

ISSN 2411-3336
e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА



РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ



ИЗДАЕТСЯ С 1907 ГОДА

том 233



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ • 2018

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ПЕРВОЕ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ РОССИИ

Основан в 1773 году



С

анкт-Петербургский горный университет – первое в России высшее техническое учебное заведение, основанное Указом императрицы Екатерины II 21 октября (1 ноября) 1773 года как воплощение идей Петра I и М.В. Ломоносова о подготовке инженерных кадров для развития горно-заводского дела.

В настоящее время в Горном университете обучается более 8 тысяч студентов, ведется подготовка бакалавров, магистров и специалистов (инженеров) на 7 факультетах:

- горном;
- геологоразведочном;
- нефтегазовом;
- переработки минерального сырья;
- строительном;
- электромеханическом;
- экономическом.

Более 90 % профессорско-преподавательского состава университета имеет ученые степени и звания.

Горный музей – хранитель уникальных коллекций, в котором находится более 250 тысяч экспонатов, собранных со всех континентов и более чем из 80 стран мира.

Книжно-журнальное собрание Главной библиотеки университета насчитывает около полутора миллионов изданий, имеет большое научно-историческое значение.

Горный университет имеет высший государственный статус образовательной системы России, являясь особо ценным объектом культурного наследия народов Российской Федерации, имеет категорию «Национальный исследовательский университет», награжден четырьмя правительственными наградами, входит в ведущие международные рейтинги мировых университетов (16-е место в рейтинге QS World University Rankings by Subject 2017 по направлению «Инженерное дело – добыча полезных ископаемых и горная промышленность»).



Издаются
с 1907 года

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Том 233

рецензируемый
научный журнал

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ • 2018

ISSN 2411-3336
e-ISSN 2541-9404

Подписной индекс в каталоге агентства
«Роспечать» 18067

Учредитель Санкт-Петербургский горный университет

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

В.С.Литвиненко, д-р техн. наук, профессор, академик Международной академии наук высшей школы, РАЕН, РАГН, МАНЭБ, ректор
(Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия)

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

В.Л.Трушко, д-р техн. наук, профессор, академик Международной академии наук высшей школы, РАЕН, РАГН, МАНЭБ, зав. кафедрой механики
(Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

О.Е.Аксютин, д-р техн. наук, чл.-кор. РАН, член правления, начальник департамента (ПАО «Газпром», Москва, Россия)

А.А.Барях, д-р техн. наук, профессор, чл.-кор. РАН, директор (Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Пермь, Россия)

В.Н.Бричкин, д-р техн. наук, зав. кафедрой металлургии (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия)

Л.А.Вайсберг, д-р техн. наук, профессор, академик РАН, председатель Совета директоров и научный руководитель (НПК «Механобр-техника», Санкт-Петербург, Россия)

С.Г.Гендлер, д-р техн. наук, профессор, академик РАЕН (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия)

О.М.Ермилов, д-р техн. наук, профессор, академик РАН, РАГН, зам. главного инженера по науке (ООО «Газпром добыча Надым» ПАО «Газпром», Надым, Россия)

В.П.Зубов, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой разработки месторождений полезных ископаемых (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия)

М.А.Иванов, д-р геол.-минерал. наук, профессор (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия)

Г.Б.Клейнер, д-р экон. наук, профессор, чл.-кор. РАН, заместитель директора (Центральный экономико-математический институт РАН, Москва, Россия)

Ю.Б.Марин, д-р геол.-минерал. наук, профессор, чл.-кор. РАН, президент (ООО «Российское минералогическое общество», Санкт-Петербург, Россия)

С.С.Набойченко, д-р техн. наук, профессор, чл.-кор. РАН, заслуженный деятель науки и техники РФ, зав. кафедрой металлургии цветных металлов
(Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия)

М.А.Пашкевич, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой геоэкологии (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия)

Т.В.Пономаренко, д-р экон. наук, профессор, доцент (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия)

О.М.Прищепа, д-р геол.-минерал. наук, академик РАЕН, управляющий директор (АО «ВНИГРИ», Санкт-Петербург, Россия)

А.Г.Протосеня, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой строительства горных предприятий и подземных сооружений (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия)

М.К.Рогачев, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия)

В.Е.Сомов, д-р экон. наук, канд. техн. наук, академик РАЕН, директор (ООО «Кинеш», Кириши, Россия)

А.Г.Сыров, д-р техн. наук, профессор (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия)

А.А.Тронин, д-р геол.-минерал. наук, врио директора (Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербург, Россия)

А.Е.Череповицын, д-р экон. наук, профессор, зав. кафедрой организации и управления (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия)

Я.Э.Шклярский, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой общей электротехники (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия)

В.А.Шпенст, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой электроэнергетики и электромеханики (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия)

Олег Анцуткин, профессор (Технологический университет, Лулео, Швеция)

Хал Гургенчи, профессор (Школа горного машиностроения Квинслендского университета, Брисбен, Австралия)

Волли Калм, доктор наук, ректор (Тартуский университет, Тарту, Эстония)

Анджей Краславски, профессор (Лаппеенрантский технологический университет, Лаппеенранта, Финляндия)

Эдвин Кроеке, д-р наук, профессор (Институт неорганической химии Фрайбергской горной академии, Фрайберг, Германия)

Илпо Мутикайнен, научный сотрудник химического факультета (Хельсинкский университет, Хельсинки, Финляндия)

Павел Власак, профессор, зав. кафедрой механики жидкостей и дисперсных сред (Институт гидродинамики Чешской академии наук, Прага, Чехия)

Габриэль Вейс, доктор наук, профессор, проректор по научной и исследовательской деятельности (Технический университет, Кошице, Словакия)

Разделы

• Геология • Горное дело • Нефтегазовое дело • Металлургия и обогащение • Электромеханика и машиностроение
• Геоэкология и безопасность жизнедеятельности • Геоэкономика и менеджмент

Журнал индексируется наукометрической базой данных Web of Science Core Collection в указателе научных журналов Emerging Sources Citation Index (ESCI),
Международным междисциплинарным каталогом журналов открытого доступа DOAJ

Журнал включен в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) Научной электронной библиотеки <http://elibrary.ru>
и в международную реферативную базу данных GeoRef

Журнал включен Высшей аттестационной комиссией РФ в действующий Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий,
в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-70453 от 20.07.2017

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.02

Редакция: начальник РИЦ В.Л.Лебедев; редакторы: Е.С.Дрибинская, И.В.Неверова, Н.И.Сочивко
Компьютерная верстка: В.И.Каширина, Н.Н.Седых, Л.П.Хлюпина

© Санкт-Петербургский горный университет, 2018
Подписано к печати 24.10.2018. Формат 60 × 84/8. Уч.-изд. л. 29.
Тираж 300 экз. Заказ 906. С 327. Отпечатано в РИЦ СПбГУ.

Адрес учредителя и редакции: 21-я линия, 2, Санкт-Петербург, Россия, 199106
Тел. +7 (812) 328-8416; факс +7 (812) 327-7359;
E-mail: pml@spmi.ru Сайт журнала: pml.spmi.ru



СОДЕРЖАНИЕ

Геология

Егоров А.С., Винокуров И.Ю., Телегин А.Н. Научно-методические приемы повышения геологической и прогнозно-поисковой эффективности государственного геологического картирования российского арктического шельфа	447
Сысоев А.П. Многовариантность скоростной модели в задаче структурных построений по сейсмическим и скважинным данным	459

Горное дело

Александров В.И., Васильева М.А. Гидротранспорт сгущенных хвостов обогащения железной руды на Качканарском ГОКе по результатам опытно-промышленных испытаний системы гидро-транспорта	471
Деменков П.А., Голдобина Л.А., Трушко О.В. Метод прогноза деформации земной поверхности при устройстве котлованов в условиях плотной городской застройки с применением способа «стена в грунте»	480

Нефтегазовое дело

Абросимов А.А., Шеляго Е.В., Язынина И.В. Обоснование репрезентативного объема данных фильтрационно-емкостных свойств для получения статистически достоверных петрофизических связей	487
Бондарев Э.А., Рожин И.И., Аргунова К.К. Влагосодержание природного газа в призабойной зоне пласта	492

Металлургия и обогащение

Воропанова Л.А., Пухова В.П. Экстракция ионов меди, кобальта и никеля из водных растворов экстрагентом марки CYANEX 272	498
Жмурова В.В., Немчинова Н.В. Опыт комплексного использования золотосодержащего сырья при производстве драгоценных металлов	506
Каминский В.В., Петрович С.Ю., Липин В.А. Получение интерметаллидов в системе Al–Ti–Zn ...	512
Курганова Ю.А., Панина К.С., Бешенков П.С. Анализ возможности повышения свойств материала ВК15 для бурового инструмента	518

Электромеханика и машиностроение

Болобов В.И., Ле Тхань Бинь. Закономерности разрушения материала ударника при единичных ударах	525
Ещин Е.К. Расчеты динамических режимов работы электроприводов самоходных горных машин	534
Федоров С.К., Федорова Л.В., Иванова Ю.С., Воронина М.В., Садовников А.В., Никитин В.Н. Повышение долговечности переводников и бурильных труб электромеханической обработкой	539

Геоэкономика и менеджмент

Зайцев А.Ю. Оценка стоимости золоторудных месторождений с учетом величины капитальных затрат	547
Козьменко С.Ю., Маслобоев В.А., Матвишин Д.А. Обоснование экономического преимущества морской транспортировки арктического природного газа в виде СПГ	554
Лапинская А.А. Современная специфика корпоративных отношений на примере вертикально-интегрированной компании	561



Геология

УДК 528.9:550.3:551.351.2(268)

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ И ПРОГНОЗНО-ПОИСКОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГОСУДАРСТВЕННОГО ГЕОЛОГИЧЕСКОГО КАРТИРОВАНИЯ РОССИЙСКОГО АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА

А.С.ЕГОРОВ¹, И.Ю.ВИНОКУРОВ², А.Н.ТЕЛЕГИН¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

² ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П.Карпинского (ВСЕГЕИ)», Санкт-Петербург, Россия

На примере материалов по Баренцевоморско-Карскому региону приводится обоснование набора научно-методических приемов картографирования и глубинного моделирования в условиях российского арктического шельфа и прилегающих осадочных бассейнов континентальной части России. Охарактеризована фактологическая основа исследований и показано, каким образом в условиях несопоставимости различных геофизических данных применяется зонально-блоковая модель земной коры и обобщенные модели геодинамических обстановок. Обосновывается необходимость и описывается подход к построению глобальных и региональных палеореконструкций.

Показано, что основным содержанием послонных карт глубинного строения (платформенного чехла и консолидированного фундамента) и разрезов земной коры становится отображение закономерностей локализации главных структурно-вещественных подразделений литосферы как следствия геодинамических процессов на границах литосферных плит. Установленные параметры глубинного строения и исторические вехи тектонической истории региона открывают новые возможности для изучения закономерностей локализации месторождений полезных ископаемых. Показан пример решения прогнозно-минерогенических задач по территории Западно-Сибирской и Хатангско-Виллюйской нефтегазовых провинций, выполненного с использованием параметров известных промышленных месторождений нефти и газа для обучения системы распознавания образов.

Ключевые слова: арктический шельф; методика геолого-геофизического моделирования; зонально-блоковая модель земной коры

Как цитировать эту статью: Егоров А.С. Научно-методические приемы повышения геологической и прогнозно-поисковой эффективности государственного геологического картирования российского арктического шельфа / А.С.Егоров, И.Ю.Винокуров, А.Н.Телегин // Записки Горного института. 2018. Т. 233. С. 447-458. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.447

Введение. Совместный опыт исследований *глубинного строения, тектоники и геодинамики западного сектора российской Арктики и прилегающих частей евразийского континента* тематических коллективов Санкт-Петербургского горного университета, Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П.Карпинского (ВСЕГЕИ) и «Севморгео» позволил выработать некоторые научно-методические приемы, существенно повышающие детальность и достоверность глубинных построений в условиях арктического шельфа и прилегающих осадочных бассейнов континентальной части России [9].

Фактологической основой работ этого типа являются материалы гравиметрических и магнитометрических съемок, данные батиметрических исследований, профильные сейсморазведочные съемки МОВ (метод отраженных волн), МОВ-ОГТ (общей глубинной точки), ГСЗ (глубинное сейсмическое зондирование), КМПВ (корреляционный метод преломленных волн), сейсмоакустическое профилирование. Кроме того, задействуются данные сейсмотомографических, геотермических, магнитотеллурических исследований, геологического картирования, глубоководного бурения и других съемок [3].

Постановка проблемы. В ходе комплексной интерпретации разнотипных данных исследователи вынуждены решать широкий спектр научно-теоретических и методологических проблем. Из их числа, в первую очередь, следует выделить:

1. Несопоставимость данных различных геофизических методов, часто отражающих различные объекты исследований или различные свойства единых объектов исследований. Эта кажущаяся несопоставимость чаще всего приводит к неоднозначной геотектонической интерпретации аномалий геофизических полей, не обеспечивающих в общем случае распознавание и моделирование структур, сформированных в разнотипных геодинамических обстановках.

2. Многовариантность интерпретационных построений даже в сечениях опорных геофизических профилей, обеспеченных максимальным объемом фактической информации, что обу-

словлено неоднозначностью решения обратных задач геофизики, а также сложностью и многообразием форм и петрофизических параметров разнотипных геотектонических структур.

3. Необходимость изучения истории развития региона, что повышает надежность глубинных геотектонических построений и открывает возможности для оценки пространственных закономерностей локализации месторождений.

4. Резкие различия морфологии структур платформенного чехла и консолидированного фундамента, что вызывает перегруженность карт глубинного строения (по содержанию – геотектонических), одновременно отражающих строение чехла и фундамента.

5. Необходимость изучения закономерностей локализации месторождений полезных ископаемых с использованием выявленных параметров глубинного строения и исторических вех тектонической истории региона, что обеспечивает внедрение научных разработок в решение поисково-разведочных задач.

Методология исследований. Решение проблемы *несопоставимости данных различных геофизических методов* было найдено в использовании в ходе интерпретации *зонально-блоковой модели земной коры* [4]. В рамках этого подхода выполняется моделирование блоков и межблоковых зон разных типов с использованием материалов специализированной обработки потенци-

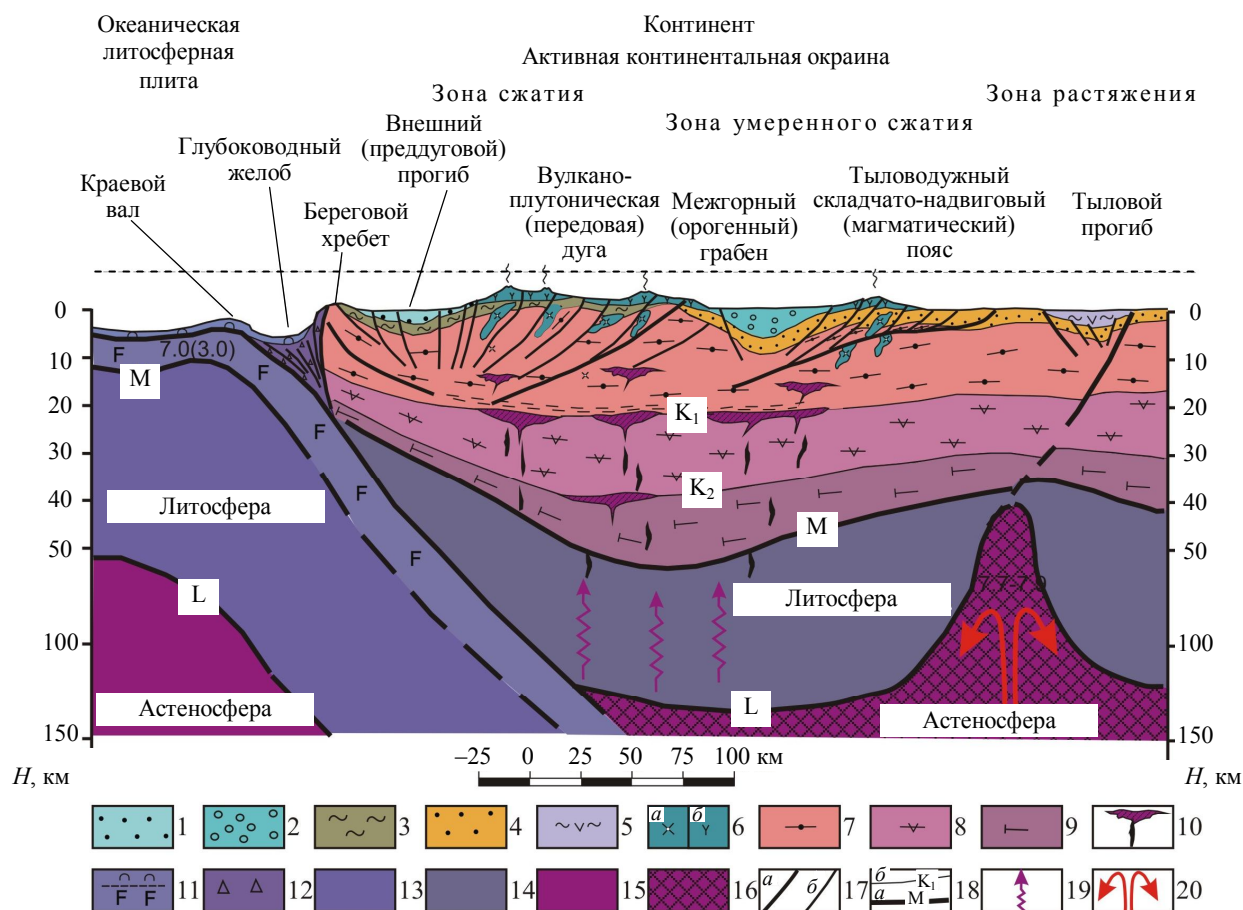


Рис. 1. Обобщенный разрез земной коры активной континентальной окраины андийского типа

1-16 – структурно-вещественные подразделения (СВП) земной коры и верхней мантии: 1 – осадки преддугового прогиба, 2 – моласса межгорного орогенного грабена, 3 – осадки древней пассивной окраины, 4 – внутриконтинентальные осадки, 5 – вулканогенно-осадочные рифтогенные комплексы, 6 – магматические комплексы вулканоплутонической дуги (а – интрузивные, б – эффузивные), 7 – верхнекоровый «гранитно-метаморфический» мегаслой, 8 – среднекоровый мегаслой, 9 – нижнекоровый мегаслой, 10 – очаги корово-мантийных и коровых магм, 11 – океаническая кора, 12 – комплексы аккреционной призмы, 13, 14 – литосферная мантия (13 – океаническая, 14 – континентальная); 15, 16 – астеносфера (15 – океаническая, 16 – континентальная); 17 – разрывные нарушения (а – главные, б – второстепенные); 18 – границы радиальной расслоенности литосферы (а – главные, в том числе подошвы земной коры М и литосферы L, б – второстепенные, в том числе подошвы верхней K₁ и средней K₂ коры); 19 – зоны тепло-массопереноса, инициированные взаимодействием насыщенных водой осадков погружающейся океанической литосферы с астеносферой континентальной плиты; 20 – тыловодужный мантийный плюм

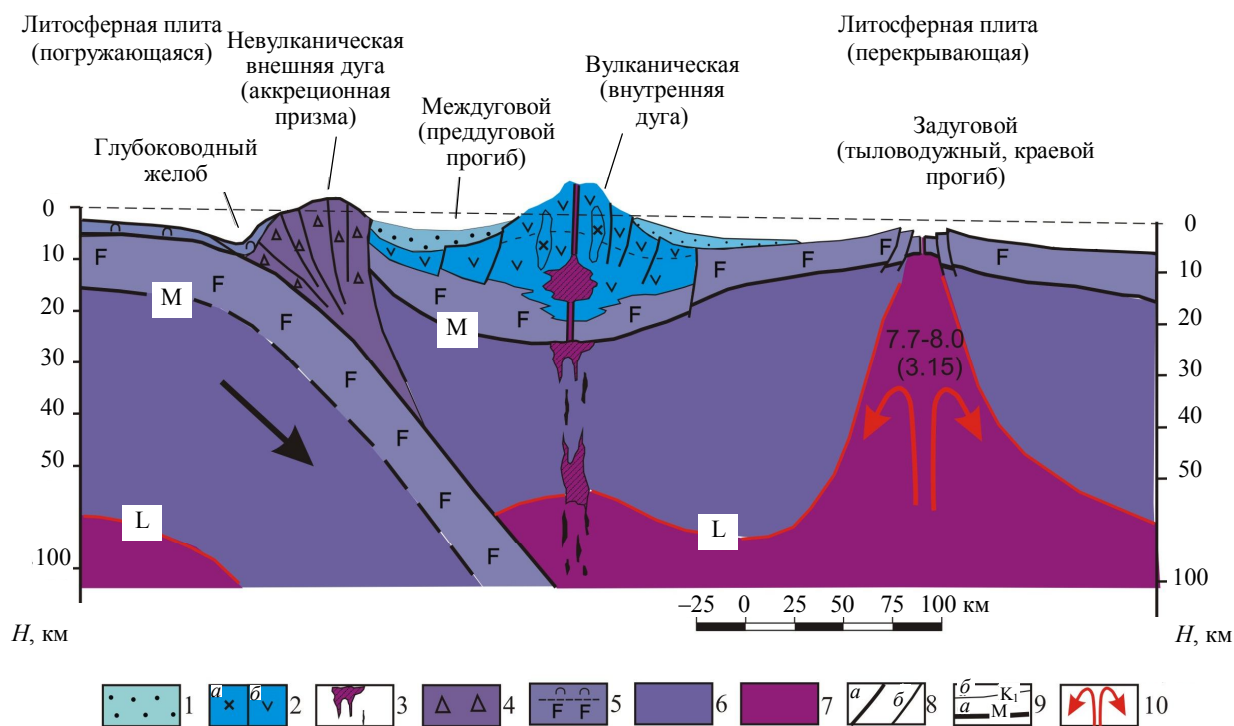


Рис.2. Обобщенный разрез земной коры энсиматической островной дуги

1-7 – структурно-вещественные подразделения земной коры и верхней мантии: 1 – осадки преддугового прогиба, 2 – магматические комплексы вулканической дуги (а – интрузивные, б – эффузивные), 3 – очаги корово-мантийных и коровых магм, 4 – комплексы аккреционной призмы, 5 – океаническая кора, 6 – литосферная мантия, 7 – океаническая астеносфера; 8 – разрывные нарушения (а – главные, б – второстепенные); 9 – главные границы радиальной расслоенности океанической литосферы (а – главные, в том числе подошва земной коры М и подошва литосферы L, б – второстепенные, в том числе подошвы верхней K_1 и средней K_2 коры); 10 – тыловодужный мантийный плюм

альных полей на площади исследований и в сечениях опорных геофизических профилей: *блоки* уверенно выделяются как *области стационарности* расчетных геофизических параметров; *межблоковые зоны* – как *градиентные зоны* или зоны радикального изменения инфраструктуры геофизического поля. Блоки на результирующих тектонических моделях, как правило, отвечают континентальным частям литосферных палеоплит и микроплит или их автономным сегментам; межблоковые зоны – глубинным тектоническим швам, сформированным в условиях растяжения (рифты), сжатия (сутуры коллизионных орогенов) или сдвига [5].

Таким образом, такой подход уже на ранней стадии качественной интерпретации геофизических полей позволяет сопоставлять и обобщать разнородную геофизическую и априорную геологическую информацию и выполнять предварительную геотектоническую типизацию выделяемых физико-геологических неоднородностей.

Решение задач моделирования в условиях недостатка геологической и геофизической информации и, соответственно, *многовариантности интерпретационных построений* выполняется путем распознавания по косвенным геофизическим признакам геодинамических условий формирования изучаемой структуры. С учетом научно-теоретических представлений подбирается природный аналог и его свойства используются при изучении относительно более слабо изученных структур. Таким образом, ключом к расшифровке строения объекта геолого-геофизических исследований являются обобщенные модели структур, сформированных в различных геодинамических обстановках [4]. Моделирование изучаемых геологических объектов выполняется с высоким уровнем генерализации: разрез отражает строение лишь главных структурно-вещественных неоднородностей – границ блоков и межблоковых зон, глубинных разрывных нарушений, тектонических дислокаций осадочных толщ, ареалов развития наиболее петрофизически контрастных интрузивных массивов и др. В качестве примера ниже приводятся обобщенные разрезы структур, сформированных в конвергентных геодинамических обстановках (рис.1-3).

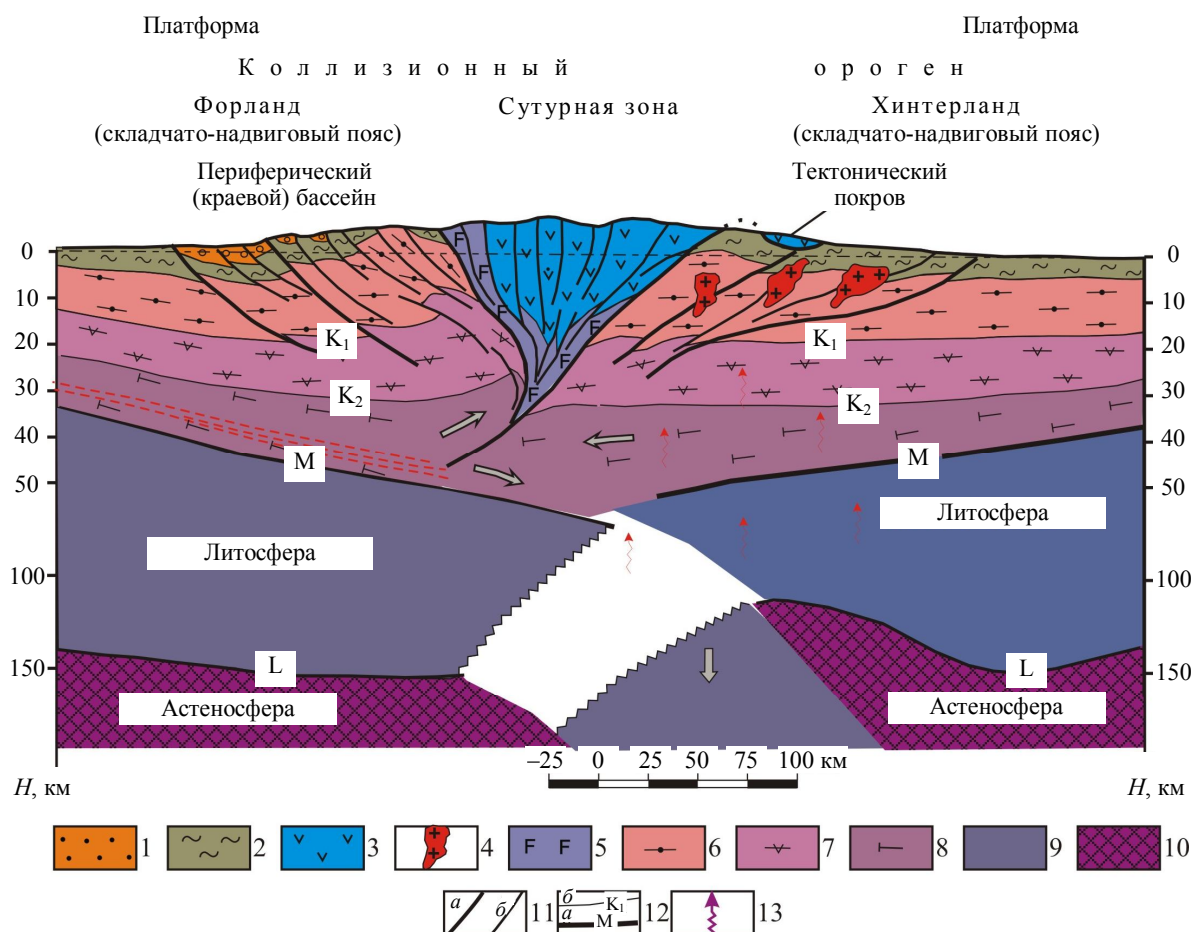


Рис.3. Обобщенный разрез земной коры коллизионного орогена уральского типа

1-10 – структурно-вещественные подразделения земной коры и верхней мантии: 1 – моласса краевого прогиба, 2 – осадки древней пассивной окраины, 3 – магматические комплексы древней островной дуги, 4 – коллизионные гранитоиды, 5 – офиолиты, 6 – верхнекоровый «гранитно-метаморфический» мегаслой, 7 – среднекоровый мегаслой, 8 – нижнекоровый мегаслой, 9 – литосферная мантия, 10 – астеносфера; 11 – разрывные нарушения (a – главные, б – второстепенные); 12 – границы радиальной расслоенности литосферы (a – главные, в том числе подошвы земной коры М и литосферы L, б – второстепенные, в том числе подошвы верхней K₁ и средней K₂ коры); 13 – зоны тепломассопереноса, инициированные взаимодействием насыщенных водой осадков погружающейся океанической литосферы с астеносферой континентальной плиты

Применение в ходе глубинных построений моделей геодинамических обстановок окончательно утверждает геотектонический подход к комплексной геологической интерпретации геофизических данных. Вполне понятно, что карты и разрезы глубинного строения следует рассматривать как документы тектонического содержания: только в этом случае апелляция к обобщенным моделям обстановок и к свойствам хорошо изученных аналогов становится корректной.

Изучение истории развития региона успешно выполняется путем увязки авторских геотектонических построений, выполненных в рамках «радиально-зональной модели земной коры», с более генерализованными реконструкциями, базирующимися на палеомагнитных данных. Так, в основу региональных палинспастических реконструкций нами были положены построения Арне Бьёрликке [11], согласно которым протерозойский период эволюции Земли завершается формированием целой группы архейско-раннепротерозойских кратонов, располагавшихся в экваториальной части планеты.

Реконструкция на байкальскую эпоху тектогенеза (700-670 млн лет) характеризует время завершения аккреции саальбардской части палеоплиты Лавренция, с Большеземельской палеоплитой и Балтией. Результатом аккреции является формирование на их границах Тимано-Печорской складчатой области. Снос и накопление осадков в это время происходит из центральной части Свальбарда и, вероятно, из осевой зоны Тимано-Печорской складчатой области в периферические области Свальбарда. Вдоль окраин Сибирской палеоплиты в результате приращения Няояхской

и Карской палеоплит формируются Енисейская и Таймырская складчатые области. Последняя является источником осадочного материала, поступающего в Карский бассейн (рис.4, а).

Реконструкция на время 420 млн лет показывает закрытие океана Япетус в результате аккреции палеоплит Лавренции с Балтией и Свальбардом в ходе каледонской эпохи тектогенеза. Результатом аккреции является формирование обширного складчатого пояса, охватывающего западный фланг Шпицбергена, норвежскую окраину Европы, территорию современной Великобритании, окраины Гренландии и Северной Америки. Осадочный материал накапливался в юго-западной части Свальбардской палеоплиты. Источником материала являлись территории северо-западной части Свальбарда и Большеземельской окраины Балтии. Сибирский палеоконтинент в это время наращивается складчатыми сооружениями Алтае-Саянской и Байкальской складчатых областей (рис.4, б).

В герцинскую эпоху тектогенеза в условиях аккреции палеоплит Балтии (окраина Лавренции), Казахстана и Сибири происходит формирование Уральской (290 млн лет) и Центрально-Западно-Сибирской (250 млн лет) складчатых областей. В пределах Свальбардского и Карского бассейна продолжается накопление осадочного материала, поступавшего с окружающих горно-складчатых сооружений (рис.4, в).

В начале мезозойской эры (195 млн лет) нами предполагается высокоамплитудное сдвиговое смещение Сибирского палеоконтинента и Центрально-Западно-Сибирской складчатой области относительно других сегментов Пангеи и формирование в области их столкновения с окраиной Свальбарда Пайхой-Новоземельского складчатого пояса. С началом мезозойского периода связывается заложение рифтогенных структур, обусловивших интенсивное осадконакопление в пределах Западно-Сибирской геосинеклизы, Карского и Баренцевского бассейнов.

Палинспастические построения призваны прояснить логику развития разновозрастных складчатых поясов и формирования разновозрастных осадочных палеобассейнов Баренцево-Карского региона. Они направлены на увязку разнотипных геодинамических режимов, проявлявшихся в ходе домезозойской эволюции в разных частях региона и смежных структурах Западно-Сибирского, Енисейско-Хатангского и Печорского осадочных бассейнов.

Эти вспомогательных материалы повышают обоснованность геотектонической интерпретации геолого-геофизических данных и моделирование структур, сформированных в разнотипных геодинамических обстановках. Они служат конструированию геолого-структурного (тектонического) каркаса площади исследований. Основным содержанием карт и разрезов земной коры в этих условиях становится отображение закономерностей локализации главных структурно-вещественных подразделений континентальной земной коры и верхней мантии как следствия

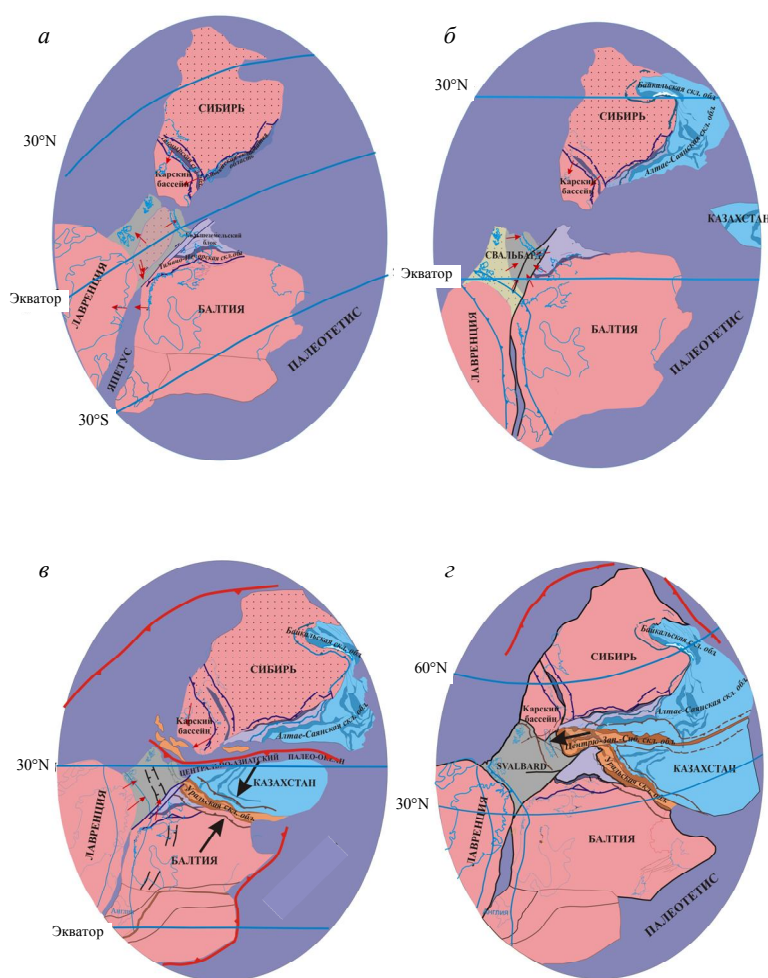


Рис.4. Региональные палинспастические реконструкции на главные эпохи палеозойской эволюции, выполненные путем монтажа элементов авторской модели глубинного тектонического районирования Северной Евразии с палеомагнитными реконструкциями Арне Бьёрликке [11]. Орогенез: а – байкальская (700-670 млн лет), б – каледонская (560 млн лет), в – герцинская (290 млн лет), г – киммерийская (195 млн лет)

геодинамических процессов на границах литосферных плит. На картах платформенных территорий, кроме того, изучают пространственные соотношения подразделений консолидированной коры и платформенного чехла. Этими исследованиями открывается путь для развития исследований в сфере изучения геодинамики осадочных бассейнов и новые возможности для многофакторных прогнозно-минерагенических построений.

Проблема картографирования и глубинного моделирования *структур платформенного чехла и консолидированного фундамента и перегруженности сводных карт глубинного строения* решается путем составления послойных карт глубинного строения и глубинных разрезов земной коры с единых позиций и с использованием унифицированной системы условных обозначений. Этот подход иллюстрируется материалами по Баренцевоморско-Карскому региону.

Карта осадочного чехла Баренцево-морско-Карского шельфа и прилегающих частей евразийского континента характеризует параметры глубинного строения осадочных бассейнов различных по возрасту, размерам и морфологии. В рамках системы условных обозначений цвет соотносится с возрастным интервалом формирования чехла; интенсивность цвета характеризует мощность чехла (рис.5).

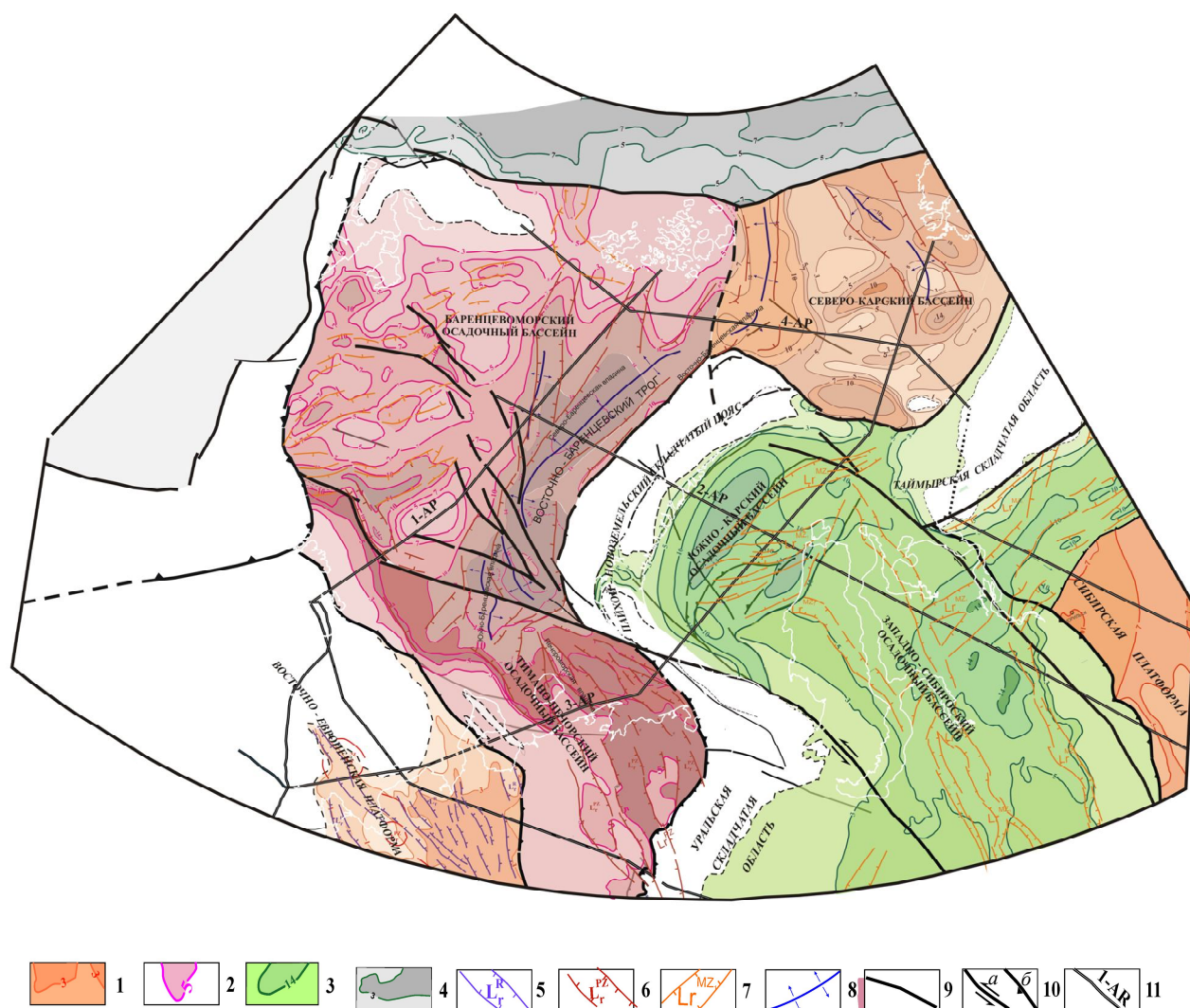


Рис. 5. Карта глубинного строения осадочного чехла Баренцевоморско-Карского шельфа и прилегающих частей евразийского континента (с упрощениями)

1-4 – изогипсы подошвы платформенного чехла: 1 – древних Восточно-Европейской, Сибирской платформ и Карской плиты, 2 – Тимано-Печорского и Баренцевоморского палеозойских осадочных бассейнов, 3 – мезозойского Западно-Сибирского и Южно-Карского осадочного бассейнов, 4 – осадков океанической коры Арктического бассейна; 5-7 – рифтовые структуры базальной части осадочных бассейнов: 5 – рифейские; 6 – палеозойские, 7 – раннемезозойские; 8 – оси рифтогенных трогов; 9, 10 – главные разрывные нарушения (в том числе сдвиговые (10а) и надвиговые (10б)); 11 – опорные геотравессы Баренцевоморско-Карского региона и увязанные с ними континентальные геотравессы



В пределах площади исследований выделяются:

- северные фланги *Восточно-Европейского и Сибирского кратонов*, осадочные чехлы которых выполнены преимущественно венд-палеозойскими осадками со средней мощностью 2-3 км; ниже залегают рифейские авлакогены мощностью до 8 км;

- *Северо-Карский бассейн*, выполненный рифейско-палеозойско-мезозойскими осадками мощностью от первых километров до 16 км (в пределах Восточно-Баренцевской впадины);

- *Тимано-Печорский бассейн*, который характеризуется переменной мощностью палеозойско-мезозойских осадочных толщ от нуля (Тиманский кряж и Канино-Северо-Тиманская зона) до 8 км в Предуралье и 16-18 км на южном фланге Южно-Баренцевской впадины. Этот осадочный бассейн развивался с раннего палеозоя в режиме пассивной континентальной окраины. На его строение большое влияние оказали внутриплитные сдвиго-сбросовые и сдвиго-взбросовые деформации, инициированные позднепалеозойскими орогенными процессами Уральской складчатой области;

- *Баренцевоморский осадочный бассейн*, выполненный палеозойско-мезозойскими осадками мощностью от нуля (о. Шпицберген) до 20 км – в пределах Северо-Баренцевской впадины. На формирование морфологии и строения осадочного бассейна большое влияние оказали процессы: ранне-среднепалеозойского и позднепалеозойского – раннемезозойского рифтогенеза, эпикаледонские орогенные процессы в смежной Свальбардской складчатой области и раннемезозойские орогенные процессы Пайхой-Новоземельской складчатой области [2, 7];

- *Западно-Сибирский осадочный бассейн*, заложенный на разновозрастном консолидированном фундаменте, включающем структуры Уральской, Центрально-Западно-Сибирской, Казахстанской, Алтае-Саянской и Енисейской складчатых областей [10]. Соответственно резко изменяется мощность осадочных толщ бассейна, достигающая максимальных значений (14 км) в его северной и восточной частях [1]. На морфологию бассейна, помимо ареалов развития раннемезозойского рифтогенеза, большое влияние оказывает трансрегиональная Томь-Колывань-Новоземельская сдвиго-надвиговая зона;

- *Хатангский прогиб*, заложенный на северном фланге Сибирской платформы. Его разрез выполнен венд-палеозойскими и мезозойскими осадками суммарной мощностью до 10 км;

- Южный фланг *Южно-Карского осадочного бассейна*, который является продолжением Западно-Сибирского осадочного бассейна. Северный фланг бассейна заложен на эпикиммерийском складчатом фундаменте; наиболее погруженная часть бассейна локализована на коре океанического типа (остаточном океаническом бассейне).

