170° С.

Как уже отмечалось, давления нагнетания воды в пласты в этих зонах очень высокие до 180 кгс/см². Но это закономерно объясняется необходимостью расположения при разработке нефтяных залежей нагнетательных скважин в периферийных (красных) зонах для достижения максимальной нефтеотдачи.

Продуктивность же скважин в центральных частях зон дробления известняков, как правило, исключи-

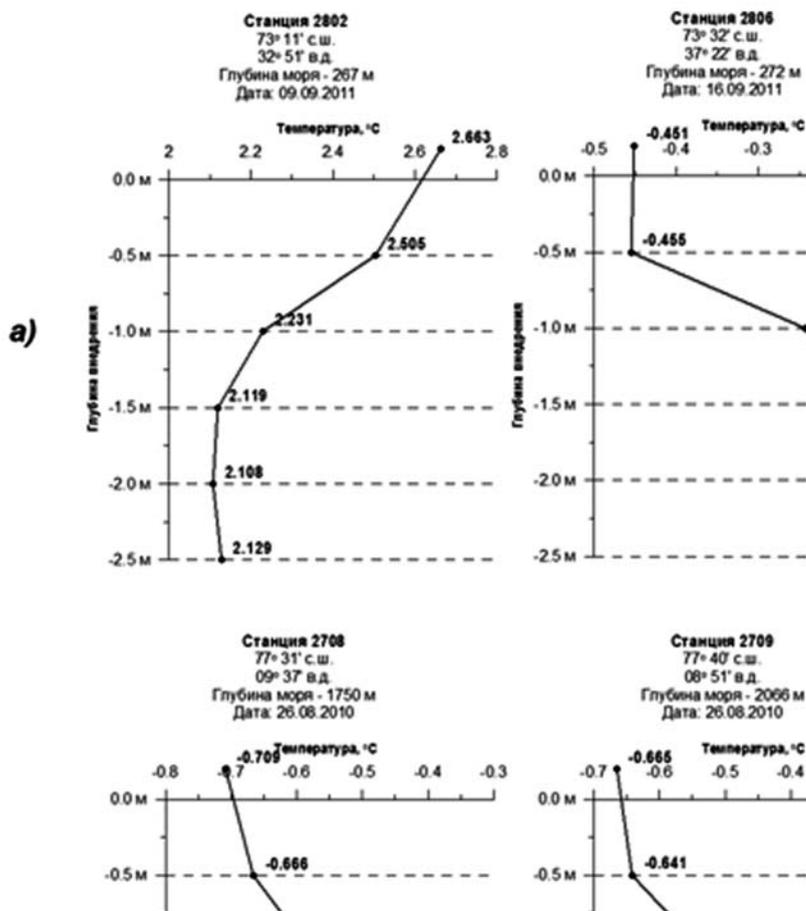


Рис. 1.

Термоводоносные площади в верхнемеловых отложениях Чеченской Республики

тельно высокие до $20 \text{ м}^3/\text{сутки-ата на 1 метр мощности}$. Высокие значения давлений нагнетания естественно объясняются и высокими значениями текущих пластовых давлений, малыми значениями вскрытых мощностей в центральных зонах.

Известно, что подавляющее большинство скважин в центральных зонах повышенной трещиноватости заканчивались аварийно. Искусственное ухудшение проницаемости призабойных зон (закачка ракушечника, шелухи, цемента и т. д.) для ликвидации катастрофических поглощений в процессе бурения привело к уменьшению продуктивности скважин.

При создании ПЦС очевидно все эти факторы должны быть учтены: нагнетательные и эксплуатационные скважины должны располагаться вряд ли по длинной оси антиклинали, в них пласт должен быть вскрыт на полную мощность, скважины должны быть оборудованы колоннами больших диаметров, с таким расчетом, чтобы дебиты и приемистость их составляли $8\text{--}10 \text{ тыс. м}^3/\text{сутки}$, а давления нагнетания не превышали $75\text{--}80 \text{ кгс/см}^2$.