На карте глубинного строения консолидированного фундамента Баренцевоморско-Карского шельфа и прилегающих частей евразийского континента главное изобразительное средство – цвет отображает возраст консолидации земной коры крупнейших геоструктур региона исследований – древних кратонов, складчатых сооружений гренвильской, байкальской, каледонской, герцинской и киммерийской эпох тектогенеза (рис.6).

Дополнительную смысловую нагрузку карты несут контуры развития геологических комплексов, классифицированных по геодинамическим обстановкам их формирования, а также разрывные нарушения разных морфокинематических типов. В пределах площади исследований выделяются:

- древние кратоны (*Восточно-Европейская и Сибирская платформы*) в составе фундамента которых фиксируются блоки с архейской корой континентального типа и разделяющие их раннепротерозойские рифтогенные и сутурные зоны;

- *Североземельский геоблок*, который рассматривается как сегмент Сибирского палеоконтинента, повторно причлененный к его северной (в современных координатах) окраине на конечной стадии байкальского тектоно-магматического цикла;

- *Баренцевская складчатая область*, классифицированная как геоструктура, сформированная в ходе гренвильской эпохи тектогенеза;

- *Тимано-Печорская складчатая система*, сформированная вдоль границы палеоплиты Балтия в ходе байкальского тектогенеза и включающая ее пассивную окраину, Верхне-Печорскую сутурную зону и Большеземельский мегаблок (палеоплиту) с корой континентального типа;

- *Уральская и Центрально-Западно-Сибирская складчатые области* - коллизионные орогены, сформированные в зонах столкновения Балтии, Казахстанской и Сибирского палеоконтинентов в конце герцинского тектоно-магматического цикла;

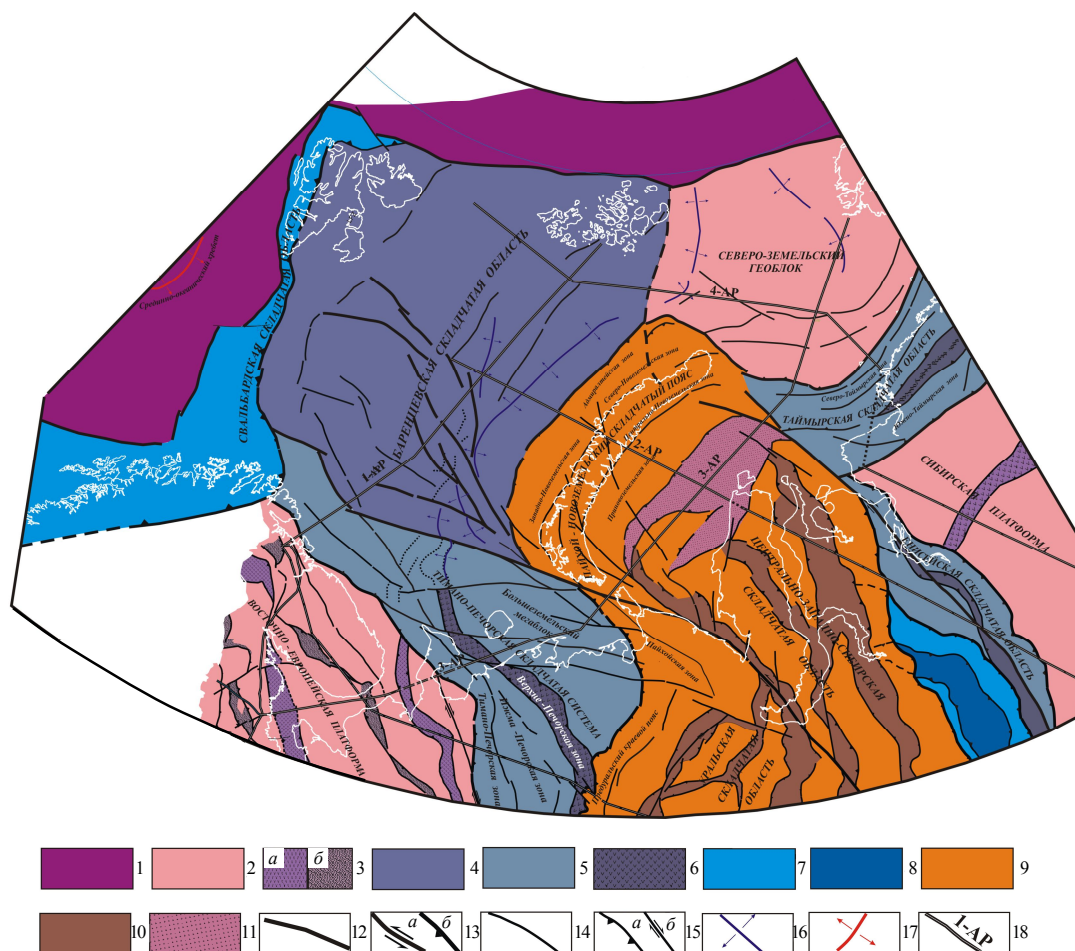


Рис.6. Карта глубинного строения консолидированного фундамента Баренцево-Карского шельфа и прилегающих частей евразийского континента (с упрощениями)

1-11 – структурно-вещественные подразделения литосферы: 1 – литосфера океанического типа, 2, 3 – древние платформы (2 – блоки, 3 – межблоковые сутурные (а) и рифтогенные (б) зоны), 4 – блоки гренвильской складчатой области, 5, 6 – байкальские складчатые области (5 – блоки, 6 – межблоковые сутурные зоны), 7, 8 – каледонская складчатая область (7 – блоки, 8 – межблоковые сутурные зоны), 9, 10 – нерасчлененные герцинские и киммерийские складчатые области (9 – блоки, 10 – межблоковые сутурные зоны), 11 – реликтовый океанический бассейн; 12-15 – разрывные нарушения: 12 – главные глубинные, в том числе сдвиговые (13а) и надвиговые (13б); 14, 15 – разрывные нарушения второго ранга (в том числе надвиговые границы сутурных зон (15а) и сдвиги (15б); 16 – оси рифтогенных трогов; 17 – срединно-океанический хребет; 18 – геотравессы Баренцево-Карского региона и увязанные с ними континентальные геотравессы

– *Пайхой-Новоземельская складчатая область*, формирование которой относится к финальной стадии закрытия северной ветви Азиатского палеоокеана в начале мезозойской эры;

– структуры северного фланга *Алтае-Саянской и Енисейской складчатых областей*, составляющие, соответственно, эпикаледонское и эпибайкальское складчатые обрамления Сибирского палеоконтинента и представленные палеомикроплитами, сутурными зонами и деформированными окраинами этого палеоконтинента;

– *Таймырская складчатая область*, главные орогенные события которой произошли в эпоху эпибайкальского тектогенеза; позднепалеозойские сдвиговые и складчато-надвиговые дислокации имеют здесь характер внутриплитных деформаций.

Интегральная карта глубинного строения земной коры отражает строение чехла и фундамента. Главным назначением этой перегруженной карты является сопоставление параметров осадочного чехла и консолидированного фундамента.

Разрезы земной коры в сечениях опорных геофизических профилей (геотравессов) отображают главные особенности глубинного строения геоструктур земной коры платформ и складчатых областей [3, 9]. По акватории Баренцево-Карского региона такие разрезы выполнены вдоль линий четырех опорных геофизических профилей АР-1, АР-2, АР-3 и АР-4. Центральный фрагмент профиля АР-2 отражает особенности глубинного строения Пайхой-Новоземельской

складчатой области и структур ее обрамления. Базовой информацией при изучении складчато-надвиговых дислокаций Пайхой-Новоземельской складчатой области являлись детальные данные сейсморазведки МОВ, геологическая переинтерпретация которых в сочетании с данными сейсмотомографии и обработки потенциальных полей позволила не только обосновать общую структуру надвиговых деформаций, но и оценить амплитуды смещений вдоль главных плоскостей разрыва.

Этот разрез свидетельствует о том, что разрезы осадочных толщ восточного фланга Северо-Баренцевской впадины и западного фланга Пайхой-Новоземельской складчатой области имеют сходные последовательности и мощности слоев, что свидетельствует об их длительном развитии в единых условиях. Различия в их строении обусловлены проявлением раннемезозойских аккреционных процессов на финальном этапе закрытия Палеоазиатского океана, которые привели к интенсивным деформациям и выведению на дневную поверхность восточного (в современных координатах) фланга депрессии, включаемого ныне в состав Пайхой-Новоземельской складчатой области. Обращает на себя внимание тот факт, что интенсивность деформаций в пределах складчатой области убывает от Адмиралтейской и Центрально-Новоземельской зон в направлении Южно-Карского бассейна.

В разрезе Приновоземельского блока складчато-надвиговые деформации не выделяются. Здесь моделируется проявление лишь рифтогенных процессов (рис.7).

В пределах акватории Карского бассейна под мезозойско-кайнозойскими осадками Южно-Карской впадины нами выделяется Карский остаточный бассейн с корой океанического типа [1], при моделировании неоднородностей которой нами были использованы параметры сейсмотомографического разреза.

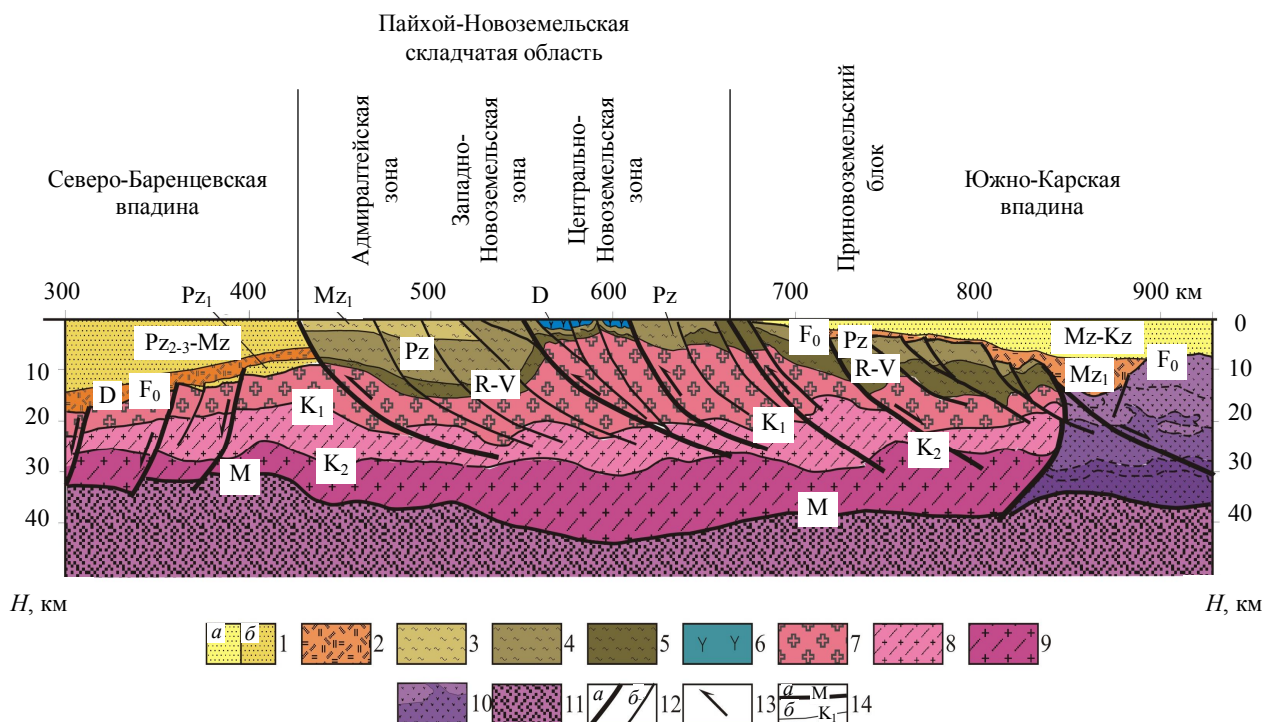


Рис.7. Глубинный разрез земной коры Пайхой-Новоземельской складчатой области и смежных структур вдоль восточного фрагмента опорного геофизического профиля 2-АР

1-10 – структурно-вещественные подразделения земной коры: 1 – осадки внутриплитных бассейнов (а – мезозойско-кайнозойского возраста, б – палеозойско-мезозойского возраста), 2 – рифтогенные комплексы, 3-5 – осадки древних пассивных континентальных окраин и чехлов микроплит мезозойского (3), палеозойского (4) и рифейского (5) возрастов, 6 – вулканогенные и осадочные образования древних активных континентальных окраин, 7-9 – слои кристаллической коры, выделенные по значениям скорости продольных волн V_p : 7 – верхняя кора – «гранитно-метаморфический слой», $V_p = 6,0 \div 6,4$ км/с, 8 – средняя кора, $V_p = 6,5 \div 6,8$ км/с, 9 – нижняя кора, $V_p = 6,8 \div 7,2$ км/с, 10 – океаническая кора Южно-Карской впадины, дифференцированная по данным сейсмотомографического моделирования (изолинии – границы скоростей продольных волн); 11 – структурно-вещественные подразделения верхней мантии; 12 – разрывные нарушения земной коры (а – главные, б – второстепенные); 13 – тренды перемещения блоков земной коры вдоль разрывных нарушений; 14 – главные (а) границы радиальной расслоенности земной коры (F_0 – подошва вулканогенно-осадочного слаблитифицированного слоя, М – подошва земной коры (граница Мохоровичича)) и прочие (б) границы радиальной расслоенности земной коры (в том числе K_1 – подошва верхней коры, K_2 – подошва средней коры)

Составление взаимоувязанных и выполненных в единой системе условных обозначений карт глубинного строения и глубинных геолого-геофизических разрезов позволяет получить принципиально новую информацию об особенностях строения, тектоники и геодинамики изучаемых регионов. Результирующие картографические документы рассматриваются в качестве разновидности тектонических моделей, которые содержат информацию о строении платформенного чехла и консолидированного фундамента.

Научно-методический подход к оценке перспектив нефтегазоносности континентального шельфа на основе изучения закономерностей локализации месторождений полезных ископаемых с использованием выявленных параметров глубинного строения и исторических вех тектонической истории региона позволяет выделить новые факторы (критерии) нефтегазоносности недр и задействовать их в прогнозно-минерагенических построениях с использованием алгоритмов распознавания образов.

В результате проведенного анализа всей суммы геолого-геофизических данных для Баренцево-Карского региона были выделены три группы наиболее значимых критериев (факторов) нефтегазоносности: литолого-стратиграфические, геохимические и тектонические.

Литолого-стратиграфические критерии лучше всего фиксируются на палеогеографических реконструкциях, выполненных в виде набора литолого-палеогеографических карт, отражающих основные этапы структурных перестроек и формирования осадочного чехла в разные этапы развития региона. На картах также показаны источники сноса обломочного материала и условия осадконакопления, в том числе рифообразование.

Группа *геохимических критериев*, особенно данные о катагенетическом преобразовании органического вещества пород, позволяют сделать выводы о распространении нефтегазоматеринских свит и их генерационном потенциале. Особое значение для качественного прогноза имеет картирование предполагаемых областей распространения битуминозных пород в позднем девоне

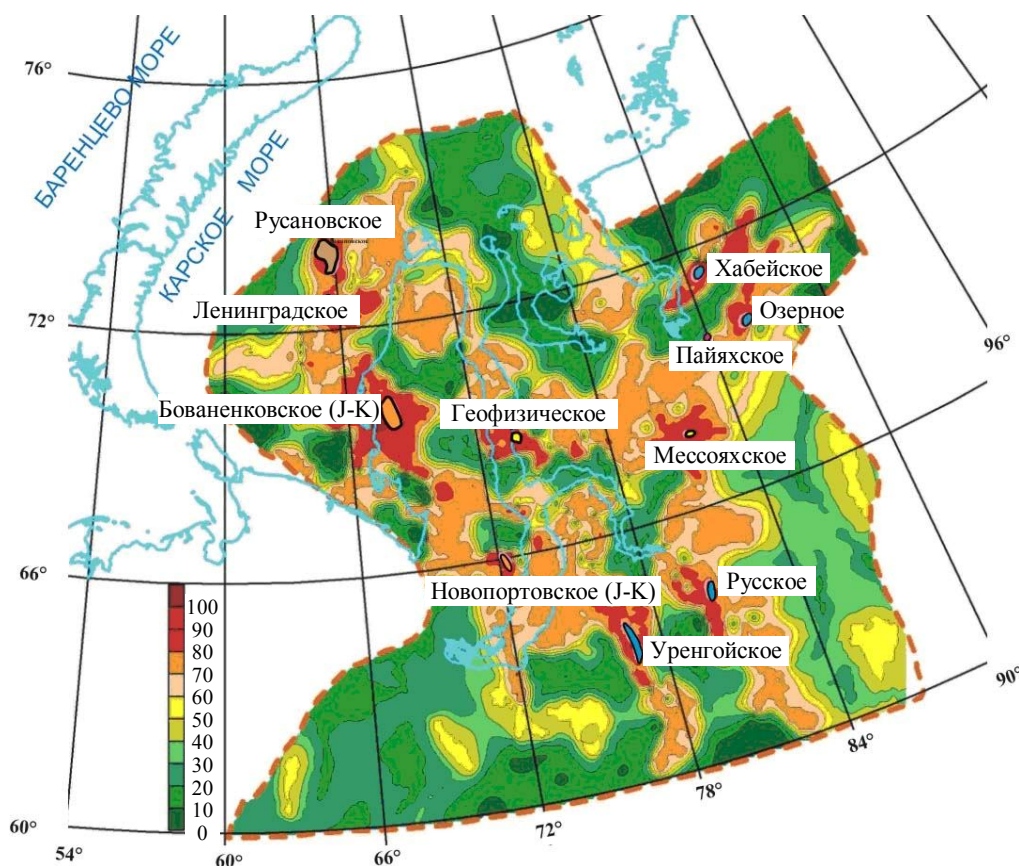


Рис.8. Интегральное прогнозное решение задачи распознавания образов по территории Западно-Сибирской и Хатангско-Виллойской нефтегазовых провинций с использованием в качестве объектов обучения 11 промышленных объектов (цветовая гамма отображает вероятность обнаружения объектов, идентичных объектам эталонной выборки)



(а в районе архипелага Сев. Земля и в раннем девоне), перми, среднем триасе и поздней юре относительно глубоководных терригенных и терригенно-карбонатных толщ мощностью первые сотни метров, которые по условиям катагенеза находятся в нефтяном окне. Исключение составляет термически незрелая позднеюрская свита, а также позднедевонские и пермские толщи, образующие очаги генерации жидких углеводородов лишь в юго-западных районах Баренцева моря, что было нами подтверждено схемами катагенеза пород верхнего палеозоя, триаса, юры и мела.

Высоко информативными, безусловно, являются *тектонические критерии* нефтегазоносности, особенно в процессах формирования осадочного бассейна и его дальнейших перестроек. Как уже упоминалось выше, комплексирование различных методов (МПВ-ГСЗ, МОВ-ОГТ и др.) и использование современных компьютерных технологий обработки данных позволяют составить объемную сейсмогеологическую модель строения всего региона, выделить структурно-формационные комплексы в так называемом койлогенном мезокайнозойском, промежуточном синрифтовом комплексе осадочного чехла, а с учетом прослеживания сейсмических границ в нижней части земной коры также определить природу и мощность этой коры, выделить блоки с аномально высокой мощностью осадочного чехла [8].

Метод аналогии, традиционно используемый в прогнозно-минерагенических исследованиях, в последние десятилетия активно применяется в решении задач многофакторного прогнозирования с использованием алгоритмов распознавания образов с обучением [6]. В качестве объектов обучения задаются эталонные объекты, т.е. объекты, о которых известно, к какому классу заданной классификации они относятся. По эталонным объектам на этапе обучения строится решающее правило, с помощью которого для остальных объектов на этапе распознавания дается прогноз, т.е. оцениваются значения некоторых функций, характеризующих близость каждого объекта к каждой эталонной выборке.

На основе анализа типов месторождений углеводородов Западно-Сибирской нефтегазовой провинции и закономерностей их локализации относительно структур консолидированного фундамента и платформенного чехла нами было намечено семь месторождений, которые рассматривались в качестве объектов обучения. Кроме того, аналогичные построения выполнены в отношении четырех объектов, расположенных на западном фланге Хатангского прогиба Хатангско-Вилуйской нефтегазовой провинции (рис.8).

Рассмотрение полученного решения на площади северной части Западно-Сибирской нефтегазовой провинции свидетельствует о широком ареале распределения перспективных площадей осадочного бассейна.

Заключение. Исследования глубинного строения земной коры регионов российской Арктики и евразийского континента рекомендуется выполнять с учетом следующих принципов:

- алгоритм обработки и геологической интерпретации комплекса геофизических данных включает различные трансформации полей, способы решения прямых и обратных задач, статистические способы, технологии безэталонной классификации и распознавания образов с обучением, применяемые для цифровых данных по площади, вертикальных сечений и трехмерного геологического пространства;

- карты и разрезы глубинного строения рассматриваются как документы тектонического содержания, выполняются по единой научно-теоретической методике с использованием унифицированной системы условных обозначений и увязываются по смысловым и формальным параметрам;

- при построении карт глубинного строения реализуется послойный подход, предусматривающий раздельное картографическое отображение особенностей строения платформенного чехла и консолидированного фундамента;

- послойные карты глубинного строения рассматриваются в качестве составных частей трехмерной геотектонической модели региона исследований;

- необходимой составляющей этих научных исследований является развитие научных знаний об истории формирования глубинных недр Земли, представляемыми в форме палинспастических и палеогеографических схем и разрезов, историко-генетических моделей и др.

С учетом методического опыта выполненных работ можно говорить о том, что для построения карт и разрезов глубинного строения земной коры, предусмотренных программами государственного геологического картирования масштабов 1:1000 000 и 1:200 000, в каждом случае исполнителям приходится обобщать и анализировать громадные объемы разнотипной геологиче-



ской информации, выполнять обработку геофизических полей с использованием современных программно-математических аппаратов разных типов и свободно владеть инструментами тектоники и геодинамики. В рамках отдельного геологического задания – это на высоком профессиональном уровне невыполнимо и полученные разными авторскими коллективами результаты будут несопоставимы.

Решение этой логистической проблемы видится в разработке «Дежурной карты глубинного строения (геотектонического содержания), сопровождаемой системой опорных разрезов земной коры (геотраверсов)» которая в оперативном режиме пополняется новыми данными составляемых листов Госгеолкарты-1000 и -200 и, в свою очередь, обеспечивает эти листы необходимыми картами и разрезами. Тем самым обеспечивается увязка структурно-вещественных параметров смежных листов.

Выполнение такого типа совместных научных исследований ВСЕГЕИ и Горного университета будет способствовать возрождению традиции тесного сотрудничества этих старейших в геологической службе страны организаций и задаче развития нашей общей школы картографии, созданной горняками-геолкомовцами Г.П.Гельмерсеном, А.П.Карпинским, И.В.Мушкетовым и другими выдающимися геологами

ЛИТЕРАТУРА

1. *Аплонов С.В.* Остаточные океанические бассейны / С.В.Аплонов, В.И.Устрицкий // ДАН СССР. 1991. Т. 316. № 2. С. 425-428.
2. Глубинное строение Баренцево-Карского региона / И.Ю.Винокуров, А.П.Каленич, А.С.Егоров, А.И.Атаков, И.Ф.Кузнецова // Разведка и охрана недр. 2011. № 10. С. 23-30.
3. Государственная сеть опорных геолого-геофизических профилей, параметрических и сверхглубоких скважин – основа глубинного 3D-картографирования территории Российской Федерации и ее континентального шельфа / С.Н.Кашубин, Е.Д.Мильштейн, И.Ю.Винокуров, Ю.М.Эринчек, Р.Б.Сержантов, В.Ю.Татаринев // Региональная геология и металлогения. 2016. № 67. С. 43-48.
4. *Егоров А.С.* Глубинное строение и геодинамика литосферы Северной Евразии (по результатам геолого-геофизического моделирования вдоль геотраверсов России). СПб: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. 200 с. (МПР РФ, ВСЕГЕИ).
5. *Егоров А.С.* Структурные и петрофизические характеристики внутриплитных геодинамических обстановок Баренцево-морско-Карского региона и северной окраины Евразийского континента / А.С.Егоров, О.Ю.Смирнов // Записки Горного института. 2012. Т. 197. С. 50-59.
6. *Ломтадзе В.В.* Программное и информационное обеспечение геофизических исследований. М.: Недра, 1993. 268 с.
7. Новая Земля и остров Вайгач. Геологическое строение и минерагения / А.П.Каленич, В.В.Орго, Н.Н.Соболев, В.И.Бондарев, Ю.П.Семенов, Е.Е.Мусатов; Под научн. ред. Ю.Е.Погребницкого. СПб: ВНИИОкеангеология, 2004. 174 с.
8. Проблемы регионального геологического изучения континентального шельфа РФ / Ю.И.Матвеев, М.Ю.Шкатов, И.Ю.Винокуров, А.Ф.Морозов, П.А.Хлебников, Ю.М.Эринчек, С.Н.Кашубин, О.И.Супруненко // Разведка и охрана недр. 2011. № 10. С. 6-10.
9. Состав и содержание карты глубинного строения в Госгеолкарте-1000/3. Основные подходы / Ю.М.Эринчек, С.Н.Кашубин, Е.Д.Мильштейн, В.Н.Мухин // Региональная геология и металлогения. 2007. № 33. С. 65-67.
10. *Сурков В.С.* Фундамент и развитие платформенного чехла Западно-Сибирской плиты / В.С.Сурков, О.Г.Жеро. М.: Недра, 1981. 143 с.
11. *Bjørlykke Arne.* Den platetektoniske syklusen. Oslo: GeoPublishing AS, 2007. 120 s.

Авторы: **А.С.Егоров**, д-р геол.-минерал. наук, заведующий кафедрой, asegorov@spti.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), **И.Ю.Винокуров**, канд. геол.-минерал. наук, заместитель заведующего отделом, iyu_vinokurov@vsegei.ru (ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П.Карпинского (ВСЕГЕИ)», Санкт-Петербург, Россия), **А.Н.Телегин**, д-р геол.-минерал. наук, профессор, telegin@spti.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Статья поступила в редакцию 31.05.2017

Статья принята к публикации 27.04.2018.



УДК 550.834

МНОВОВАРИАНТНОСТЬ СКОРОСТНОЙ МОДЕЛИ В ЗАДАЧЕ СТРУКТУРНЫХ ПОСТРОЕНИЙ ПО СЕЙСМИЧЕСКИМ И СКВАЖИННЫМ ДАННЫМ

А.П.СЫСОЕВ

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

В работе обсуждаются особенности решения задачи структурных построений (прогноза глубин отражающих горизонтов) по системе сейсмических и скважинных данных. Сейсмические данные представлены значениями вертикального времени и скоростью суммирования, данные скважин – отметками глубины отражающих горизонтов. Вертикальное время и глубина отражающих горизонтов связаны уравнением средней скорости, но значение средней скорости не определяется в сейсмическом эксперименте, поэтому возникает задача подбора скоростной модели сложного природного объекта. Задача структурных построений решается подбором формальных конструкций, в которых находят корреляционные зависимости между параметрами глубинной модели среды и кинематическими параметрами волнового поля. Оптимальное решение задачи подбора модели определяется по минимальному расхождению прогнозных и фактических значений глубины по выборке скважин. На конкретном практическом примере представлены возможные варианты интерпретационной модели.

Обратная кинематическая задача в формате преобразования вертикального времени отраженных волн в глубину горизонтов решается в каждом производственном отчете по результатам сейсморазведочных работ и, вероятно, является наиболее распространенной задачей сейсморазведки. В силу многообразия объектов исследования и кажущейся очевидности решения эта тема слабо представлена в научной литературе.

Ключевые слова: метод отраженных волн; кинематическая интерпретация; скоростная модель; скорости суммирования

Как цитировать эту статью: Сысоев А.П. Многовариантность скоростной модели в задаче структурных построений по сейсмическим и скважинным данным // Записки Горного института. 2018. Т. 233. С. 459-470. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.459

Введение. С момента становления метода отраженных волн (МОВ) и по настоящее время структурные карты геологических границ являются необходимым и важнейшим результатом сейсмических исследований. Успехи решения задач структурной геологии определяются однозначным соответствием геологических объектов с событиями волнового поля, которые связаны между собой уравнениями геометрической сейсмики. Неизвестными в задаче структурных построений являются два типа параметров среды: скоростная модель и глубина точек отражения.

Пусть для нескольких отражающих горизонтов задана совокупность годографов отраженных волн. Для этой системы данных определим толстослоистую модель среды и способ решения прямой кинематической задачи. Задача структурной интерпретации состоит в оценке параметров структурно-скоростной модели среды на основе минимизации функционала, описывающего расхождение модельных и реальных годографов отраженных волн. В такой постановке в 80-е годы прошедшего столетия была реализована система кинематической интерпретации годографов КИНГ [5]. Задача подбора параметров глубинно-скоростной модели решалась на базе больших ЭВМ при полном отсутствии графических средств контроля решения и интерактива.

В принципе в этой же постановке, но уже на новом техническом уровне решается задача подбора параметров структурно-скоростной модели среды для глубинной миграции до суммирования по 3D-данным. Отметим, что задачи на поиск минимума всегда имеют решение, но для того, чтобы решение удовлетворяло априорным данным (отметкам глубин отражающих горизонтов – ОГ, заданным в точках глубоких скважин), в пластовую модель среды вводят формальные параметры, учитывающие «анизотропию» скоростей. Но даже при значительном усложнении модели среды результаты глубинной миграции представляются не в глубинном, а во временном масштабе, поскольку при обработке сейсмических данных вопросы полного согласования сейсмических и скважинных данных пока не имеют удовлетворительного решения [6, 8]. Это обстоятельство определяет актуальность анализа проблемы структурных построений на этапе интерпретации сейсмических данных.

В прикладных задачах структурной интерпретации рассматриваются два кинематических параметра годографа общей срединной точки: вертикальное время t_0 и скорость суммирования v_s . Кинематические параметры (временные разрезы амплитуд отраженных волн и разрезы скоростей суммирования) получают в процессе цифровой обработки сейсмических данных, а параметр t_0

появляется как результат фазовой корреляции амплитуд отражений. Будем считать, что результат фазовой корреляции определяется однозначно по временным разрезам амплитуд, поэтому два кинематических параметра являются результатом обработки сейсмических данных.

Принимается, что вертикальное время t_0 описывает время прохождения луча по вертикали от линии приведения сейсмических наблюдений до отражающей границы и обратно без учета преломления лучей на границах раздела скоростной модели среды. Линия приведения может быть определена выше поверхности наблюдения – в этом случае в модель среды вводится фиктивный слой с заданной скоростью. Кроме того, в задачах компенсации латеральной неоднородности верхней части разреза выполняются процедуры замещения скоростей – изменение структуры и параметров скоростной модели среды и, соответственно, изменение вертикального времени отраженных волн.

В общем случае вертикальное время и эффективная скорость отраженных волн являются не результатом измерения параметров волнового поля в ходе выполнения натурного эксперимента, а представляют результат реконструкции поля на основе уравнений, описывающих распространение волн для определенной модели среды. Так, если переменный рельеф дневной поверхности компенсируется статическими поправками, то возникают искажения скорости суммирования, обусловленные ограничениями этого способа преобразования. Эффект искажения скорости отраженных волн возникает при компенсации статическими поправками погруженных неоднородностей разреза типа многолетнемерзлых пород. Следует также отметить широко известный факт искажения вертикального времени и эффективной скорости, обусловленный погрешностью определения низкочастотных статических поправок [7].

Даже без учета указанных факторов значения эффективной скорости соответствуют средней скорости только для однородной скоростной модели среды. Для реальных сред всегда имеет место вертикальный градиент скорости, поэтому различие между средними и эффективными скоростями нарастает с увеличением глубины ОГ. Для иллюстрации рассмотрим пример по материалам Томской области. Здесь в точках скважин по данным геоинформационной системы определены значения глубин опорного горизонта Б (кровля баженовской свиты) и в этих же точках по результатам сейсмических работ найдены вертикальное время и скорость суммирования v_s отраженной волны. Полученные данные позволяют выполнить сравнительный анализ значений средней и эффективной скорости. Средние значения по выборке составили для средней скорости 2511 м/с, для скорости суммирования – 2721 м/с (рис.1, а). Не существует аналитической формулы пересчета эффективной скорости в среднюю. Применение формул Урупова – Дикса для расчета интервальных скоростей с последующей оценкой значений средней скорости уменьшает различие между значениями скоростей, но не решает проблему полностью. Можно считать, что эффективная скорость (или скорость суммирования) является в задачах интерпретации атрибутом волнового поля, только корреляционно связанным с целевым параметром – средней скоростью до отражающих горизонтов.

Из анализа графиков скоростей следует, что различие между двумя последовательностями не описывается постоянным значением, т.е. мы не можем для приведения скорости суммирова-

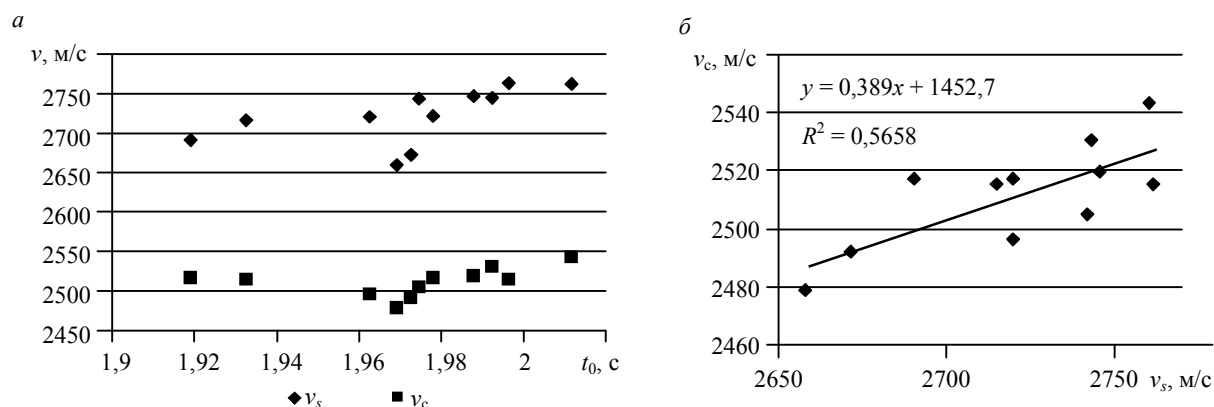


Рис.1. Соотношение средних v_s и эффективных v_e скоростей по горизонту Б

ния к средней использовать уравнение вида $v_c = v_s - a$. Также неудовлетворительно зависимость скоростей описывается уравнением вида $v_c = av_s$. Непротиворечивое описание распределения $v_c(v_s)$ получено уравнением линейной регрессии (рис.1, б).

Определение задачи структурных построений. Следуя представлению С.В.Гольдина, задачу определения глубины отражающего горизонта можно представить следующим образом [2]. Пусть D – область исследования в плоскости (x, y) . Будем считать, что в любой точке $M(x, y)$ определены параметры $t_0(M)$ и $v_s(M)$ – вертикальное время и эффективная скорость отраженной волны, являющиеся однозначными функциями переменной M . Глубина горизонта определяется уравнением

$$h(M) = t_0(M)v_c(M)/2,$$

где $v_c(M)$ – средняя скорость до отражающей границы.

Для определения неизвестного параметра $v_c(M)$ можно рассмотреть два варианта решения. Соотнесем значение средней скорости в точке M со значением: а) вертикального времени $v_c(M) = f(t_0(M))$; б) эффективной скорости $v_c(M) = f(v_s(M))$.

В результате получим две постановки задачи структурных построений. В первом случае прогноз выполняется только по вертикальному времени отраженных волн, во втором исходными данными являются вертикальное время и эффективная скорость (скорость суммирования) отраженных волн.

Конкретная постановка задачи характеризуется определенной структурой исходных данных и моделью, связывающей неизвестные параметры с исходными данными. Исходные данные для рассматриваемой задачи включают скважинную и сейсмическую информацию: 1) скважинная информация – глубина и координаты пластопересечений целевых горизонтов; 2) сейсмическая информация – время слежения отражающих горизонтов и скорость суммирования ОГ.

Требуется выполнить: 1) прогноз поверхности, описывающей глубину целевого горизонта в пределах площади исследования; 2) оценку погрешности прогноза.

Особые условия: прогнозные значения глубины в точках пластопересечения должны точно совпадать с отбивками глубины в скважинах, если не доказана необходимость учета погрешности скважинных данных.

Графики сейсмокаротажа глубоких скважин также имеют непосредственное отношение к задаче структурных построений. Учет вертикальных годографов сейсмокаротажа представляет отдельный вариант задачи построения трехмерной скоростной модели среды, рассмотренный в работе [4].

Задача прогнозирования. Для оценки глубины сейсмического горизонта необходимо определить зависимость между переменными временного поля (вертикальное время t_0 , скорость суммирования v_s) и прогнозируемыми параметрами (глубина h или средняя скорость v_c). Решение задачи прогноза разделим на четыре этапа.

1. Формирование обучающей выборки. Поскольку значения глубины заданы только в точках скважин, для получения обучающей выборки необходимо определить в этих точках значения сейсмических параметров. Дополнительно по значениям глубины и вертикального времени в точках скважин можно рассчитать значения средних скоростей: $v_c = 2h/t_0$.

2. Подбор модели. Для решения задачи необходимо определить, как минимум, одну скоростную модель среды, связывающую кинематические параметры отраженных волн со средней скоростью либо непосредственно глубиной горизонтов. Оценка параметров модели выполняется минимизацией значения функции, описывающей отклонение прогнозных и фактических глубин в точках скважин. Также допустима постановка задачи подбора параметров модели, в которой минимизируется отклонение прогнозного и наблюдаемого времени.

3. Расчет параметров глубинно-скоростной модели среды в области определения сейсмических данных.

4. Согласование прогнозных и фактических значений глубины в точках скважин (разброс невязок).

Обоснование линейной зависимости глубины от вертикального времени ОГ. Уравнение линейной регрессии наиболее часто применяется при анализе зависимости «глубина – время»

отражающего горизонта. Покажем, что эта формальная конструкция физически содержательна для описания определенного типа структурной модели среды.

Пусть в K скважинах известны глубина h и значение вертикального времени t_0 . Определим зависимость глубины и вертикального времени уравнением линейной регрессии

$$h = at_0 + b. \quad (1)$$

Отметим, что для вертикального годографа сейсмического каротажа (СК) зависимость $h(t)$ определяется непрерывной возрастающей функцией, которая допускает кусочно-линейную аппроксимацию, соответствующую пластовой модели среды. Следовательно, для данных СК представление зависимости «время – глубина» уравнением линейной регрессии в пределах однородного пласта обоснованно.

Уравнение (1) представляет однозначную зависимость глубины от времени отражения. Следуя [1] продифференцируем функцию по t_0 :

$$\frac{dh}{dt_0} = a = \text{const}. \quad (2)$$

Параметр a характеризует скорость изменения глубины границы от вертикального времени. Для краткости этот параметр будем называть «градиентом» линейной функции (1). Для слоистой модели среды с постоянными скоростями слоев ($h(x) = \sum h_i(x)$; $t_0(x) = 2\sum h_i(x)/v_i$) градиент определяется выражением

$$\frac{dh}{dt_0} = \frac{dh}{dx} \frac{dx}{dt_0} = \frac{dh}{dx} \bigg/ \frac{dt_0}{dx} = \sum_i \frac{dh_i}{dx} \bigg/ \sum_i \frac{2dh_i}{v_i dx}. \quad (3)$$

Нетрудно показать, что выражение (3) имеет постоянное значение, если мощности слоев определяются линейно зависимыми функциями вида

$$h_i(x) = d_i f(x) + c_i$$

с произвольными коэффициентами d_i , c_i . Тогда

$$\frac{dh}{dt_0} = \sum_i d_i \bigg/ \sum_i \frac{2d_i}{v_i} = a = \text{const}. \quad (4)$$

Рассмотрим частный случай – двухслойную модель, где мощности двух слоев с постоянной скоростью описываются произвольными функциями координаты профиля:

$$h_1(x) = d_1 f(x) + c_1; \quad h_2(x) = d_2 f(x) + c_2.$$

Соответственно, глубина и вертикальное время для нижней границы определяются выражениями:

$$\begin{aligned} h(x) &= (d_1 + d_2)f(x) + (c_1 + c_2); \\ t_0(x) &= 2((d_1/v_1 + d_2/v_2)f(x) + (c_1/v_1 + c_2/v_2)). \end{aligned} \quad (5)$$

Уравнение (4) приводится к виду

$$\frac{dh}{dt_0} = 0,5(d_1 + d_2)/(d_1/v_1 + d_2/v_2) = a = \text{const}.$$

Из полученного выражения (5) следует, что зависимость $h(t_0)$ может быть возрастающей ($a > 0$), убывающей ($a < 0$) и постоянной ($a = 0$) функцией вертикального времени.

Выразим значение градиента a как функцию коэффициента k , характеризующего отношение мощностей слоев глубинной модели среды:

$$k = d_2/d_1, \Rightarrow a = \frac{1+k}{2(1/v_1 + k/v_2)}. \quad (6)$$

Положительное значение коэффициента k соответствует прямой линейной зависимости между мощностями слоев, отрицательное – обратной. Прямая зависимость отражает унаследованное развитие толщ, обратная зависимость не имеет простого геологического истолкования, но в принципе интересна для формального анализа. График зависимости $a(k)$ для двухслойной среды с пластовыми скоростями $v_1 = 2000$ м/с, $v_2 = 3000$ м/с представлен на рис.2.

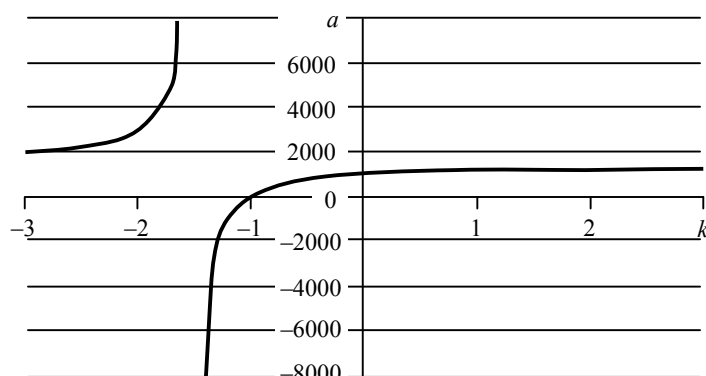


Рис.2. График зависимости градиента a от отношения $k = d_2/d_1$ параметров глубинной модели

Отметим следующие особенности:

1. В точке $k = -1,5$ график функции имеет разрыв $\pm \infty$, здесь знаменатель выражения (6) равен нулю:

$$1/v_1 + k/v_2 = 0, \Rightarrow k = -v_2/v_1, \Rightarrow k = d_2/d_1 = -v_2/v_1, \Rightarrow d_2 = -d_1 v_2/v_1.$$

Подставив выражение для d_2 в уравнения (5), определим, что точка разрыва соответствует переменной глубине ОГ при постоянном значении вертикального времени отражающего горизонта (рис.3):

$$h(x) = d_1(1 + d_2 v_2/v_1)f(x) + (c_1 + c_2);$$

$$t_0(x) = 2(c_1/v_1 + c_2/v_2) = \text{const}.$$

Резкое изменение графика в окрестности точки разрыва $k = -v_2/v_1$ определяется сколько угодно большим изменением глубины при малом изменении вертикального времени.

2. Градиент a равен нулю в точке $k = -1$, что соответствует отношению $d_2 = -d_1$. Из уравнений (5) получим, что значение $a = 0$ соответствует постоянной глубине при переменном значении вертикального времени (рис.4).

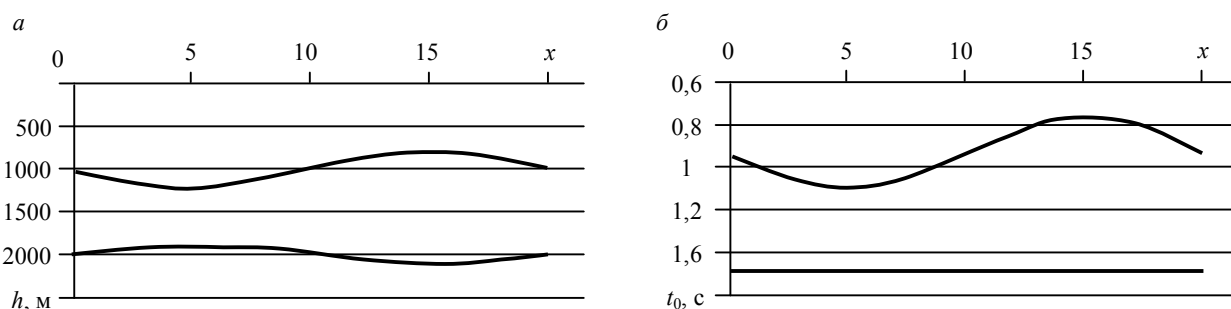


Рис.3. Глубинная модель при $k = -v_2/v_1$ (а) и графики вертикального времени ОГ (б)

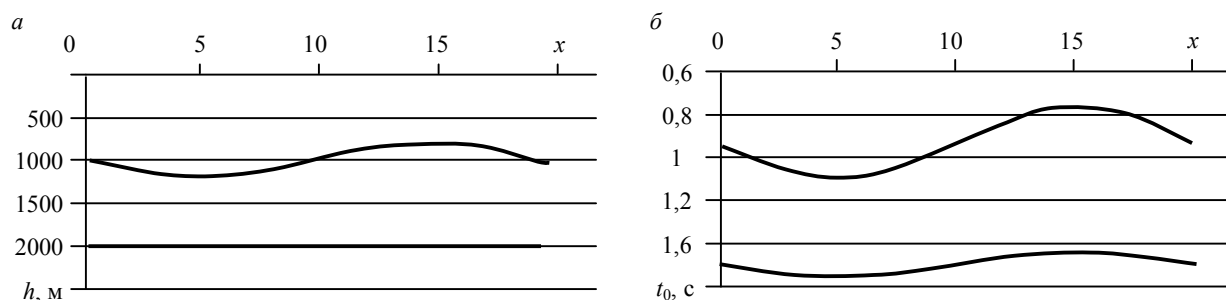


Рис.4. Глубинная модель при $k = -1$ (а) и графики вертикального времени ОГ (б)

3. В диапазоне $-1,5 < k < -1$ градиент a принимает отрицательное значение, что соответствует уменьшению глубины с увеличением вертикального времени ОГ (рис.5).

4. Точка пересечения оси ординат ($k = 0$) соответствует постоянной мощности второго слоя. Значение градиента $a = v_1 / 2 = 1000$ м/с определяется скоростью первого слоя (рис.6).

5. Асимптотика $a(k \rightarrow \pm\infty) \rightarrow v_2 / 2 = 1500$ м/с соответствует модели, в которой изменение мощности первого слоя мало, сравнительно с вариацией мощности второго (рис.7). В пределе этому варианту модели соответствует постоянная мощность первого слоя.

В заключение этого раздела рассмотрим модель среды со слабо выраженной зависимостью мощности слоев. Линейная зависимость $h(t_0)$ определяется, но проявляются отклонения значений глубины от линии регрессии (рис.8), интерпретируемые как ошибки прогноза.

По результатам модельных экспериментов можно сделать вывод, что уравнению линейной зависимости между глубиной и вертикальным временем отражения соответствует в общем случае многослойная модель среды с линейной связью между мощностями слоев. Признаком этого

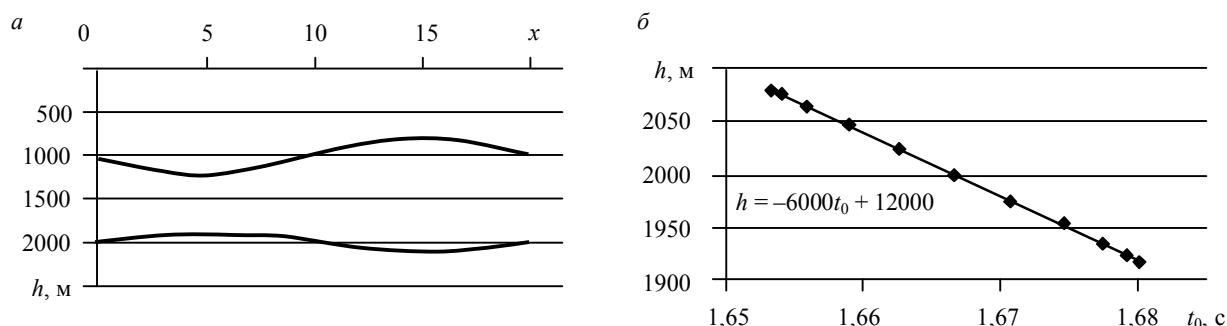


Рис.5. Глубинная модель при $k = -1,4$ (а) и график зависимости $h(t_0)$ (б)

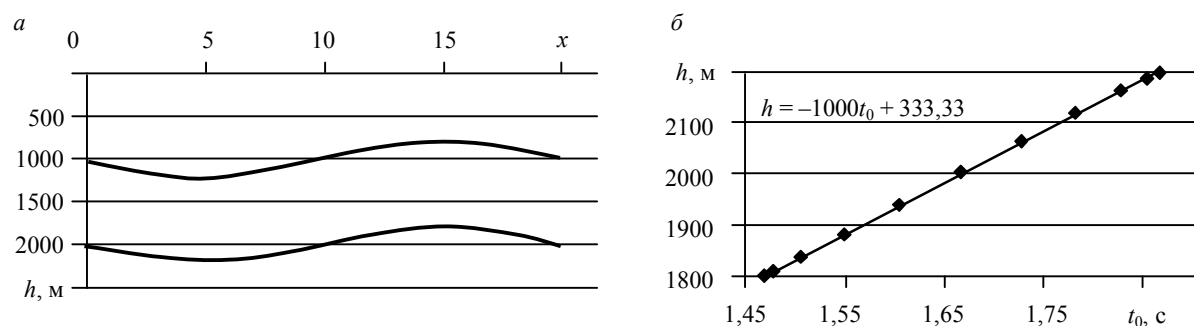


Рис.6. Глубинная модель при $k = 0$ (а) и график зависимости $h(t_0)$ (б)

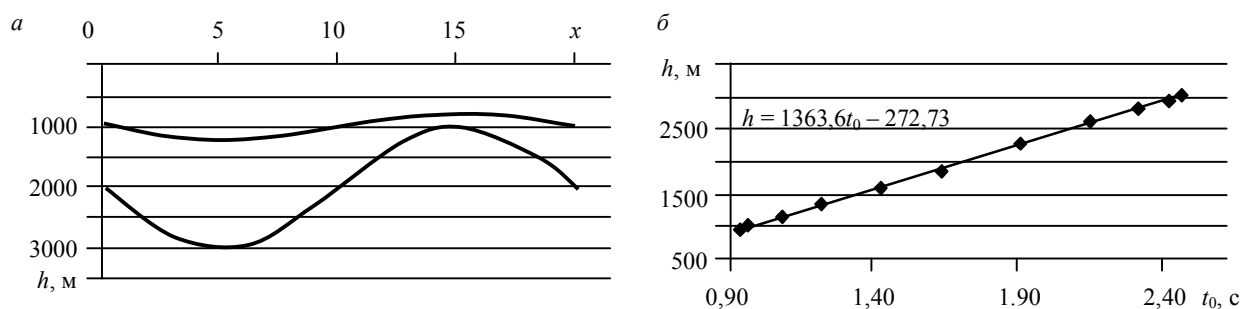


Рис.7. Глубинная модель при $k = 4$ (а) и график зависимости $h(t_0)$ (б)

типа моделей может служить линейная зависимость между интервальными мощностями или значениями времени отражающих горизонтов.

Подбор интерпретационной модели. Варианты подбора скоростной модели проиллюстрируем на примере обучающей выборки по одной из площадей Томской области. Здесь в 11 скважинах глубокого бурения определены значения вертикального времени и отбивок глубин горизонтов с условными индексами Г, Б. Значения времени ОГ, упорядоченные по возрастанию второй переменной, представлены на рис.9. Для целевого горизонта Б также определены значения скоростей суммирования, представленные на рис.2.

На первом этапе анализа предположим, что в K точках скважин известен прогнозируемый параметр h_k , значение переменной t_{0k} и расчетное значение средней скорости v_k для горизонта Б. Даже для этой простой системы данных можно предложить несколько вариантов глубинно-скоростной модели среды.

1. Распределение средней скорости $v(x)$ по площади исследования можно получить интерполяцией значений средней скорости, рассчитанных в точках скважин.

2. Значение скорости определяется как функция вертикального времени отражения: $v(x) = f(t_0(x))$.

3. Глубина горизонта определяется как функция вертикального времени отражения: $h(x) = f(t_0(x))$.

4. Вертикальное время отражения описывается как функция глубины горизонта: $t_0(x) = f(h(x))$.

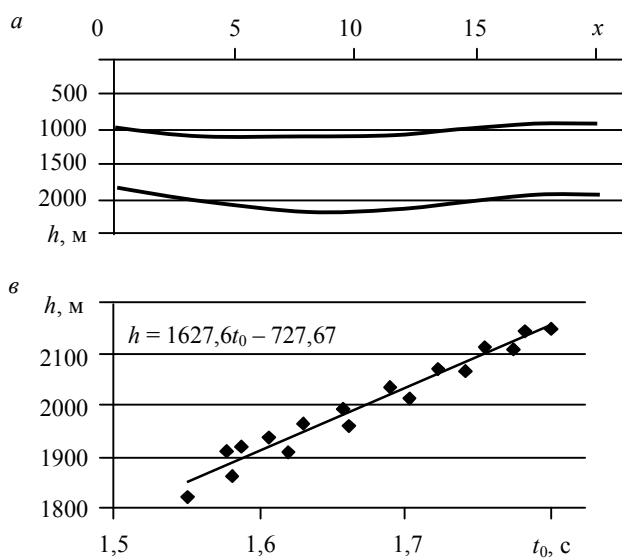


Рис.8. Глубинная модель с нелинейной зависимостью мощностей слоев (а), график зависимости $t_0(t_1)$ (б); распределение $h(t_0)$ (в)

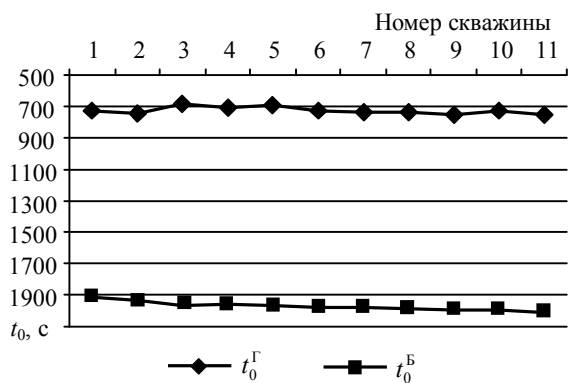


Рис.9. Значения вертикального времени в точках скважин

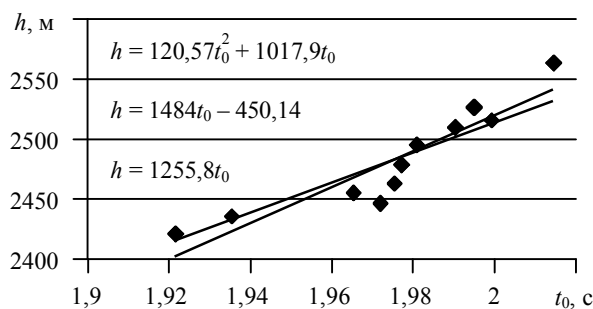


Рис.10. Распределение $h(t_0)$ по выборке скважин

Модель средней скорости $v(x)$. Самое простое решение задачи сводится к интерполяции средней скорости по множеству значений v_k . Модель средней скорости, соответствующая этому решению, описывается выражением, включающим постоянную v_0 и переменную составляющие:

$$v_k = v_0 + e_{vk}.$$

Оценка параметра v_0 определяется из условия минимума функционала, описывающего расхождение фактических и прогнозных глубин в точках скважин:

$$\Theta(v_0) = \sum (h_k - v_0 t_{0k} / 2)^2 \rightarrow \min, \Rightarrow \hat{v}_0 = \sum_{k=1}^K h_k t_{0k} / \sum_{k=1}^K (t_{0k}^2 / 2).$$

Используя оценку скорости $\hat{v}_0$, определим для каждой скважины расхождение e_h прогнозной и фактической глубины и значение стандартной погрешности прогноза σ_h :

$$e_{hk} = h_k - \hat{v}_0 t_{0k} / 2; \quad \sigma_h^2 = \sum_{k=1}^K e_{hk}^2 / (K - 1).$$

На рис.10 модель средней скорости для горизонта Б описывается уравнением $h = 1255,8 t_0$. Стандартная погрешность прогноза по выборке $\sigma_h = 17,9$ м.

Модель линейной регрессии $v(t_0)$. Уравнение линейной зависимости средней скорости от времени отражения преобразуем к зависимости глубины от времени отражения:

$$v = at_0 + b, \Rightarrow vt_0 / 2 = (at_0 + b)t_0 / 2, \Rightarrow h(t_0) = dt_0^2 + ct_0. \quad (7)$$

В ней глубина выражается параболическим уравнением с нулевым постоянным членом (рис.10). Стандартная погрешность прогноза глубины по выборке $\sigma_h = 16,7$ м.

Модель линейной регрессии $h(t_0)$. Результат аппроксимации зависимости $h(t_0)$ уравнением линейной регрессии

$$h = at_0 - b + e_h \quad (8)$$

представлен на рис.10. На интервале изменения переменной t_0 линия регрессии практически накладывается на уравнение параболы (7). Стандартная погрешность прогноза по выборке $\sigma_h = 16,8$ м.

Регрессия $t_0(h)$. В рассмотренном выше уравнении линейной регрессии (8) случайная составляющая e_h определяется как погрешность измерения глубины горизонтов h в точках скважин, а объясняющая переменная t_0 считается заданной точно. Предположение, что глубина скважин известна точно, а время отражений содержит погрешности, более соответствует реальной ситуации. В работе [3] эта ситуация описывается как «ошибки объясняющих переменных», которые приводят к смещению оценок параметров уравнения линейной регрессии. Если σ_t – среднеквадратичная ошибка переменной t_0 , то смещение коэффициента a оценивается выражением $a\sigma_t^2 / (\sigma_t^2 + \sigma_h^2)$.

Указанное противоречие модели можно преодолеть, если уравнение линейной регрессии использовать для описания вертикального времени как функции глубины горизонта:

$$t_0 = ah + b + e_t.$$

После оценки коэффициентов уравнение регрессии $t_0(h)$ приведем к представлению

$$h(t_0) = t_0 / \hat{a} - \hat{b} / \hat{a}. \quad (9)$$

Коэффициенты регрессии подбираются из условия минимума расхождения прогнозных и фактических значений времени отражения, поэтому погрешность прогноза глубины по уравнению (9) возрастает до 18,2 м.

Таким образом, по одной выборке данных получено две линейные зависимости глубины горизонта от вертикального времени отраженной волны. Предположим, что вертикальное время отражения в пределах площади исследования изменяется в диапазоне 1,9-2,1 с и выполним расчет глубины горизонта с использованием уравнения прямой $h(t_0)$ и обратной $t_0(h)$ зависимостей

(рис.11). Расхождение между решениями на заданном интервале изменения времени отражения (0,2 с) составляет от –18 до 33 м. Зависимость $t_0(h)$ определяет решение с более резким изменением гипсометрии отражающей границы.

Двухслойная модель среды. Введем в условие задачи значения вертикального времени и отбивки глубины отражающего горизонта Г. Естественнo ожидать, что параметризация глубинной модели двумя слоями позволит уменьшить погрешность прогноза целевого горизонта Б.

Ранее показано, что уравнение линейной регрессии корректно описывает зависимость глубины от вертикального времени, если существует линейная зависимость между значениями глубины (или вертикального времени границ). На рис.12 представлен график совместного распределения $t_0^B(t_0^Г)$ вертикальных времен двух горизонтов. Линейная зависимость между значениями времени двух горизонтов отсутствует, что является причиной значительной погрешности прогноза глубины по уравнению линейной регрессии.

Если временные мощности двух интервалов разреза изменяются независимо, то логично рассмотреть модель с независимой оценкой мощности каждого интервала. На рис.13 представлены два графика, характеризующие распределение $h(t_0)$ для горизонта Г и зависимости $d_h(d_t)$ мощности интервала Б-Г от интервального времени.

Для горизонта Г (рис.13, а) зависимость $h(t_0)$ удовлетворительно описывается уравнением линейной регрессии, значение стандартной погрешности $\sigma_h = 4,2$ м. Для интервала Б-Г линейная зависимость определяется низким значением коэффициента детерминации $R^2 = 0,49$ и погрешность прогноза мощности интервала $\sigma_h = 24$ м. Таким образом, усложнение модели, выполненное разделением среды на два интервала, приводит к увеличению погрешности прогноза глубины горизонта Б, сравнительно с линейной зависимостью от одной переменной.

В рассматриваемой задаче заданы всего два горизонта, поэтому перебором объясняющих переменных и параметров модели несложно установить, что для оценки мощности интервала Б-Г

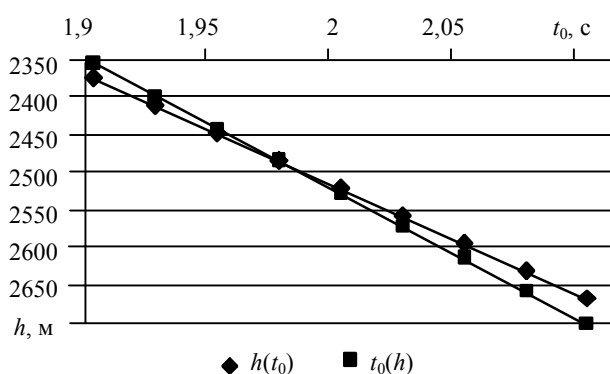


Рис.11. Расхождение оценки глубины ОГ для моделей регрессии $h(t_0)$ и $t_0(h)$

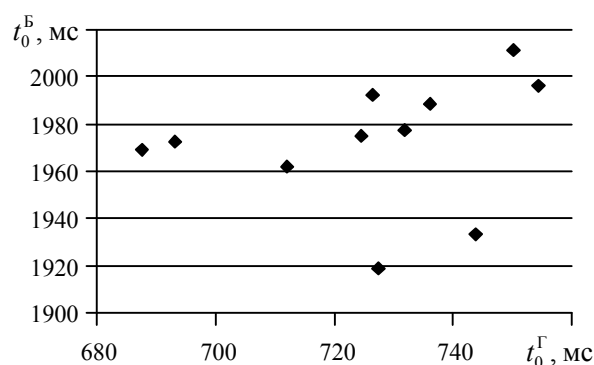


Рис.12. Распределение $t_0^B(t_0^Г)$ в точках скважин

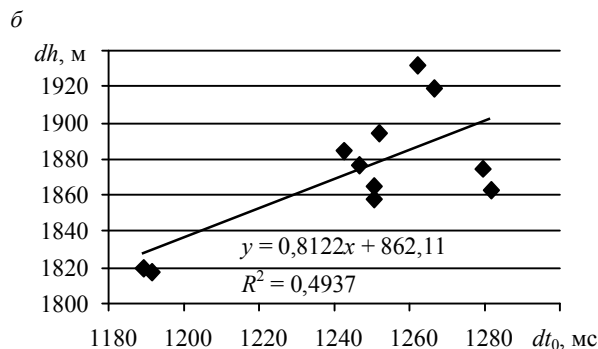
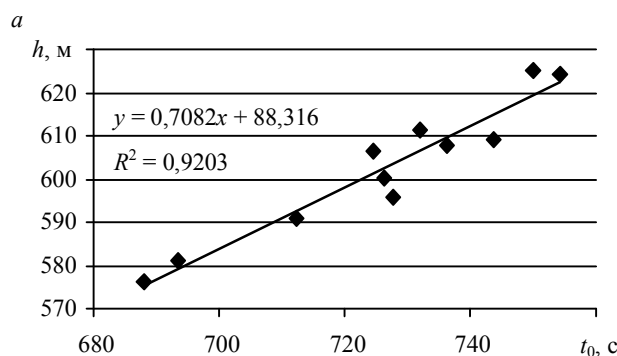


Рис.13. Анализ зависимостей для отражающего горизонта Г(а) и интервала Б-Г(б)

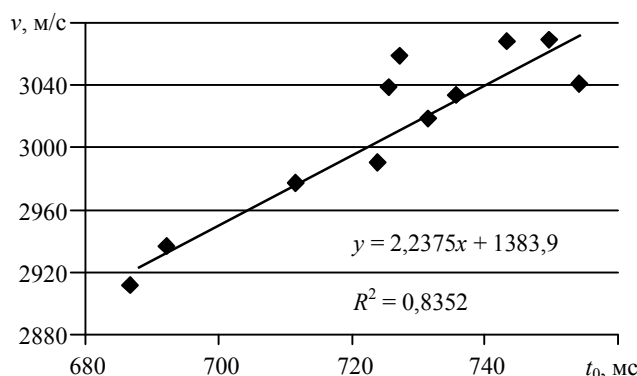


Рис.14. Зависимость средней скорости интервала Б-Г от t_0 горизонта Г

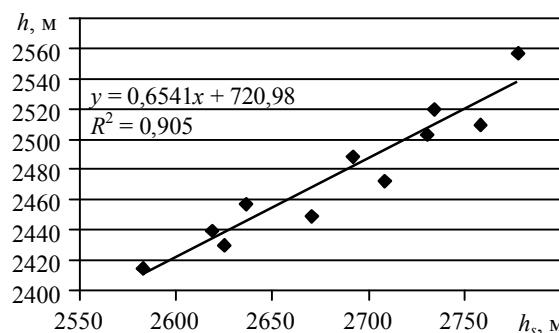


Рис.15. Зависимости фактической глубины горизонта от «эффективной»

определяется практически важный вариант модели в виде линейной зависимости средней скорости интервала Б-Г от вертикального времени гор. Г – кровли анализируемого интервала (рис.14)

$$v^{B-G} = a_0 + a_1 t_0^G \Rightarrow \hat{d}_h^{B-G} = \hat{v}^{B-G} (t_0^B - t_0^G) / 2. \quad (10)$$

В этом варианте решения мощность первого слоя оцениваем уравнением линейной регрессии, а скоростную модель нижнего интервала описываем уравнением средней скорости $v^{B-G}(t_0^G)$. Стандартная погрешность прогноза глубины горизонта Б для двухслойной модели среды $e_h = h - (\hat{h}^G + \hat{d}_h^{B-G})$ составляет 9,8 м.

Модель эффективной скорости. Рассмотрим задачу, в которой сейсмические данные представлены функциями вертикального времени и скорости суммирования отраженной волны: $t_0(\mathbf{x})$, $v_s(\mathbf{x})$. Кроме того, в точках скважин рассчитаны значения средней скорости v_c .

Для пересчета скорости суммирования к средней скорости используем формальное описание уравнением линейной регрессии $v_c = av_s + b + e_v$, где e_v – случайная составляющая. График распределения $v_c(v_s)$ приведен на рис.1, б. Глубина горизонта определится по формуле

$$\hat{h}(\mathbf{x}) = \hat{v}_c(\mathbf{x}) t_0(\mathbf{x}) / 2 = (\hat{a} v_s(\mathbf{x}) + \hat{b}) t_0(\mathbf{x}) / 2. \quad (11)$$

Значение стандартной погрешности прогноза глубины для этой модели $\sigma_h = 11,69$ м.

Модель эффективной глубины. В предыдущей задаче выполнялась подгонка скорости суммирования к средней скорости. Между тем конечная цель решения состоит в подборе скоростной модели, которая минимизирует расхождение глубин в точках скважин.

В точках сейсмических наблюдений известны значения вертикального времени и скорости суммирования (эффективные скорости). Это позволяет рассчитать функцию, которую назовем «эффективной глубиной» горизонта: $h_s = v_s t_0 / 2$. Значения h_s смещены относительно истинных глубин, поскольку скорости суммирования смещены относительно средних скоростей. Но значения h_s можно использовать как объясняющие переменные уравнения регрессии для прогноза глубины горизонта (рис.15):

$$h = d_1 h_s + d_2 = d_1 (v_s t_0 / 2) + d_2 + e_h.$$

Зависимость $h(h_s)$ характеризуется более высоким коэффициентом детерминации, чем при оценке средней скорости в предыдущем примере, но значение погрешности прогноза глубины $\sigma_h = 13,42$ м больше, чем для модели эффективной скорости.

Как учесть случайный характер результата. Принимаем во внимание, что коэффициенты уравнения регрессии и ошибки прогноза являются случайными величинами, т.е. минимальная погрешность, определяемая по ограниченной выборке, не является гарантией лучшего решения. Можно рекомендовать выполнить расчет всех вариантов и оценить расхождение между картами глубин. Возможно, что расхождение будет незначительным, тогда проблема выбора модели отпадает. При значительной разнице допустимо получить средневзвешенное значение нескольких вариантов решения.

Если принять условие независимости ошибки прогноза для определенных типов модели, то можно предложить усреднение карт с учетом погрешности прогноза каждой реализации. Пусть, например, получено два заслуживающих внимания результата: модель эффективной скорости (10) и двухслойной модели с оценкой интервальной скорости (11). Оценки погрешности решения, определяемые по выборке из 11 скважин, составляют соответственно 11,7 и 9,8 м.

На множестве точек $\mathbf{x}$ определены два варианта решения $h_1(\mathbf{x}), h_2(\mathbf{x})$, для которых определены оценки дисперсии ошибки прогноза: D_1, D_2 . Значение искомой функции в произвольной точке $\mathbf{x}$ определим как взвешенную сумму исходных данных:

$$h(\mathbf{x}) = w_1 h_1(\mathbf{x}) + w_2 h_2(\mathbf{x}),$$

где $w_1 + w_2 = 1$.

Дисперсия суммы двух независимых величин определяется выражением

$$D_e = w_1^2 D_1 + w_2^2 D_2.$$

Задача определения весов w_1, w_2 , обеспечивающих минимум дисперсии с учетом дополнительного условия, определяется минимизацией функционала:

$$D(w_1, w_2, \lambda) = w_1^2 D_1 + w_2^2 D_2 + \lambda(w_1 + w_2 - 1),$$

где λ – неопределенный множитель Лагранжа [1].

Точка минимума функционала определяется условием равенства нулю частных производных:

$$\frac{\partial}{\partial w_1} D(w_1, w_2, \lambda) = 0; \quad \frac{\partial}{\partial w_2} D(w_1, w_2, \lambda) = 0; \quad \frac{\partial}{\partial \lambda} D(w_1, w_2, \lambda) = 0.$$

Несложно определить, что весовые множители определяются выражениями

$$w_1 = D_2 / (D_1 + D_2); \quad w_2 = D_1 / (D_1 + D_2).$$

Оценка стандартной погрешности прогноза глубины целевого горизонта, рассчитанной по формуле (11), $\sigma_h = 7,5$ м.

Заключение. Оценка глубины сейсмических горизонтов представляет стандартную задачу прогноза, где в качестве объясняющих переменных используются кинематические параметры волнового поля: вертикальное время и скорость суммирования отраженных волн. Отсутствие функциональной зависимости между прогнозируемыми параметрами среды и параметрами волнового поля определяет многовариантность описания зависимости глубины горизонта от кинематических параметров волнового поля. Варианты модели определяются структурой модели и исходных данных. Критерием оптимального выбора варианта модели является минимальное расхождение прогнозных и фактических глубин, заданных в точках скважин. Как правило, структурные построения выполняются по серии отражений, что определяет возможность решения задачи в рамках однослойной или многослойной модели среды.

Стандартным вариантом однослойной модели является уравнение линейной зависимости глубины от вертикального времени. Показано, что это уравнение соответствует многослойной модели среды при условии линейной зависимости мощности слоев. Отмечено, что значения параметров модели линейной регрессии согласуются с параметрами толстослойной модели среды, определяемыми по данным сейсмокаротажа, только в предельных вариантах скоростной модели.

Ограничения на структуру модели снимаются при использовании эффективной скорости отраженных волн, но этот параметр редко применяется при решении практических задач, поскольку оценки скорости суммирования неустойчивы к погрешности параметров модели и способам компенсации неоднородности верхней части разреза.

Многослойная модель предполагает последовательное определение мощности или скорости определенных интервалов разреза. Подбор объясняющих переменных для этой модели ограничен только вертикальным временем отражений. Модель идеальна для слоев с постоянной скоростью, но результат прогноза непредсказуем в случае латеральной скоростной неоднородности слоев.



В каждом конкретном случае подбор скоростной модели среды представляет нетривиальную проблему, включающую также анализ методики кинематических преобразований волнового поля в процессе обработки сейсмических данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бронштейн И.Н. Справочник по математике / И.Н.Бронштейн, К.А.Семендяев. М.: Наука, 1986. 543 с.
2. Гольдин С.В. Теория интерпретации в сейсморазведке и сейсмологии. Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2011. 357 с.
3. Доугерти К. Введение в эконометрику: Пер. с англ. М.: ООО «Издательский дом ИНФРА-М», 1999. 401 с.
4. Мусатов И.В. Построение трехмерной скоростной модели на основе совместного анализа данных ВСП, наземной сейсморазведки и ГИС / И.В.Мусатов, А.В.Новокрещин, В.П.Торгашов // Технологии сейсморазведки. 2016. № 1. С. 5-13.
5. Система кинематической интерпретации волн (КИНГ) / Д.И.Судварг, Л.Г.Киселева, В.С.Черняк, Т.В.Курдюкова, А.Ф.Глебов. Новосибирск: Институт геологии и геофизики СО РАН, 1987. 180 с.
6. Современный подход к построению глубинно-скоростных моделей для миграции с учетом анизотропии / А.Сахаров, В.Солган, Е.Королев, Е.Вороновичева // «Геомодель-2008». Россия, г. Геленджик, 10-14 сентября, 2008 // http://0003uhk.rcomhost.com/files_public (дата обращения 10.09.2017).
7. Сысоев А.П. Прикладные задачи компенсации неоднородности верхней части разреза при обработке и интерпретации сейсмических данных. Новосибирск: ИНГГ им. А.А.Трофимука СО РАН, 2011. 90 с.
8. Jones Ian F. Anisotropic Ambiguities in TI media / Ian F.Jones, Mike L.Bridson, Nick Bernitsas // http://www.iongeo.com/content/documents/Resource%20Center/Technical%20Hahers/TP_FB (дата обращения 10.09.2017).

Автор А.П.Сысоев, д-р техн. наук, профессор, sysoev@spti.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Статья поступила в редакцию 12.09.2017

Статья принята к публикации 31.08.2018.



Горное дело

УДК 622.692.4: 622-17

ГИДРОТРАНСПОРТ СГУЩЕННЫХ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОЙ РУДЫ НА КАЧКАНАРСКОМ ГОКе ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМЫ ГИДРОТРАНСПОРТА

В.И.АЛЕКСАНДРОВ, М.А.ВАСИЛЬЕВА

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

В качестве объекта исследования выступает система гидротранспорта хвостов обогащения железной руды на АО «ЕВРАЗ Качканарский ГОК». Целью работы являлось определение параметров гидравлического транспорта хвостов обогащения железной руды при массовых концентрациях твердой фазы от 30 до 70 % и разработка рекомендаций для промышленной эксплуатации систем гидротранспорта высоконцентрированных пульп ЦХХ Качканарского ГОКа. Проведены лабораторные исследования параметров гидротранспорта сгущенных хвостовых пульп с разработкой методики расчета; опытно-промышленные испытания гидротранспортной системы в условиях ЦХХ Качканарского ГОКа. Установлено, что при использовании полиуретановых покрытий внутренней поверхности пульповодов значительно (в 1,75 раза) снижаются удельные потери напора на гидротранспорт сгущенных смесей. Это позволяет значительно увеличить дальность транспортирования для укладки хвостов обогащения в дальние участки хвостохранилища. Внедрение результатов исследований – в проекте реконструкции и развития хвостохранилища ЦХХ Качканарского ГОКа на период 2018-2020 гг. Предлагается использовать результаты работы в проекте реконструкции системы гидротранспорта в ЦХХ Качканарского ГОКа путем перехода на гидротранспорт гидросмесей, сгущенных до массовых концентраций 35-40 % в пульповодах с внутренним полиуретановым покрытием, что обеспечит энергосбережение в технологическом процессе гидротранспорта.

Ключевые слова: гидротранспорт; сгущенные гидросмеси; хвосты обогащения; потери напора; полиуретановые покрытия; лабораторные и опытно-промышленные испытания

Как цитировать эту статью: Александров В.И. Гидротранспорт сгущенных хвостов обогащения железной руды на Качканарском ГОКе по результатам опытно-промышленных испытаний системы гидротранспорта / В.И.Александров, М.А.Васильева // Записки Горного института. 2018. Т. 233. С. 471-479. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.471

Введение. Одним из важных направлений интенсификации горно-рудного производства, повышения его эффективности и конкурентоспособности в условиях современных рыночных отношений является создание мощной транспортной базы, способной значительно повысить производительность транспортных систем при одновременном снижении себестоимости транспортных перевозок минерального сырья и продуктов его переработки. Развитие такой базы связано с внедрением непрерывных видов транспорта, среди которых наибольшее распространение в горной отрасли получил гидравлический трубопроводный транспорт.

В настоящее время в горно-рудном промышленном комплексе функционирует около 400 напорных гидротранспортных систем, суммарная длина трубопроводной магистрали которых превышает 1300 км. Этими системами ежегодно перемещается более 1,5 млрд т различных твердых сыпучих материалов, в основном хвостов обогащения минерального сырья и концентратов [13].

АО «ЕВРАЗ КГОК» входит в пятерку крупнейших в России горно-рудных предприятий. Производственная мощность комбината составляет более 55 млн т железной руды в год. Основным потребителем продукции АО «ЕВРАЗ КГОК» является АО «ЕВРАЗ НТМК». В настоящее время Качканарский горно-обогатительный комбинат добывает руду из трех карьеров с дальнейшей ее переработкой в цехах дробления, обогащения, агломерации и окускования [3].

Анализ работы гидротранспортных систем на горных предприятиях показывает, что эффективность использования этого вида транспорта не соответствует его техническим возможностям, высока трудоемкость работ при эксплуатации оборудования, высок гидроабразивный износ трубопроводов, высоки металлоемкость и энергоемкость гидротранспортных систем.

Удельная энергоемкость гидравлического транспорта зависит от удельных потерь напора и концентрации твердой фазы гидросмеси [1]:

$$E = \frac{N}{q_{\text{тв}} L} = \frac{\rho_{\text{см}} g I_{\text{см}}}{3,6 \rho_{\text{тв}} c_{\text{об}}},$$



Рис.1. Лабораторная гидротранспортная установка

где E – удельная энергоемкость процесса, кВт·ч/(т·км); N – мощность насосов, кВт; $q_{\text{ТВ}}$ – производительность системы по твердому материалу, кг/ч; L – длина трубопровода (расстояние транспортирования), км; $\rho_{\text{см}}$ – плотность гидросмеси, кг/м³; $\rho_{\text{ТВ}}$ – плотность твердых хвостов, кг/м³; g – ускорение силы тяжести, м/с²; $I_{\text{см}}$ – удельные потери напора, м вод. ст./м; $c_{\text{об}}$ – объемная концентрация твердых частиц в гидросмеси.

Из формулы видно, что энергоемкость процесса транспортирования в основном зависит от удельных потерь напора $I_{\text{см}}$ при транспортировании гидросмеси (хвостовой пульпы) по трубопроводу и от величины концентрации $c_{\text{об}}$ твердой фазы в транспортируемом потоке гидросмеси. Снижение потерь напора и увеличение концентрации приводят к уменьшению работы на перекачку заданного объема твердого материала – хвостов обогащения.

Исследования. Лабораторные исследования гидротранспорта хвостовой пульпы Качканарского ГОКа проводились в лаборатории кафедры горных транспортных машин Санкт-Петербургского горного университета.

Экспериментальная гидротранспортная установка показана на рис.1. Жидкость (чистая вода или гидросмесь) из зумпфа вместимостью 0,5 м³ перекачивалась по трубопроводам с помощью центробежного насоса П12.5/12.5СП производительностью 12,5 м³/ч. В качестве твердого материала были взяты хвосты обогащения железной руды ЦХХ Качканарского ГОКа, предоставленные комбинатом для выполнения лабораторных экспериментов. Хвосты характеризуются определенным химическим составом, а их механические характеристики определяются принятой технологией обогащения.

Технология обогащения титаномагнетитовых руд на Качканарском ГОКе включает четырехстадийное дробление, сухую магнитную сепарацию, двухстадийное измельчение, мокрую магнитную сепарацию в третьей стадии, обезвоживание концентрата. Химический состав хвостов обогащения по данным ИМГРЭ [4], %: окись кремния (SiO₂) – 45,02; диоксид титана (TiO₂) – 0,67; оксид алюминия (Al₂O₃) – 8,6; оксид железа (Fe₂O₃) – 17,7; оксид двухвалентного железа (FeO) – 3,95; оксид марганца (MnO) – 0,14; окись кальция (CaO) – 20,8; оксид натрия (Na₂O) – 0,90; прочие – 2,24.

Гранулометрический состав твердых частиц хвостов обогащения по классам крупности приведен ниже:

Класс крупности, мм	+1,6	–1,60 + 0,56	–0,56 + 0,28	–0,28 + 0,14	–0,14 + 0,071	–0,071
Содержание, %	3,6	25,3	23,0	20,7	14,8	12,6

Хвосты обогащения, представленные лабораторией Качканарского ГОКа, взяты с пляжа хвостохранилища. В объеме хвостов присутствует значительная доля крупнозернистых твердых частиц с включениями металлических фракций от шаров, применяемых в шаровых мельницах на стадии измельчения.

По данным гранулометрического состава видно, что твердый материал представлен, в основном, классами крупности частиц – 0,14 мм – 27,4 %, класса – 0,071 – 12,6 %. Средневзвешенный диаметр частиц равен

$$d_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^{n=5} P_i d_i}{100} = \frac{1,6 \cdot 3,6 + 25,3 \cdot 1,08 + 23 \cdot 0,42 + 20,7 \cdot 0,21 + 14,8 \cdot 0,105 + 0,035 \cdot 12,6}{100} = 0,491 \text{ мм.}$$

Гистограмма распределения твердых частиц хвостов приведена на рис.2.

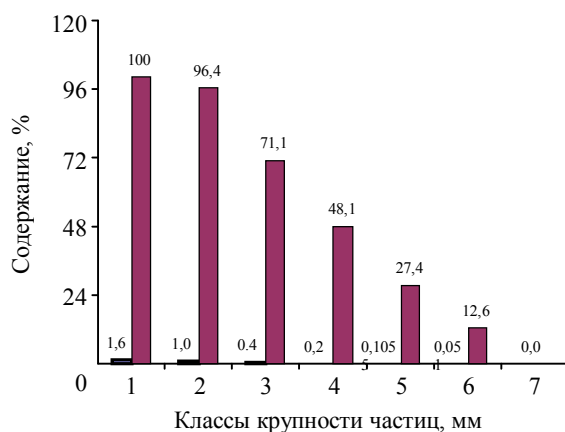


Рис.2. Гистограмма распределения твердых частиц по классам крупности

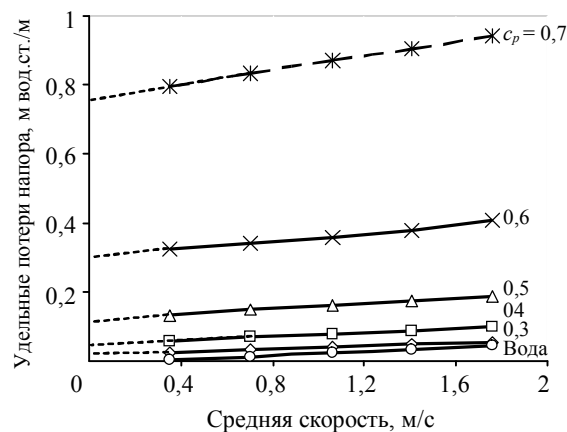


Рис.3. График зависимости потерь напора от средней скорости потока гидросмеси, $D_{тр} = 0,05$ м

Анализ гранулометрического состава производился путем отбора проб, фильтрации, сушки и просеивания сухого материала через стандартный набор сит. Определение количества материала производилось взвешиванием отдельных фракций. Точность ситового анализа на механическом анализаторе составляла 5 % [7].

Замеренные средние значения потерь напора, полученные при экспериментальных исследованиях течения по трубопроводу гидросмесей хвостов обогащения железной руды четырех концентраций, приведены в табл.1. Графические зависимости потерь напора от средней скорости потока смеси по данным лабораторных экспериментов приведены на рис.3.

Таблица 1

Экспериментальные данные течения гидросмесей хвостов обогащения железной руды в трубопроводе ($D_{тр} = 0,05$ м)

Средняя скорость, м/с	Массовая концентрация, %						Число Re (вода)
	30	40	50	60	70 (теория)	Вода	
0,352	0,026/1075*	0,057/790	0,134/590	0,323/440	0,797/343	0,003	17300
0,704	0,033/2150	0,069/1590	0,148/1190	0,342/890	0,833/686	0,012	34600
1,06	0,041/3200	0,078/2390	0,162/1780	0,360/1340	0,87/1033	0,024	52100
1,41	0,048/4300	0,088/3180	0,175/2360	0,380/1780	0,906/1374	0,039	69320
1,76	0,056/5370	0,098/3970	0,189/2950	0,41/2230	0,94/1715	0,058	86530

* В числителе – потери напора, м, в знаменателе критерий Re.

Из рис.3 и табл.1 следует, что на всех исследованных концентрациях гидросмеси проявляют свойства неньютоновских жидкостей. В нижней части кривых при скоростях течения около 1 м/с и до 0,5 м/с (для всех гидросмесей) имеется линейный участок, свидетельствующий о ламинарном режиме течения.

Потери напора увеличиваются при повышении концентрации твердого материала, что хорошо видно на рис.3. Наклон линейных участков возрастает при росте объемной концентрации. Пунктирными линиями, проведенными в продолжение линейных участков кривых от точки с минимальной средней скоростью потока смеси, на оси потерь напора отсекаются ординаты, соответствующие начальному уклону i_0 . Значения начального уклона увеличиваются при росте концентрации (рис.4).

Начальный гидравлический уклон свидетельствует о неньютоновском характере потока смеси. Для концентрированных гидросмесей хвостов

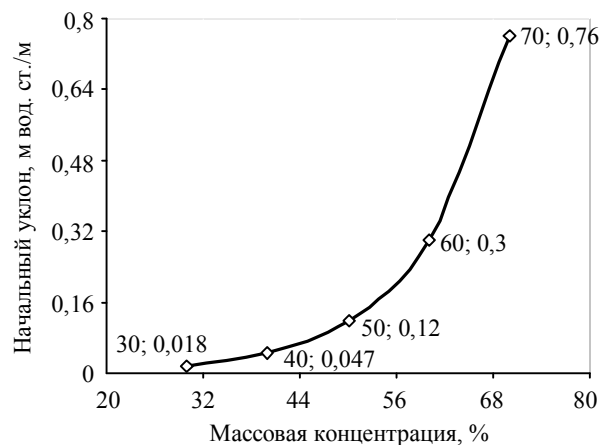


Рис.4. Изменение начального уклона от концентрации твердой фазы гидросмеси



обогащения железной руды, твердая фаза которых содержит в основном частицы относительно мелких классов ($d_0 = 0,491$ мм с преобладающим классом $-0,044$ до 80 %), характерно образование внутренней структуры за счет сил сцепления и коагуляции отдельных частиц, распределенных в жидкой непрерывной среде.