Как следует из таблицы, наилучшими по этому условию сегодня являются Старогрозненское (4495 м) и Эльдаровское (4285 м) месторождения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **БОРИСЕНКО З.Г.** Новая теория и практика пространственного размещения залежей нефти и газа в трещинных коллекторах. Пятигорск: ПГАУ, 2010. 168 с.
2. **ИСРАПИЛОВ М.И.** Ресурсы углеводородов и геотермический режим осадочных бассейнов. М.: Недра, 1991. 208 с.
3. **ЛЕБЕДИНЕЦ Н.П.** Особенности строения и разработки нефтяных месторождений с трещиноватыми коллекторами. М.: ИНСОФТ, 2011. 188 с.
4. **МАЙДЕБОР В.Н.** Особенности разработки нефтяных месторождений с трещиноватыми коллекторами. М.: Недра, 1980. 288 с.

ТАБЛИЦА 1.

Сводные характеристики площадей, перспективных для создания ГеоТЭС

№ п/п	Месторождение	Глубина, м	Пластовая температура, °С	Пластовое давление, МПа	Эффективная мощность, м	Коеф. проницаемости, мД	Вторичная трещиноватость, %	Площадь, км ²
1	Старогрозненское	4495	159	47,9	273	207	0,3	92,1
2	Эльдарово	4285	150–156	45,8	285	20–1400	0,2–0,6	92,95
3	Гудермесское	4921	170	47,8	169	0,02–425	0,46	40,52
4	Брагуны	5290	151–172	45,2	440	40–350	0,2–0,65	69,5
5	Северные Брагуны	5230	175	70,9	360	18,1	0,35	64,7
6	Октябрьское	5250	160–170	48,8	400	10–233	0,57	25,33
7	Правобережное	5280	175	60,4	241	16–22	0,46	76,375
8	Ханкальское	5620	160–170	47,3	100	3,0	0,55	0,63

Наиболее перспективной, на наш взгляд, является Старогрозненская зона ПЦС, находящаяся непосредственно в черте г. Грозного и разработка нефтяной залежи в которой заканчивается (табл. 1). Эта зона обустроена блочными насосными станциями и в ней, фактически, в настоящее время уже производится реинжекция воды: нефтяные попутные воды обратно закачиваются в пласт. Приемистость нагнетательных скважин в среднем составляет $1000\text{--}1500 \text{ м}^3/\text{сутки}$.

По степени выработанности запасов нефти описанные месторождения выстраиваются следующим образом: Старогрозненское (99%), Эльдарово (90%), Гудермес (80%), Брагуны (67%), Горячисточническое (65%), Октябрьское (62%), Правобережное (20%).

А.А. Абдрахманов,
генеральный директор ООО «Трансэнергопром»,
☎ г. Грозный, e-mail: transenergoprom@mail.ru,

В.А. Васильев,
к.ф.-м.н., зав. лабораторией ОАО «ЭНИН»,
☎ г. Москва, e-mail: vasilyev@eninnet.ru,

Р.М. Алиев,
д.т.н., профессор кафедры бурения РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, генеральный директор ОАО «Геотермнефтегаз»,
☎ г. Махачкала, e-mail: tek-geoterm@yandex.ru,

Г.Б. Бадавов,
генеральный директор ООО «Каспийэкосервис»,
☎ г. Махачкала, e-mail: lotos155@yandex.ru

РЕШЕНИЕ

НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ГЕОТЕХНОЛОГИЯ»

**Конференция проведена МГГУ и РАЕН
12–13 ноября 2013 г. при финансовой поддержке
РФФИ и ОАО «Атомредметзолото»**

Поддержание экономики России путем ускоренного освоения минерально-сырьевых ресурсов страны во многом сопряжено с вовлечением в отработку более бедных месторождений, залегающих в отдаленных районах в сложных природных условиях: на больших глубинах, в области вечной мерзлоты, под водоемами и т. д. Разработка их обычными методами сопряжена со значительными технологическими, экономическими и экологическими трудностями.

Подземные и открытые горные работы, основанные на механическом отделении полезного ископаемого от массива, погрузке и доставке горной массы, требуют присутствия людей на месте добычи, извлечения и перемещения огромных объемов пустых пород и переработки всей рудной массы. При вскрытии и складировании пустых пород изымаются значительные площади ценных земельных угодий. Кроме того реализация проектов, базирующихся на подземных и открытых горных работах, требует значительных капитальных вложений с большими сроками окупаемости.

Российские недра – это «живот» России, а на старорусском языке живот это жизнь, и наша задача сделать эту жизнь комфортной, безопасной и эффективной. Сегодня именно горный инженер настоящий хозяин своей страны, и в XXI веке от успехов недропользователей будет зависеть ее судьба.