Начальные потери напора – результат суммы сопротивлений от сил сцепления между частицами и сил трения между ними, т.е.:

$$i_0 = i_p + i_f,$$

где i_0 – начальный уклон; i_p – часть начального уклона, обусловленная силами сцепления между частицами; i_f – часть начального уклона от сил трения между частицами.

Кривая на рис.4 описывается формулой

$$i_0 = \frac{0,496 \cdot 10^{4,525 \cdot c_p}}{\rho_{\text{см}} g D}.$$

Начальный уклон, как следует из приведенной формулы, зависит от концентрации твердых частиц хвостов обогащения и диаметра трубопровода. В табл.2 приведены расчетные значения начального уклона для различных концентраций и диаметров трубопровода.

Таблица 2

Расчетные значения начального уклона

Массовая концентрация c_p	Начальный уклон, м вод. ст./м для диаметра трубы, м					
	0,05	0,1	0,2	0,4	0,5	1,0
0,3	0,0182	0,009	0,004	0,002	0,0018	0,001
0,4	0,048	0,024	0,012	0,006	0,005	0,002
0,5	0,121	0,06	0,03	0,015	0,012	0,006
0,6	0,305	0,153	0,076	0,038	0,03	0,015
0,7	0,761	0,381	0,19	0,095	0,076	0,038

Из табл.2 видно, что с увеличением концентрации твердых частиц начальный уклон возрастает, а с увеличением диаметра трубопровода – уменьшается. При запуске насосной установки системы гидротранспорта необходимо, чтобы развиваемый напор был больше начального уклона.

Анализ экспериментальных зависимостей удельных потерь напора от средней скорости потока гидросмеси показывает, что гидросмеси в диапазоне массовых концентраций от 30 до 60 % представляют собой неньютоновские жидкости, течение которых описывается уравнением Бингама – Шведова [11, 12]. Из-за высоких значений концентрации режим течения в трубопроводе $D = 50$ мм практически на всех концентрациях ламинарный и переходной к турбулентному режиму. Общее уравнение для потерь напора можно записать в следующем виде:

$$i_{\text{м/м}} = \frac{4 \left(\tau_0 + \eta_{\text{эф}} \frac{8v}{D} \right)}{\rho_{\text{см}} g D},$$

где τ_0 – начальное напряжение сдвига, Па; $\eta_{\text{эф}}$ – динамический коэффициент эффективной вязкости, Па·с; v – средняя скорость потока гидросмеси, м/с; D – диаметр трубопровода, м; $\rho_{\text{см}}$ – плотность гидросмеси, кг/м³; g – ускорение силы тяжести, м/с².

Результаты лабораторных исследований позволяют предварительно оценить величину потерь напора в трубопроводах другого диаметра, например в промышленном трубопроводе диаметром $DN1000$, используя метод теории подобия гидродинамических процессов [5].

В соответствии со второй теоремой подобия для подобных процессов дифференциальные уравнения движения можно заменить уравнением из чисел подобия:

$$f(K_1, K_2, K_3, \dots) = 0.$$

где K_i – числа подобия.



Для случая подобия гидродинамических потоков жидкости эта функция имеет вид

$$f(Eu, Re, Fr) = 0,$$

где Eu – число Эйлера (отношение сил давления к силам инерции); Re – число Рейнольдса (отношение сил инерции к силам вязкости); Fr – число Фруда (отношение сил инерции к силам тяжести).

Последнее уравнение можно записать в следующем виде

$$A(Eu^n Re^m Fr^q) = 0.$$

В данном уравнении имеются определяемые и определяющие числа подобия. Определяемым числом подобия является число Эйлера, так как оно содержит искомую величину потерь давления. В связи с этим можно переписать последнее равенство:

$$Eu = A(Re^m Fr^q i_L),$$

где $i_L = L/D$ – инвариант геометрического подобия.

В этих уравнениях число Fr при течении в горизонтальных трубах не имеет существенного значения и им можно пренебречь. Тогда в окончательном виде уравнение подобия при течении жидкостей в горизонтальных трубах будет иметь вид:

$$Eu = A(Re^m i_L).$$

В гидродинамике известно уравнение подобия для горизонтального течения вязкой ньютоновской жидкости

$$Eu = k Re^{-0,25} \left(\frac{L}{D} \right),$$

где коэффициент $k = 0,158$ [5].

Для неньютоновской жидкости, к которой относятся сгущенные гидросмеси хвостов обогащения, необходимо определить значение этого коэффициента.

Преобразуем полученное уравнение подобия, записав значение определяемого числа Эйлера

$$\frac{\Delta P}{\rho_{cm} v^2} = k Re^{-0,25} \left(\frac{L}{D} \right) \rightarrow \frac{\rho_{cm} g h}{\rho_{cm} v^2 L} = k \frac{Re^{-0,25}}{D} \rightarrow \frac{h}{L} = k \frac{\rho_{cm} v^2 Re^{-0,25}}{\rho_{cm} g D}.$$

В итоге имеем равенство

$$i = k Re^{-0,25} \frac{v^2}{g D} = 2k Re^{-0,25} \frac{v^2}{2g D}.$$

Для гидросмесей неньютоновских, проявляющих реологические свойства, и описываемых уравнением Бингама – Шведова, потери напора пропорциональны коэффициенту $\frac{\lambda}{(1-\sigma)k_{ct}}$.

Следовательно, можно приравнять

$$2k Re^{-0,25} = \frac{\lambda}{(1-\sigma)k_{ct}},$$

откуда получим

$$k = \frac{\lambda}{2(1-\sigma)k_{ct} Re^{-0,25}},$$

где $\sigma = \tau/\tau_0$ – относительное напряжение сдвига; k_{ct} – коэффициент структуры.

Из формулы видно, что величина коэффициента k зависит от концентрации твердой фазы, так как относительное напряжение сдвига и коэффициент структуры являются функциями этой характеристики гидросмеси.

Определим значение k с учетом известных реологических характеристик гидросмесей [6, 10]:

$$c_p = 30 \%; \quad \sigma = \frac{\tau_0}{\tau_0 + \eta_{эф} \dot{\gamma}}; \quad \tau_0 = 0,124 \cdot 10^{4,525 \cdot c_p} = 0,124 \cdot 10^{4,525 \cdot 0,3} = 2,82 \text{ Па};$$

$$\eta_{эф} = 6,31 \cdot 10^{1,72 \cdot c_p} = 20,7 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}; \quad \dot{\gamma} = \frac{8v}{D} = \frac{8 \cdot 1,41}{0,05} = 225,6 \text{ с}^{-1};$$

$$\sigma = \frac{2,82}{2,82 + 0,0207 \cdot 225,6} = 0,376; \quad k_{ст} = 1 + 3,45 c_{об} = 1 + 3,45 \cdot 0,115 = 1,4.$$

Возьмем значение скорости $v = 1,41$ м/с (см. табл.1). Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{v D \rho_{см}}{\eta_{эф}} = \frac{1,41 \cdot 0,05 \cdot 1264}{0,0207} = 4305.$$

Примем по формуле Блазиуса

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} = 0,04, \quad k = \frac{0,04}{2 \cdot (1 - 0,376) \cdot 1,4 \cdot 4305^{-0,25}} = 0,1855.$$

Потери напора по формуле

$$i = 0,1855 \cdot 4305^{-0,25} \frac{1,41^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,05} = 0,05 \text{ м вод. ст./м.}$$

Из табл.1 находим, что фактические (замеренные) потери напора составляют 0,046 м вод. ст./м. Ошибка расчетных и опытных данных составляет

$$\varepsilon = \frac{i_{расч} - i_{факт}}{i_{факт}} = \frac{0,05 - 0,046}{0,046} \cdot 100 \% = 4,8 \%.$$

Следовательно, разработанную методику пересчета потерь напора с одного диаметра трубопровода на другой можно использовать для предварительной оценки потерь напора.

Результаты. Опытно-промышленная установка для проведения испытаний гидротранспорта была смонтирована работниками ПНС-I ЦХХ (рис.5) [2, 9].

Гидросмесь с заданной концентрацией твердых хвостов обогащения перекачивалась грунтовым насосом 8Гр-8 производительностью $Q = 400 \text{ м}^3/\text{ч}$. Транспортная линия выполнена в виде петли, состоящей из двух трубопроводов – стального $DN200$ и $DN190$ с внутренним полиуретановым покрытием. Участок трубопроводной петли $DN190$ расположен на 3 м ниже стального трубопровода.

На каждом трубопроводе имеется измерительный участок длиной $L = 15$ м. На измерительных участках установлены пружинные манометры с разделителями сред для измерения перепада давления.

Расходный бак объемом $W = 1,7 \text{ м}^3$ был выполнен из трубы диаметром 1000 мм, высотой 2,5 м. Днище бака скошено в сторону всасывающего трубопровода. Поток гидросмеси всасывал-



Рис.5. Отдельные элементы опытно-промышленной установки гидротранспорта хвостовой пульпы

ся грунтовым насосом, транспортировался по трубопроводной петле и сливался в расходный бак. В расходный бак с помощью мостового крана засыпалась фиксированная масса твердых хвостов обогащения. Уровень гидросмеси в расходном баке и ее объем оставались постоянными. Массовая концентрация гидросмеси рассчитывалась по формуле

$$c_p = \frac{M_{\text{ТВ}}}{M_{\text{см}}} = \frac{M_{\text{ТВ}}}{M_{\text{в}} + M_{\text{ТВ}}},$$

где c_p – массовая концентрация гидросмеси, доли ед.; $M_{\text{ТВ}}$ – масса загружаемых в расходный бак твердых хвостов, кг; $M_{\text{в}}$ – масса воды, численно равная объему воды, кг.

Перед началом основных экспериментов были проведены испытания на чистой воде. При этом проверялась работоспособность оборудования, насоса, приборов (ультразвуковой расходомер, манометры), герметичность соединений. Установка работала на ожидаемых номинальных характеристиках. Расходомер и манометры показывали стабильные расчетные значения. Объем жидкости в расходном баке оставался постоянным на уровне сливного отверстия.

Измеренные параметры гидротранспорта хвостов обогащения, полученные при проведении опытно-промышленных испытаний, приведены в табл.3 и на рис.6.

Таблица 3

Значения потерь напора по экспериментальным данным

Концентрация, доли ед.	Плотность, кг/м ³	Скорость в трубопроводах, м/с		Потери напора в трубопроводах, м вод. ст./м		Коэффициент сопротивлений λ	
		Стальной	Футерованный	Стальной	Футерованный	Стальной	Футерованный
7	1051	3,82	4,23	0,062	0,04	0,016	0,008
13	1100	3,88	4,3	0,088	0,06	0,021	0,011
19	1152	3,85	4,27	0,113	0,078	0,026	0,014
24	1200	3,73	4,14	0,127	0,099	0,030	0,018
29	1253	3,66	4,06	0,149	0,105	0,035	0,019
34	1310	3,54	3,92	0,163	0,124	0,039	0,023
38	1361	3,49	3,86	0,182	0,12	0,043	0,022
42	1414	3,41	3,78	0,192	0,125	0,046	0,023
45	1458	3,29	3,64	0,197	0,151	0,049	0,029
49	1517	3,15	3,49	0,199	0,148	0,052	0,03
52	1568	2,98	3,3	0,195	0,142	0,055	0,031
53	1584	2,91	3,22	0,191	0,136	0,056	0,031

Результаты экспериментов показывают, что удельные потери напора в экспериментальном футерованном трубопроводе $DN190$ в 1,4 раза меньше, чем в стальном трубопроводе $DN200$. Необходимо учесть, что футерованный трубопровод был меньшего диаметра, что привело к большей скорости потока гидросмеси, от которой зависит кинетическая энергия потока и, следовательно, потери на трение. При равных диаметрах трубопроводов соотношение потерь напора в стальном и футерованном трубопроводах составило бы не менее 1,75.

Покажем это на конкретном пересчете (табл.3).

Расчет производим по формуле

$$i = \lambda \frac{v^2}{2gD} \frac{\rho_c}{\rho_0}.$$

Принимаем среднюю скорость в футерованном трубопроводе, равной скорости в стальном трубопроводе,

$$v_{\text{ст}} = v_{\text{фут}}.$$

Зададимся концентрацией пульпы $c_p = 49 \%$.



Рис.6. Потери напора в трубопроводах при изменении концентрации гидросмесей

1 – стальной трубопровод, $D = 200$ мм;
2 – футерованный, $D = 190$ мм

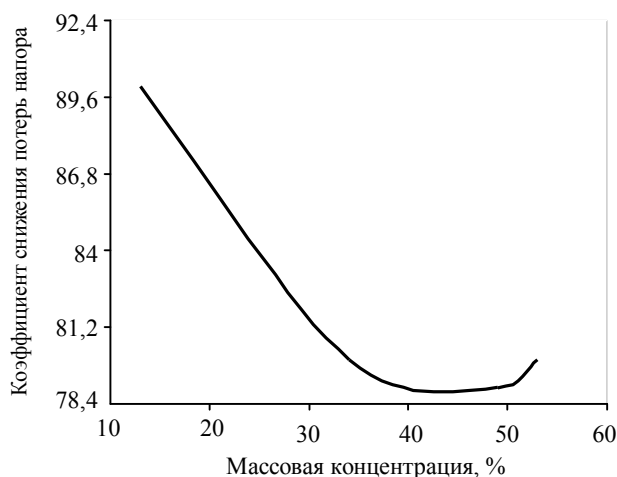


Рис. 7. Коэффициент снижения потерь напора от концентрации пульпы в футерованном трубопроводе DN200 по отношению к стальному трубопроводу DN200

Рассчитаем коэффициент гидравлических сопротивлений по формуле, полученной для футерованного трубопровода,

$$\lambda = 0,05c_p + 0,0045 = 0,05 \cdot 0,49 + 0,0045 = 0,029.$$

Данная формула получена при обработке опытных данных [3].

Для концентрации 49 % плотность пульпы равна 1517 кг/м^3 , скорость пульпы равна $3,15 \text{ м/с}$.

Потери напора в футерованном трубопроводе диаметром 200 мм

$$i = 0,029 \frac{3,15^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,2} 1,517 = 0,111 \text{ м/м}.$$

Относительное уменьшение потерь напора в футерованном трубопроводе

$$\varepsilon = \frac{i_{\text{ст}}}{i_{\text{фут}}} = \frac{0,199}{0,111} = 1,79; \quad \varepsilon_1 = \frac{i_{\text{ст}} - i_{\text{фут}}}{i_{\text{фут}}} \cdot 100\% = \frac{0,199 - 0,111}{0,111} \cdot 100\% = 79\%.$$

Был выполнен пересчет значений потерь напора для футерованного трубопровода при работе на других концентрациях (табл.3, рис.7). График на рис.7 показывает, что во всем диапазоне концентраций гидросмеси хвостов обогащения железной руды потери напора в футерованном полиуретановым покрытием трубопроводе DN200 не менее, чем в 1,75 раз меньше, чем в стальном трубопроводе DN200 без покрытия.

Результаты выполненных лабораторных и опытно-промышленных исследований приняты для использования в проекте реконструкции системы гидротранспорта сгущенных хвостов обогащения Качканарского ГОКа в соответствии с планом развития хвостового хозяйства ЦХХ ЕВРАЗ «Качканарский ГОК».

Выводы

1. При существующем на данный момент выходе хвостов с обогатительной фабрики «ЕВРАЗ КГОК» в размере 4903 т/ч, в том числе секции 1-15 в объеме 2509 т/ч, секции 16-29 в объеме 2394 т/ч, и принимаемой степени сгущения исходной хвостовой пульпы на проектируемых комплексах сгущения КС-1 и КС-2 до 40 % по весу, для оптимизации системы гидротранспорта сгущенных хвостов на участке от ПНС II до комплекса гидроциклонирования необходимо предусматривать применение труб с внутренним полиуретановым покрытием.

2. Применение пульповодов с внутренним полиуретановым покрытием позволяет осуществить подачу сгущенной пульпы для складирования на дальних отсеках хвостохранилища.

3. Выполненный анализ применения пульповодов с полиуретановым покрытием на технологическом участке подачи сгущенных хвостов в сравнении со стальными трубами показывает, что экономический эффект достигается уже в первые 3-4 года эксплуатации пульповода, и за 4-5 лет эксплуатации обеспечит полную окупаемость первоначальных капитальных затрат.

4. Применение стальных труб с внутренним полиуретановым покрытием позволяет сократить затраты электроэнергии на гидротранспорт сгущенных хвостов в сравнении со стальной трубой в среднем на 22-24 %.

5. Затраты жизненного цикла за 10 лет эксплуатации труб с полиуретановым покрытием на технологическом участке гидротранспорта сгущенных хвостов в два раза дешевле эксплуатации стальных труб без покрытия.



ЛИТЕРАТУРА

1. Александров В.И. Энергетическая эффективность гидравлического транспорта хвостов обогащения железной руды на Качканарском ГОКе / В.И.Александров, С.А.Тимухин, П.Н.Махараткин // Записки Горного института. 2017. Т. 225. С. 330-337. DOI: 10.18454/PMI.2017.3.330
2. Александров В.И. Энергетическая эффективность применения труб, футерованных полиуретаном / В.И.Александров, И.А.Дедушенко, С.Ю.Авксентьев // Обогащение руд. 2017. № 2. С. 54-59.
3. Александрова Т.Н. Экологические и технологические аспекты утилизации зольных и шлаковых отходов / Т.Н.Александрова, С.А.Корчевенков // Журнал экологической инженерии. 2017. № 4. Т. 18. С 15-24.
4. Борисенко Л.Ф. Лабораторные и технологические исследования минерального сырья / Л.Ф.Борисенко, Л.М.Делицын и др.; ЗАО «Геоинформмарк». М., 1997. 65 с.
5. Васильева М.А. Исследование полимерного материала рабочей камеры-канала магнитного насоса для перекачивания тяжелых нефтей / М.А.Васильева, С.Фёйт // Записки Горного института. 2016. Т. 221. С. 651-654. DOI: 10.18454/PMI.2016.5.651
6. Гусев В.П. Основы гидравлики / Изд-во ТПУ. Томск, 2009. 172 с.
7. Ромашев А.О. К вопросу статистической проверки данных для обогащения руд различного генезиса / А.О.Ромашев, Т.Н.Александрова // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. № 19. Т. 12. С. 5613-5619.
8. Alexandrov V. Estimation of efficiency of hydrotransport pipelines polyurethane coating compared to steel pipelines / V.Alexandrov, M.Vasilyeva // International Conference on Transport and Sedimentation of Solid Particles. Prague, 2017. P. 19-26.
9. Aleksandrov V.I. Estimation of efficiency of hydrotransport pipelines polyurethane coating application in comparison with steel pipelines / V.I.Aleksandrov, M.A.Vasilyeva, I.B.Pomeranets // Earth and Environmental Science. 2017. № 87(2). P. 22001.
10. Berta M. Correlation between in-line measurements of tomato ketchup shear viscosity and extensional viscosity / M.Berta, J.Wiclund, R.Kotse // Journal of Food Engineering. 2016. Vol. 173. P. 8-14.
11. Heywood N. Developments in slurry pipeline technologies / N.Heywood, J.Alderman // Chemical Engineering Progress. 2003. Iss. 4. P. 100-107.
12. Slurry Transport Using Centrifugal Pumps / K.C.Wilson, G.R.Addie, S.Aellgren, R.Clift. US: Springer, 2006.
13. Vlasak P. Fully stratified particle-laden flow in horizontal circular pipe / P.Vlasak, B.Kysela, Z.Chara // Particulate Science and Technology. 2014. Vol. 32. № 2. P. 179-182.

Авторы: В.И.Александров, *д-р техн. наук, профессор, Aleksandrov_VI@pers.spmi.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), М.А.Васильева, канд. техн. наук, доцент, vasilyeva_ma@pers.spmi.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).*

Статья поступила в редакцию 11.03.2018.

Статья принята к публикации 25.05.2018.



УДК 692.1; 69.035

МЕТОД ПРОГНОЗА ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ УСТРОЙСТВЕ КОТЛОВАНОВ В УСЛОВИЯХ ПЛОТНОЙ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СПОСОБА «СТЕНА В ГРУНТЕ»

П.А.ДЕМЕНКОВ, Л.А.ГОЛДОБИНА, О.В.ТРУШКО

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

В статье предложен метод прогноза деформации земной поверхности при устройстве котлованов в условиях плотной городской застройки с применением способа «стена в грунте», основанный на моделировании методом конечных элементов.

Приведены результаты численного моделирования строительства полузаглубленного сооружения под защитой «стены в грунте». Выявлены закономерности изменения напряженно-деформированного состояния в зависимости от параметров стены и физико-механических свойств грунтов. В работе приведены мультимедийные модели оседаний поверхности при строительстве котлована способом «стена в грунте», эпюры изгибающих моментов, поперечных и продольных сил, возникающих в стене.

Для оценки расхождения результатов моделирования в плоской и объемной постановке задачи выполнены численные эксперименты в Plaxis 2D и 3D.

Ключевые слова: котлованы; оседания; стена в грунте; смещения; грунты; полузаглубленные подземные сооружения; метод конечных элементов

Как цитировать эту статью: Деменков П.А. Метод прогноза деформации земной поверхности при устройстве котлованов в условиях плотной городской застройки с применением способа «стена в грунте» / П.А.Деменков, Л.А.Голдобина, О.В.Трушко // Записки Горного института. 2018. Т. 233. С. 480-486. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.480

Введение. Уменьшение свободной наземной территории для застройки и развития транспортной инфраструктуры, инженерных систем и обеспечения местами парковки личного транспорта требуют в мегаполисах и крупных городах все более активного использования подземного пространства, что приводит к необходимости устройства глубоких котлованов и строительства полузаглубленных сооружений в условиях плотной застройки. Освоение подземного пространства городов осуществляется как открытым, так и закрытым способом [2, 12].

Интенсивное освоение подземного пространства городов в условиях плотной городской застройки может оказывать негативное воздействие на нее [3, 4, 6-9, 13]. Для снижения негативного влияния при строительстве полузаглубленных сооружений на основание и фундаменты соседних зданий наиболее эффективным является «стена в грунте», которая позволяет минимизировать воздействие на окружающую застройку [1, 5, 6].

Анализируя результаты работ [5, 11], посвященных расчету и натурным наблюдениям за строительством глубоких котлованов, можно выделить следующие факторы, оказывающие наибольшее влияние на формирование напряженно-деформированного состояния ограждающих конструкций и вмещающего массива: инженерно-геологические условия строительства, глубина сооружения и жесткость ограждающих конструкций.

Метод прогноза деформации земной поверхности при устройстве котлованов. Деформации грунтового массива в окрестности полузаглубленного сооружения могут вызвать повреждения зданий и сооружений, расположенных в зоне влияния. Прогноз перемещений грунтового массива при строительстве полузаглубленных подземных сооружений способом «стена в грунте» в условиях плотной городской застройки является важной и сложной задачей.

Наиболее полную картину деформирования грунтового массива при сооружении полузаглубленного сооружения можно получить при использовании численных методов анализа. Алгоритм расчета полузаглубленных подземных сооружений представлен на рис.1.

В первую очередь при подготовке исходных данных задаются характеристики грунтового массива. Особую осторожность необходимо проявлять при оценке результатов инженерно-геологических изысканий, так как часто лабораторные испытания не проводятся, а характеристики грунтов принимаются по нормативным документам, но даже при проведении лабораторных испытаний их результаты могут существенно отличаться от реальных характеристик грунтов. Это связано прежде всего с влиянием строительных работ на гидрогеологическую ситуацию строительной площадки и ее окрестности и масштабным эффектом.



Рис. 1. Алгоритм расчета полузаглубленных подземных сооружений

Сегодня существует большое количество моделей поведения грунта. Они отличаются как сложностью, объемом входных данных, так и областью применения к конкретным грунтам. Выбранная модель грунта должна соответствовать реальному поведению грунта. Для песчаных и глинистых грунтов наиболее точные результаты показала модель упрочняющегося грунта (Hardening soil model).

Разработка расчетной схемы подразумевает задание жесткостных характеристик несущих конструкций, узлов их сопряжения и определение этапности возведения сооружения. При этом особое внимание следует уделять осушению котлована, так как оно способно существенно менять физико-механические свойства грунтов.

По результатам численного моделирования выполняется их аналитическая обработка. Проводится аппроксимация полученных зависимостей оседаний, горизонтальных перемещений поверхности, изгибающих моментов и перерезывающих сил в несущих конструкциях и т.д. при изменении характеристик вмещающих грунтов или элементов крепления. Полученные формулы могут использоваться для оперативного инженерного расчета котлованов, а также при возникновении нештатных ситуаций, что повышает безопасность строительства.

Все здания, попадающие в зону влияния строительства котлована, должны обследоваться на предмет оценки технического состояния. Составляется таблица обследуемых зданий и сооружений с указанием категорий технического состояния, их особенностями и рекомендациями по усилению (ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния).

Степень воздействия на окружающую застройку зависит от расстояния до здания или сооружения, наклона и радиуса кривизны поверхности и определяется мульдой оседания. При выделении безопасной зоны строительства необходимо учитывать особенности зданий и сооружений существующей застройки.

Самыми опасными для зданий и сооружений являются неравномерные оседания. Здания с монолитным железобетонным несущим каркасом обладают наибольшей жесткостью. Предельная относительная разница в осадках для них составляет 0,0024, для крупнопанельных бескаркасных без

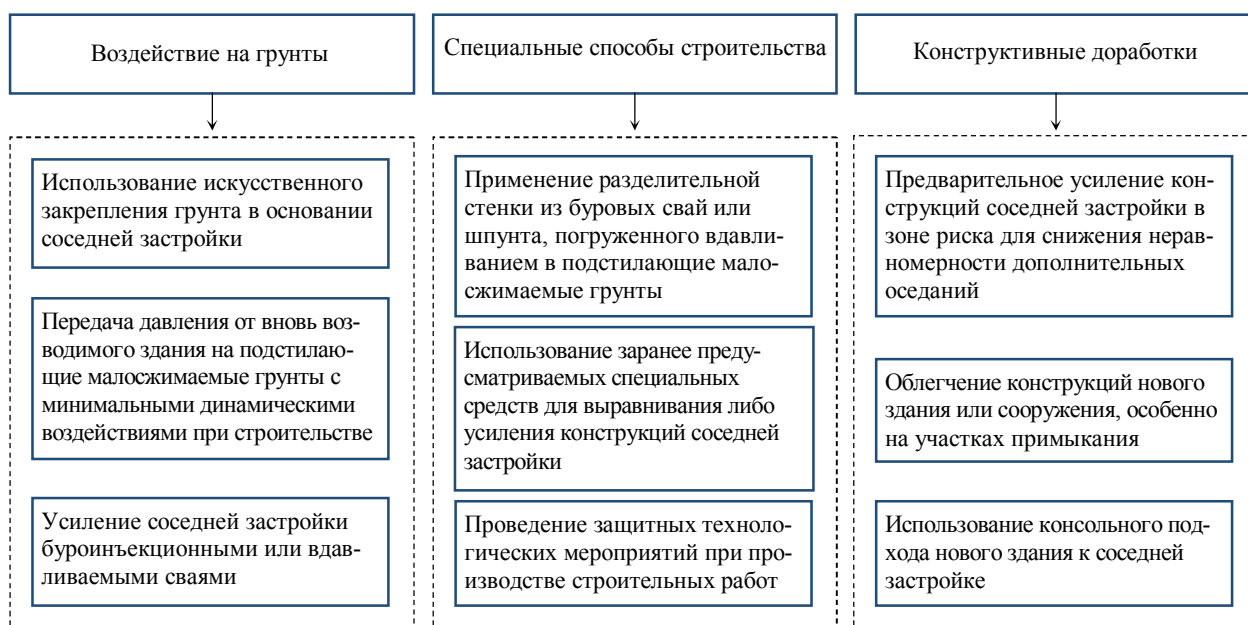


Рис.2. Классификация мероприятий, направленных на снижение негативных воздействий от строительства на соседнюю застройку

непрерывных арматурных поясов – 0,0015 (ТСН 50-302-2004. Проектирование фундаментов зданий и сооружений в Санкт-Петербурге). Коробчатые фундаменты обеспечивают наибольшую жесткость зданий и имеют самые большие предельные оседания (20-30 см) по сравнению с другими типами фундаментов.

Ширина, длина и высота являются основными геометрическими параметрами здания и по величине их отношений можно судить об устойчивости зданий. Здесь выделяются два основных типа: протяженные здания и здания башенного типа. В протяженных зданиях предельные оседания меньше, но допускается больший крен по сравнению со зданиями башенного типа.

Здание по отношению к котловану может быть ориентировано под разным углом относительно большей оси здания. Предпочтительно перпендикулярное или параллельное расположение здания. Величина оседаний также напрямую зависит от расстояния до котлована.

Если совместные деформации оснований и конструкций соседней застройки превышают допустимые пределы, то проводят различные мероприятия, направленные на улучшение характеристик грунта и повышение жесткости здания или его приспособление к неравномерным воздействиям (рис.2). Разделение по категориям выполнено условно.

Апробация метода. Были выполнены численные эксперименты в плоской и объемной постановке с использованием программного комплекса Plaxis 2D и Plaxis 3D. Рассмотрено три варианта сооружения глубокого котлована (рис.3). Каждый вариант предполагает расчет с тремя различными жесткостными показателями «стены в грунте». При моделировании в плоской постановке были приняты следующие геометрические параметры вмещающего массива: ширина 200 м, высота 40 м. Задача симметричная относительно оси центра котлована. Запрещены перемещения низа модели по оси Y и бока модели по оси X .

Ширина котлована для плоской модели 20 м. Длина котлована в объемной постановке задачи принималась 30; 35 и 40 м. Для предотвращения горизонтальных смещений стенок котлована использовалась «стена в грунте», выполненная из бетона В40 толщиной 800; 600 и 400 мм. Для повышения ее жесткости применяется распорная система с шагом 5 м по глубине. В зависимости от глубины расположения яруса менялась жесткость распорок: 1-й ярус – EI; 2-й – 2EI; 3-й – 3EI; 4-й – 1,5EI. В качестве распорки первого яруса служила стальная труба диаметром 500 мм из стали шириной 10 мм. Уровень грунтовых вод понижался на 1 м ниже дна котлована на всех этапах вычислений.

Грунты оснований зданий и сооружений могут существенно различаться в различных регионах страны. В связи с этим при моделировании рассмотрены грунты, характеризующиеся раз-

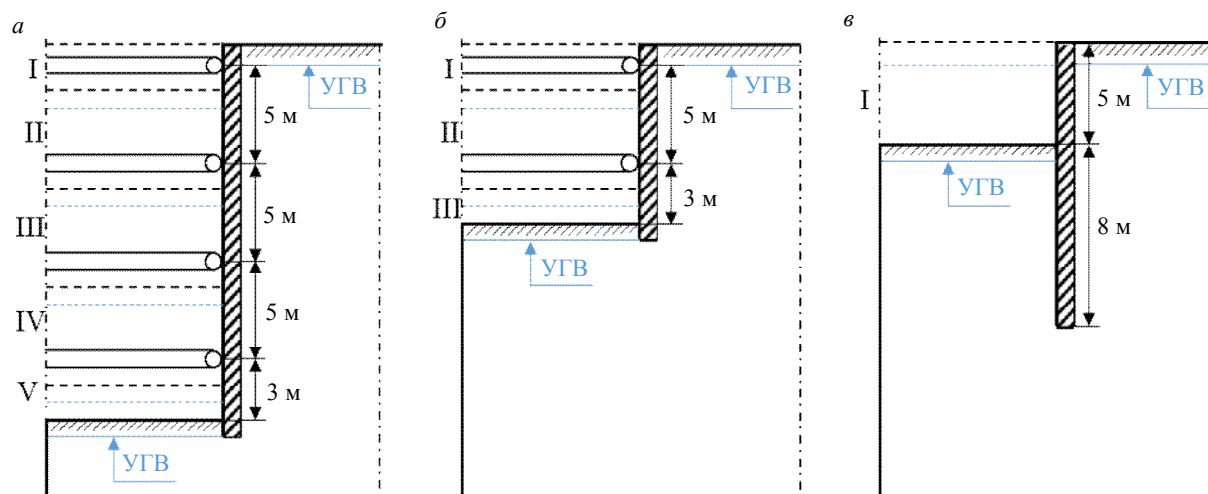


Рис.3. Варианты моделей котлована: а-в – котлован глубиной 19; 9 и 5 м соответственно, консольная схема;
I-V – этапы разработки котлована

личным коэффициентом пористости e : четыре варианта глинистых (модель 1 – $e = 0,85$, ..., модель 4 – $e = 0,55$) и четыре варианта песчаных (модель 1 – $e = 0,75$, ..., модель 4 – $e = 0,45$). В общей сложности было выполнено около 100 расчетов.

Для расчетов была принята упруго-пластическая модель упрочняющегося грунта, учитывающая изменение свойств при малых деформациях, которая получила широкое распространение при прогнозе деформаций грунтового массива в окрестности подземных сооружений. Аprobация этой геомеханической модели, проведенная отечественными и зарубежными исследователями, показала, что представленная геомеханическая модель дает более точные результаты при выполнении прогноза формирования напряженно-деформированного состояния в системе «полузаглубленное подземное сооружение – существующая застройка». Расчет велся на недrenированное состояние грунтов с учетом естественной скорости фильтрации и распределения порового давления.

Основные результаты моделирования в плоской постановке для глинистых грунтов с коэффициентом пористости представлены на рис.4.

Из графиков видно, что зона влияния строительства глубокого котлована достигает 60-65 м для всех моделей. При этом максимальная величина оседаний поверхности и кривизна мульды сдвига значительно отличаются для разных вариантов расчета. Таким образом, можно сделать вывод, что степень воздействия строительства на здания, попадающие в зону влияния для разных вариантов моделей, будет отличаться.

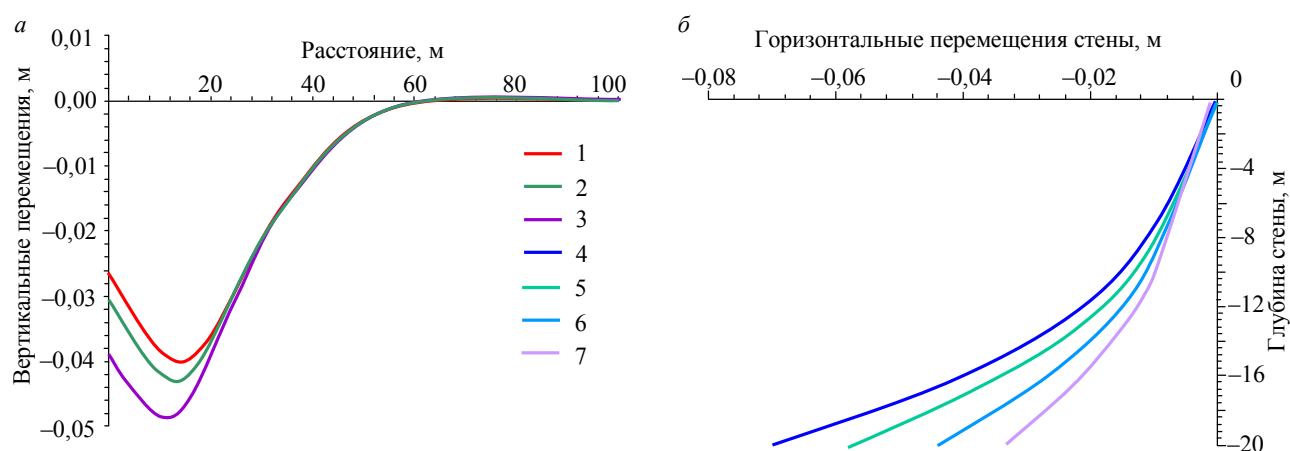


Рис.4. Графики вертикальных (а) перемещений поверхности в глине № 1 с различными толщинами «стены в грунте» (модель 1) и эпюры горизонтальных смещений «стены в грунте» (б) с различными характеристиками глин (модели 1-4)
Кривые 1, 4-7 – толщина стены 800 мм; 2 – 600 мм; 3 – 400 мм; 1-4 – $e = 0,85$; 5 – 0,75; 6 – 0,65; 7 – 0,55

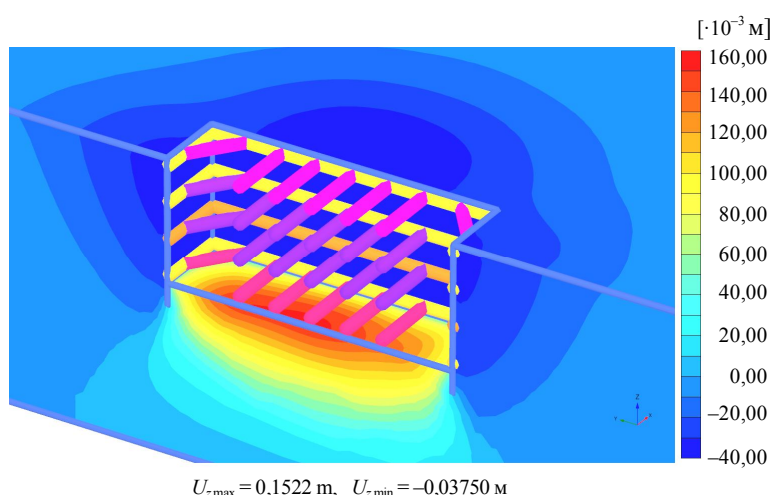


Рис.5. Мульды сдвижений земной поверхности при строительстве котлована длиной 40 м в песчаных грунтах (Plaxis 3D)

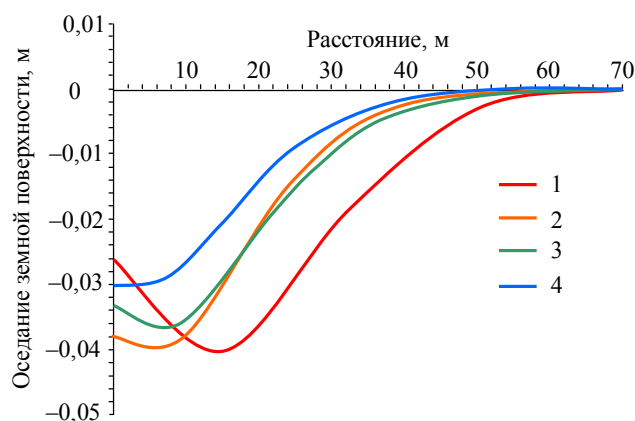


Рис.6. Графики вертикальных перемещений поверхности (толщина стены 800 мм) в глине № 1 для плоской модели (1) и 3D-моделей с различной длиной котлована (2-4 – В = 35; 30 и 40 м соответственно)

Кривые вертикальных перемещений поверхности при моделировании в плоской и объемной постановке задачи имеют некоторые различия (рис.6). Максимальная величина оседаний в плоской постановке (4 см) соответствует 3D-модели с длиной котлована 35 м. При этом экстремум в первом случае находится на расстоянии 15 м от стены, а во втором – 8 м. Для других длин котлована моделирование в плоской постановке дает завышенные значения по максимальной величине вертикальных перемещений поверхности. Большое оседание поверхности по графику в объемной модели с длиной котлована 35 м по сравнению с котлованом 40 м связано с расстановкой распорок. Графики строились в разрезе по центру котлована и в моделях 30 и 40 м он попал на распорки, а в модели 35 м – между распорками.

Обсуждения. Большой интерес представляет анализ наблюдений за деформациями грунтового массива в окрестности подземного сооружения, расположенного в слабых грунтах ($c_u < 75$ кПа), выполненных Мурманом [10]. Анализ результатов более чем 500 наблюдений показал, что в зависимости от объекта строительства горизонтальные смещения стены изменяются от $0,5 \% H$ (H – глубина котлована) до $1,0 \% H_e$. Среднее значение горизонтальных смещений $0,87 \% H$. Максимумы горизонтальных смещений располагаются на расстоянии от $0,5$ до $1,0H$ от поверхности земли. Максимальные величины вертикальных смещений земной поверхности находятся в диапазоне от $0,1$ до $10 \% H$. Среднее значение максимальных вертикальных смещений земной поверхности $1,1 \% H$. Максимальное значение вертикальных смещений земной поверхности наблюдается на расстоянии до $0,5 \% H$, однако отмечены случаи, когда значение максимальных оседаний земной поверхности удалено на расстояние до $2 \% H$.

В первом варианте максимальный наклон не превышает $2,7$ мм/м, во втором – $1,6$ мм/м. Для консольной схемы эта величина составляет около 9 мм/м и наблюдается на расстоянии от 0 до 15 м от ограждения котлована. Для более вытянутого в плане здания такая величина наклона может быть опасной. На большем расстоянии от ограждения котлована (15 м и более) наклон не превышает 1 мм/м и эта зона может считаться условно безопасной. Следовательно, при необходимости возведения полузаглубленного сооружения в непосредственной близости от существующей застройки в нашем случае требуется повысить жесткость ограждающей конструкции за счет усиления распорной системы.

Для оценки расхождения результатов моделирования в плоской и объемной постановке задачи были выполнены численные эксперименты в Plaxis 3D. Рассмотрены варианты с шириной котлована 20 м и различной длиной 30 ; 35 ; 40 м. Все параметры грунтового массива и конструкций задавались аналогично плоским моделям.

Оседания земной поверхности при строительстве котлована длиной 40 м в песчаных грунтах показаны на рис.5.



Полученные в работе результаты хорошо согласуются с результатами других исследователей. Горизонтальные смещения стены в отношении к глубине котлована для первой и второй схем расчета не превысили 0,53 % H . Максимальная величина оседаний земной поверхности для первой схемы составила 0,26 % H , для второй – 0,18 % H . Консольная схема для данных условий показала большие значения перемещений. Горизонтальные перемещения стены в отношении к глубине котлована для консольной схемы достигли 2,8 % H . Максимальная величина оседаний земной поверхности для третьей схемы 1,8 % H . При этом для глинистых грунтов был обеспечен коэффициент запаса устойчивости не менее 1,3. В песчаных грунтах с консольной схемой и принятыми параметрами стены, а также при значительном увеличении толщины и глубины стены обеспечить устойчивость не удалось.

Заключение. Предложенный метод прогноза деформации земной поверхности при устройстве котлованов в условиях плотной городской застройки с применением способа «стена в грунте» позволяет получить полную картину взаимодействия строящегося полузаглубленного сооружения с окружающей застройкой.

Устойчивость полузаглубленного сооружения и деформации грунтового массива в его окрестности взаимосвязаны: чем выше коэффициент устойчивости, тем менее значительные деформации развиваются в грунтовом массиве. По мере снижения коэффициента запаса по устойчивости стен полузаглубленного сооружения деформации в грунтовом массиве нарастают вплоть до неконтролируемой величины. Это наблюдалось в консольной схеме ограждающих конструкций для песчаных грунтов. Расчетная схема с консольной стеной может быть успешно реализована только при небольшой глубине котлована. Максимальное оседание для котлована с толщиной стены 800 мм составило 91 мм. Горизонтальные смещения поверхности достигли 132 мм.

Применение даже наиболее надежных технологий создания ограждающих конструкций типа «стена в грунте» не позволяет полностью исключить влияние на существующую застройку. Так, максимальное оседание для глубины котлована 19 м достигало 59 мм. Зона влияния строительства распространялась до 60 м ($3H$).

Решения в плоской постановке дают завышенные значения зоны влияния по сравнению с трехмерной. Наблюдается почти двукратное расхождение в оседаниях по величине между плоским и объемным решением на расстоянии от стены котлована 22-55 м. Вблизи здания расхождение меньше.

В рамках статьи апробация метода была представлена только частично без детального анализа результатов и оценки влияния на здания.

Благодарность. Исследования выполнены по гранту Российского научного фонда (проект № 16-17-00117).

ЛИТЕРАТУРА

1. Деменков П.А. Прогноз безопасной зоны влияния строительства полузаглубленных подземных сооружений на окружающую среду / П.А.Деменков, Н.А.Беляков, В.И.Очуров // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2017. Вып. 4. С.311-324.
2. Протосеня А.Г. Изучение прочности на сжатие трещиноватого горного массива / А.Г.Протосеня, П.Э.Вербило // Записки Горного института. 2017. Т. 223. С. 51-57. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.51
3. Протосеня А.Г. Разработка численной модели прогноза деформаций грунтового массива при строительстве полузаглубленного сооружения в программном комплексе ABAQUS / А.Г.Протосеня, М.А.Карасев // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2014. № 2. С. 2-6.
4. Artola J. A solution to the braced excavation collapse in Singapore // M.Eng. Thesis. 2005. P. 1-86.
5. Clough G.W. Construction-induced movements of in-situ walls / G.W.Clough, T.D.O'Rourke // Design and performance of earth retaining structures. ASCE special publication. 1990. № 25. P.439-470.
6. Demenkov P.A. Predicting land-surface deformations during the construction of underground facilities of complex spatial configuration / P.A.Demenkov, M.A.Karasev, D.N.Petrov // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2017. Vol. 8. Iss. 11. P. 1161-1171.
7. Demenkov P.A. Emergency Assessment of Semi-Embedded Construction / P.A.Demenkov, N.A.Belakov, V.I.Ochkurov // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Vol. 11. № 21. P. 10698-10707
8. Karlsrud K. Design of deep excavations in soft clays / K.Karlsrud, L.Andresen // Proc. of the 14-th European Conference on SMGE. Madrid. 2007. Vol. 1. P.75-99.



9. *Lim P.C.* A Floating-Type braced excavation in soft marine clay / P.C.Lim, T.S.Tan // Proc. of Underground Singapore. November, 2003. P. 326-337.
10. *Moormann C.* Analysis of wall and ground movements due to deep excavations in soft soil based on a new worldwide database // Soils Found. 2004. № 44(1). P. 87-98.
11. *Peck R.B.* Deep excavation and tunneling in soft ground // Proceedings of the 7th international conference on soil mechanics and foundation engineering. Mexico City. State of the art Volume. 1969. P. 225-290.
12. *Protosenya A.G.* Investigating mechanical properties of argillaceous grounds in order to improve safety of development of megalopolis underground space / A.G.Protosenya, M.A.Karasev, D.N.Petrov // International Journal of Applied Engineering Research. Research India Publications. 2016. Vol. 11. Iss. 16. P. 8949-8956.
13. *Shirlaw J.N.* Deep excavations in Singapore marine clay / J.N.Shirlaw, T.S.Tan, K.S.Wong // Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground: Proc. of the 5-th Int. Symposium, Amsterdam, 2005. P. 13-28.

Авторы: **П.А.Деменков**, д-р техн. наук, профессор, demenkov_pa@pers.spmi.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), **Л.А.Голдобина**, д-р техн. наук, профессор, goldobina_la@pers.spmi.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), **О.В.Трушко**, канд. техн. наук, доцент, trushko_ov@pers.spmi.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Статья поступила в редакцию 23.01.2018.

Статья принята к публикации 01.09.2018.



Нефтегазовое дело

УДК 552.1:53

ОБОСНОВАНИЕ РЕПРЕЗЕНТАТИВНОГО ОБЪЕМА ДАННЫХ ФИЛЬТРАЦИОННО-ЕМКОСТНЫХ СВОЙСТВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СТАТИСТИЧЕСКИ ДОСТОВЕРНЫХ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ

А.А.АБРОСИМОВ, Е.В.ШЕЛЯГО, И.В.ЯЗЫНИНА

Российский государственный университет нефти и газа имени И.М.Губкина, Москва, Россия

В статье рассмотрены вопросы обоснования объема выборки для петрофизического описания объекта по результатам традиционных лабораторных измерений, а также обработки данных рентгеновской томографии. Рассмотрен новый подход к расчету фильтрационно-емкостных свойств коллекторов из данных метода рентгеновской томографии путем формирования массива виртуальных кубов. Обсуждаются вопросы необходимого количества выделяемых кубов для моделирования флюидодинамики. Показаны критерии числа лабораторных измерений и выделяемых из цифровой модели виртуальных кубов для получения статистически достоверных петрофизических связей. Сделан вывод о необходимости корректного сравнения расчетных и лабораторных петрофизических связей.

Ключевые слова: анализ керна; рентгеновская томография; петрофизические связи; выборка; пористость; проницаемость; виртуальный куб

Как цитировать эту статью: Абросимов А.А. Обоснование репрезентативного объема данных фильтрационно-емкостных свойств для получения статистически достоверных петрофизических связей / А.А.Абросимов, Е.В.Шеляго, И.В.Язынина // Записки Горного института. 2018. Т. 233. С. 487-491. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.487

Введение. Первые работы в области использования рентгеновской томографии (РТ) для изучения горных пород, в том числе коллекторов нефти и газа, относятся к 80-м годам прошлого века [15]. В настоящее время данный метод вызывает повышенный интерес у нефтегазовых компаний, который связан, с одной стороны, с тем, что он является неразрушающим, требует для исследования малый объем образца любой формы и, следовательно, открывает перспективы исследования слабо консолидированного и непригодного для лабораторных исследований керна. С другой стороны, математическое моделирование позволяет рассчитывать необходимые для петрофизиков и разработчиков свойства. Также интересна идея создания «виртуального кернаохранилища» с целью его использования для подбора методов повышения нефтеотдачи.

Количество работ, использующих РТ для исследований керна продуктивных нефтегазоносных отложений, растет. Сегодня, как правило, томография дополняет литологическое описание керна и применяется для количественной оценки пористости [3, 5, 10]. Расчет фильтрационных характеристик (например, газопроницаемости) встречается реже [7, 11], а расчетные капиллярные кривые или кривые относительных фазовых проницаемостей – в единичных случаях [9]. Исследователи сталкиваются с ограничениями математических алгоритмов, большими временными затратами на проведение расчетов, а также высокими требованиями к вычислительным мощностям.

Для расчета фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) существуют несколько подходов (рис.1). Первый заключается в подборе представительного объема (в англ. REV – representative elementary volume) и использовании его в гидродинамическом моделировании в масштабе пор [1, 6, 8, 12-14]. Использование данного подхода требует значительно больших вычислительных ресурсов, в связи с чем был предложен альтернативный подход с формированием значительно меньших объемов (виртуальных кубов) [2, 4]. Уменьшение виртуального куба снижает требования к вычислительной машине, но и уменьшает его представительность по отношению к исходному образцу. Поэтому авторами данной статьи предложено выделять массивы виртуальных кубов из одного образца керна. Данный подход позволяет экономить вычислительные ресурсы и время работы рентгеновской трубки для получения конечного результата, а также построить петрофизические связи по ограниченному числу стандартных цилиндров керна или по фрагментам в случае его разрушенности.

В настоящей работе приведено обоснование выбора необходимого количества виртуальных кубов для построения статистически достоверной петрофизической связи по данным РТ.

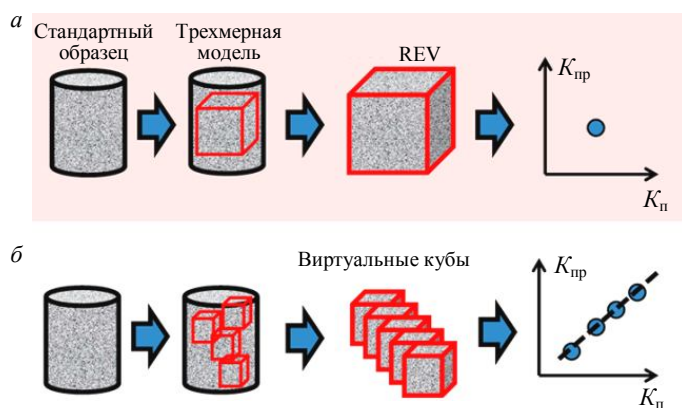


Рис.1. Подходы к расчету ФЕС горных пород
а – традиционный подход – одно значение (суперкомпьютер);
б – новый подход – несколько значений (стационарный компьютер)

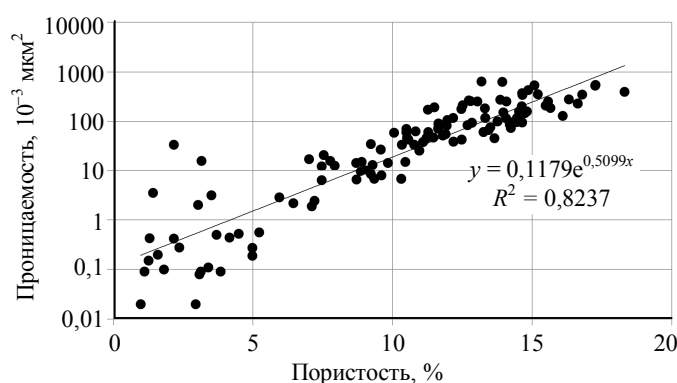


Рис.2. Зависимость $K_{пр} = f(K_{п})$ для отложений среднего девона афонинского горизонта

Объект и метод исследования. Объектом исследования являются терригенные отложения среднего девона афонинского горизонта. Лабораторные исследования проведены по 150 образцам, для РТ исследований были отобраны два образца, представленные песчаником мелко- и среднезернистым, по минеральному составу кварцевым (90-95 %). Пустотное пространство представлено порами межзернового типа и распределено равномерно.

Метод рентгеновской томографии заключается в использовании проникающей способности однонаправленного рентгеновского излучения с последующей регистрацией и построением рентгеновского изображения на приемниках рентгеновских лучей. Результатом РТ-съемки и последующей обработки является трехмерная модель ядра. Для оценки фильтрационно-емкостных свойств выделяется пустотное пространство и строится его объемная модель. В рамках предложенного подхода предлагается разбивать модель пустотного пространства отснятого образца на фрагменты (виртуальные кубы), которые используются для расчета пористости и газопроницаемости и построения соответствующей петрофизической зависимости $K_{пр} = f(K_{п})$.

Число виртуальных кубов изменяется до тех пор, пока полученная по ним петрофизическая зависимость не перестанет изменяться и наилучшим образом не совпадет с зависимостью, полученной в лаборатории на образцах $30 \times 30 \text{ мм}$ в соответствии с ГОСТ 26450.2-85 «Породы горные. Метод определения коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации». В качестве параметров, контролирующих изменение зависимости, были выбраны: дисперсия, среднее квадратичное отклонение (СКО) и тангенс угла наклона петрофизической связи.

Результаты исследования, обсуждение. Согласно РД 153-39.0-072-01 «Техническая инструкция по проведению геофизических исследований и работ приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах» для построения петрофизических связей «керна-керна» необходимо исследовать не менее 30 образцов ядра. В связи с этим было решено вначале проверить это положение на лабораторной зависимости (рис.2), где выборка образцов производилась случайным образом.

На рис.3 показано, как происходит изменение значений дисперсии, среднего квадратичного отклонения (СКО) и тангенса угла в зависимости от размера выборки. Для согласования значений проницаемости удастся добиться стабилизации параметров при 40 образцах ядра, в то время как для пористости для этого необходимо 80 образцов. Тангенс угла наклона является комплексным параметром, учитывающим взаимоотношение обоих параметров, и, как видно, перестает изменяться при количестве исследуемых образцов, равным 80. Таким образом, для данного типа коллектора количество образцов, необходимых для построения статистически достоверной связи проницаемости от пористости, составляет порядка 80, что согласуется с правилами РД (более 30 образцов). Если взять для исследований только 30-40 образцов, то можно получить некорректные данные, поэтому рекомендуется проводить подобный статистический анализ, который, в свою очередь, может являться дополнением к указанному РД.

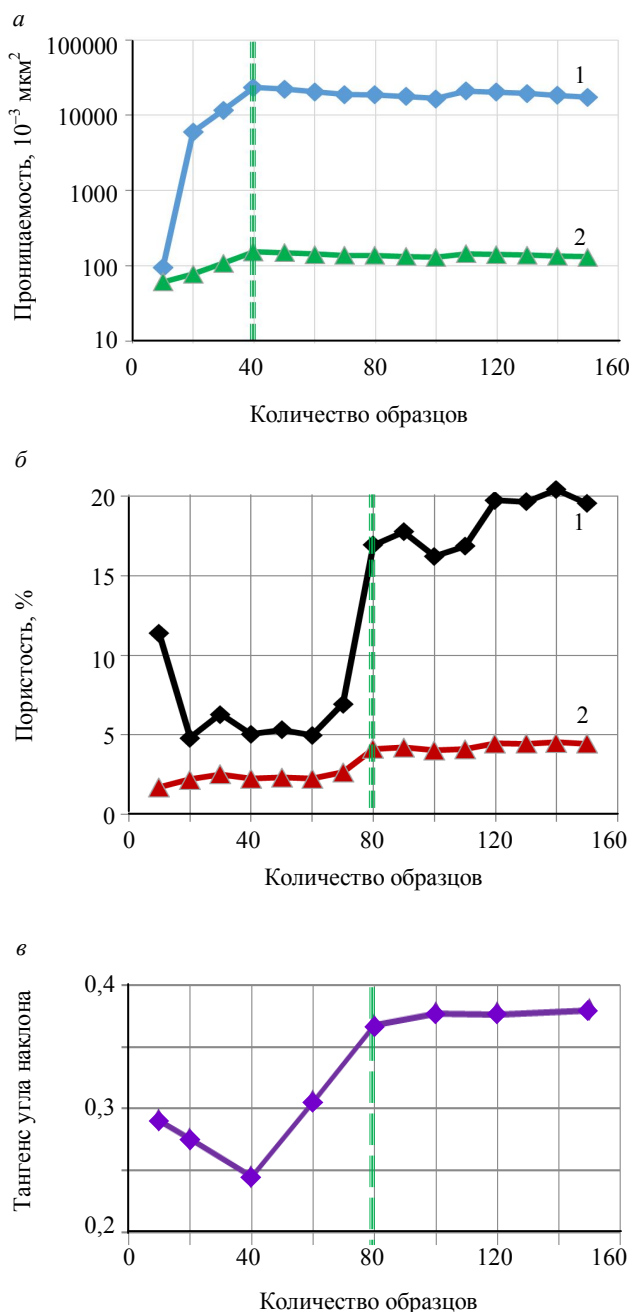


Рис.3. Зависимости дисперсии и среднего квадратичного отклонения проницаемости (а), пористости (б), тангенса угла (в) от количества исследованных образцов
1 – дисперсия; 2 – СКО

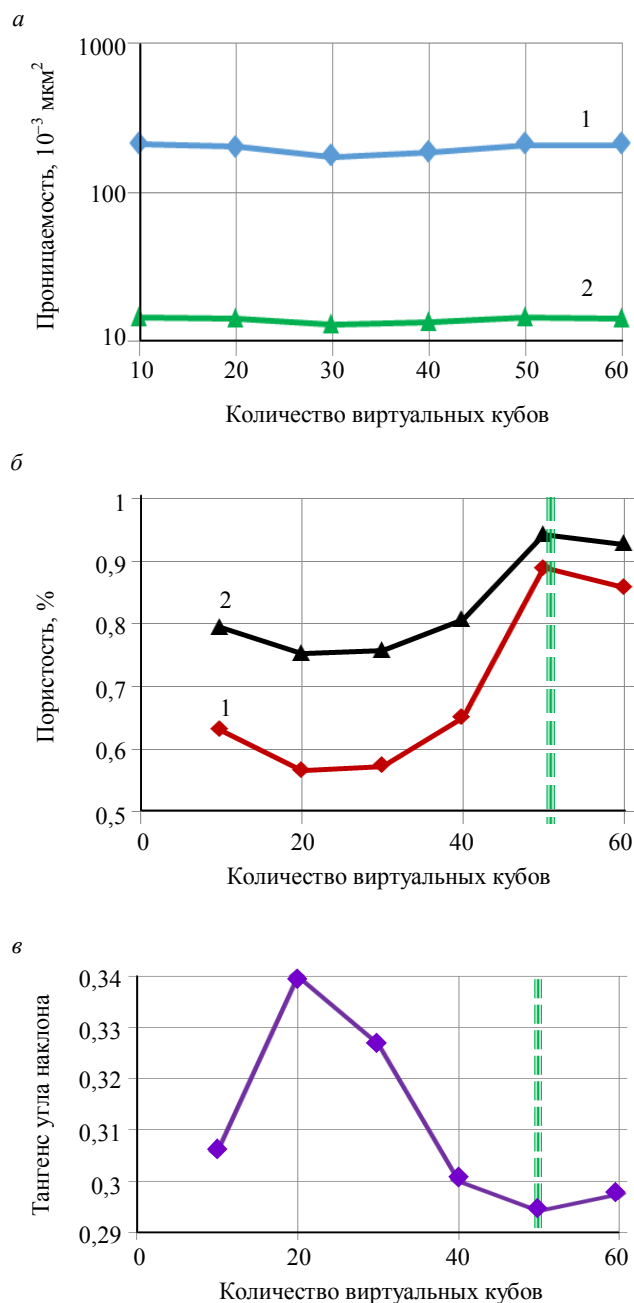


Рис.4. Зависимости дисперсии и среднего квадратичного отклонения проницаемости (а), пористости (б), тангенса угла (в) от количества виртуальных кубов,
1 – дисперсия; 2 – СКО

Аналогичные процедуры были проведены в случае РТ, только в данном случае зависимость строилась внутри одного образца. Предположение о том, что виртуальные кубы, вырезанные из данных РТ-съемки одного образца керна, могут формировать корреляционную связь пористости и проницаемости, является новым и не применялось до сих пор на практике. На рис.4 приводятся результаты по одному из исследованных образцов.

Как видно, в случае проницаемости дисперсия и СКО практически не меняются с увеличением количества виртуальных кубов. Для пористости, также как и для тангенса угла наклона, эти значения устанавливаются на постоянном уровне при 50 кубах. Однако для второго исследуемого образца это количество составило 40 кубов, что говорит о том, что количество выделяемых кубов из каждого образца для построения статистически достоверной связи индивидуально. В результате применения данного подхода были получена расчетная связь пористость – прони-

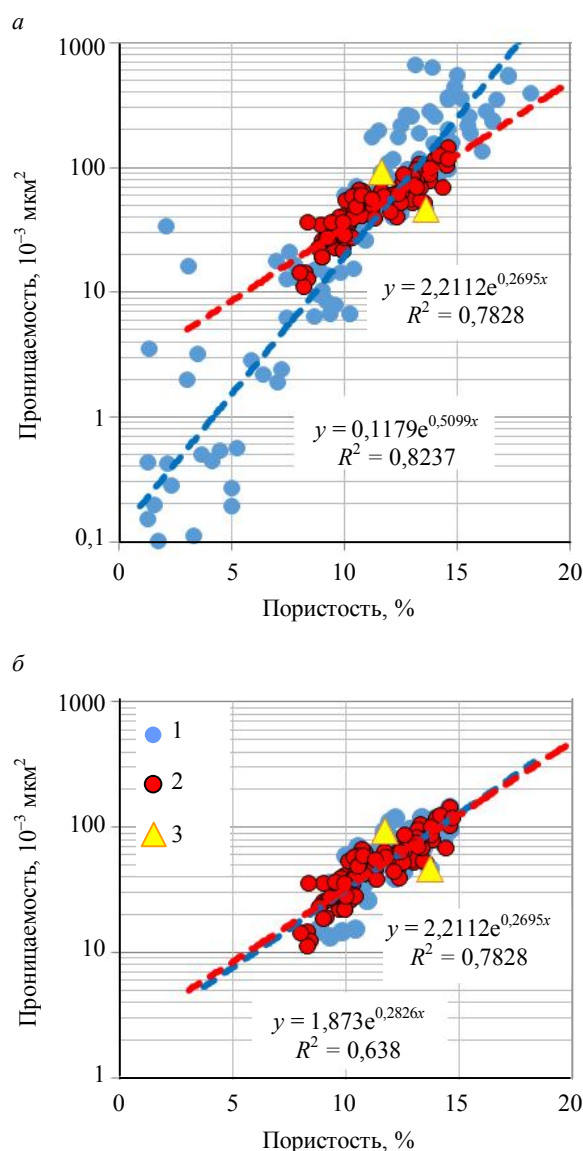


Рис.5. Сопоставление результатов:
а – с полным объемом лабораторных исследований
б – в интервале исследований, полученных по РТ
1 – лаборатория; 2 – РТ; 3 – образцы для РТ

цаемость, сравнение ее с лабораторной приводится на рис.5, а. В целом, можно отметить хорошее совпадение результатов, однако зависимость, полученная по РТ, имеет несколько другой наклон. Это можно объяснить тем, что выбранные образцы (желтые треугольники) характеризуют достаточно узкую область лабораторной зависимости, поэтому сравнивать результаты по этим двум образцам с лабораторной зависимостью, имеющей значительно более широкий разброс, не совсем корректно. В связи с этим интервал сравнения был ограничен областью, где имелись расчетные данные РТ. На рис.5, б показано, что при этом достигается полная сходимость петрофизических связей.

Выводы

В рамках настоящей работы сформулированы основные составляющие статистического подхода к определению фильтрационно-емкостных свойств горных пород по данным РТ с использованием массива виртуальных кубов:

1. Приведено обоснование количества вырезаемых кубов на основе использования таких статистических параметров как дисперсия, среднее квадратичное отклонение и тангенс угла наклона. Данный подход является универсальным, поскольку может быть применим как для терригенных, так и для карбонатных образцов.

2. Показано, что предлагаемый подход также применим для лабораторных исследований керна, помогает более обоснованно подходить к выбору количества образцов для построения статистически достоверных связей и является дополнением к РД 153-39.0-072-01.

3. Надежное построение петрофизических связей с использованием статистического подхода по данным виртуальных кубов, созданных на базе

РТ съемки, возможно только в пределах получаемых значений ФЕС. Аппроксимация расчетных зависимостей для фрагментов в область лучших или ухудшенных ФЕС может привести к погрешностям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абросимов А.А. Применение рентгеномографии для изучения фильтрационно-емкостных систем коллекторов нефти и газа // Труды РГУ нефти и газа имени И.М.Губкина. 2015. № 4/281. С. 5-15.
2. Аprobация нового подхода к определению петрофизических связей по данным рентгеновской томографии / И.В.Язынина, Е.В.Шеляго, А.А.Абросимов, Н.А.Веремко, Е.А.Грачев, Д.А.Бикулов // Нефтяное хозяйство. 2017. № 2. С. 36-40. DOI: 10.24887/0028-2448-2017-2-36-40.
3. Кочнев А.А. Палеонтологические исследования с помощью метода рентгеновской томографии / А.А.Кочнев, С.Н.Кривошеков // Master's Journal. 2015. № 2. С. 177-181.
4. Новый подход к исследованиям керна с помощью рентгеновской томографии для решения задач петрофизики / И.В.Язынина, Е.В.Шеляго, А.А.Абросимов, Н.А.Веремко, Н.Е.Грачев, Д.С.Сенин // Нефтяное хозяйство. 2017. № 1. С. 19-23.
5. Чугунов С.С. Комплексирование методов рентгеновской томографии и трехмерной электронной микроскопии при исследовании пород баженовской свиты Западной Сибири / С.С.Чугунов, А.В.Казак, А.Н.Черемисин // Нефтяное хозяйство. 2015. №10. С. 44-49.



6. *Al-Raoush R.* Representative elementary volume analysis of porous media using X-ray computed tomography / R.Al-Raoush, A.Papadopoulos // Powder Technology. 2010. Vol. 200. P. 69-77.
7. *Alreshedan F.* Investigation of permeability, formation factor, and porosity relationships for Mesaverde tight gas sandstones using random network models / F.Alreshedan, A.J.Kantzas // Petrol Explor Prod Technol. 2016. Vol. 6. P. 545-554. DOI.org/10.1007/s13202-015-0202-x.
8. Effects of sampling volume on the measurement of soil physical properties: simulation with X-ray tomography data / P.Baveye, H.Rogasik, O.Wendroth, I.Onasch, J.W.Crawford // Measurement Science and Technology. 2002. Vol. 13. P. 775-784.
9. Gas-Water Two Phase Flow Simulation Based on Pore Network Model / M.Mutailipu, Y.Liu, B.Wu, Y.Song, D.Wang, L.Ai. // Energy Procedia. 2017. Vol. 142. P. 3214-3219.
10. *Hickman-Lewis K.* X-ray microtomography as a tool for investigating the petrological context of Precambrian cellular remains // Geological Society. London. Special Publications. 2016. Vol. 448 (1). P. 33-56.
11. Permeability estimation of porous media by using an improved capillary bundle model based on micro-CT derived pore geometries / L.Jiang, Y.Liul, Y.Teng, J.Zhao1, Y.Zhang, M.Yang, Y.Song // Heat Mass Transfer. 2017. Vol. 53. P. 49-58. DOI 10.1007/s00231-016-1795-4.
12. *Razavi M.R.B.* Representative elementary volume analysis using X-ray computed tomography/ M.R.B.Razavi, B.Muhunthan, O.Al Hattamleh // Geotechnical Testing Journal. 2007. Vol. 30 (3). P. 212-219.
13. Various estimates of Representative Volume Element sizes based on a statistical analysis of the apparent behaviour of random linear composites / M.Salmi, F.Auslender, M.Bornert, M.Fogli // Comptes Rendus Mécanique. 2012. Vol. 340 (4-5). P. 230-246.
14. *Vandenbygaart A.J.* The representative elementary area (REA) in studies of quantitative soil micromorphology / A.J.Vandenbygaart, R.Protz // Geoderma. 1999. Vol. 89 (3-4). P. 333-346.
15. *Wellington S.L.* X-ray computerized tomography / S.L.Wellington, H.J.Vinegar // Journal of Petroleum Technology. 1987. Vol. 39. P. 885-898.

Авторы: **Абросимов А.А.**, канд. техн. наук, инженер, *abrosimov.aa@inbox.ru* (Российский государственный университет нефти и газа имени И.М.Губкина, Москва, Россия), **Шеляго Е.В.**, канд. техн. наук, доцент, *thelgp@yandex.ru* (Российский государственный университет нефти и газа имени И.М.Губкина, Москва, Россия), **Язынина И.В.**, канд. геол.-минерал. наук, доцент, *yazupina@mail.ru* (Российский государственный университет нефти и газа имени И.М.Губкина, Москва, Россия).

Статья поступила в редакцию 27.03.2018.

Статья принята к публикации 28.04.2018.



УДК 62-621.2:622.279.3

ВЛАГОСОДЕРЖАНИЕ ПРИРОДНОГО ГАЗА В ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЕ ПЛАСТА

Э.А.БОНДАРЕВ, И.И.РОЖИН, К.К.АРГУНОВА

ФГБУН «Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН», Якутск, Россия

Для модельной задачи отбора реального газа из скважины в центре кругового пласта с непроницаемыми кровлей и подошвой выполнен анализ влияния начальных пластовых условий на динамику распределения его влагосодержания. Использовалась математическая модель неизотермической фильтрации, в которой теплопроводность считалась пренебрежимо малой по сравнению с конвективным переносом. Для ее замыкания использовалась эмпирическая зависимость коэффициента несовершенства газа от давления и температуры, апробированная в предыдущих публикациях авторов. Связь между влагосодержанием, давлением и температурой газа описывалась эмпирическими зависимостями, основанными на формуле Бюкачека. Вычислительный эксперимент выполнялся следующим образом. Вначале из численного решения осесимметричной задачи неизотермической фильтрации реального газа определены давление и температура газа при заданном давлении на забое скважины. При этом условия на внешней границе пласта имитировали водонапорный режим отбора газа. Затем эти найденные функции времени и координат использовались для вычисления аналогичной зависимости для влагосодержания. Результаты эксперимента показали, что если пластовая температура существенно превышает равновесную температуру гидратообразования, то распределение влагосодержания в призабойной зоне будет практически идентично распределению температуры. В противном случае газ будет содержать пары воды только вблизи забоя скважины, а далее его влагосодержание будет практически равно нулю. Роль давления и в том и в другом случаях проявляется через интенсивность отбора газа, от которого, в свою очередь, зависят и интенсивность конвективного переноса тепла, и степень охлаждения газа за счет дросселирования.

Ключевые слова: влагосодержание природных газов; неизотермическая фильтрация; газовые гидраты; вычислительный эксперимент

Как цитировать эту статью: Бондарев Э.А. Влагосодержание природного газа в призабойной зоне пласта / Э.А.Бондарев, И.И.Рожин, К.К.Аргунова // Записки Горного института. 2018. Т. 233. С. 492-497. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.492

Введение. В недавней публикации авторов [1] описаны особенности добычи природного газа в Арктической зоне России, которые необходимо учитывать при математическом моделировании соответствующих технологических процессов. В ней же были приведены многочисленные примеры расчета образования газовых гидратов в скважинах и магистральных газопроводах. Настоящая публикация призвана дополнить статью [1] анализом динамики температуры и давления в призабойной зоне газовых скважин и оценкой влияния этих технологических параметров на влагосодержание добываемого газа. Актуальность решения такой задачи определяется тем воздействием, которое оказывает пластовая вода на гидратообразование в призабойной зоне, а также необходимостью осушки газа перед его подачей в магистральный газопровод. Кроме того, при существующей практике закачки в скважины метанола или других ингибиторов для предотвращения гидратообразования непосредственно в газоносном пласте необходимо предварительно вычислять расход этого реагента.

Равновесное влагосодержание природного газа. В пластах-коллекторах газовых и газоконденсатных месторождений газ контактирует с остаточной пластовой водой либо с краевыми и подстилающими водами и, следовательно, содержит пары воды. В условиях термодинамического равновесия их максимальное количество зависит от давления, температуры и состава газа [3-5, 7, 9]. Оно называется влагосодержанием w и в термодинамике определяется как отношение массы водяного пара m_{H_2O} к массе сухого газа m_g . В инженерных расчетах из-за подражания переводным справочникам США в России под влагосодержанием понимается отношение массы водяных паров к приведенному к стандартным условиям объему сухого газа W в килограммах на 1000 м^3 .

Аналитические зависимости влагосодержания природных газов W от давления p в паскалях и температуры T являются модификациями формулы Бюкачека [13]:

$$W = \frac{A(T)}{p} + B(T), \quad (1)$$

где A – коэффициент, равный влагоемкости (влагосодержание в условиях насыщения) идеального газа при нормальном атмосферном давлении; B – поправка на неидеальность природного газа, зависящая от состава газа [4, 7].

Остановим свой выбор на соотношениях, предложенных в монографиях [3, 4] как наиболее употребительных:

$$WG(p, T) = 10^{-3} \left(\frac{0,457}{p} \exp(0,0735(T - 273,15) - 0,00027(T - 273,15)^2) \right) + 0,0418 \exp(0,054(T - 273,15) - 0,0002(T - 273,15)^2); \quad (2)$$

$$WB(p, T) = 0,016 \cdot 10^{-3} \left(\frac{0,1 ps(T)}{p} 47482 + 10^{-\frac{1713,3}{T} + 6,694} \right), \quad (3)$$

где $ps(T) = 0,0061038 \exp(0,0735(T - 273,15) - 0,00027(T - 273,15)^2)$ – давление водяных паров над чистой водой.

Соотношения (2), (3) рекомендуется использовать для природных газов с относительной плотностью по воздуху 0,6. Их идентичность демонстрирует рис.1. В дальнейших расчетах использовалась формула (3), так как ее легко модифицировать в случае, когда надо вычислять давление паров воды в газовой фазе, равновесной с гидратом. При этом вместо функции $ps(T)$ следует воспользоваться соответствующим эмпирическим соотношением, в качестве которого нами выбрана формула, предложенная в работе [4]:

$$p_{H_2O}^h(p, T) = \exp \left(29,396 - \frac{6234,874}{T} - 0,1593 \ln(p) \right). \quad (4)$$

Динамика влагосодержания в призабойной зоне газовых скважин. Влагосодержание, согласно соотношению (3), является функцией давления и температуры. Следовательно, чтобы определить характер ее распределения в призабойной зоне пласта, необходимо решить задачу неизо-термической фильтрации реального газа при соответствующих граничных и начальных условиях.

Для математического описания отбора газа через одиночную скважину, расположенную в центре круговой залежи, воспользуемся системой уравнений, описывающей неизо-термическую фильтрацию реального газа в пористой среде, в которой перенос энергии за счет теплопроводности считается пренебрежимо малым по сравнению с конвективным переносом [2, 11, 12]. Сведем исходные уравнения неизо-термической фильтрации в осесимметричной постановке к безразмерным уравнениям относительно давления и температуры газа:

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{t}} \left(\frac{\bar{p}}{Z \bar{T}} \right) = \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial}{\partial \bar{r}} \left(\bar{r} \frac{\bar{p}}{Z \bar{T}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{r}} \right), \quad \bar{r}_b < \bar{r} < \bar{r}_k, \quad \bar{t} > 0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{t}} = \left(1 + \frac{\bar{T}}{Z} \frac{\partial Z}{\partial \bar{T}} \right) \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{t}} + \frac{c_p}{R} \frac{\bar{p}}{Z \bar{T}} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{r}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{r}} - \frac{\bar{T}}{Z} \frac{\partial Z}{\partial \bar{T}} \left(\frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{r}} \right)^2, \quad \bar{r}_b < \bar{r} < \bar{r}_k, \quad \bar{t} > 0; \quad (6)$$

где $\bar{t} = \kappa_p t / l^2$; $\bar{p} = p / p_0$; $\bar{T} = c_r T / m p_0$;
 $\bar{r} = r / l$; $\bar{r}_b = r_b / l$; $\bar{r}_k = r_k / l$; c_p – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении; c_r – объемная теплоемкость газона-сыщенной пористой среды; k – коэффициент проницаемости; l – характерный размер; m – пористость; p – давление; R – газовая постоянная; r – радиальная координата; r_b – наружный радиус скважины; r_k – радиус контура пласта; T – температура; t – время; Z – коэффициент несовершенства газа; κ_p – коэффициент пьезопроводности газона-сыщенной пористой среды, $\kappa_p = k p_0 / m \eta$; η – динамическая вязкость газа; нижний индекс

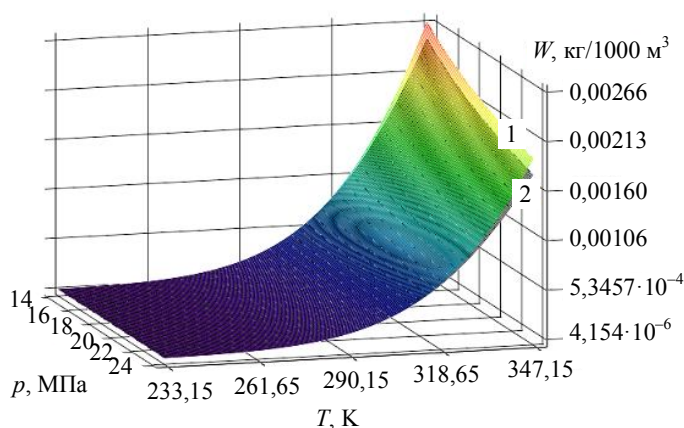


Рис.1. Зависимость влагосодержания природного газа от температуры и давления. Поверхность 1 построена по формуле (3), поверхность 2 – по формуле (2)



«0» соответствует начальному состоянию газоносного пласта. В дальнейшем черта над безразмерными переменными для удобства опускается.

В работе [10] показано, что с точки зрения технологии добычи режим отбора с постоянным давлением на забое скважины наиболее благоприятен, так как он обеспечивает более равномерное распределение давления по сравнению с режимом постоянного дебита. Тем самым на забое скважины задается постоянное давление газа

$$p = p_b; \quad r = r_b. \quad (7)$$

На контуре питания задаются условия, моделирующие отсутствие потоков фильтрующегося газа и тепла, т.е. описывается водонапорный режим отбора газа:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0; \quad r = r_k. \quad (8)$$

В начальный момент времени давление и температура считаются постоянными:

$$p(r, 0) = 1; \quad T(r, 0) = T_0; \quad r_b \leq r \leq r_k. \quad (9)$$

Следует отметить, что в данной постановке температура газа на забое скважины (при $r = r_b$) является искомой величиной, определяемой в ходе решения задачи, а уравнение (6) – квазилинейным гиперболическим уравнением первого порядка. Характеристики данного уравнения выходят из правой границы, поэтому граничного условия отсутствия теплового потока (8) достаточно для определения его единственного решения.

В качестве уравнения состояния принимается уравнение Латонова – Гуревича [8]

$$Z = \left(0,17376 \ln \left(\frac{mp_0}{c_r T_c} T \right) + 0,73 \right)^{\frac{p_0}{p_c}} + 0,1 \frac{p_0}{p_c} p, \quad (10)$$

где нижний индекс «с» соответствует критическому состоянию природного газа, который представляет собой смесь газов, в основном, парафинового ряда, начиная с метана.

Критические давление и температура газовой смеси определяются по правилу Кейя [14]:

$$p_c = \sum_{i=1}^n y_i p_{ci}; \quad T_c = \sum_{i=1}^n y_i T_{ci},$$

где y_i , p_{ci} , T_{ci} – объемная доля, критические давление и температура i -го компонента природного газа.

Газовая постоянная газовой смеси определяется по формуле

$$R = 8,314 / \mu_g,$$

где $\mu_g = \sum_{i=1}^n y_i \mu_{gi}$ – молярная масса природного газа; μ_{gi} – молекулярный вес i -го компонента природного газа.

Расчеты выполнялись при следующих значениях параметров, соответствующих двум месторождениям Республики Саха (Якутия). 1. Средневилюйское: $R = 449,4$ Дж/(кг·К); $p_0 = 24$ МПа; $T_0 = 323$ К; $p_b = 14$ МПа; $p_c = 4,6596$ МПа; $T_c = 205,022$ К; $c_p/R = 5,118$; $c_r/mp_0 = 1,234$ 1/К; $a = 7,009$ К и $b = 178,28$ К – константы для вычисления равновесной температуры гидратообразования, найдены путем аппроксимации кривой термодинамического равновесия, определяемой по методике Слоана [15] или по методике Истомина [6] при известном составе газа (объемные доли), %: CH_4 90,34; C_2H_6 4,98; C_3H_8 1,74; $i\text{C}_4\text{H}_{10}$ 0,22; $n\text{C}_4\text{H}_{10}$ 0,41; C_5H_{12+} 1,55; CO_2 0,28; N_2 0,48; плотность газа по воздуху – 0,634.

2. Отраднинское: $R = 438,3$ Дж/(кг·К); $p_0 = 18,835$ МПа; $T_0 = 286,35$ К; $p_b = 16,87$ МПа; $p_c = 4,471$ МПа; $T_c = 195,376$ К; $c_p/R = 5,248$; $c_r/mp_0 = 3,539$ 1/К; $a = 6,635$ К; $b = 182,951$ К; состав газа (объемные доли), %: CH_4 83,15; C_2H_6 4,16; C_3H_8 1,48; $i\text{C}_4\text{H}_{10}$ 0,17; $n\text{C}_4\text{H}_{10}$ 0,50;

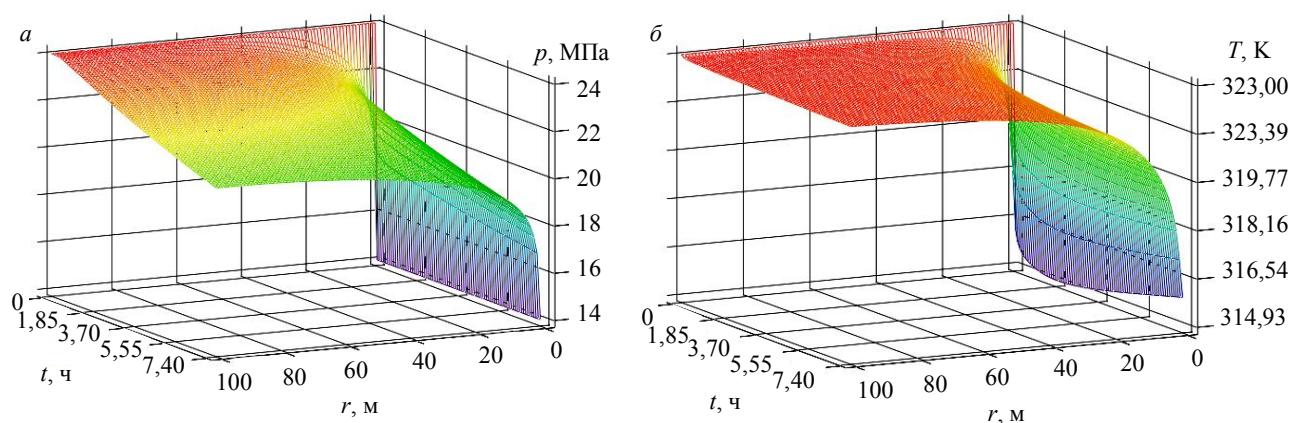


Рис.2. Динамика распределения давления (а) и температуры (б) в пласте для Средневилюйского месторождения

iC_5H_{12} 0,12; nC_5H_{12} 0,17; C_6H_{14} 0,17; C_7H_{16+} 0,28; CO_2 0,07; N_2 9,50; H_2 0,02; He 0,21; плотность газа по воздуху – 0,685.

Видно, что при примерно равной глубине продуктивного горизонта состав природного газа, а также пластовые условия этих месторождений существенно различны. Температура гидратообразования, вычисленная по формуле $T_h(p) = a \ln(p) + b$, при заданных забойных давлениях составляет для Средневилюйского и Отраднинского месторождений соответственно 293,6 и 293,4 К. Таким образом во втором случае отбор газа будет сопровождаться образованием гидратов в призабойной зоне, так как начальная температура пласта ниже равновесной температуры гидратообразования. Отметим также, что для указанных значений относительной плотности газов поправочный коэффициент к формулам (2) и (3) равен 0,99, т.е. его можно не учитывать в последующих расчетах.

Анализ результатов вычислений начнем со Средневилюйского месторождения. Предварительно заметим, что для указанных значений входных данных длительность переходных процессов изменения давления и температуры составляет несколько часов, поэтому здесь приводятся результаты расчетов, соответствующих этому периоду. На рис.2 представлены зависимости температуры и давления газа от времени и радиальной координаты.

Эти данные были использованы для вычисления аналогичной зависимости влагосодержания газа по формуле

$$w(r, t) = \frac{W(p, T)}{\rho(p, T)},$$

где ρ – плотность газа.

Результаты вычислений представлены на рис.3. Видно, что весовая доля паров воды в газе очень невелика, а форма поверхности $w(r, t)$ практически идентична поверхности $T(r, t)$. Следовательно, в случае контакта газа с водой его влагосодержание в основном определяется характером изменения температуры. Однако не следует забывать, что эти изменения зависят от интенсивности отбора газа, т.е. от изменения давления, от которого, в свою очередь, зависят и интенсивность конвективного переноса тепла, и степень охлаждения газа за счет дросселирования.