Современное освоение недр Земли по сложности и трудности можно сравнить с проблемой освоения космоса, но общественное внимание к этой проблеме, а следовательно, и финансирование недостаточны. Наша цель сделать горное дело привлекательным для работы людей с недрами Земли.

Основные экономические программы последнего десятилетия содержат много технократических предложений, но явно недостаточное внимание в них уделено стратегии развития добывающих отраслей промышленности. В этом плане ключевыми яв-

ляются проблемы развития человека, инвестиции в человеческий капитал – специалистов горного дела, которые определенно не адекватны потребностям страны для развития и модернизации добывающих отраслей промышленности и науки её обслуживающей. К сожалению, горный бизнес, являющийся главным источником внешней ренты, фактически отказывается от поиска путей в будущее горного дела. Необходимо его принуждение к научно-исследовательским работам с целью обеспечения развития науки и технологии горного дела в будущем для чего следует ввести специальный налог, из которого государство будет финансировать крупные исследовательские работы. Кроме этого, необходимо обязать все добывающие предприятия принимать на рабочие места студентов для прохождения производственной практики.

Экономика XXI века требует поиска принципиально новых путей, позволяющих расширить сырьевую базу и увеличить объем добычи и снизить себестоимость их добычи, исключить присутствие людей под землей, свести к минимуму вредные экологические последствия ведения горных работ, а также значительно снизить величину капитальных вложений. Неизбежность коллапса (в самом широком понятии этого слова) при сохранении действующих тенденций в горном деле требует значительного переосмысления, преобразования и перестройки нашего представления о поиске Нового.

Известно, что Новое конфликтует со Старым. Сегодня выявляется необходимость коренного преобразования технологии добычи полезных ископаемых, замены старых технических средств современными, работающими на новых принципах. Это прежде всего связано с развитием научного направления – физико-химической геотехнологии (ФХГ) и использованием ее возможностей для разработки физико-химических методов (ФХМ) добычи.

За прошедшие годы были получены важные научные и практические результаты в развитии ФХГ. В широких промышленных масштабах освоены технологии: добычи урана подземным и кучным выщелачиванием, подземного растворения солей, в т. ч. для создания подземных хранилищ нефти и газа, различные методы интенсификации добычи нефти. В мировой практике широко используются приповерхностная тепловая энергия недр. Опробованы в промышленном масштабе способы подземного выщелачивания золота, скважинной гидродобычи полезных ископаемых, растворения бишофита.

Созданы научно-технические предпосылки по освоению месторождений железа, марганца, золота, молибдена, никеля и других металлов выщелачиванием; битума, озокерита, асфальгита, тяжелой нефти; извлечения нефти и газа из глубинных сланцевых залежей, погребенных металлоносных россыпей скважинной гидродобычей. Разработаны технические системы извлечения и использования глубинного тепла Земли.

Выполнен большой комплекс научных исследований, позволивший разработать теоретические основы ФХГ и создать в 2009 г. впервые в мировой практике учебник для вузов по ФХГ, который в 2012 г. был переиздан.

В работе конференции по ФХГ приняли участие представители различных научных учреждений, предприятий и организаций России, Казахстана, Белоруссии, Украины.

Прошедшая конференция широко открыла дверь для входа в мир горного дела ФХГ. К сожалению, жизнь многих кафедр в горных вузах превратилась в имитацию учебы, а у многих студентов полностью отсутствует мотивация к творческому познанию предмета изучения. Сегодня необходимо вести активную всестороннюю подготовку молодых горных инженеров, что является обязательным этапом становления и широкой практической реализации ФХМ добычи полезных ископаемых.

Конференция считает целесообразным сконцентрировать усилия геологов, горняков, нефтяников, физиков, химиков, всех сотрудников научно-исследовательских и проектных организаций в реализации следующих направлений:

1. Оценка возможности освоения конкретных месторождений методами ФХГ. Разработка методических руководств по поиску и разведке различных типов полезных ископаемых для ФХМ добычи.

2. Создание высокоэффективной техники и технологий вскрытия месторождений полезных ископаемых для их отработки скважинными методами (в т. ч. для бурения скважин сложного профиля, создания типоразмерного ряда буровых установок), что должно снизить себестоимость буровых работ в 3–5 раз, увеличить производительность в 5–7 раз и резко уменьшить вредное влияние горных разработок на окружающую среду.

3. Поиск эффективных методов подготовки месторождений к отработке ФХ методами (в т. ч. технологий искусственного улучшения фильтрационных свойств рудного тела), что даст возможность увеличить коэффициент извлечения полезного ископаемого, снизить расход реагентов, улучшить характеристики продуктивных флюидов.