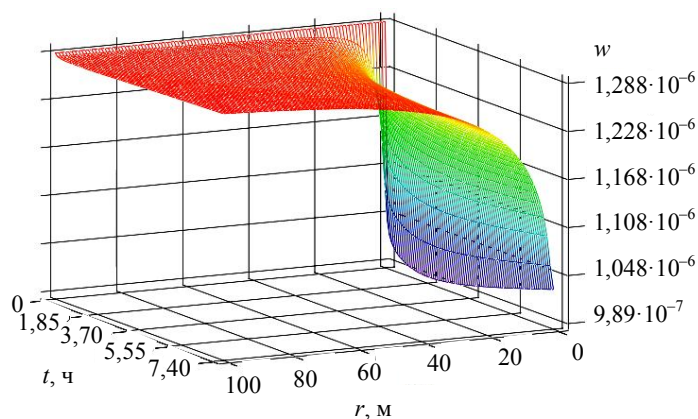


Рис.3. Динамика распределения влагосодержания газа в пласте для Средневилюйского месторождения

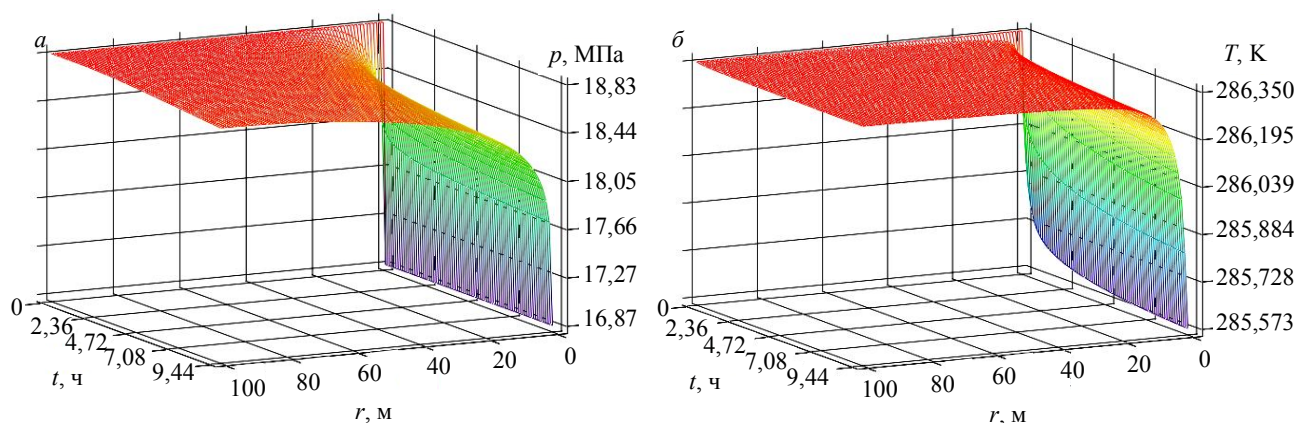


Рис.4. Динамика распределения давления (а) и температуры (б) в пласте для Отраднинского месторождения

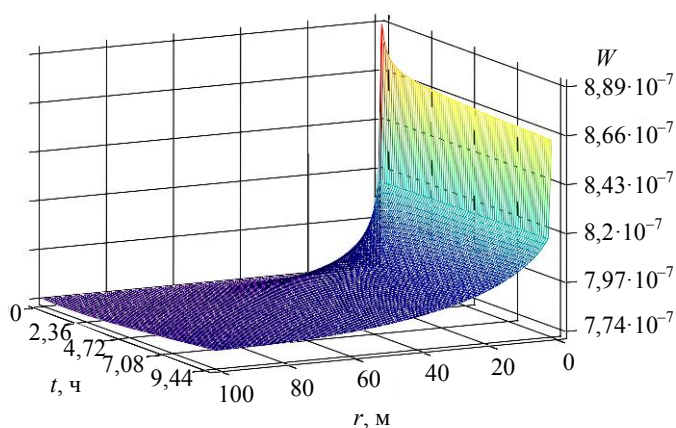


Рис.5. Динамика распределения влагосодержания газа в пласте для Отраднинского месторождения

Соответствующий анализ для Отраднинского месторождения дал следующие результаты. Здесь начальная температура газа ниже равновесной температуры образования гидратов. Следовательно, в формуле (3) выражение для давления водяных паров над чистой водой следует заменить на формулу (4), определяющую давление паров воды над гидратом. В этом случае, несмотря на качественное сходство зависимостей давления и температуры от координаты и времени с предыдущим примером (рис.4), форма поверхности $w(r,t)$ существенно иная, а весовая доля

влаги в газе близка по величине к предыдущему результату только в непосредственной близости от забоя скважины, а затем резко уменьшается почти до нуля (рис.5).

Заключение. В вычислительном эксперименте показано, что если пластовая температура существенно превышает равновесную температуру гидратообразования, то распределение влагосодержания в призабойной зоне будет практически идентично распределению температуры. В противном случае газ будет содержать пары воды только вблизи забоя скважины, а далее влагосодержание будет практически равно нулю. Роль давления и в том и в другом случаях проявляется через интенсивность отбора газа, от которого, в свою очередь, зависят и интенсивность конвективного переноса тепла, и степень охлаждения газа за счет дросселирования.

Благодарность. Работа выполнена в рамках Госзаказа ФАНО РФ (проект № IX.131.4.5, номер ФАНО 0377-2016-0003).

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондарев Э.А. Особенности математического моделирования систем добычи и транспорта природного газа в Арктической зоне России / Э.А.Бондарев, И.И.Рожин, К.К.Аргунова // Записки Горного института. 2017. Т. 228. С. 705-716. DOI: 10.25515/PMI.2017.6.705.
2. Бондарев Э.А. Плоскопараллельная неизотермическая фильтрация газа: роль теплопереноса / Э.А.Бондарев, К.К.Аргунова, И.И.Рожин // Инженерно-физический журнал. 2009. Т. 82. № 6. С. 1059-1065.
3. Брусиловский А.И. Фазовые превращения при разработке месторождений нефти и газа. М.: Грааль, 2002. 575 с.
4. Гухман Л.М. Подготовка газа северных газовых месторождений к дальнему транспорту. Л.: Недра, 1980. 161 с.
5. Дегтярев Б.В. Борьба с гидратами при эксплуатации газовых скважин в северных районах / Б.В.Дегтярев, Э.Б.Бухгалтер. М.: Недра, 1976. 197 с.
6. Истомин В.А. Предупреждение и ликвидация газовых гидратов в системах добычи газа / В.А.Истомин, В.Г.Квон. М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2004. 506 с.



7. Коротаев Ю.П. Борьба с гидратами при транспорте природных газов / Ю.П.Коротаев, А.М.Кулиев, Р.М.Мусаев. М.: Недра, 1973. 136 с.
8. Латонов В.В. Расчет коэффициента сжимаемости природных газов / В.В.Латонов, Г.Р.Гуревич // Газовая промышленность. 1969. № 2. С. 7-9.
9. Намиот А.Ю. Растворимость газов в воде: Справочное пособие. М.: Недра, 1991. 167 с.
10. Николаев В.Е. Численный анализ взаимодействия тепловых и гидродинамических процессов при фильтрации газа: Автореф. ... канд. физ.-мат. наук / Якутский государственный университет им. М.К.Аммосова. Якутск, 2000. 13 с.
11. Термогидродинамика систем добычи и транспорта газа / Э.А.Бондарев, В.И.Васильев, А.Ф.Воеводин, Н.Н. Павлов, А.П.Шадрин. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1988. 272 с.
12. Bondarev E.A. Plane-parallel nonisothermal gas filtration: the role of thermodynamics / E.A.Bondarev, K.K.Argunova, I.I.Rozhin // Journal of Engineering Thermophysics. 2009. Vol. 18. № 2. P. 168-176. DOI: 10.1134/S1810232809020088.
13. Bukacek R.F. Equilibrium moisture content of natural gases // Research Bulletin. Institute of Gas Technology, Chicago, USA. 1955. Vol. 8. № 11. P. 20.
14. Kay W.B. Density of hydrocarbon gases and vapors at high temperature and pressures // Industrial & Engineering Chemistry Research. 1936. Vol. 28. P. 1014-1019.
15. Sloan E.D. Clathrate hydrates of natural gases / E.D.Sloan, C.A.Koh. Boca Raton: Taylor & Francis Group/CRC Press, 2008. 720 p.

Авторы: **Э.А. Бондарев**, д-р техн. наук, главный научный сотрудник, bondarev@ipng.usn.ru (ФГБУН «Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН», Якутск, Россия), **И.И. Рожин**, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, i_rozhin@mail.ru (ФГБУН «Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН», Якутск, Россия), **К.К. Аргунова**, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, akk@ipng.usn.ru (ФГБУН «Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН», Якутск, Россия).

Статья поступила в редакцию 11.02.2018.

Статья принята к публикации 08.05.2018.

Металлургия и обогащение

УДК 669.53

ЭКСТРАКЦИЯ ИОНОВ МЕДИ, КОБАЛЬТА И НИКЕЛЯ ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ЭКСТРАГЕНТОМ МАРКИ CYANEX 272

Л.А.ВОРОПАНОВА, В.П.ПУХОВА

Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет),
Владикавказ, Россия

Экстрагент марки CYANEX 272, активным компонентом которого является ди(2,4,4-триметилпентил)-фосфиновая кислота (C_8H_{17})₂POOH, эффективен для экстракции ионов меди (II), кобальта (II) и никеля (II). Извлечение ионов металлов с использованием в качестве экстрагента ди(2,4,4-триметилпентил)-фосфиновой кислоты осуществляется за счет образования фосфорорганического комплекса в широком диапазоне pH: медь при pH > 2, кобальт при pH > 3, никель при pH > 5. При этом экстрагируются органической фазой: медь при pH = 3-7, кобальт при pH = 4-7, никель при pH = 6-9, а осаждаются в составе фосфорорганического соединения: медь при pH > 7, кобальт при pH ≥ 8, никель при pH ≥ 10. Возможность разделения меди (II) и кобальта (II) незначительна, разделение меди (II) и никеля (II) происходит при pH = 4-6, а разделение кобальта (II) и никеля (II) – при pH = 5-6.

Полученные результаты экстракции ионов исследованных металлов могут быть использованы не только для переработки технологических растворов, но также для очистки стоков промышленных предприятий от рассматриваемых ионов металлов, шахтных и рудничных вод, растворов кучного и подземного выщелачивания и т.п.

Ключевые слова: водный раствор; экстракция; экстрагент; медь; кобальт; никель

Как цитировать эту статью: Воропанова Л.А. Экстракция ионов меди, кобальта и никеля из водных растворов экстрагентом марки Cyanex 272 / Л.А.Воропанова, В.П.Пухова // Записки Горного института. 2018. Т. 233. С. 498-505. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.498

Введение. Экстракция кобальта из растворов никеля алкилфосфиновыми кислотами в значительной мере представлена в литературе. Известно, что для извлечения ионов кобальта из водных растворов сульфатов и хлоридов никеля эффективна экстракция экстрагентом марки CYANEX 272, активным компонентом которого является ди(2,4,4-триметилпентил)-фосфиновая кислота (C_8H_{17})₂POOH [1-13]. Металлы экстрагируются посредством механизма обмена катионами. Экстрагент CYANEX 272 полностью смешивается с ароматическими и алифатическими растворителями и очень устойчив в отношении нагревания и гидролиза, проявляет высокую селективную способность по отделению кобальта от никеля, как в сульфатной, так и в хлоридной среде, практически слабо экстрагирует ионы кальция, что исключает образование гипсовых загрязнений, которые могут появляться в цикле жидкостного экстрагирования.

Известно, что кобальт селективно экстрагируется из растворов соли никеля в узком интервале: pH ≈ 5. Однако извлечение меди, кобальта и особенно никеля при их совместном присутствии в растворе, а также извлечение примесей меди и кобальта из растворов макроколичеств солей никеля мало изучено. Не исследованы процессы взаимодействия экстрагента с растворами солей при pH > 7.

Материалы и методы исследования. Задачами данного исследования являются нахождение оптимальных условий селективного и совместного извлечения меди, кобальта и никеля экстракцией

экстрагентом марки CYANEX 272 и реэкстракцией из растворов сложного состава, а также условий извлечения примесей меди и кобальта из растворов макроколичеств солей никеля, в том числе с использованием керосина в качестве разбавителя экстрагента, исследование процессов взаимодействия экстрагента с растворами солей при pH > 7.

Для приготовления растворов использовали кристаллогидраты солей $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, $CoSO_4 \cdot 7H_2O$ и $NiCl_2 \cdot 7H_2O$. Экстракцию осуществляли при перемешивании и регулировании постоянной величины pH, в качестве нейтрализаторов использовали растворы NaOH и H_2SO_4 . Эксперименты проводили при комнатной температуре.

На рис.1 приведена схема приборов для проведения экстракции и реэкстракции.

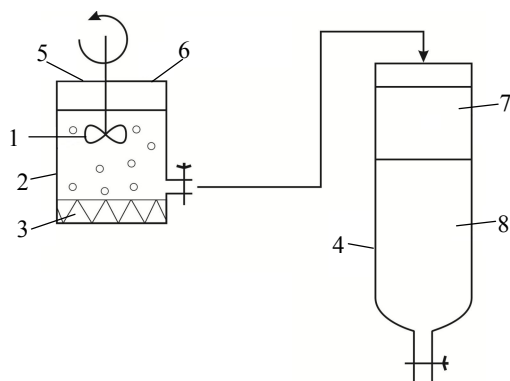


Рис.1. Схема приборов для проведения экстракции

1 – мешалка; 2 – стакан; 3 – нагреватель;
4 – длительная воронка; 5 – исходный раствор;
6 – экстрагент; 7 – экстракт; 8 – рафинат

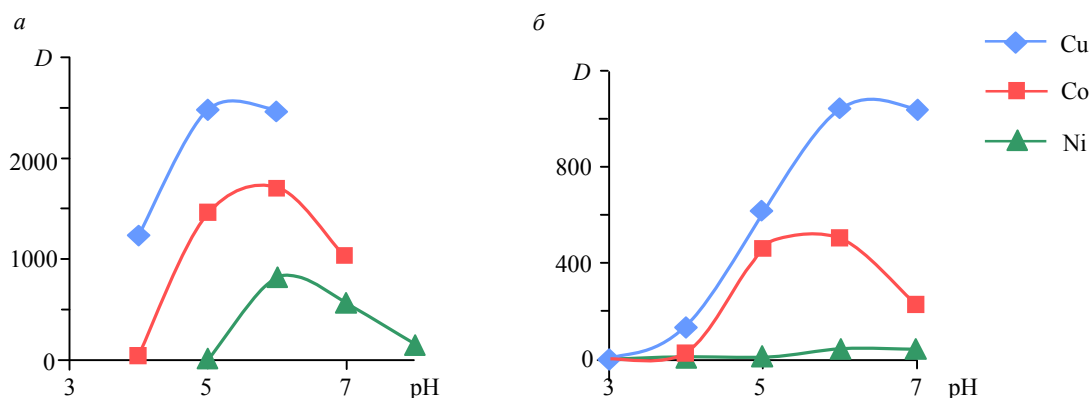


Рис.2. Зависимость коэффициента распределения D от величины pH раствора солей CuSO_4 , CoSO_4 и NiSO_4 :
а – из индивидуальных растворов; б – из растворов смеси солей

Стакан с исходным раствором, содержащим экстрагируемые ионы, и экстрагентом помещали на нагреватель для нагрева смеси до заданной температуры. Для лучшего массообмена содержимое стакана перемешивали мешалкой в течение заданного времени. Затем смесь переносили в делительную воронку, где смесь отстаивалась и разделялась на экстракт и рафинат. После отстаивания рафинат, а затем экстракт через нижнее выходное отверстие делительной воронки сливали в отдельные емкости и анализировали.

Результаты экстракции оценивали остаточной концентрацией C (в граммах на кубический дециметр) ионов металлов в рафинате, коэффициентом распределения $D = C_{\text{орг}}/C_{\text{вод}}$, извлечением металлов в органическую фазу (в процентах по массе от исходного), коэффициентом разделения $\beta = D_{\text{Me}_1} / D_{\text{Me}_2}$.

Результаты и их анализ. На рис.2 приведена зависимость коэффициента распределения D от величины pH водного раствора солей CuSO_4 , CoSO_4 и NiSO_4 .

Концентрация исходных растворов по сумме металлов составила, мг/дм³: 400-550 для индивидуальных растворов и 660-770 для растворов смеси солей металлов. Заданное значение pH поддерживали в течение 0,1-1,5 ч, в дальнейшем величина pH изменялась незначительно. Исходная водно-масляная эмульсия содержала 5 % по массе экстрагента (отношение водной и органической фаз В:О = 19:1). Объемы органической и водной фаз изменялись по сравнению с исходными незначительно: объем органической – не изменялся, водной – 0,8-1,0.

В табл.1 по данным рис.2 показаны лучшие результаты экстракции из индивидуальных растворов солей и из растворов смеси солей CuSO_4 , CoSO_4 и NiSO_4 , полученные за 0,5 ч.

Таблица 1

Лучшие результаты экстракции из индивидуальных растворов солей
и из растворов смеси солей CuSO_4 , CoSO_4 и NiSO_4 экстрагентом марки CYANEX 272

Металл	Концентрация исходного раствора, мг/дм ³	Результаты экстракции			
		pH	Остаточная концентрация, мг/дм ³	Коэффициент распределения D	Извлечение, % по массе от исходного
Экстракция из индивидуальных растворов					
Cu	395	4	6	1232	98,5
Cu	395	5	3	2483	99,2
Cu	395	6	3	2483	99,2
Co	546	5	7	1463	98,7
Co	546	6	6	1710	98,9
Co	546	7	10	1018	98,2
Ni	533	6	12	825	97,7
Ni	533	7	17	577	96,8
Ni	533	8	58	156	89,1

Окончание табл.1

Металл	Концентрация исходного раствора, мг/дм ³	Результаты экстракции			
		pH	Остаточная концентрация, мг/дм ³	Коэффициент распределения D	Извлечение, % по массе от исходного
Экстракция из растворов смеси солей					
Cu	168	4	21	133	87,5
Cu	168	5	5	619	97,0
Cu	168	6	3	1045	98,2
Cu	168	7	3	1045	98,2
Co	276	5	11	458	96,0
Co	276	6	10	505	96,4
Co	276	7	22	219	92,0
Ni	241	6	73	44	69,8
Ni	241	7	78	40	67,8
Ni	241	8	83	36	65,5

В щелочной среде при $pH > 7$ из индивидуальных растворов металлы осаждаются в составе фосфорорганического соединения в виде гелеобразных осадков. Раствор отделяли от осадка через фильтр средней плотности. Фильтрация осуществлялась быстро. Фильтрат анализировали на содержание металла.

При $pH = 8-11$ в растворе медного купороса заметно образование осадка голубого цвета. При $pH = 12$ образуется гелеобразный осадок коричневого цвета. Лучшие результаты осаждения получены при $pH = 12$: минимальная остаточная концентрация $C = 5 \text{ мг/дм}^3$ Cu (II), извлечение 98,7 % по массе.

При $pH = 8-9$ в растворе сульфата кобальта заметно образование осадка синего цвета. Лучшие результаты осаждения получены при $pH = 8$: минимальная остаточная концентрация $C = 74 \text{ мг/дм}^3$ Co (II), извлечение 86,4 % по массе.

В процессе экстракции никеля при $pH = 7-9$ органическая фаза принимала вид сгустка с большей плотностью и вязкостью. Раствор подвергали фильтрации для удаления слабой мути.

При $pH = 10-12$ в системе заметно образование гелеобразного зеленого осадка. При отстаивании более суток соотношение между объемами осветленной водной фазой и осадком составило 2:1. Лучшие результаты осаждения получены при $pH = 12$: минимальная остаточная концентрация $C = 1 \text{ мг/дм}^3$ Ni (II), извлечение 99,8 % по массе.

Коэффициенты разделения β ионов меди, кобальта и никеля, рассчитанные по данным рис. 2 и табл.1, приведены в табл.2 и на рис.3.

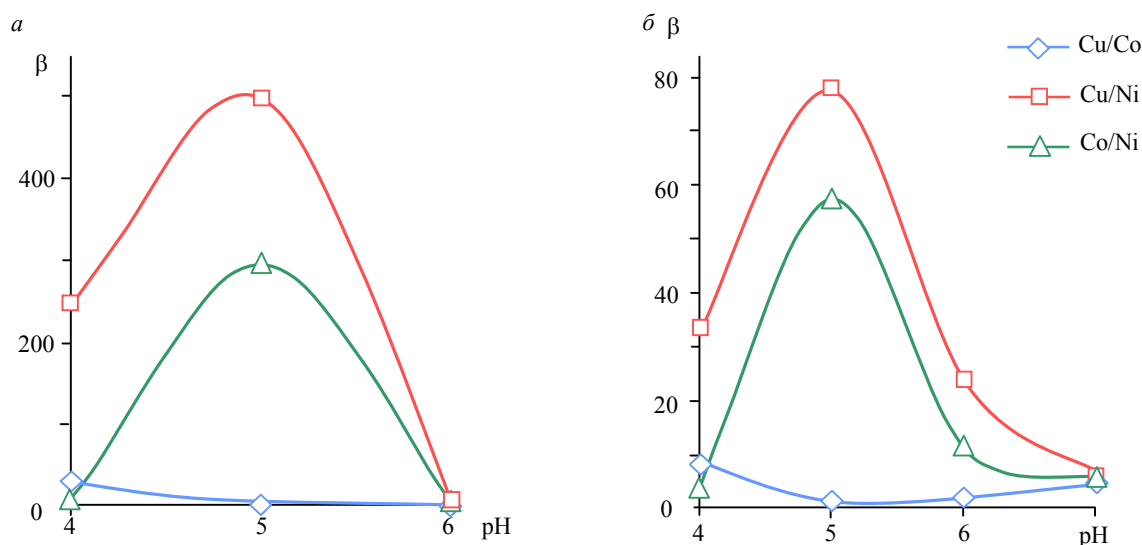


Рис.3. Коэффициенты разделения β ионов меди, кобальта и никеля при экстракции из сульфатных растворов их солей (экстрагент – CYANEX 272): а – из индивидуальных растворов; б – из растворов смеси солей



Таблица 2

**Коэффициенты разделения β ионов меди, кобальта и никеля
при экстракции из сульфатных растворов их солей (экстрагент – CYANEX 272)**

рН экстракции	β					
	из индивидуальных растворов (условный)			из растворов смеси солей		
	Cu/Co	Cu/Ni	Co/Ni	Cu/Co	Cu/Ni	Co/Ni
4	30,0	246,4	8,2	8,3	33,3	4,0
5	1,7	496,6	292,6	1,4	77,4	57,3
6	1,5	3,0	2,1	2,1	23,8	11,5
7	–	–	1,8	4,8	6,1	5,5

По данным табл.1, 2 и рис.2, 3 можно сделать следующие выводы:

1. Извлечение ионов металлов с использованием в качестве реагента ди(2,4,4-триметилпентил)-фосфиновой кислоты осуществляется за счет образования фосфорорганического комплекса в широком диапазоне рН:

- медь при рН > 3, кобальт при рН > 4, никель при рН > 5.

При этом экстрагируются органической фазой:

- медь при рН = 3-7, кобальт при рН = 4-7, никель при рН = 5-9.

В составе фосфорорганического соединения осаждаются:

- медь при рН > 7, кобальт при рН ≥ 7, никель при рН ≥ 10.

2. Селективное извлечение исследуемых ионов из водных растворов сульфатов в процессе экстракции возможно при следующей последовательности по величине рН:

- из индивидуальных растворов

Ион	Cu	Co	Ni
рН	4-5	5-6	6-8

- из водных растворов смеси солей

Ион	Cu	Co	Ni
рН	4	5	6

3. Возможность разделения меди (II) и кобальта (II) незначительна, а отделение меди (II) и кобальта (II) от никеля (II) происходит при рН = 5.

4. Извлечение ионов меди (II), кобальта (II) и никеля (II) при их совместном присутствии в сульфатных растворах значительно ниже, чем при их экстракции из индивидуальных сульфатных растворов.

В табл.3 приведены результаты реэкстракции ионов меди, кобальта и никеля из экстрактов, полученных в опытах, представленных в табл.1.

Таблица 3

Результаты реэкстракции ионов меди, кобальта и никеля из экстракта

рН экстракции	рН _{нач} реэкстракции	рН _{кон} реэкстракции	Концентрация металла, мг/дм ³						Коэффициент распределения D между органической и водной фазами			β			Извлечение в реэк- тракт, % по массе от исходного раствора		
			в исходном экстракте, $V = 10 \text{ см}^3$			в реэкстракте, $V = 50 \text{ см}^3$			Cu	Co	Ni	Cu/Co	Cu/Ni	Co/Ni	Cu	Co	Ni
			Cu	Co	Ni	Cu	Co	Ni									
4	1	0,84	2793	–	–	525,6	558,6	0	0,3	–	–	–	–	–	–	–	–
5	1	0,87	3097	5035	–	581,4	1003,2	155,8	0,3	0,02	–	15	–	–	93,8	–	–
6	1	0,87	3135	5054	3192	562,4	1005,4	572,4	0,6	0,03	0,6	20	1	0,05	89,6	99,6	89,6
7	0	1,10	4788	4826	3097	463,6	955,6	562,4	0,6	0,05	0,5	12	1,2	0,1	48,5	99,0	90,7

Из данных табл.3 следует, что реэкстракция эффективна при рН < 1, когда экстракция осуществлялась при рН = 4-6, и при рН < 0, когда экстракция осуществлялась при рН = 7-8.

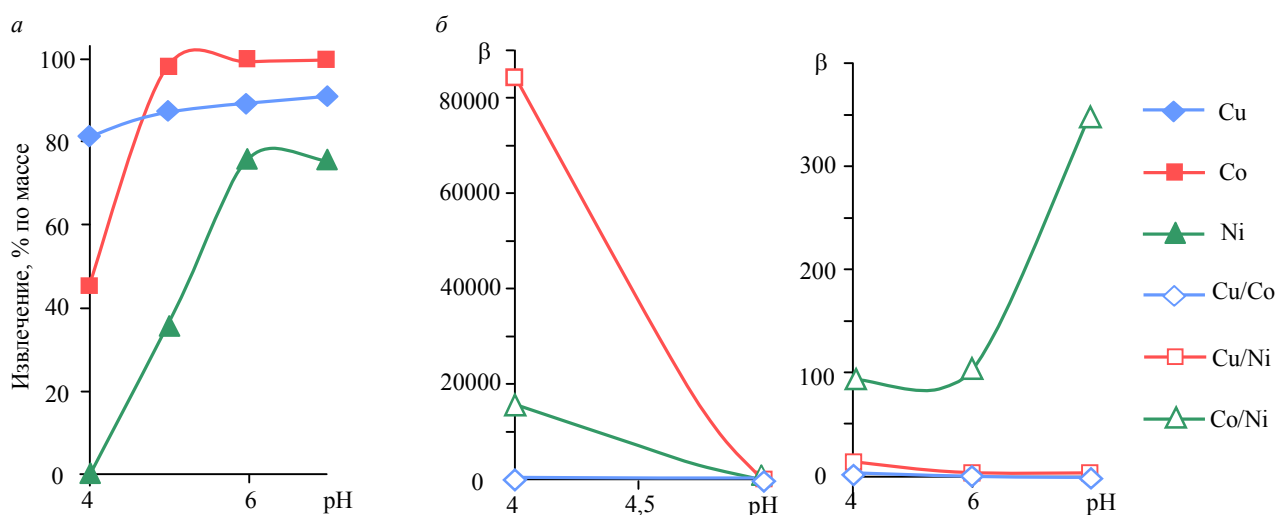


Рис.4. Результаты ступенчатой экстракции ионов металлов из водных сульфатных растворов смеси солей в зависимости от pH раствора: а – извлечение, б – коэффициент разделения

В табл.4 и на рис.4 приведены результаты экстракции, которая осуществлялась при соотношении органической и водной фаз О:В = 1:19, ступенчатом повышении pH раствора в процессе экстракции по схеме 4 → 5 → 6 и последующей реэкстракции каждой ступени при pH = 1 и соотношении О:В=1:5. Время экстракции – 30 мин, время реэкстракции – сутки.

Таблица 4

Результаты ступенчатой экстракции ионов металлов из водных сульфатных растворов смеси солей

pH экстракции	pH _{кон} реэкстракции	Концентрация, мг/дм ³								
		исходного раствора, V = 190 см ³			реэкстракта, V = 50 см ³			рафината		
		Cu	Co	Ni	Cu	Co	Ni	Cu	Co	Ni
4	0,17	168	323	176	520,6	558,6	0	30,9	176,0	176,0
5	1,30	168	323	176	38,0	646,0	239,4	21,0	6,1	113,0
6	1,34	168	323	176	11,4	19,0	266,0	18,0	1,0	42,9
7	1,36	168	323	176	11,4	3,8	0	15,0	0,3	42,9

pH экстракции	D			β			Общее извлечение в реэкстракт, % по массе от исходного раствора		
	Cu	Co	Ni	Cu/Co	Cu/Ni	Co/Ni	Cu	Co	Ni
4	84,3	15,9	0,001	5,3	84300	15900	81,6	45,5	0,01
5	133,0	987,1	10,6	0,1	12,5	93,1	87,5	98,1	35,8
6	158,3	6118	58,9	0,03	2,7	103,9	89,3	99,7	75,6
7	193,8	20437,7	58,9	0,01	3,3	347,0	91,1	99,9	75,6

Из данных табл.4 и рис.4 следует, что при содержании в исходном растворе, мг/дм³: 168 Cu, 323 Co, 176 Ni, извлекается при pH = 4 меди 82 %, при pH = 5 кобальта 98 % и при pH = 6 никеля 76 %.

Селективное извлечение цветных металлов можно осуществить дробной экстракцией с постепенным изменением величины pH раствора и поддержанием измененной величины pH на каждой периодической операции экстракции; извлечение преимущественно ионов меди осуществляется экстракцией при pH = 4, кобальта – при pH = 5, никеля – при pH = 6-7.

В табл.5 и на рис.5 приведены результаты ступенчатой экстракции ионов меди (II) и кобальта (II) на фоне макрокомпонента никеля (II). Экстракция осуществлялась при соотношении органической и водной фаз О:В = 1:19 и ступенчатом повышении pH раствора в процессе экстракции по схеме 4→5→6 при времени экстракции на каждой ступени не более 2 ч, последующей реэкстракции каждой ступени при pH = –0,5, соотношении О:В = 1:5 и времени реэкстракции 2 сут.

Состав рафината (экстрагент CYANEX 272, время экстракции на каждой ступени – не более 2 ч) следующий: концентрация, мг/дм³: Cu – 35, Co – 148, Ni – 55300; состав, % по массе: Cu – 0,06, Co – 0,27, Ni – 99,67.

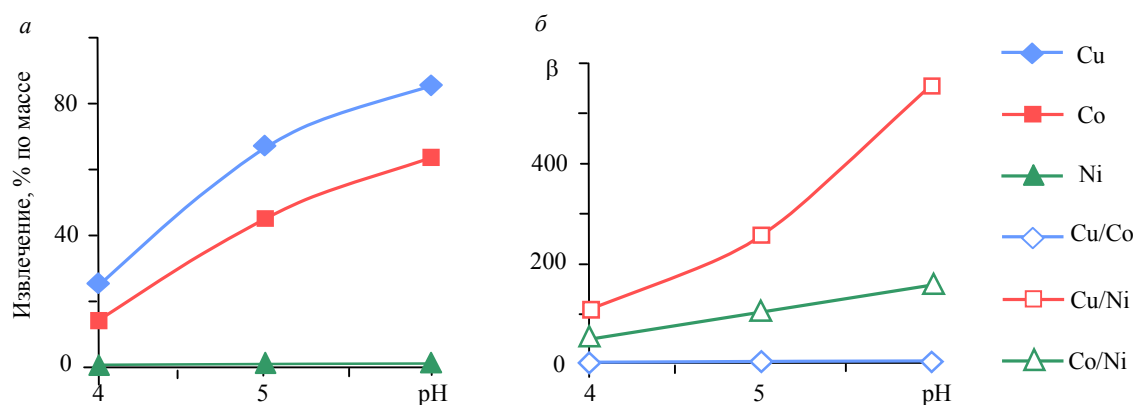


Рис.5. Результаты ступенчатой экстракции ионов металлов из водных сульфатных растворов смеси солей на фоне макрокомпонента никеля (II) в зависимости от pH раствора: *a* – извлечение, *б* – коэффициент разделения

Таблица 5

Результаты ступенчатой экстракции ионов металлов из водных сульфатных растворов смеси солей на фоне макрокомпонента никеля (II), экстрагент CYANEX 272

pH экстракции	pH _{кон} реэкстракции	Концентрация, мг/дм ³								
		исходного раствора, <i>V</i> = 190 см ³			реэкстракта, <i>V</i> = 50 см ³			рафината		
		Cu	Co	Ni	Cu	Co	Ni	Cu	Co	Ni
4	–0,37	286	416	55950	270	228	613	215,1	356,1	55782,2
5	–0,07	286	416	55950	460	485	982	94,1	228,4	55502,4
6	–0,06	286	416	55950	205	293	751	40,0	151,4	55334,6

pH экстракции	<i>D</i>			<i>β</i>			Общее извлечение в реэкстракт, % по массе от исходного раствора		
	Cu	Co	Ni	Cu/Co	Cu/Ni	Co/Ni	Cu	Co	Ni
4	6,3	3,2	0,06	2,0	105	53,3	24,8	14,4	0,3
5	38,7	15,6	0,15	2,5	258	104	67,1	45,1	0,8
6	116,9	33,2	0,21	3,5	556,7	158,1	86,0	63,6	1,1

Из данных табл.5 и рис.5 следует, что при содержании в исходном растворе, мг/дм³: 286 Cu, 416 Co, 55950 Ni, извлекается при pH = 4 меди 25 %, при pH = 5 кобальта 45 % и при pH = 6 никеля 1 %, соотношение металлов в рафинате после экстракции позволяет получить никель чистоты 99,7 %.

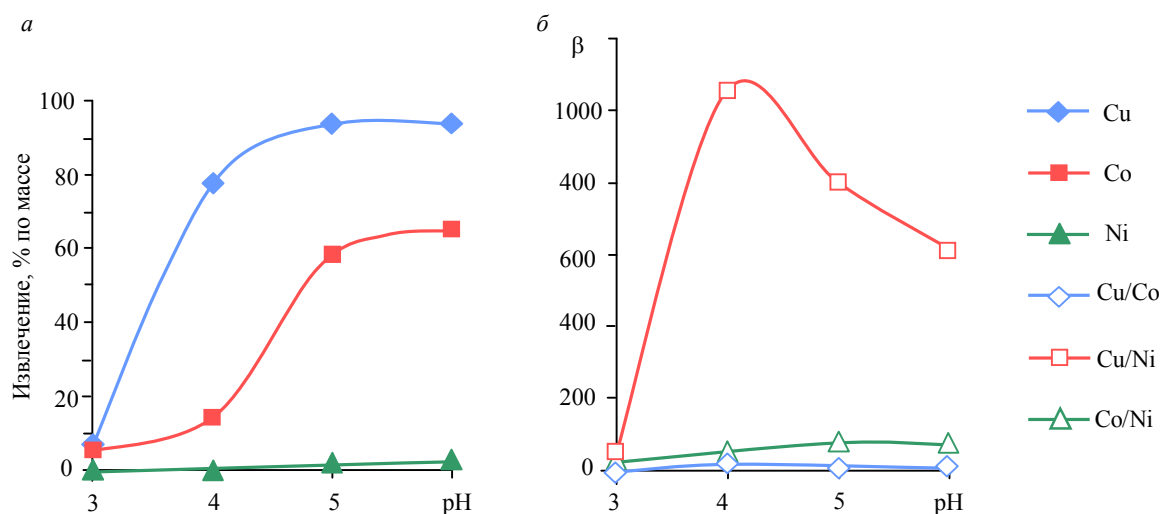


Рис.6. Результаты ступенчатой экстракции ионов металлов из водных сульфатных растворов смеси солей на фоне макрокомпонента никеля (II) в зависимости от pH раствора: *a* – извлечение, *б* – коэффициент разделения. Экстрагент – 30 %-ный раствор CYANEX 272 в керосине



Из данных табл.4-5 и рис. 4-5 следует, что значительное (более чем на 2 порядка) увеличение концентрации ионов никеля в растворе снижает извлечения меди и кобальта.

В табл.6 и на рис.6 приведены результаты экстракции ионов меди (II) и кобальта (II) на фоне макрокомпонента никеля (II), экстракция осуществлялась при соотношении органической и водной фаз О:В = 1:6 (в качестве экстрагента использовали 30 %-ный раствор CYANEX 272 в керосине) и ступенчатом повышении pH раствора в процессе экстракции по схеме 3→4→5→6 при времени экстракции на каждой ступени не более 2 ч, и последующей реэкстракции каждой ступени при pH = -0,5, соотношении О:В = 1:5 и времени реэкстракции 3 сут.

Состав рафината (экстрагент – 30 %-ный раствор CYANEX 272 в керосине) следующий: концентрация, мг/дм³: Cu – 0; Co – 100; Ni – 59900; состав, % по массе: Cu – 0; Co – 0,17; Ni – 99,83.

Таблица 6

Результаты ступенчатой экстракции ионов металлов из водных сульфатных растворов смеси солей, экстрагент – 30 %-ный раствор CYANEX 272 в керосине, время экстракции на каждой ступени не более 2 ч

pH экстракции	pH _{кон} реэкстракции	Концентрация, мг/дм ³								
		исходного раствора, V = 190 см ³			реэкстракта, V = 50 см ³			рафината		
		Cu	Co	Ni	Cu	Co	Ni	Cu	Co	Ni
3	-0,60	278	266	61600	72	52	420	259,9	252,4	61476,8
4	-0,70	278	266	61600	75	96	500	61,7	227,4	61353,6
5	-0,95	278	266	61600	16	440	3360	17,8	111,2	60491,2
6	-1,00	278	266	61600	40	74	1800	16,1	91,8	59998,4

pH экстракции	D			β			Общее извлечение в реэкстракт, % по массе от исходного раствора		
	Cu	Co	Ni	Cu/Co	Cu/Ni	Co/Ni	Cu	Co	Ni
3	0,4	0,3	0,01	1,3	40	30	6,8	5,1	0,2
4	21,0	1,0	0,02	21,0	1050	50	77,8	44,6	0,4
5	87,7	8,4	0,11	10,4	797,3	76,4	93,6	63,2	1,4
6	97,6	11,4	0,16	8,6	610	71,3	94,2	65,5	1,8

Из данных табл.6 и рис.6 следует, что при содержании в исходном растворе, мг/дм³: 278 Cu, 266 Co, 61600 Ni, извлекается при pH = 4 меди 78 %, при pH = 5 кобальта 58 % и при pH = 6 никеля 2,6 %, соотношение металлов в рафинате после экстракции позволяет получить никель чистоты 99,8 %.

Из данных табл.5-6 и рис.5-6 следует, что использование в качестве разбавителя керосина повышает извлечение меди и кобальта.

Выводы

1. Экстрагент марки CYANEX 272 эффективен для экстракции ионов меди (II), кобальта (II) и никеля (II).
2. Возможность разделения меди (II) и кобальта (II) незначительна, а отделение меди (II) и кобальта (II) от никеля (II) происходит при pH = 5.
3. Полученные результаты экстракции ионов исследованных металлов могут быть использованы не только для переработки технологических растворов, но также для очистки стоков промышленных предприятий от рассматриваемых ионов металлов, шахтных и рудничных вод, растворов кучного и подземного выщелачивания и т.п.

Благодарность. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Министерства образования и науки Республики Северная Осетия – Алания в рамках научного проекта № 17-48-150696/17.



ЛИТЕРАТУРА

1. Вольдман Г.М. Теория гидрометаллургических процессов / Г.М.Вольдман, А.Н.Зеликман. М.: Интермет-Инжиниринг, 2003. 464 с.
2. Гиндин Л.М. Экстракционные процессы и их применение. М.: Наука, 1984. 144 с.
3. Процессы и аппараты цветной металлургии / С.С.Набойченко, Н.Г.Агеев, А.П.Дорошкевич и др. / Уральский технический университет. Екатеринбург, 2005. 700 с.
4. Патент 2617471 РФ. Способ извлечения кобальта из сульфатных растворов никеля и кобальта / А.Г.Касиков, М.А.Шарандо, Е.Г.Багрова, Н.В.Серба. Оpubл. 25.04.2017. Бюл. № 12.
5. Патент 2203969 РФ. Способ селективной экстракции ионов меди, кобальта и никеля из водных растворов / Л.А.Воропанова, Е.Ю.Кругских, В.Н.Титухина. Оpubл. 10.05.2003. Бюл. № 13.
6. Патент 2604289 РФ. Способ очистки никелевого электролита от примесей железа (III), кобальта (III) и меди (II) экстракцией / Л.А.Воропанова, Н.Т.Кисиев, З.А.Гагиева. Оpubл. 10.12.2016. Бюл. № 34.
7. Радущев А.В. Экстракция меди (II) и никеля (II) из кислых растворов гидразидами нафтенных кислот / А.В.Радущев, В.Ю.Гусев, Г.С.Богомазова // Современные проблемы химии и технологии экстракции. 1999. Т.2. С. 189-194.
8. Экстракционная очистка сульфатного никелевого электролита от примесей / С.Б.Котухов, М.Б.Грейвер, А.И.Юрьев, Л.А.Большаков // Тез. докл. XIII Российской конференции по экстракции, 19-24 сентября 2004 г., М., 2004. Ч. 2. С. 229-230. URL: https://www.fbr.ru.rffi/ru/project_search/0_254342 (дата обращения 10.08.2017).
9. Gharabaghi M. Separation of nickel and zinc ions in a synthetic acidic solution by solvent extraction using D2EHPA and Cyanex 272 / M.Gharabaghi, M.Irannajad, A.Azadmehr // Physicochemical Problems of Mineral Processing. 2013. № 49 (1). P.233-242.
10. Ocana N. Cobalt-manganese separation: The extraction of cobalt (II) from manganese sulphate solutions by Cyanex 301 / N.Ocana, F.J.Alguacil // J. of Chemical Technology and Biotechnology. 1999. Vol.73. № 3. P.211-216.
11. Sole K.C. B. Solvent extraction of copper by Cyanex 272, Cyanex 302 and Cyanex 301 / K.C.Sole, J. B.Hiskey // Hydro-metallurgy. 1995. Vol. 37. P.129-147.
12. Tait B.K. Cobalt-nickel separation: the extraction of cobalt (II) and nickel (II) by Cyanex 301, Cyanex 302 and Cyanex 272 // Hydrometallurgy. 1992. Vol. 32. P.365-372.
13. The development of a novel hydrometallurgical process for nickel and cobalt recovery from Goro laterite ore / I.Mihaylov, E.Krause, D.F.Colton, Y.Okita, J.-P.Duterque, J.-J.Perraud // CIM Bulletin. 2000. Vol. 93. № 1041. P.124-130.

Авторы: Л.А.Воропанова, д-р техн. наук, профессор, lidia_metall@mail.ru (Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия), В.П.Пухова, канд. техн. наук, инженер, hova-vikochka@mail.ru (Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия).

Статья поступила в редакцию 11.09.2017.

Статья принята к публикации 08.05.2018.



УДК 669.2

ОПЫТ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ДРАГОЦЕННЫХ МЕТАЛЛОВ

В.В.ЖМУРОВА, Н.В.НЕМЧИНОВА*Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия*

С истощением богатых золотосодержащих руд в переработку все чаще стали вовлекаться полиметаллические руды, которые помимо драгоценных металлов содержат другие элементы, представляющие интерес для их извлечения. Проблема использования таких руд решается крайне трудно из-за высокой себестоимости доизвлечения сопутствующих ценных компонентов. В работе приведены результаты исследований по комплексному использованию добываемого золотосодержащего сырья на примере месторождения «Березитовое» (Амурская обл.), характеризующегося низким содержанием драгоценных металлов и наличием в значительном количестве тяжелых цветных металлов (меди, свинца). Были проведены экспериментальные работы по получению меди методом цементации из растворов, образующихся после выщелачивания соляной кислотой примесей золотосодержащих катодных осадков. Металлом-цементатором служила железная стружка (отходы токарного цеха предприятия). Далее было предложено использование цементационной меди в качестве коллектора при переплавке шлаков – отходов переработки бедных полиметаллических руд, содержащих драгоценные металлы. Авторами были получены слитки сплава лигатурного золота с массовой долей золота 16 %, отвечающие требованиям ТУ 117-2-7-75 по содержанию цветных металлов. Серебро, частично перешедшее в раствор при солянокислой обработке катодных осадков, также восстанавливается совместно с цементационной медью и при последующей плавке переходит в сплав лигатурного золота. Таким образом, предложенный авторами метод способствует снижению содержания драгоценных металлов в «незавершенном производстве» золотоизвлекательной фабрики. Показана возможность реализации полученной цементационной меди на предприятиях, специализирующихся на изготовлении ювелирных изделий; ожидаемый экономический эффект при этом составил более 1,8 млн руб.

Ключевые слова: металлургия; драгоценные металлы; катодные осадки; примеси; цементационная медь; извлечение

Как цитировать эту статью: Жмурова В.В. Опыт комплексного использования золотосодержащего сырья при производстве драгоценных металлов / В.В.Жмурова, Н.В.Немчинова // Записки Горного института. 2018. Т. 233. С. 506-511. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.506

Введение. Рациональное использование природных ресурсов является одним из приоритетных направлений в сфере недропользования. При разработке золотосодержащих месторождений помимо задач максимально полного извлечения драгоценных металлов и защиты окружающей среды также актуальным является комплексное использование перерабатываемого сырья. В настоящее время данная проблема решается крайне трудно из-за высокой себестоимости добычи сопутствующих ценных элементов и нерентабельности их последующей переработки [12, 13]. Чаще всего решение данного вопроса ограничивается уплатой штрафов за несоблюдение требований по рациональному использованию недр или пересмотром условий лицензии на добытое минеральное сырье (Закон РФ «О недрах» №2395-1 от 21.02.1992).

На долю перерабатываемых золотосодержащих полиметаллических руд приходится около 10 % от всех руд, содержащих драгоценные металлы, но данное значение неуклонно возрастает в связи с истощением запасов месторождений, богатых по содержанию золота и серебра. К ним относятся руды, имеющие в своем составе драгоценные металлы, два или более промышленных компонента: Cu, Pb, Zn и др. Так, руды с содержанием менее 60 % кварца и не более 12 % оксида алюминия (золото-кварцевые) часто используют в качестве флюсов в пирометаллургических процессах. Промышленную ценность представляют в данном случае и золото, и кварц. При переработке пиритно-арсенопиритных золотосодержащих концентратов возможно получение серной кислоты [14]. При переработке золото-сурьмянистых руд одновременно выделяют богатый сурьмяный концентрат. Промышленное значение также имеют золото-свинцовые, золото-цинковые, золото-теллурические, золото-висмутовые, золото-вольфрамовые, золото-баритовые, золото-турмалиновые и другие руды.

Основные золотополиметаллические месторождения в России – Гайское (Оренбургская обл.), Березитовое (Амурская обл.), Рубцовское (Алтайский край), Николаевское, Верхнее, Партизанское (Дальний Восток), Дукаат, Хатанга (Магаданская обл.), Неждановское (Якутия) и др. – характеризуются наличием других ценных компонентов.

Постановка задачи. Месторождение «Березитовое» относится к бедным полиметаллическим рудам с содержанием, г/т: золота – 2,1, серебра – 18,5. Кроме драгоценных металлов, в состав данной руды входят различные минералы со средним содержанием, % по массе: свинец – 0,5, цинк – 1,5, медь – 0,03. Для извлечения ценных компонентов специалистами АО «Иргиредмет» (г. Иркутск) была разработана комбинированная технология переработки руды с получением сплава лигатурного золота, свинцового и цинкового концентратов, но из-за высокой стоимости переработки руды в настоящее время ведется добыча только золота и серебра. Технологическая схема переработки руд данного месторождения представлена на рис.1.

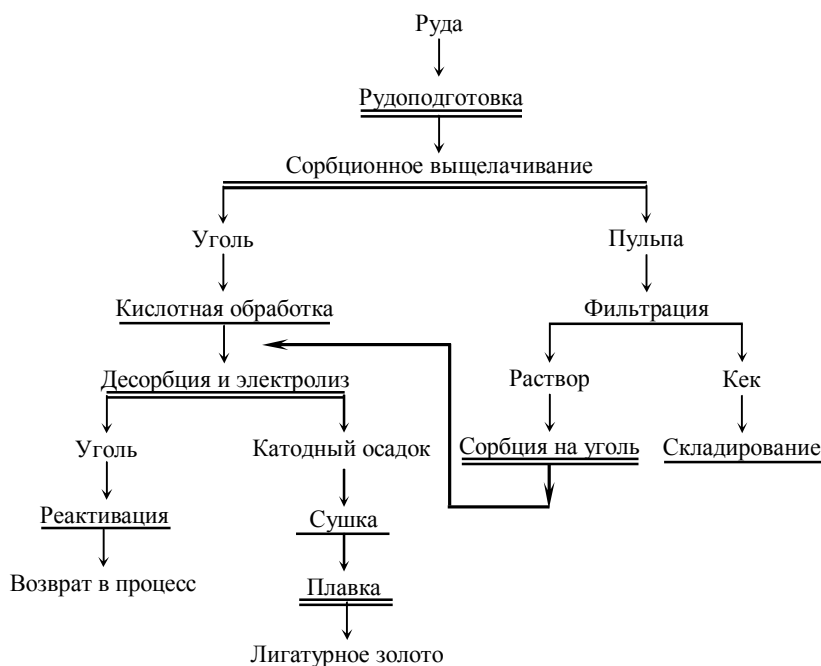


Рис.1. Технологическая схема переработки золотосодержащих полиметаллических руд месторождения «Березитовое» (Амурская область) [2]

По мере промышленной разработки данного месторождения содержание металлов-примесей в руде увеличивается, а содержание драгоценных металлов падает, что заставляет предприятие принимать меры по устранению негативного влияния на химический состав получаемых сплавов золота и серебра металлов-примесей, переходящих в готовую продукцию [16].

Одним из основных сопутствующих металлов в руде является медь, которая по своим химическим свойствам близка к драгоценным металлам и при выщелачивании переходит в раствор, образуя устойчивые цианистые комплексы, которые при накоплении могут препятствовать растворению золота и серебра [6, 10, 11]. В табл.1 приведены данные о химическом составе золотосодержащих цианистых растворов ООО «Березитовый рудник», полученных по технологической схеме (рис.1), атомно-абсорбционного анализа на приборе «Квант-2АТ» (Россия).

Таблица 1

Химический состав золотосодержащих цианистых растворов

Номер опыта	Содержание элементов, г/м ³		
	Au	Ag	Cu
1	24	125	1081
2	36	0,1	334
3	125	118	780
4	80	140	575
5	110	13	158

Из данных табл.1 видно, что содержание меди в растворе в несколько раз превышает содержание драгоценных металлов. На рис.2 представлена карта распределения характеристического рентгеновского излучения образца катодного осадка, полученная при изучении химического состава методом рентгеноспектрального микроанализа, проведенного на микроанализаторе JXA-8200 (фирма «Interactive Corporation», Япония).

На карте (рис.2) изменение интенсивности рентгеновского излучения определяемого элемента отражается в цвете от черного до красного. Черному цвету соответствует минимальная интенсивность элемента на данной площади поверхности. Если содержание элемента в области карты меняется от 1 до 100 % – красный цвет будет отвечать области 100 %, а синий – 1 %; в случае изменения химического состава от 0,1 до 1 % красным на карте будет область с содер-

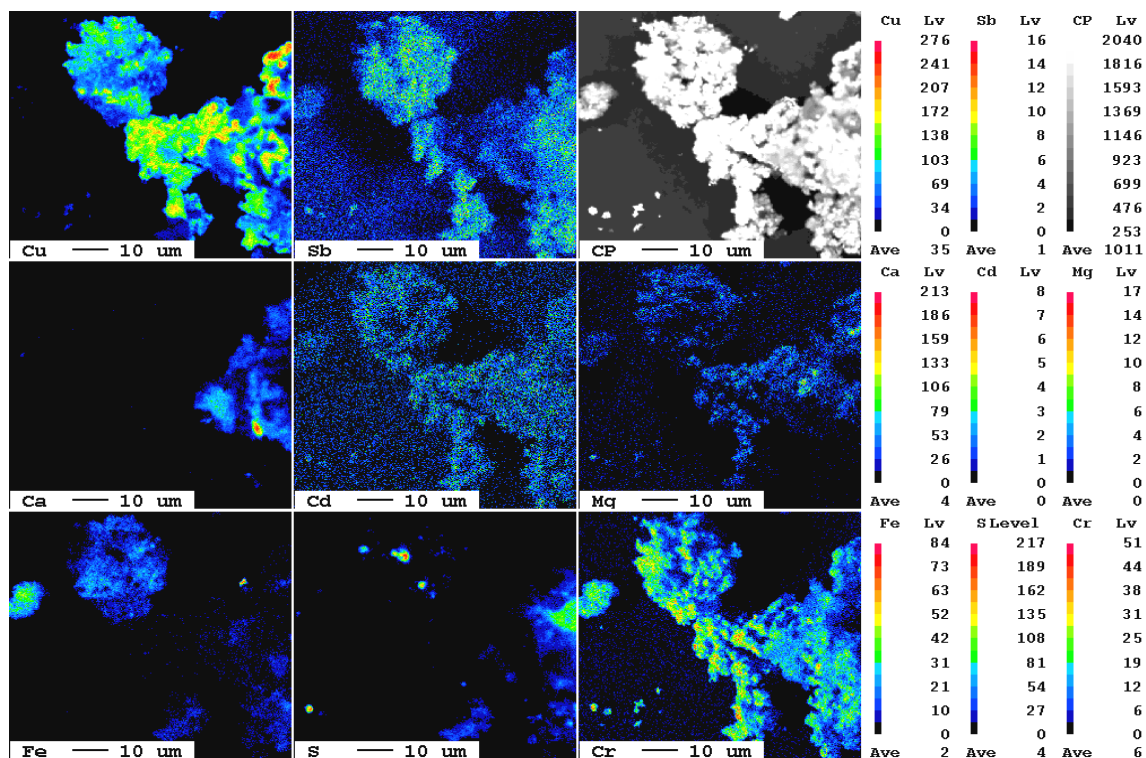


Рис.2. Карта распределения характеристического рентгеновского излучения элементов в образце катодного осадка (для Cu, Sb, Ca, Cd, Mg, Fe, S, Cr)

жанием 1 %, а черный цвет будет соответствовать нулевому содержанию (режим съемки: CP – поверхность в обратно рассеянных электронах). Содержание меди в образце катодного осадка преобладает по сравнению с другими элементами.

Медь, присутствующая в катодных осадках, при последующей их переработке попадает в готовую продукцию – сплав лигатурного золота. В табл.2 представлены данные химического состава сплава лигатурного золота, получаемого на предприятии (массовая доля драгоценных металлов определялась пробирным методом анализа).

Таблица 2

Химический состав сплава лигатурного золота

Номер сплава	Массовая доля, %			
	Au	Ag	Cu	Прочие
1	16	17	32	35
2	14	13	28	45
3	22	32	43	3
4	18	28	49	5
5	24	27	39	10
6	19	18	62	1
7	20	27	41	12
Среднее	19	23	42	16

Как видно из данных табл. 2, массовая доля меди в сплаве варьируется в диапазоне 28-62 %, что значительно увеличивает затраты предприятия на последующие аффинажные услуги своей продукции. Наличие большого количества меди и других примесей в сплаве также является причиной недостоверного опробования золота [5, 6]. В сплавах с повышенным содержанием меди наблюдается весьма неравномерное распределение золота и серебра; последние аккумулируются преимущественно в нижней части слитка [1, 9].

Одним из способов удаления меди из сплава является предварительная солянокислая обработка катодных осадков перед плавкой, на что и были направлены наши исследования [7]. Дан-

ная операция позволила перевести в раствор до 80 % меди в виде дихлоркупратов щелочных и щелочно-земельных металлов. Растворы после выщелачивания примесей катодных осадков нейтрализовывались и сбрасывались в дренаж.

Для выделения меди из растворов можно использовать процесс цементации железным скрапом. Как известно, данный способ является эффективным и малозатратным [4].

В основе технологии лежит реакция вытеснения меди из раствора более электроотрицательным металлом – железом [8]:



Расчет величины изменения энергии Гиббса показал, что данная реакция термодинамически возможна.

По результатам проведенных нами экспериментов была предложена технология, позволяющая выделить ионы меди из растворов в виде металла и использовать ее далее в качестве коллектора в процессе получения драгоценных металлов для переплавки шлаков [1, 15].

Результаты и обсуждение. Цементация ионов меди из растворов, образующихся после обработки катодных осадков соляной кислотой, производилась с использованием железной стружки – отходов токарного цеха предприятия. Продолжительность цементации составила 1 ч. Затем цементационный осадок отфильтровывался и высушивался в течение 1-2 ч. Результаты анализа химического состава (атомно-абсорбционным методом анализа на приборе «Квант-2АТ» (Россия)) цементационной меди представлены в табл.3.

Таблица 3

Химический состав цементационной меди

Номер опыта	Содержание элементов, % по массе			
	Cu	Pb	Ag	Прочие*
1	96,5	–	3,5	–
2	95,3	0,1	2,2	2,4
3	94,8	0,5	1,9	2,8
4	97,8	0,2	1,8	0,2
Среднее	96,1	0,2	2,35	1,35

* Элементы, содержание которых не учитывалось в экспериментах из-за их незначительного количества.

Из данных табл.3 видно, что выделившаяся цементационная медь содержит небольшое количество примесей; ее химический состав в первую очередь зависит от химического состава исходных катодных осадков. Незначительное количество серебра, перешедшее в раствор при солянокислом выщелачивании, также восстанавливается железом при цементации и переходит в цементационную медь, что является благоприятным условием для предотвращения безвозвратных потерь данного драгоценного металла и увеличения его последующего суммарного извлечения при переработке руды.

Применение цементационной меди в производстве драгоценных металлов. Катодные осадки служат исходным сырьем для производства сплава лигатурного золота пирометаллургическим способом (плавкой) [1]; чем меньшее количество примесей тяжелых цветных металлов в них, тем соответственно более химически чистыми получаются сплавы драгоценных металлов.

Наиболее негативное влияние на процесс плавки катодных осадков по традиционной технологии оказывают Cu, Pb и S, так как медь и свинец являются коллекторами драгоценных металлов при плавке: аккумулируют золото и серебро [3]. Присутствие серы в катодных осадках является причиной образования промежуточной штейновой фазы при плавке, в которой содержится большое количество золота в виде корольков. При плавке катодных осадков также образуются богатые по содержанию драгоценных металлов шлаки. Все отходы плавки, содержащие драгоценные металлы (шлак, штейн, бой тиглей и другие промпродукты), возвращаются в «голову» процесса (в цикл измельчения руды). Различные попытки переплавки шлака и штейна с целью



доизвлечения Au и Ag не давали положительных результатов. В связи с этим, а также с необходимостью максимального извлечения драгоценных металлов, нами были проведены экспериментальные работы по переплавке шлаков [1] с использованием в качестве медного коллектора меди, полученной цементацией из солянокислых растворов выщелачивания.

Для проведения экспериментальных плавки были взяты две партии шлака, содержащие штейновую фазу общей массой 20 кг. На это количество были взяты для плавки флюсы, %: бура – 50, сода – 10, цементационная медь – 2-5.

В нагретую индукционную печь засыпали буру; после ее расплавления оставшаяся часть флюсов смешивалась со шлаком и добавлялась в плавку. Затем после расплавления всего шлака добавлялась цементационная медь и плавилась до получения равномерного по составу расплава. В результате плавки было получено два слитка сплава лигатурного золота с массовой долей соответственно, %: Au – 16,1, Ag – 21,5. Выход слитков составил 17,84 и 11,20 %.

Таким образом, в результате плавки шлаков на медный коллектор были получены слитки лигатурного золота, соответствующие ТУ117-2-7-75, для отправки на последующий аффинаж. Данная технология применения цементационной меди в качестве коллектора драгоценных металлов при плавке шлаков была рекомендована для использования на действующем производстве.

Полученная цементационная медь также может быть реализована на медеплавильные заводы или предприятия, специализирующиеся на производстве ювелирных изделий.

Экономический эффект от реализации цементационной меди. Содержание меди в цементном осадке составляет $\approx 96\%$, что позволяет при выделении ее из раствора реализовывать на медеперерабатывающие предприятия. Расчет ожидаемого экономического эффекта от реализации данной цементационной меди на примере ОАО «Красноярский завод цветных металлов им. В.Н.Гулидова», где возможно ее применение для производства ювелирных изделий, показал возможность получения экономического эффекта 1883700 руб./год (в расчете использовались данные по количеству образующейся при цементации меди (2,691 т/год) и стоимости приема металла на заводе 700 руб./кг). При расчете не учитывались транспортные расходы на доставку меди, так как данный вид промпродукта можно транспортировать совместно со сплавом лигатурного золота, направляемого на аффинажный завод, расположенный также в г. Красноярске, и капитальные затраты на используемое оборудование (все необходимое оборудование – контактный чан, сушильная печь, вакуум-фильтр и др. – уже имеется на предприятии).

Таким образом, предприятие может получить прибыль (без значительных дополнительных затрат) от реализации цементационной меди.

Заключение. Проведенные исследования показали целесообразность использования технологии цементации меди из солянокислых растворов, полученных при выщелачивании примесей катодных осадков. Массовая доля меди в полученном цементационном осадке составила более 95 %. Серебро, перешедшее в раствор при солянокислой обработке катодных осадков, при цементации восстанавливается совместно с медью и при последующем использовании ее в качестве коллектора для переплавки шлаков переходит в сплав лигатурного золота. Предложенные мероприятия способствуют снижению содержания драгоценных металлов «в незавершенном производстве» золотоизвлекательной фабрики. Предприятие может также получить дополнительную прибыль в размере более 1,8 млн руб. в год от реализации цементационной меди на медеперерабатывающие предприятия. Таким образом, предлагаемая авторами технология способствует комплексному использованию природного рудного сырья.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баликов С.В. Плавка золотосодержащих концентратов / С.В.Баликов, В.Е.Дементьев. Иркутск: Иргиредмет, 2002. 323 с.
2. Барченков В.В. Технология гидрометаллургической переработки золотосодержащих флотоконцентратов с применением активных углей. Чита: Поиск, 2004. 242 с.
3. Ванюков А.В. Теория пирометаллургических процессов / А.В.Ванюков, В.Я.Зайцев. М.: Металлургия, 1993. 384 с.
4. Вольдман Г.М. Теория гидрометаллургических процессов / Г.М.Вольдман, А.Н. Зеликман. М.: Интермет Инжиниринг, 2003. 464 с.
5. Жмурова В.В. Разработка способа получения сплава благородных металлов с минимальным количеством примесей // Цветные металлы – 2010: Материалы II Междунар. конгресса. Красноярск: Изд-во ООО «Версо», 2010. С. 325-332.
6. Жмурова В.В. Исследование по повышению качества катодных осадков, получаемых при переработке золотосодержащего полиметаллического сырья / В.В.Жмурова, А.И.Карпунин // Цветные металлы. 2012. № 9. С. 37-40.



7. Жмурова В.В. Кислотное выщелачивание примесей золотосодержащего катодного осадка / В.В.Жмурова, Н.В.Немчинова, Г.Г.Минеев // Цветные металлы. 2017. № 7. С 41-46.
8. Морачевский А.Г. Термодинамические расчеты в металлургии. М.: Металлургия, 1993. 303 с.
9. Патент 2598726 РФ. Способ комплексной переработки материала, содержащего драгоценные металлы / С.М.Совка, И.А.Малыхин, О.В.Телипенко. Опубл. 27.09.2016. Бюл. № 27.
10. Agorhom E.A. Influence of gold mineralogy on its flotation recovery in a porphyry copper-gold ore / E.A.Agorhom, W.Skinner, M.Zanin // Chemical Engineering Science. 2013. Vol. 99. № 9. P. 127-138.
11. Canda L. Methods for recovering precious metals from industrial waste / L.Canda, T.Heput, E.Ardelean // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 106. № 1. P. 12-20.
12. Hussin A.M. Statistical optimization of gold recovery from difficult leachable sulphide minerals using bacteria / A.M.Hussin, Ahmed. Ayman A.El-Midany // Materials Testing. 2012. Vol. 54. № 5. P. 351-357.
13. Kyle J.H. Review of trace toxic elements (Pb, Cd, Hg, As, Sb, Bi, Se, Te) and their deportment in gold processing. Part II: Deportment in gold ore processing by cyanidation / J.H. Kyle, P.L. Breuer, K.G. Bunney, R. Pleysier // Hydrometallurgy. 2012. Vol. 111-112. P. 10-21.
14. Mohammadnejad S. The effect of grinding on the preg-robbing of gold quartz / S.Mohammadnejad, J.L.Provis, S.J.Van Deventer // International Journal of Mineral Processing. 2014. Vol. 128. P. 1-5.
15. Syed S. Recovery of gold from secondary sources – A review // Hydrometallurgy. 2012. Vol. 115-116. P. 30-51.
16. Tremolada J. The preg-robbing of gold and silver by clays during cyanidation under agitation and heap leaching conditions / J.Tremolada, R.Dzioba, A.Bernardo-Sanchez, J.M.Menendez-Agnado // International Journal of Mineral Processing. 2010. Vol. 94. P. 67-71.

Авторы: **В.В. Жмурова**, ст. преподаватель, v_richugina@list.ru (Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия), **Н.В. Немчинова**, д-р техн. наук, профессор, ninavn@yandex.ru (Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия).

Статья поступила в редакцию 10.05.2018.

Статья принята к публикации 27.06.2018.



УДК 621.762

ПОЛУЧЕНИЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ В СИСТЕМЕ Al–Ti–Zn

В.В.КАМИНСКИЙ¹, С.Ю.ПЕТРОВИЧ², В.А.ЛИПИН³

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, Россия

Двойные интерметаллиды – алюминиды титана (TiAl, Ti₃Al), добавленные в сплавы, заметно повышают их прочностные и специальные свойства. Наиболее перспективным направлением получения интерметаллидов являются механохимические технологии, включающие механическое легирование сплавов. Механическое легирование позволяет ввести в металлическую матрицу значительно более мелкие частицы, чем можно добиться с помощью стандартных технологий порошковой металлургии. Помимо механического синтеза, способом получения интерметаллидов на основе алюминия является самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) твердых химических соединений. Синтез был осуществлен по многостадийной схеме: приготовление порошка титана и алюминия, их смешивание; синтез интерметаллида Al₃Ti методом СВС в вакууме с последующей механической активацией стехиометрических шихт. Целью работы являлось изучение динамики развития нанодисперсных фаз в процессе синтеза при механолегировании. Была рассчитана мощность, поглощаемая единицей массы материала за разное время обработки шихты. При уровне удельной мощности (дозы) механообработки 3,5 кДж/г достигается максимальное содержание интерметаллида в получаемом материале. Благодаря этим расчетам и данным, полученным в ходе рентгенофазового анализа, определена зависимость изменения содержания тройных интерметаллидов в конечном продукте от поглощаемой мощности. В результате выполненных исследований с помощью растровой электронной микроскопии и рентгеновского анализа было установлено, что методом механолегирования порошков в системе Al–Ti–Zn могут быть получены наноструктурированные интерметаллиды Ti₄ZnAl₁₁ и Ti₂₅Zn₉Al₆₆ с размером нанодисперсных фаз менее 12 нм, причем с увеличением продолжительности в условиях эксперимента доля последнего достигает 74 % от массы образца.

Ключевые слова: механохимия; механолегирование; порошковые материалы; самораспространяющийся высокотемпературный синтез; алюминиевые сплавы; алюминий; титан; цинк

Как цитировать эту статью: Каминский В.В. Получение интерметаллидов в системе Al–Ti–Zn / В.В.Каминский, С.Ю.Петрович, В.А.Липин // Записки Горного института. 2018. Т. 233. С. 512-517. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.512

Введение. Металлические соединения на основе алюминия, входя в состав алюминиевых, магниевых и титановых сплавов, оказывают большое влияние на их прочностные и специальные свойства – износостойкость, коррозионностойкость, жаропрочность. Наибольший эффект достигается при наличии в сплаве двойных и тройных металлических соединений в виде интерметаллидов. Интерметаллиды могут присутствовать в структурно-свободном состоянии, входить в структуру эвтектик или находиться в форме рассеянных частиц, выделившихся в процессе дисперсионного распада закаленных сплавов [1, 2, 4, 5, 10-15].

Двойные интерметаллиды – алюминиды титана (TiAl, Ti₃Al), добавленные в сплавы, заметно повышают их прочностные и специальные свойства. Сплавы, легированные алюминиды титана, применяют там, где нужно получить наиболее легкую конструкцию в сочетании с необходимой прочностью (авиационная техника, ракетостроение), а также, где необходимы высокие жаропрочность и сопротивление коррозии (химическая промышленность и судостроение) [6].

Тройные металлические соединения также оказывают существенное влияние на механические свойства некоторых алюминиевых сплавов, в частности, могут существенно изменить модуль упругости [3].

Образование интерметаллидов, их концентрация, величина и морфология их зерен существенно зависят от химического состава сплава – наличия и содержания в требуемой пропорции необходимых металлических компонентов – и режима кристаллизации сплава. Имеется лишь ограниченная возможность воздействовать на эти параметры в процессе плавления и кристаллизации расплава.

Порошковая металлургия открывает широкие возможности создания искусственных («синтетических») сплавов, упрочненных двойными или тройными интерметаллидами, что может быть реализовано введением в порошки чистого алюминия (а также титана или цинка) или малолегированных его сплавов заранее синтезированных порошков интерметаллидов заданного хи-



мического состава. При этом система может значительно отличаться от равновесной и содержать существенно большее, чем в классической диаграмме состояния, количество упрочняющих фаз. Это содержание определяется только интересами исследователя и получаемым после термопластической обработки смеси комплексом прочностных и служебных характеристик.

Кроме того, упрочнение алюминиевого сплава алюминийсодержащим упрочняющим компонентом, основную долю которого составляет алюминий, позволяет получать более однородный композиционный материал в противоположность упрочнению «неродственными» фазами – карбидами, нитридами, оксидами, боридами и т.д. кремния, хрома, вольфрама и других металлов.

Термопластическая обработка смеси порошков алюминия с интерметаллидами, несомненно, приведет к некоторому изменению в количестве и фазовом составе последних, поскольку они частично растворяются в сплаве, однако все это нуждается в экспериментальной апробации.

Для изучения возможности упрочнения различных сплавов алюминия, содержащих титан или цинк, предпринята попытка создания тройных интерметаллидов, состоящих из этих трех металлов.

Наиболее перспективным направлением получения интерметаллидов являются механохимические технологии, включающие механическое легирование сплавов. Механическое легирование позволяет ввести в металлическую матрицу частицы значительно более мелкие, чем можно добиться посредством стандартных технологий порошковой металлургии. Процесс реализуется при высокоскоростной обработке элементарных порошков или порошков простых сплавов в размольных аппаратах высокой удельной мощности. Чередование разрушения частиц и их сварки в сочетании с усиливающей диффузией деформацией все больше и больше гомогенизирует порошки, приводя в конечном итоге к образованию нового сплава. Обработка металлических и керамических порошков в высокоэнергетических аппаратах позволяет достичь четырех взаимосвязанных эффектов – диспергирование, активация поверхности, механическое образование сплавов, механохимическое образование соединений. Наблюдаемые механохимические реакции приводят к возникновению новых соединений, появление которых совершенно невозможно в реакциях, стимулированных, например, только температурным фактором [3, 7].

Методы исследования. Помимо механического синтеза, существует способ получения интерметаллидов на основе алюминия – самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) твердых химических соединений. Этот технологический процесс основан на экзотермической реакции взаимодействия исходных реагентов в форме горения. Для СВС реагенты используются в виде порошков. Вопрос о процессах, происходящих в системе Al–Ti и более сложных системах, определяющих фазовый состав и структуру конечного продукта, остается малоизученным [1, 7].

Цель работы – изучение возможности синтеза тройных интерметаллидов в системе Al–Ti–Zn, в частности $Al_{11}Ti_4Zn$ и $Al_{66}Ti_{25}Zn_9$, из порошкообразных материалов с использованием методов механохимии и СВС и определение условий для их получения.

Синтез был осуществлен по оригинальной многостадийной схеме: приготовление порошков титана и алюминия, их смешивание; синтез интерметаллида Al_3Ti методом СВС в вакууме с последующей механической активацией стехиометрических шихт.

На первой стадии измельчением в воде в атриторе стандартной конструкции [3] из титанового порошка марки ТПП-8 фракции 0-160 мкм был получен тонкодисперсный порошок. Обезвоживание порошка осуществлялось сначала фильтрованием на вакуумном фильтре, затем сушкой при температуре 100-105 °С в течение нескольких часов. Из высушенного тонкодисперсного порошка была выделена заданная фракция 0-63 мкм.

После этого в необходимой пропорции смешивался порошок алюминия марки ПА-4 фракции 0-63 мкм с порошком титана в шаровой мельнице и прессовался в таблетки под давлением 300 МПа.

Далее был проведен сам синтез интерметаллида Al_3Ti из таблеток методом СВС в вакууме. Установка для проведения СВС в вакууме состоит из стальной герметичной реторты с водоохлаждаемой верхней крышкой, помещенной в лабораторную печь сопротивления СШОЛ-2,5, вакуум-насоса, масляной ловушки, расширительной склянки, вакуумных шлангов и вентилях. Контроль глубины вакуума производится мановакуумметром ОБМВ1-100. Реторта была заполнена ровными слоями прессованных таблеток, пересыпанных глиноземом.

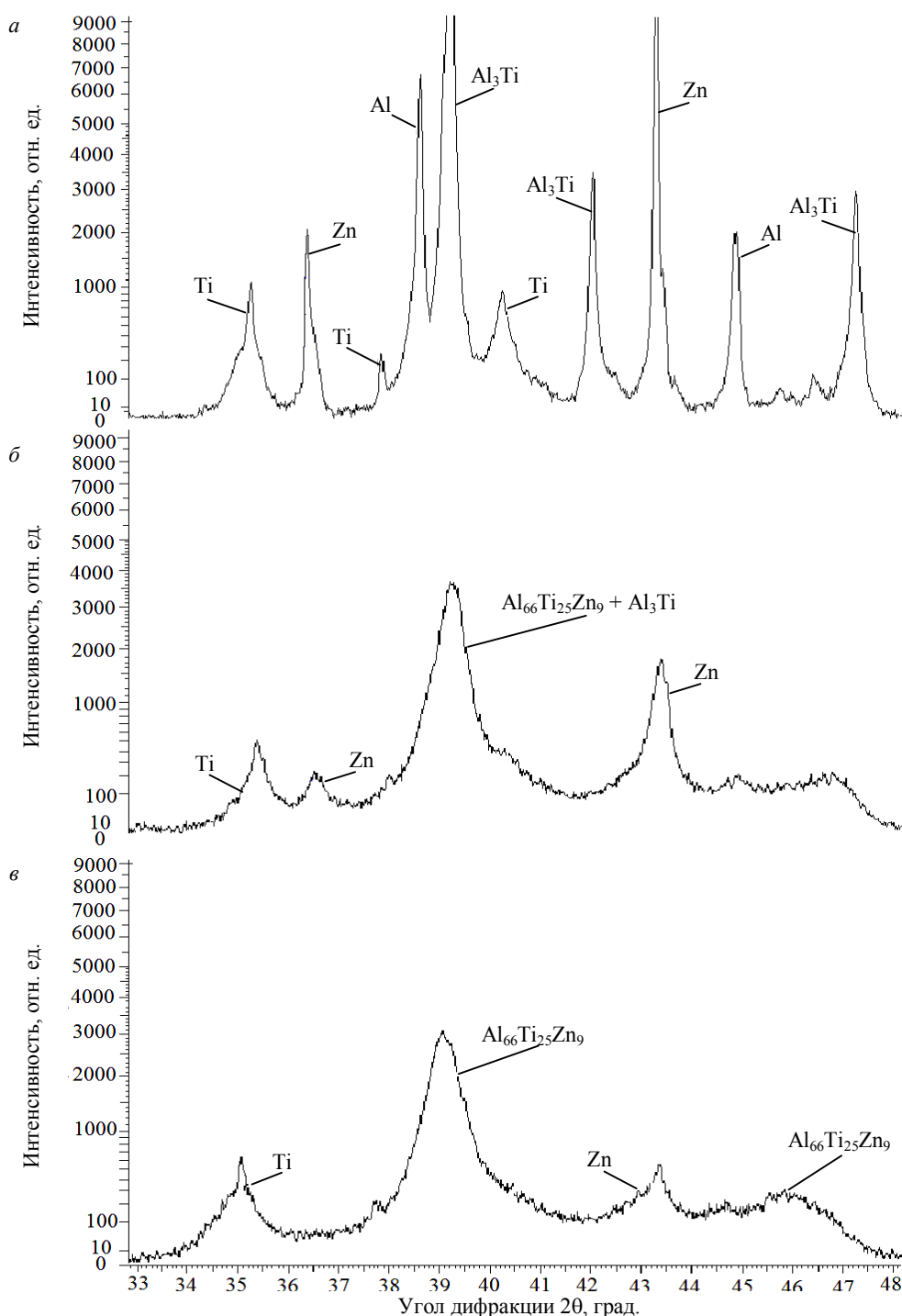


Рис. 1. Шихта, соответствующая составу интерметаллида $\text{Al}_{66}\text{Ti}_{25}\text{Zn}_9$: а – исходная смесь; б – после 4 кс обработки содержание $\text{Al}_{66}\text{Ti}_{25}\text{Zn}_9$ 66 % по массе; в – после 8 кс обработки содержание $\text{Al}_{66}\text{Ti}_{25}\text{Zn}_9$ 74 % по массе

Динамика развития нанодисперсных фаз в процессе синтеза при механолегировании исследовалась рентгенофазовым методом с использованием рентгеновского дифрактометра Bruker D8 Advance с вертикальным θ - θ -гониометром на β -фильтрованном $\text{CuK}\alpha$ -излучении ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$, Ni-фильтр), регистрация дифракционной картины проводилась высокоскоростным детектором LynxEye (угол захвата $3,2^\circ$) фирмы «Bruker», шаг сканирования $0,02^\circ$ по 2θ и время накопления сигнала 0,7 с/шаг. Режимы работы трубки $U = 40 \text{ кВ}$, $I = 40 \text{ мА}$. Съемка велась с фокусировкой по Бреггу – Брентано при вращении образцов (30 об/мин). Обработка полученных рентгенограмм производилась с помощью пакета программ DiffractionPlus фирмы «Bruker».

Фазовый состав определяли путем сравнения набора межплоскостных расстояний экспериментально полученной рентгенограммы с рентгенометрическими данными фаз порошковой базы PDF-2 (ICDD). Дальнейшая обработка дифракционных данных осуществлялась по методу Ритвельда с помощью программы Diffraction Plus Topas. Метод основан на построении модельной дифрактограммы, в которой учитываются все особенности структуры фазовых составляющих изучаемого объекта и инструментальные параметры съемки, и сравнительном анализе ее с экспериментальной картиной рассеяния. Путем уточнения профильных (параметры ячейки, сдвиг нуля и параметр преимущественной ориентировки) и структурных параметров модели (координаты и заселенности атомов) в ходе ряда итераций добивались наилучшего соответствия наблюдаемой и расчетной дифракционной картины. Добротность обработки (Goodness of Fit) показывает критерий $GOF = R_{wp}/R_{exp}$, характеризующий несоответствие модели экспериментальным данным. Уточнение проводилось до тех пор, пока значение GOF не превышало 1,5–2,5 %. В результате расчета по Ритвельду были определены количества фаз и размер их кристаллитов.

Изменения размера частиц порошка после активации фиксировались также с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) марки SUPRA 55VP-25-78.

В результате эксперимента было установлено, что при осуществлении СВС имеет место высокоскоростной характер реакции образования Al_3Ti : после продолжительного нагрева до 220 °С в течение 2 ч температура пространства внутри реторты поднималась в течение 80 с до 870 °С.

После нагрева материал приобрел неравномерную структуру, которая представляет собой прочное «ядро» и хрупкую «скорлупу». По данным рентгеновского анализа «ядро» состояло на 90 % из Al_3Ti , а «скорлупа» на 65 % из Al_3Ti . Этот интерметаллид получился наноструктурированным с размерами кристаллитов ≈ 40 –90 нм.

«Ядра» материала были измельчены в вибрационной мельнице до фракции 0–63 мкм. Из порошков

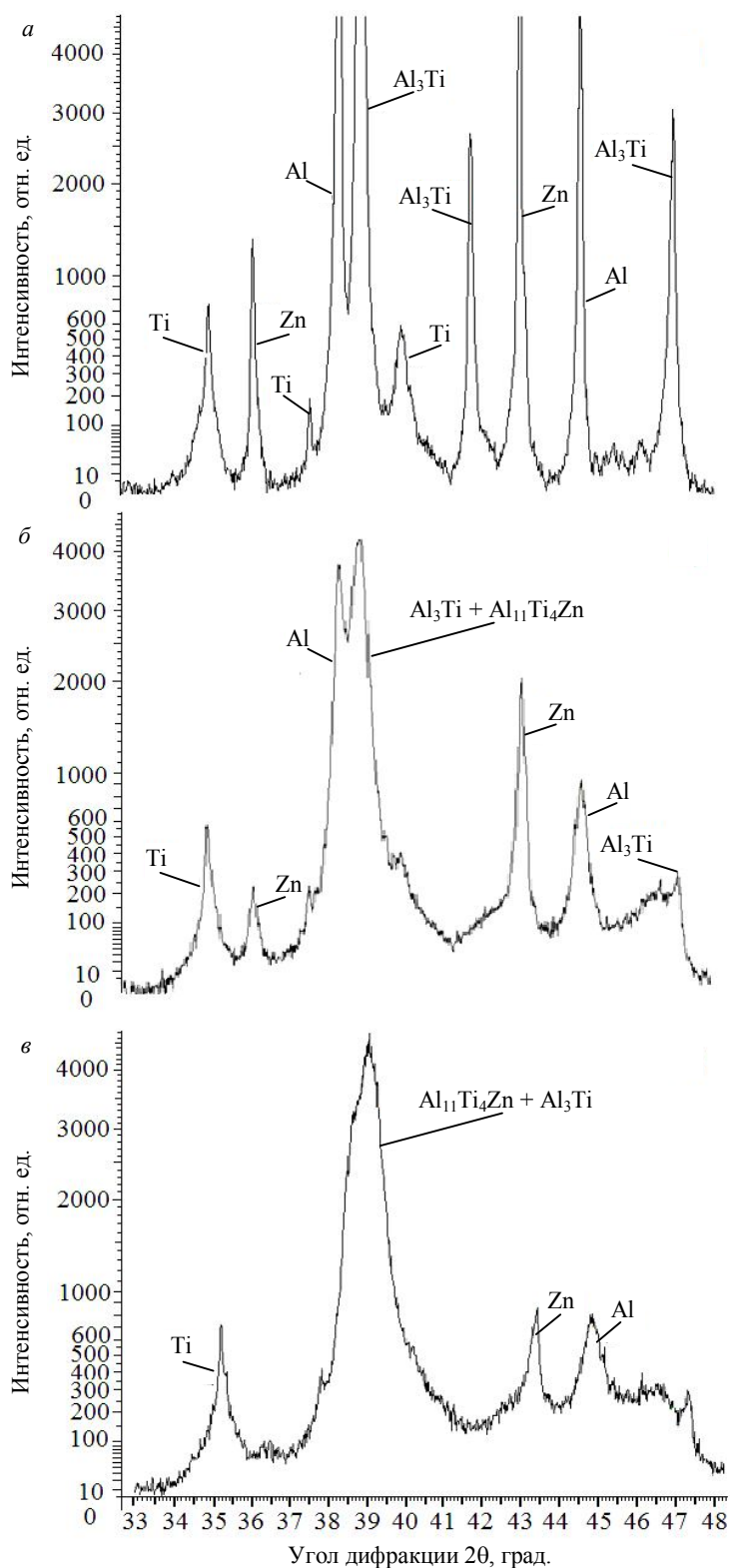


Рис.2. Шихта, соответствующая составу интерметаллида $Al_{11}Ti_4Zn$: а – исходная смесь; б – после 4 кс обработки содержание $Al_{11}Ti_4Zn$ 26 % по массе; в – после 8 кс обработки содержание $Al_{11}Ti_4Zn$ 54 % по массе

сплава 88,4 Al–11,6 Zn (в процентах по массе), цинка ПЦ1 и Al_3Ti были приготовлены шихты из расчета получения интерметаллидов $\text{Al}_{11}\text{Ti}_4\text{Zn}$ и $\text{Al}_{66}\text{Ti}_{25}\text{Zn}_9$. Механолегирование шихт осуществлялось в атриторе по методике [3] стальными шарами диаметром 7–10 мм общей массой 20 кг на 1150 г порошковой смеси. Каждая порошковая смесь была обработана по 8 кс.

Характерные участки дифрактограмм при различном времени активации представлены на рис.1 и 2.

В ходе высокоэнергетической механической обработки обнаружено возникновение и увеличение до 74 % по массе и более содержания тройного интерметаллида $\text{Al}_{66}\text{Ti}_{25}\text{Zn}_9$ (см. рис.1), размер частиц которого 0–40 мкм (рис.3). Эти частицы состояли из нанокристаллических кластеров не более 3–4 нм на любой стадии обработки. Во второй смеси содержание интерметаллида $\text{Al}_{11}\text{Ti}_4\text{Zn}$ достигло 54 % по массе (после 8 кс обработки), размер кластеров составил от 5 до 12 нм.

Сопоставление морфологии и дисперсности исходных шихт и продуктов их обработки в течение 8 кс (рис.3) показало существенное уменьшение размеров частиц при незначительном изменении их формы. Это характерно для обоих изученных интерметаллидов.

Гранулометрический состав порошков $\text{Al}_{11}\text{Ti}_4\text{Zn}$ до и после механообработки был проанализирован на лазерном дифрактометре Microsizer 201A в среде 1 %-ного раствора виннокислого калия в дистиллированной воде, являющегося ингибитором коррозии порошков на основе алюминия в воде. Результаты определения гранулометрического состава порошков $\text{Al}_{11}\text{Ti}_4\text{Zn}$ приведены на рис.4.