4. Разработка эффективных конструкций оборудования, отвечающих технологическим и экономическим требованиям, увеличивающих эффективность использования новых методов.

5. Углубление теоретических основ физико-химических процессов, протекающих в недрах, выявление технической возможности создания новых ФХМ, а также оптимизации действующих технологий.

6. Разработка методов обеспечения оптимальных режимов нагнетания, движения и подъема на поверхность рабочих и продуктивных флюидов, обеспечивающих полноту охвата обрабатываемой залежи рабочими флюидами, надежность работы технологических скважин.

7. Обоснование технологии подземного растворения и переработки продуктивных растворов при ФХМ разработке силвинитовых и карналитовых месторождений.

8. Разработка техники и технологии подготовки новых рабочих флюидов эффективных растворов для выщелачивания, снижающих затраты на производство реагентов и обеспечивающих экологичность производства.

9. Разработка техники и технологии переработки продуктивных растворов, что позволит создать производство новых видов продукции, снизить эксплуатационные затраты, увеличить производительность труда.

10. Разработка математических основ и программных средств для экономико-математического моделирования, вычислительного эксперимента при решении научно-исследовательских и производственных задач, позволяющих снизить затраты, сократить время на разработку, обосновать оптимальные параметры технологических процессов, увеличить эффективность проектных работ, усовершенствовать методы контроля и управления производственными процессами.

11. Разработка экологических и экономических аспектов использования ФХМ и мероприятий по охране окружающей среды.

Конференция обращается с просьбой к администрациям регионов и муниципальных органов оказать помощь в обеспечении развития ФХМ добычи полезных ископаемых в связи с их существенной привязкой к экономике регионов, для чего предлагает:

1. Взять на себя частичное инвестирование ФХМ, имеющих в данном регионе существенные запасы полезных ископаемых и высокую экономическую эффективность их добычи;

2. С целью учета, а главное пропаганды новых в горном производстве ФХМ, создать при региональных Администрациях соответствующие инстанции стимулирования ФХМ.

Конференция считает необходимым:

1. Создать независимый общественно-государственный Научный Горно-геологический Совет при Президенте РФ для экспертизы и обсуждения стратегических вопросов развития МСК.

2. Образовать на базе НИИ, РАН и ВУЗах общественную организацию специалистов в области ФХГ, которая явилась бы экспертно-дискуссионным сообществом.

3. В сложившихся условиях для развития кадрового и инновационного потенциала минерально-сырьевого комплекса создать на базе ведущих ВУЗов и НИИ Автономный Федеральный Исследовательский Центр.

4. Отметить, что отсутствие координации научно-исследовательских работ в области ФХГ сдерживает развитие этих прогрессивных методов добычи полезных ископаемых, для чего просить Министерство образования и науки РФ, Министерство природных ресурсов и экологии РФ, РАН, РАЕН, АГН:

а) совместно со всеми заинтересованными организациями разработать координационный план НИР в области физико-химической геотехнологии на 2014–2025 гг. и подготовить предложения в соответствующие учреждения;

б) создать центры по исследованию и проектированию подземного растворения солей, выщелачиванию металлов, скважинной гидродобычи, новых методов добычи углеводородов, освоения ресурсов тепла Земли, освоения шельфовых и глубоководных месторождений;

в) создать комиссию по разработке терминологического словаря по ФХГ;

г) организовать постоянно действующий научный семинар по ФХГ при одном из НИИ.

5. Отмечая важность подготовки высококвалифицированных кадров в области ФХГ:

а) одобрить опыт подготовки специалистов по физико-химической геотехнологии в МГРИ-РГГУ, МГУ. Просить Министерство науки и образования РФ включить в учебные планы для студентов геологических, горных и нефтяных специальностей курс «Основы физико-химической геотехнологии»;

б) организовать постоянно функционирующие курсы по переподготовке и повышению квалификации инженеров горного профиля, занимающихся работами в области физико-химической геотехнологии.

6. Придавая большое значение информации и пропаганде ФХМ добычи полезных ископаемых, просить:

а) Министерство природных ресурсов и экологии РФ и Федеральное агентство по недропользованию

обеспечить широкую информацию геологов-производственников о научных и практических достижениях в области ФХГ;

б) редколлегии журналов «Физико-химические проблемы разработки полезных ископаемых», «Горный журнал», «Цветные металлы», «Природные ресурсы», «Разведка и охрана недр», «Недропользование-XXI век», «Рациональное освоение недр» постоянно публиковать работы, посвященные проблемам физико-химической геотехнологии и ежегодные обзоры о состоянии и перспективах развития ФХМ добычи полезных ископаемых.

7. Усилить научно-исследовательские и опытно-конструкторские технологические работы в области физико-химической геотехнологии, для чего:

а) рекомендовать Госкорпорации «Росатом» с целью повышения технико-экономических показателей скважинного подземного выщелачивания на месторождениях урана организовать разработку и серийное производство гидрофицированной буровой установки для сооружения технологических скважин, комплексов с гидротранспортом керна, гидроударных, пневмоударных машин и комплексов для восстановления и улучшения фильтрационных свойств продуктивных горизонтов;

б) рекомендовать НИИ и ВУЗам усилить работы по методам интенсификации процессов капиллярной пропитки горных пород, по изучению механизма процессов выщелачивания и переноса в капиллярных системах; по изысканию высокоэффективных химических реагентов для выщелачивания металлов и других полезных ископаемых; усилить работы по методам интенсификации процессов с использованием тепловых, электромагнитных, микробиологических и других воздействий;

в) рекомендовать СО РАН организовать комплексные исследования по развитию физико-химических методов добычи полезных ископаемых в условиях Сибири, Дальнего Востока и Крайнего Севера;

г) рекомендовать включение в планы институтов РАН, Министерства топлива и энергетики РФ и ВУЗов научно-исследовательские работы по физико-химическим методам разработки горючих ископаемых, в т. ч. сланцев, как новых источников углеводородного сырья;

д) рекомендовать ИФЗ РАН, МГРИ-РГГУ, МГУ, Институту гидродинамики СО РАН и другим организациям провести серию научно-исследовательских работ по созданию высокоэффективных методов разрушения и трещинообразования в горных породах в целях подготовки месторождений к отработке геотехнологическими методами;

е) рекомендовать Институту микробиологии РАН им. С.К. Виноградского, научно-исследовательским институтам и ВУЗам усилить исследования по изучению геохимической деятельности микроорганизмов

на месторождениях полезных ископаемых и в коре выветривания, как теоретической базы микробиологических способов отработки месторождений полезных ископаемых; интенсифицировать работы по выведению высокоактивных бактериальных штаммов для выщелачивания руд меди, золота и других металлов и по адаптации микроорганизмов к условиям конкретных месторождений;

ж) всем заинтересованным организациям и специалистам подготовить проекты научно-исследовательских работ в области ФХГ для подачи в Российский фонд фундаментальных исследований.

8. Ускорить проведение исследовательских, проектных, опытных, опытно-промышленных и внедренческих работ по ФХМ добычи полезных ископаемых, для чего:

а) провести опытные работы по работам МГРИ-РГГРУ для освоения прибрежных морских месторождений шельфа;

б) рекомендовать институтам ВСЕГИНГЕО, ВОДГЕО, провести изучение и освоение гидроминеральных ресурсов, включая отходы и стоки нефтепромыслов, рудников, обогатительных фабрик и промышленных предприятий с целью их использования как источника минерального сырья;

в) просить институты системы РАН совместно с другими научными организациями выполнить анализ экономической целесообразности использования тепла Земли для повышения эффективности ФХМ добычи нефти, цветных металлов, калийных солей и т. д.;

г) расширить научно-исследовательские работы и маркетинговые исследования в области переработки и использовании растворов подземного растворения бишофита;

д) отметить перспективность применения электро-технологических методов интенсификации процессов ФХГ;

е) расширить работы по скважинной гидродобыче железных руд и рыхлых россыпных месторождений полезных ископаемых;

ж) рекомендовать Институту физико-технических проблем Севера СО РАН опробовать ФХМ разработки погребенных прибрежных россыпей;

з) ускорить строительство промышленных установок по подземному выщелачиванию меди и золота;

и) выполнить опытные работы по извлечению редкоземельных элементов из вулканических газов.

к) существенно расширить работы по освоению приповерхностных (до глубины 200–300 м) тепловых ресурсов недр;

л) ускорить строительство геотермальных опытно-промышленных циркуляционных систем с естественными коллекторами.

9. Отметить необходимость подготовки минеральной сырьевой базы развития методов ФХГ, для чего:

а) просить Министерство природных ресурсов и экологии РФ учитывать перспективы развития ФХГ методов добычи полезных ископаемых при планировании поисково-разведочных работ; в отчетах о разведке месторождений давать оценку возможности и условий их отработки методами ФХГ; рекомендовать научно-исследовательским институтам Министерства совместно с научными учреждениями горнодобывающей отрасли разработать методические указания по разведке месторождений, включающей их оценку с точки зрения применения ФХГ-разработки;

б) просить ГКЗ при составлении инструкций и рассмотрении отчетов учитывать возможность разработки месторождений полезных ископаемых ФХГ, для чего привлечь к составлению инструкций ГКЗ специалистов в области ФХГ;

в) на основе достижений фундаментальных наук, анализа исследовательских и опытных работ разработать дорожные карты по развитию основных направлений ФХГ;

г) считать целесообразным, проведение ежегодно семинара по ФХГ.

Конференция призывает всех работников горнодобывающей и нефтегазовой промышленности, научно – исследовательских институтов, проектных и геологоразведочных организаций, академий и научных обществ принять активное участие в разработке новых физико-химических методов добычи полезных ископаемых.

КОНФЕРЕНЦИЯ БЛАГОДАРИТ:

РФФИ, ОАО «Атомредметзолото», МГГУ и РАЕН – за всестороннюю поддержку, организацию и помощь в проведении;

ректора МГГУ, проф. д.т.н. Ю.В. Дмитрака и проф., д.т.н. В.Н. Королёву – за большую организационную работу;

вице президента РАН Н.П. Лавёрова, акад. РАН А.Н. Дмитриевского и акад. РАН К.Н. Трубецкого – за поддержку идеи проведения конференции;

отмечает активную и плодотворную работу руководителей семинаров:

проф. д.т.н. Г.А. Машковцева, проф. д.т.н. А.Г. Калинина, проф. д.т.н. М.И. Фазлулина, проф. д.биол.н. Т.Ф. Кондратьеву, проф. д.т.н. К.С. Басниева, д.т.н. А.С. Хрулёва, к.т.н. А.В. Кубланова, проф. д.т.н. В.П. Неберы, проф. д.т.н. Э.И. Богуславского, проф. д.т.н. О.М. Гридина, проф. д.т.н. В.С. Алексева, проф. д.т.н. В.П. Дрободенко.

Аренс Виктор Жанович — д.т.н., профессор, Заслуженный деятель науки и техники РСФСР, Лауреат Государственной премии СССР, вице-президент РАЕН

Глазко Валерий Иванович — д.с.-х.н., профессор, иностранный член РАСХН, зав. Центром нанобиотехнологии Российского государственного аграрного университета – Московской сельскохозяйственной академии им. К.А. Тимирязева, заместитель главного редактора журнала «Вестник РАЕН»

Горбачев Владимир Васильевич — д.ф.-м.н., профессор Московского государственного университета печати, вице-президент РАЕН, заместитель главного редактора журнала «Вестник РАЕН»

Маринина Милена Всеволодовна — ответственный секретарь журнала «Вестник РАЕН»

Алексеев Владимир Николаевич — д.и.н., профессор, научный руководитель Международной программы двойного диплома, почетный работник высшего профессионального образования

Волков Юрий Григорьевич — д.филос.н., профессор, зав. кафедрой социологии, политологии и права, директор Института по переподготовке и повышению квалификации Южного федерального университета, Заслуженный деятель науки РФ

Грибов Лев Александрович — д.ф.-м.н., профессор, чл.-корр. РАН, почетный вице-президент РАЕН, Заслуженный деятель науки РФ

Епифанцев Сергей Николаевич — д.соц.н., действительный государственный советник II класса, Статс-Директор «Трансэнерго ОАО «Российские железные дороги»

Золотарев Владимир Антонович — д.ю.н., д.и.н., профессор, действительный государственный советник РФ I класса, вице-президент РАЕН

Иваницкая Лида Владимировна — к.т.н., доцент, Первый вице-президент – Главный ученый секретарь РАЕН

Лукаевич Игорь Ярославович — д.э.н., профессор, зам. проректора по научным исследованиям и разработкам, зав. кафедрой финансового менеджмента Финансового университета при правительстве РФ

Каспаров Аркадий Александрович — д.м.н., профессор, зав. отделом реконструктивной хирургии глаза НИИ глазных болезней РАМН

Магомедов Шамиль Магомедович — д.э.н., профессор, зам. директора Института региональных экономических исследований

Опалев Александр Васильевич — д.филос.н., профессор, зам. начальника Академии ФСБ России

Панин Александр Николаевич — д.вет.н., профессор, д. чл. РАСХН, директор Всероссийского государственного центра качества и стандартизации лекарственных средств для животных и кормов

Письменский Геннадий Иванович — д.воен.н., д.и.н., проректор НОУ ВПО «Современная гуманитарная академия»

Смирнов Анатолий Иванович — д.и.н., профессор Дипломатической академии МИД России, Чрезвычайный и полномочный посланник Российской Федерации

Терехин Михаил Тихонович — д.ф.-м.н., профессор кафедры математического анализа Рязанского государственного университета им. С.А. Есенина

Утямышев Ильдар Рустамович — д.т.н., ученый секретарь отделения «Научные основы регулирования естественных монополий»

Черешкин Дмитрий Семенович — д.т.н., профессор Института системного анализа РАН, зав. лабораторией Информатизации и информационной безопасности

Шахвердиев Азиз Ханович — д.т.н., генеральный директор НП «Институт системных исследований процессов нефтегазодобычи»

Кузнецов Олег Леонидович — президент РАЕН, д.т.н., профессор, президент Международного университета природы, общества и человека «Дубна», Лауреат государственной премии СССР, Заслуженный деятель науки и техники РФ, Лауреат Премии правительства РФ в области науки и техники

Гейхман Исаак Львович — д.т.н., профессор, Вице-президент РАЕН, президент Ассоциации строительных компаний «Росзарубежстрой», Заслуженный деятель науки РФ

Кервалишвили Паата Джамлетович — д.ф.-м.н., профессор Института прикладной физики Грузинского технического университета, президент Грузинской АЕН

Козловский Евгений Александрович — д.т.н., профессор, Вице-президент РАЕН, зав. кафедрой Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе, Герой Социалистического труда, лауреат Ленинской премии, дважды лауреат премии Правительства РФ

Лагуткин Александр Владимирович — д.ю.н., член Международного антитеррористического и антикриминального форума

Мелуа Аркадий Иванович — д.филос.н., профессор, генеральный директор научного издательства «Гуманистика»

Никитин Альберт Николаевич — д.т.н., профессор, генеральный директор Московского института ноосферных технологий, Лауреат государственной премии РФ

Новиков Василий Семенович — д.м.н., профессор, Лауреат Государственной премии РФ, Заслуженный деятель науки РФ, вице-президент РАЕН

Пирумов Владимир Семенович — д.воен.н., профессор, Заслуженный деятель науки РФ, Лауреат Государственной премии РФ, почетный вице-президент РАЕН

Рахманин Юрий Анатольевич — д.м.н., профессор, д. чл. РАМН, директор НИИ экологии человека и гигиены окружающей среды им. А.Н. Сысина Минздрав России, вице-президент РАЕН

Сенчагов Вячеслав Константинович — д.э.н., профессор, Заслуженный экономист РФ, руководитель Центра финансовых исследований Института экономики РАН

Степашин Сергей Вадимович — д.ю.н., профессор, государственный советник юстиции РФ, председатель Счетной палаты РФ, президент Российского книжного союза, председатель Ассоциации контрольно-счетных органов России

Тыминский Владимир Георгиевич — к.г.-м.н., профессор, президент Европейской академии естественных и гуманитарных наук (Германия, Ганновер), почетный Главный ученый секретарь РАЕН, ФРГ

Фурсей Георгий Николаевич — д.ф.-м.н., профессор Государственного университета телекоммуникаций, зав. кафедрой физики, директор Центра электрофизических проблем поверхности, вице-президент РАЕН

Чилингар Джордж Б. — профессор, иностранный член РАН, руководитель научного центра РАЕН, США

Шевченко Юрий Леонидович — д.м.н., профессор, д. чл. РАМН, Заслуженный врач РФ, Заслуженный деятель науки РФ, президент Национального медико-хирургического Центра им. Н.И. Пирогова

ВЫПУСКАЮЩИЙ РЕДАКТОР НОМЕРА

Хчехян Георгий Хачатурович — д.т.н., ученый секретарь Горнометаллургической секции РАЕН

ЗАВ. РЕДАКЦИЕЙ

Алексеев Павел Александрович — к.т.н., начальник научно-организационного отдела РАЕН