Энергетическими характеристиками механолегирования являются энергонапряженность – отношение полезной мощности размольного аппарата к массе обрабатываемого материала и доза – удельная энергия, поглощаемая единицей массы материала при механической обработке. На рис.5

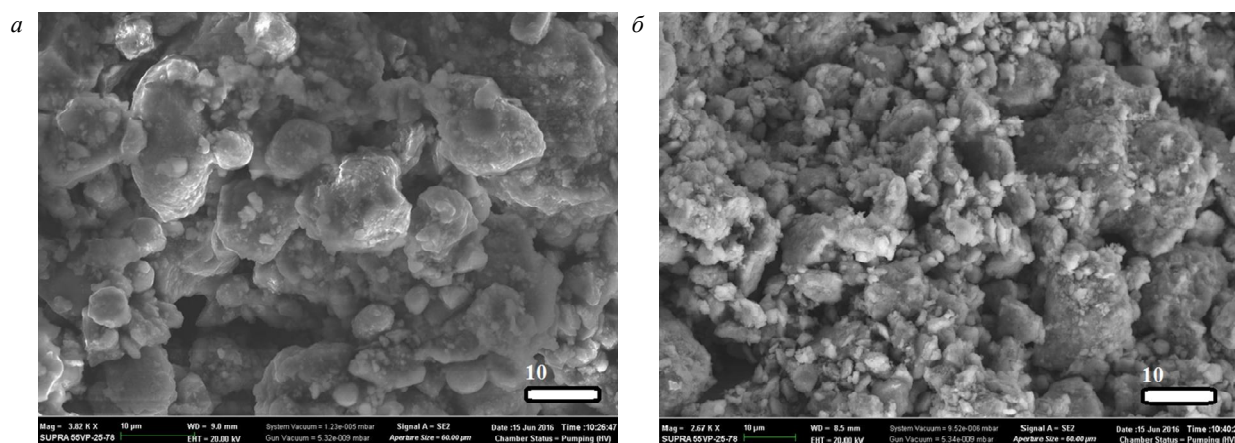


Рис.3. РЭМ-изображение порошковой шихты, соответствующей составу интерметаллида $\text{Al}_{11}\text{Ti}_4\text{Zn}$ до (а) и после механолегирования в течение 8 кс (б)

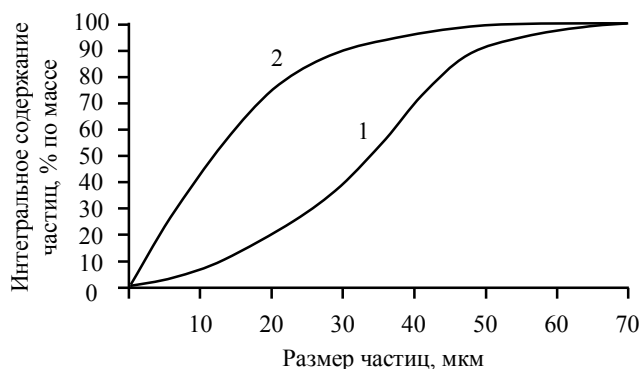


Рис.4. Интегральные кривые гранулометрического состава порошков $\text{Al}_{11}\text{Ti}_4\text{Zn}$ до (1) и после (2) механолегирования

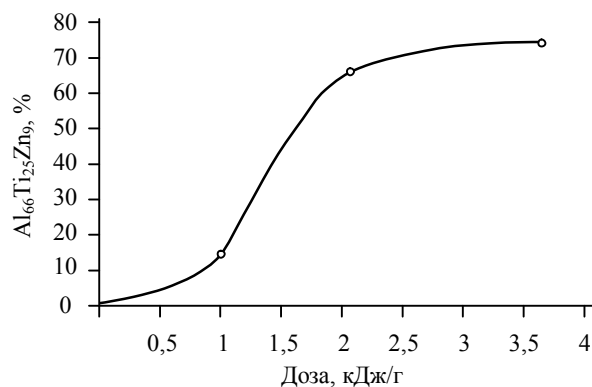


Рис.5. Зависимость содержания $\text{Al}_{66}\text{Ti}_{25}\text{Zn}_9$ от дозы высокоэнергетической механической обработки



представлена зависимость изменения содержания $Al_{66}Ti_{25}Zn_9$ от дозы высокоэнергетической механической обработки. Из полученных данных следует, что при уровне удельной мощности (дозы) механообработки 3,5 кДж/г достигается максимальное содержание в получаемом материале.

Полученные интерметаллидные соединения были использованы в качестве легирующей (на уровне 3–7 % по массе) добавки к порошковому сплаву марки Д16 (системы Al–Cu–Mg–Mn) для термопластической переработки изготовленных смесей методом горячей экструзии с получением упрочненных прутковых заготовок [9].

Выводы

1. Установлена принципиальная возможность получения в системе Al–Ti–Zn методом механолегирования порошков наноструктурированных интерметаллидов $Al_{66}Ti_{25}Zn_9$ и $Al_{11}Ti_4Zn$.
2. По предлагаемой методике был синтезирован наноструктурированный интерметаллид $Al_{66}Ti_{25}Zn_9$ с размером нанодисперсных фаз 3–4 нм; причем при уровне удельной мощности (дозы) механообработки 3,5 кДж/г его доля в материале может достигать 74 % по массе и более.
3. Синтез интерметаллида $Al_{11}Ti_4Zn$ методом механолегирования по той же методике протекает менее интенсивно: при том же уровне дозы механообработки его доля достигает лишь 54 % по массе. Размер нанодисперсных фаз 5–12 нм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Евстигнеев В.В. Два механизма структурообразования в гетерогенной порошковой смеси Ti–Al при синтезе в режиме теплового взрыва / В.В.Евстигнеев, В.Ю.Филимонов, С.Н.Василенко // Ползуновский вестник. 2004. № 1. С. 239–243.
2. Ермилов А.Г. Предварительная механоактивация / А.Г.Ермилов, Е.В.Богатырева. М.: Изд. дом МИСиС, 2012. 135 с.
3. Закономерности возникновения и изменения наноразмерных упрочняющих фаз в механолегированных порошках системы Al–Mg–Mn–Ti / М.В.Троцкий, С.Ю.Петрович, В.Д.Андреева, В.А.Липин // Сборник докладов МНПК в рамках недели науки СПбПУ. Ч. 1. СПб: Изд-во Политехнического университета, 2014. С. 137–141.
4. Контроль энергии измельчения и механоактивации планетарной мельницы АГО-3 / М.П.Бороненко, В.В.Лавриков, А.Е.Серегин, П.А.Юрукин, Р.Ф.Юхимук // Вестник Юргинского государственного университета. 2016. № 2 (41). С. 7–16.
5. Металлические порошки алюминия, магния, титана и кремния. Потребительские свойства и области применения / В.Г.Гопиенко, С.Ю.Петрович, В.П.Черепанов, И.Б.Гриценко, В.А.Баранов / Под ред. А.И.Рудской. СПб: Изд-во Политехнического университета, 2012. 356 с.
6. Структура, фазовый состав и свойства перспективных Al-сплавов с Ti, Zr после их высокоскоростного деформирования в твердом и жидком состояниях / Е.А.Козлов, И.Г.Бродова, Д.В.Башлыков, Т.Н.Яблонских, Е.В.Абакшин // Физика металлов и металловедение. 1999. Т. 87. № 3. С. 34–45.
7. Сурков В.А. Анализ методов получения интерметаллидов *p*, *d*-металлов // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 10. С. 27–33.
8. Третьяков К.В. Фазовые и структурные превращения в алюминиды переходных металлов Fe, Co и Ni при механохимическом синтезе и механоактивации: Автореф. дис. ... канд. хим. наук / Московский государственный университет. М., 2006. 139 с.
9. Хмелевская В.Б. Получение и применение наноматериалов и наноструктурирования для повышения работы механизмов / В.Б.Хмелевская, Е.С.Мосейко, М.Б.Мяконьков. СПб: Изд-во Политехнического университета, 2012. 140 с.
10. Bozic D. Nanocomposites with unique properties and applications in medicine and industry / D.Bozic, B.Dimcic. Rijeka: InTech, 2011. 360 p.
11. Intermetallics Synthesis in the Fe–Al System via Layer by Layer 3D Laser Cladding / I.Shishkovsky, F.Missemer, N.Kakovkina, I.Smurov // Crystals. 2013. № 3. P. 517–529.
12. Gnanapoongothai T. First-principle study on lithium intercalated antimonides Ag_3Sb and Mg_3Sb_2 / T.Gnanapoongothai, R.Murugan, B.Palanivel // Ionics. 2014. Vol. 21. № 5. P. 1351–1361.
13. Nanocomposite Formation in the Fe_2O_3 –M (M = Al, Ti, Zn, Cu) / C.H.Lee, S.H.Lee, S.Y.Chun, S.J.Lee, Y.S.Kwon // Systems by Mechanical Alloying: Materials Science Forum. 2004. Vol. 449–452. P. 253–256.
14. The influence of alloying additions on interaction of aluminum alloys with aqueous media / A.Yu.Baimakov, S.Yu.Petrovich, V.A.Lipin, A.L.Shahmin, R.A.Seytenov // Light Metals. The Minerals, Metals and Materials Society. 2015. P. 387–391.
15. Zolotarevsky V.S. Casting Aluminium Alloys / V.S.Zolotarevsky, N.A.Belov, M.V.Glazoff. Amsterdam: Elsevier, 2007. 530 p.

Авторы: В.В.Каминский, инженер, kam-vladimiro@yandex.ru (Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия), С.Ю.Петрович, заведующий лабораторией, lmpa2010-new@mail.ru (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия), В.А.Липин, д-р техн. наук, заведующий кафедрой, vadim.lipin@rambler.ru (Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, Россия).

Статья поступила в редакцию 11.09.2017.

Статья принята к публикации 14.05.2018.



УДК 669.018.9

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ВК15 ДЛЯ БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА

Ю.А.КУРГАНОВА¹, К.С.ПАНИНА¹, П.С.БЕШЕНКОВ²¹ Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия² ООО «Завод технической керамики», г. Апрелевка, Московская обл., Россия

Традиционно при бурении крепких, весьма крепких и абразивных горных пород рекомендуется применять вольфрамкобальтовый твердый сплав ВК15. Мониторинг информационных источников по вопросу возможностей повышения потенциала материала продемонстрировал наличие механизмов, обеспечивающих структурные превращения, провоцирующие повышение показателей прочности, твердости и ударной вязкости материала. Применение таких технологических приемов взамен традиционных приведет к повышению эффективности работы и срока эксплуатации инструмента. В ходе работы получены экспериментальные образцы сплава ВК15, спеченные по четырем разным модернизированным режимам. На полученных экспериментальных образцах проведен сравнительный анализ свойств. Результаты металлографического исследования, осуществляемого на микроскопе «Carl Zeiss», позволили оценить распределение зерен карбида вольфрама в кобальтовой связке и продемонстрировать измельчение карбидной фазы. Так, при традиционном спекании количество зерен карбида вольфрама средним размером менее 1 мкм в диаметре от всего размерного диапазона достигает 19,5 %, в то время как после дополнительной термической обработки с выдержкой 1280 °С – 41,5 %; 900 °С – 59,1 %; 600 °С – 54,5 %. Максимальное из исследуемых экспериментальных образцов увеличение твердости на 18 %, коэрцитивной силы – на 49 %, трещиностойкости – на 11 % традиционного сплава достигнуто на режиме 900-1280 °С. Выдвинута гипотеза о формировании дополнительных структурных элементов, не выявляемых методами оптической металлографии. Исследования топологии и структуры образцов на атомно-силовом микроскопе подтвердили наличие наноразмерных включений от 20 до 40 нм, предположительно карбида вольфрама, в кобальтовой связке.

Для ВК15 сравнительные исследования свойств и анализ микроструктуры экспериментальных образцов, полученных по традиционному режиму спекания и модернизированной технологии, показали, что режим спекания при 900 °С является приоритетным. Таким образом, разработанная технология, включающая спекание порошков в потоке водорода до 750 °С, с 750 до 1450 °С в вакууме, подачу на максимальной температуре 1450 °С в течение 15 мин аргона под давлением 60 бар, последующее охлаждение до 900 °С и выдержку в течение часа, может быть рекомендована как наиболее рациональная для раскрытия потенциала материала и обеспечения повышенного уровня свойств бурового инструмента.

Ключевые слова: вольфрамкобальтовый твердый сплав; буровой инструмент; температурный интервал; термообработка

Как цитировать эту статью: Курганова Ю.А. Анализ возможности повышения свойств материала ВК15 для бурового инструмента / Ю.А.Курганова, К.С.Панина, П.С.Бешенков // Записки Горного института. 2018. Т. 233. С. 518-524. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.518

Введение. В настоящее время Российская Федерация является ведущей страной в мире по добыче полезных ископаемых. Около 90 % объема буровых работ выполняется шарошечными буровыми долотами. При помощи инструмента, оснащенного твердыми сплавами, производится вырубка, бурение геологоразведочных скважин, бурение промышленных скважин на нефть, газ, воду, бурение скважин для взрыва горной массы и пород. Эксплуатационные свойства бурового инструмента определяются физико-механическими свойствами материала, выбранного для рабочих частей. При бурении крепких, весьма крепких и абразивных горных пород рекомендуется применять твердый сплав ВК15 [2]. Сплав относится к вольфрамкобальтовым твердым сплавам, структура которых состоит из зерен карбида вольфрама и кобальта. Данная группа сплавов обладает высокими показателями твердости, износостойкости и теплостойкости [5].

Постановка проблемы. Потребности современного производства и мониторинг информационных источников по данному вопросу позволили выявить возможности достижения повышенных прочности и ударной вязкости за счет упрочненной кобальтовой связки. Например, использование таких приемов, как модифицирование кобальтовой связки нанодобавками приводит к повышению срока эксплуатации инструмента [1, 3, 4, 7, 10-13, 15-17]. Данные методы способствуют значительному росту комплекса механических свойств, однако являются дорогостоящими. Помимо изменения гранулометрического и химического состава исходных компонентов, на структуру и свойства сплавов влияет термическая обработка [8, 14].

В настоящей работе предложено обоснование и результаты опробования модернизированного технологического процесса получения порошковой заготовки путем дополнения операции охлаждения после спекания и повторного нагрева [6, 9].

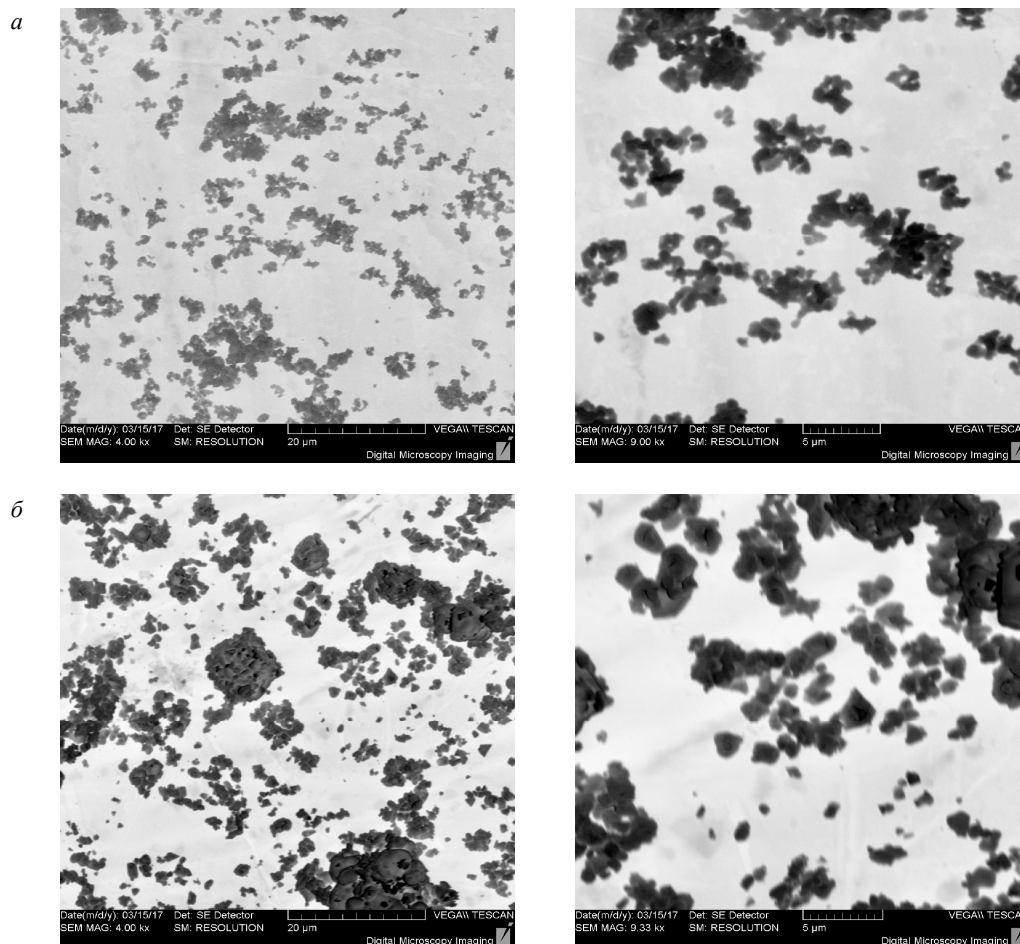


Рис.1. Порошок Co (а) и WC (б) при увеличении 4000^x и 9000^x

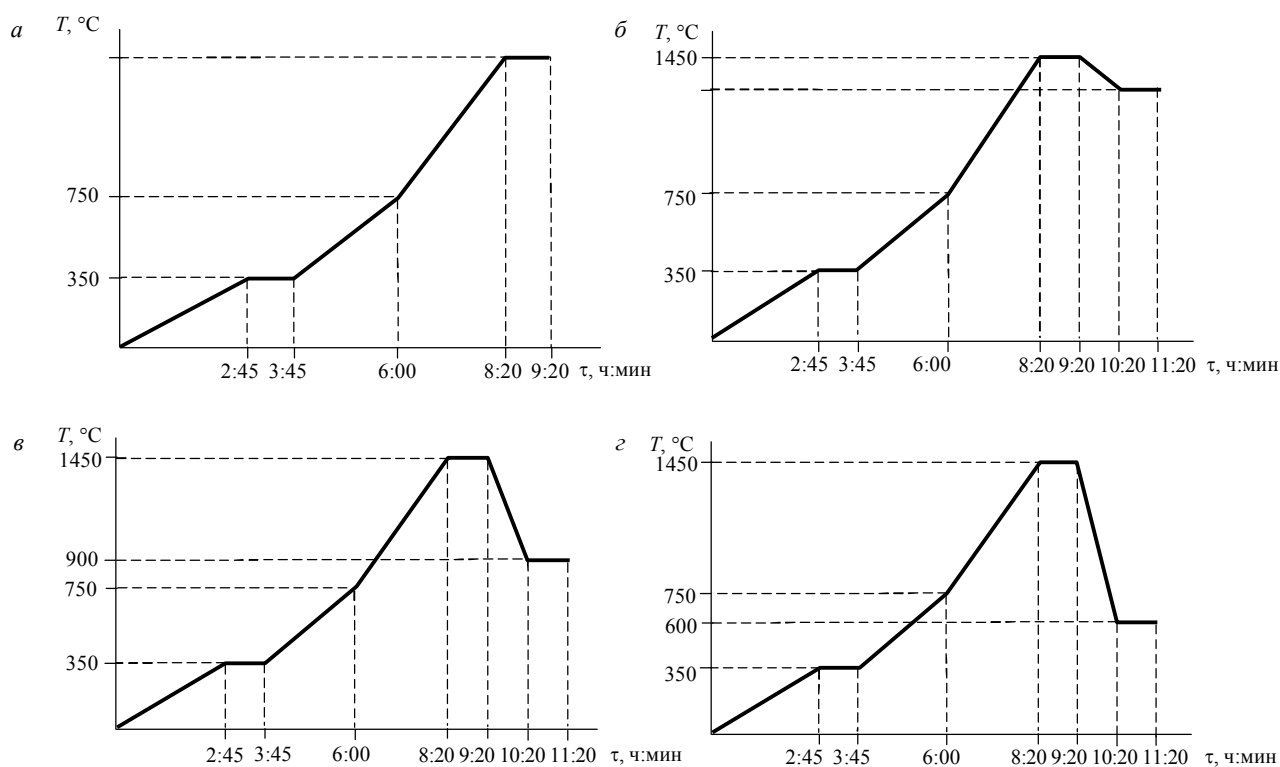


Рис.2. Графики режимов термообработки: традиционного (а) и режима спекания с дополнительной выдержкой при температурах 1280 °C (б); 900 °C (в); 600 °C (г)



Методология. Исходными материалами объекта исследования взяты порошки карбида вольфрама марки WC3 (ТУ 1742-002-46878311-2013) со средним размером частиц порошка $D_{50} = 3 \pm 1$ мкм и кобальт марки ПК-1У (ГОСТ 9721-79) со средним размером $1,2 \pm 0,2$ мкм. Контроль гранулометрического состава осуществлялся на приборе «Malvern Mastersizer 3000E».

Химический состав исходных порошков следующий:

Компонент	Mo	Si	Fe	Na+K	Pb	Ni	Mn	Ca	Al	S	C _{общ}	C _{своб}
WC	0,18	0,003	0,100	0,010	–	–	–	0,005	0,003	0,023	6,12	0,050
Co	–	0,001	0,002	0,002	0,001	0,03	0,001	0,001	–	0,001	0,015	–

Исследования исходных порошков проводились на растровом электронном микроскопе VEGA II LMN в лаборатории тонких физических методов исследования структуры материалов МГТУ им. Баумана (рис.1).

Смесь порошков размалывали в среде изопропилового спирта в валковой мельнице мокрого размола. Далее проводилась сушка, замешивание с раствором синтетического каучука в бензине и прессование полученной смеси в стальных формах под давлением 100 МПа. Спекание прессовок в вакуумно-компрессионной печи ПВК-1 осуществлялось в различных режимах для определения наиболее эффективного. Все технологические операции выполнены на базе ООО «Завод технической керамики» (табл.1).

Таблица 1

Режимы спекания

Номер режима	Температурный режим			Назначение операции
	Температура, °C	Скорость нагрева, °C/мин	Выдержка, мин	
1	≤ 350	2,0	–	Отгонка пластификатора
	350	–	60	
	350-750	3,0	–	
	750-1450	5,0	–	Предварительное спекание
	1450	–	60	Окончательное спекание
	1450-20	–5,0	–	Охлаждение
2	≤ 350	2,0	–	Отгонка пластификатора
	350	–	60	
	350-750	3,0	–	
	750-1450	5,0	–	Предварительное спекание
	1450	–	60	Окончательное спекание
	1450-1280	–3,2	–	Охлаждение
	1280	–	60	Выдержка
	1280-20	–5,0	–	Охлаждение
3	≤ 350	2,0	–	Отгонка пластификатора
	350	–	60	
	350-750	3,0	–	
	750-1450	5,0	–	Предварительное спекание
	1450	–	60	Окончательное спекание
	1450-900	–3,2	–	Охлаждение
	900	–	60	Выдержка
	900-20	–5,0	–	Охлаждение
4	≤ 350	2,0	–	Отгонка пластификатора
	350	–	60	
	350-750	3	–	
	750-1450	5	–	Предварительное спекание
	1450	–	60	Окончательное спекание
	1450-600	–3,2	–	Охлаждение
	600	–	60	Выдержка
	600-20	–5	–	Охлаждение

Графики описанных режимов представлены на рис.2.

До 750 °С спекание проводят в потоке водорода, с 750 до 1450 °С – в вакууме для облегчения процесса уплотнения, удаления газов из пористых заготовок и обеспечения лучшей смачиваемости карбидов кобальтом. На максимальной температуре 1450 °С в течение 15 мин подается аргон под давлением 60 бар, затем для модернизированной технологии охлаждали до температуры 600, 900, 1280 °С соответственно для разных режимов. В конце режима проводили охлаждение садки с печью до температуры окружающей среды.

Обсуждение. На полученных экспериментальных образцах были проведены измерения ряда характерных свойств (табл.2).

Таблица 2

Результаты измерений физико-механических свойств

Режим термообработки	Плотность, г/см ³	Твердость, HV 10	Коэрцитивная сила, эрстед	Трещиностойкость, МПа·м ^{1/2}
1	13,97	1033	78	10,59
2	14,0	1088	98	10,79
3	14,1	1222	116	11,70
4	14,07	1153	107	11,05

Плотность определяли по ГОСТ 200818-74 на измерителе плотности VIBRA NT224RCE. Измерение твердости по методу Виккерса проводили на микротвердомере ПМТ-3 с максимальной нагрузкой 200 г, измерение коэрцитивной силы – на приборе «Кобальт-1» согласно ГОСТ 24916-81.

Анализ полученных данных подтверждает эффективность модернизированных технологий. Незначительное увеличение плотности тем не менее свидетельствует о том, что термообработка приводит к снижению дефектов типа остаточных пор. Повышение коэрцитивной силы и твердости позволяет судить об увеличении дисперсности зерен, так как известно, что это косвенные показатели измельчения структуры в твердых сплавах.

Наглядный сравнительный анализ данных свойств, полученных для трех экспериментальных режимов, представлен на рис.3.

Так как движению трещины препятствуют границы зерен и иные структурные несовершенства, наблюдаемое увеличение вязкости разрушения можно объяснить потребностью в до-

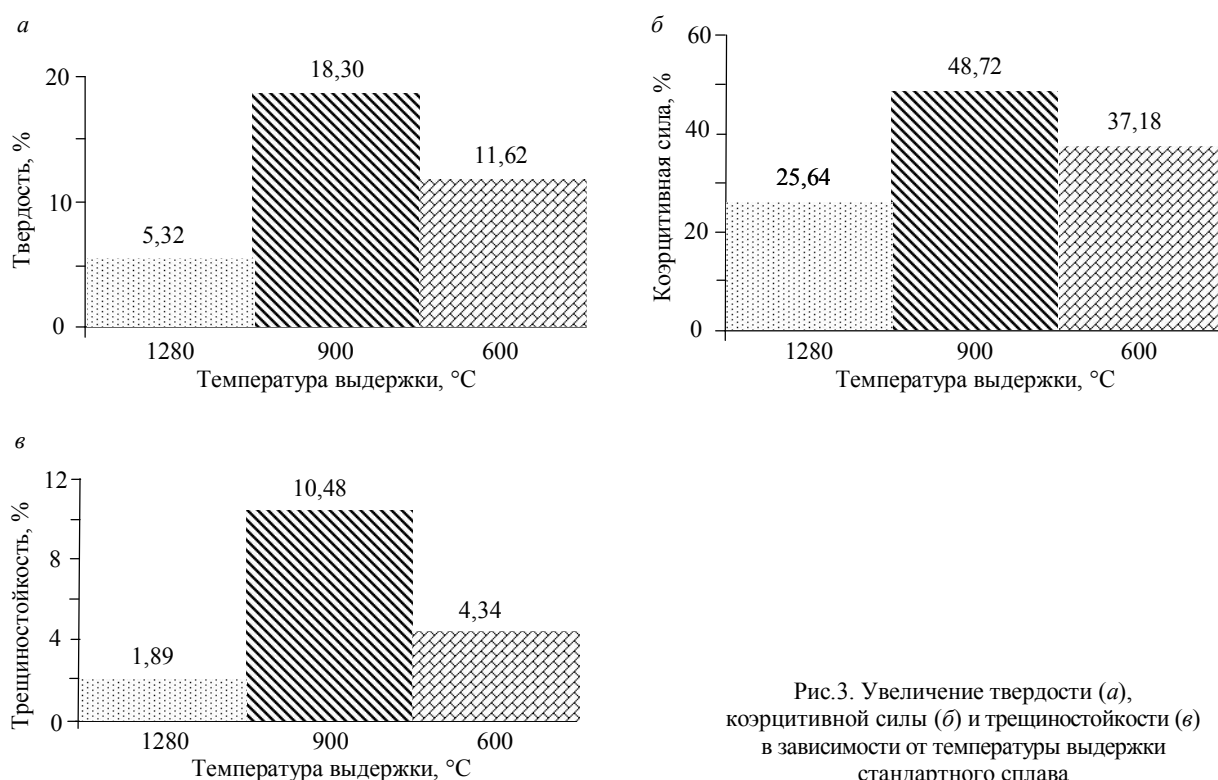
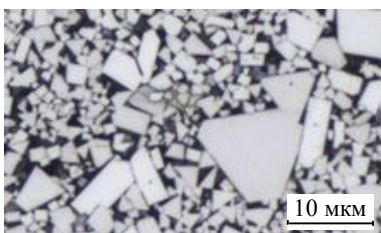
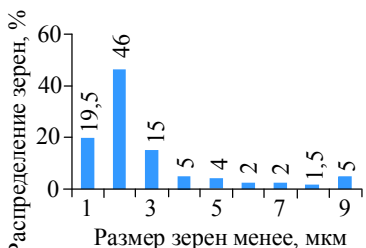
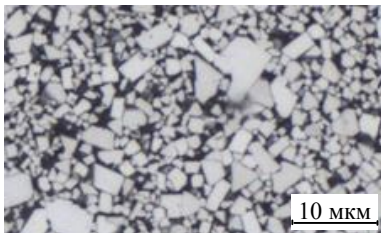
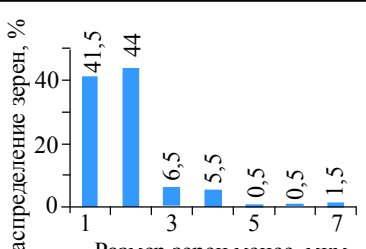
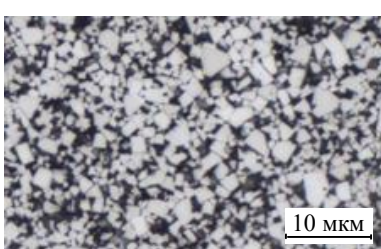
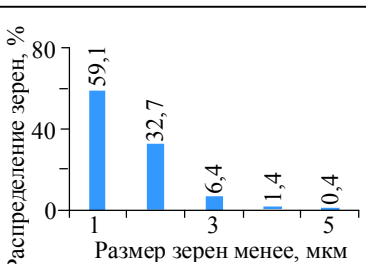
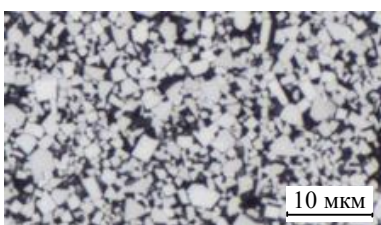
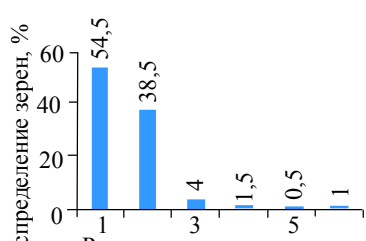


Рис.3. Увеличение твердости (а), коэрцитивной силы (б) и трещиностойкости (в) в зависимости от температуры выдержки стандартного сплава

Таблица 3

Результаты металлографического исследования и анализа распределения зерен

Режим термообработки	Микроструктура	Распределение зерен, %
1		
2		
3		
4		

полнительной энергии на развитие трещины. Результаты металлографического исследования, осуществляемого на микроскопе «Carl Zeiss», и анализа распределения зерен карбида вольфрама в сплавах представлены в табл.3.

Анализ структуры демонстрирует видимое измельчение карбидной фазы после термообработки. Так, при традиционном спекании количество зерен карбида вольфрама средним размером менее 1мкм в диаметре от всего размерного диапазона достигает 19,5 %, в то время как после дополнительной обработки с выдержкой 1280; 900; 600 °С – 41,5; 59,1; 54,5 % соответственно.

В большей степени эффект измельчения, равнозначно как относительный прирост свойств, демонстрирует сплав после дополнительной выдержки при 900 °С (см. табл.2, режим 3).

При сопоставлении данных всего исследования установлено, что именно для этого режима наблюдается максимальное из исследуемых экспериментальных образцов увеличение твердости на 18 %, коэрцитивной силы – на 49 %, трещиностойкости – на 11 % относительно характеристик материала заготовок, полученных по традиционной технологии. Выдвинута гипотеза о формировании дополнительных структурных элементов, не видимых при оптической металлографии. Увеличение твердости и вязкости приводит к увеличению эксплуатационной стойкости бурового инструмента и снижению затрат на бурение промышленных скважин.

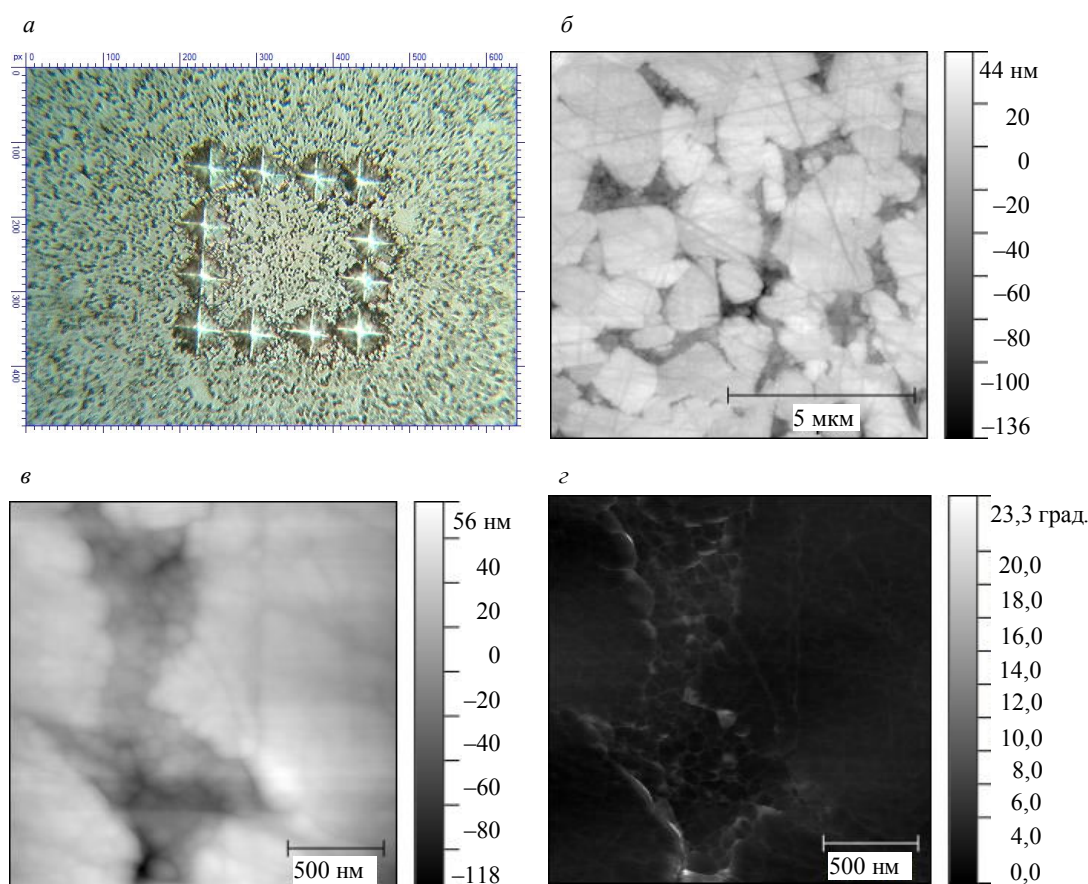


Рис.4. Результаты сканирования на атомно-силовом микроскопе: а и б – область 40×40 мкм на образце; в и г – кадр АСМ-сканирования образца в области 3 на 3 мкм и при разности фаз соответственно

Для подтверждения предположения в центре коллективного пользования «Научно-образовательный центр «Функциональные микронаносистемы» проведено исследование неоднородности строения кобальтовой связки на образце, полученном по режиму 3 на атомно-силовом микроскопе с использованием уникальных научных установок. Результаты исследований представлены на рис.4.

Исследования топологии и структуры образцов подтвердили наличие наноразмерных включений, предположительно карбида вольфрама, в кобальтовой связке. Выявлен характерный размер включений от 20 до 40 нм.

Заключение. В ходе работы установлено, что условия спекания, а именно сочетание температуры и скорости нагрева и охлаждения, температуры и времени выдержки, температурного интервала дополнительной термообработки значимо влияют на структурные превращения, и, следовательно, могут являться механизмом управления свойствами твердого сплава. Так, для ВК15 сравнительные исследования свойств и анализ микроструктуры экспериментальных образцов, полученных по традиционному режиму спекания и по разработанной технологии спекания, показали, что режим спекания, дополненный выдержкой при 900 °С, является приоритетным.

Таким образом, разработанная технология, включающая спекание порошков в протоке водорода до 750 °С, с 750 до 1450 °С в вакууме, подачу на максимальной температуре 1450 °С в течение 15 мин аргона под давлением 60 бар, последующее охлаждение с печью до 900 °С и выдержку в течение часа, может быть рекомендована как наиболее рациональная для раскрытия потенциала материала и обеспечения повышенного уровня свойств бурового инструмента.

Благодарность: Работа выполнена при финансовой поддержке прикладных научных исследований Министерством образования и науки Российской Федерации. Соглашение о предоставлении субсидии №14.579.21.093. Уникальный идентификатор RFMEFI57915X0093.



ЛИТЕРАТУРА

1. Влияние добавок керамических наночастиц на структурные параметры и свойства твердых сплавов / Ю.И.Гордеев, А.К.Абкарян, Г.М.Зеер, А.А.Лепешев // Вестник СибГАУ. 2013. № 3. С. 49-54.
2. Захаров Д.А. Совершенствование состава, структуры, технологии и применения твердых сплавов в производстве буровых шарошечных долот: Автореф. дис... канд. техн. наук / Самарский государственный технический университет. Самара, 2014. 22 с.
3. Новый твердый сплав с нанопропроченной связкой / И.Ю.Коняшин, Б.Рис, Ф.Ляхманн, А.А.Мазилкин, Б.Б.Страумал // Материаловедение. 2010. № 3. С.38-40.
4. Особенности уплотнения при спекании сплава ВН8М с добавками наноразмерного карбида вольфрама / Д.В.Федоров, О.В.Семенов, В.И.Румянцев, С.С.Орданьян // Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2014. № 3. С. 26-30. DOI: 10.17073/1997-308X-2014-3-26-30
5. Панов В.С. Технология и свойства спеченных твердых сплавов / В.С.Панов, В.Н.Шуменко. М.: Изд-во МИСиС, 2013. 144 с.
6. Панина К.С. Разработка технологии получения твердых сплавов с повышенными механическими свойствами на основе сплава ВК15 // Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая научная весна. Машиностроительные технологии»: Материалы конференции, 4-7 апреля, 2017 / МГТУ им. Н.Э.Баумана. М. URL: studvesna.ru?go=articles&id=1984 (дата обращения: 27.09.2017).
7. Патент 2548846 РФ. Способ получения спеченных твердых сплавов / Ю.И.Гордеев. Оpubл. 27.12.2011. Бюл. № 11.
8. Патент 2534670 РФ. Способ упрочнения твердых сплавов / С.И.Богодухов. Оpubл. 10.12.2014. Бюл. № 34.
9. Патент 2631548 РФ. Способ получения изделий из твердого сплава на основе карбида вольфрама / П.С.Бешенков, Р.Ю.Куфтырев. Оpubл. 27.09.2017 Бюл. № 27.
10. Borovskii G.V. Nanostructured hard metals WC-Co produced from plasma chemical powders / G.V.Borovskii, Y.V.Blagoveshchenskii, A.V.Abramov // RWF Werbegeellschaft. Austria. 2009. Iss. 2. P. 224- 229.
11. Bartha L. Investigation of hip-sintering of nanocrystalline WC/Co powder / L.Bartha, P.Atato, A.L.Toth // Materials. 2000. Iss. 32. P.23-26.
12. Jia K. Microstructure, hardness, and toughness of nanostructured and conventional WC-Co composites / K.Jia, T.E.Fischer, B.Gallois // Nanostructural materials. 1998. Iss. 10. P. 875-891.
13. Patent 20080179104 USA. Nano-reinforced WC-Co for improved properties / Y.Zhang. Opubl. 31.07.2008.
14. Patent 20140023546 USA. Cemented carbide material / I.Yu.Konyashin, B.H.Ries, F.F.Lachmann. Opubl. 23.01.2014.
15. Patent 6524366 USA. Method of Forming Nanograin Tungsten Carbide and Recycling Tungsten Carbide / P.Seegopaul, L.Gao. Opubl.25.02.2003.
16. Tan G.L. Preparation and mechanical properties of nanostructured tungsten carbide alloys strengthened by carbon nanotubes / G.L.Tan, X.J.Wu, Z.Q.Li // MRS Proceedings. 2003. Iss. 788. P. 449.
17. Z.Fang. Synthesis, sintering and mechanical properties of nanocrystalline cemented tungsten carbide / Z.Fang, X.Wang, T.Ryu // Metals Hard Mater. 2009. Iss. 27. P. 288-299.

Авторы: Ю.А.Курганова, д-р техн. наук, профессор, kurganova_ya@mail.ru (Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия), К.С.Панина, сотрудник лаборатории, kirapapinatgtu@mail.ru (Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия), П.С.Бешенков, инженер-технолог, pbeshenkov@gmail.com (ООО «Завод технической керамики», г. Апрелевка, Московская обл., Россия).

Статья поступила в редакцию 20.12.2017.

Статья принята к публикации 08.05.2018.



ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛА УДАРНИКА ПРИ ПОВТОРЯЮЩИХСЯ ЕДИНИЧНЫХ УДАРАХ

В.И.БОЛОБОВ, ЛЕ ТХАНЬ БИНЬ

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Представлены методика и результаты экспериментов по исследованию закономерностей процесса изнашивания конусообразного острия свободно падающего ударника, изготовленного из сталей 38ХМ, У8, Х12МФ, подвергнутого типовой термической обработке и дополнительно обработанного холодом, при нанесении им многократных (до 10000) единичных ударов по граниту в условиях, приближающихся к условиям работы пики гидромолота. Для объяснения процессов использованы значения напряжений σ_k , возникающих на площадке контакта ударника и породы, рассчитанные с использованием разработанной математической модели. Установлено, что процесс изнашивания ударника при многократном единичном ударе протекает в три стадии, разделяющиеся критическими значениями σ_k^* , σ_k^{**} , которые соответствуют прочностным характеристикам материала ударника, демонстрируемым в данных динамических условиях.

При малом числе ударов ($n \leq n^*$) и малых размерах площадки притупления (стадия I взаимодействия) значения σ_k превышают σ_k^* стали и она на площадке контакта подвергается локальному разрушению, что регистрируется в виде значительной убыли массы ударника; при $n^* < n \leq n^{**}$ (стадия II) возникающих напряжений не хватает для разрушения материала, но оказывается достаточно для его пластической деформации, сопровождаемой перемещением металла с центральной части площадки контакта на периферийную и разрушением части деформированного металла породой; при $n > n^{**}$ (стадия III) возникающие σ_k не достигают уровня σ_k^{**} и убыль массы ударника определяется стойкостью использованной стали к истиранию продуктами разрушения породы, вытесняемыми ударником из лунки. Обработка ударников из всех испытанных сталей холодом приводит к повышению их износостойкости; суммарная глубина лунок, выколотых обработанным холодом ударником из стали Х12МФ к моменту прекращения внедрения породы, в четыре раза превышает аналогичный показатель для ударника из стали 38ХМ, подвергнутого типовой термической обработке.

Ключевые слова: многократный единичный удар; конусообразный стальной ударник; обработка холодом; абразивный износ; изнашивание металла

Как цитировать эту статью: Болобов В.И. Закономерности разрушения материала ударника при повторяющихся единичных ударах / В.И.Болобов, Ле Тхань Бинь // Записки Горного института. 2018. Т. 233. С. 525-533. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.525

Введение. Машины ударного разрушения отбойкой и скалыванием широко используются при проведении горных выработок, для демонтажа огнеупорной футеровки при ремонте доменных и мартеновских печей, при разработке мерзлых и скальных грунтов, вскрытии дорожных покрытий, разрушении бетонных, железобетонных и кирпичных конструкций и пр. [7]. В качестве рабочего инструмента в этих машинах обычно используются пики цилиндрической формы в виде конуса или клина, заточенные под углом, как правило, от 30 до 40° [5]. Процесс разрушения такими машинами начинается с внедрения инструмента в массив, имеющий достаточно близкие друг к другу свободные поверхности, на такую глубину, чтобы возникающие вследствие внедрения растягивающие и сдвиговые напряжения оторвали от массива кусок необходимых размеров. Работоспособность машины определяется ее способностью внедрить ударный инструмент на заданную глубину, а показателем производительности является скорость внедрения [5].

По мере эксплуатации инструмента из-за ударно-абразивного изнашивания его материала размеры площадки притупления, имеющейся в заостренной части пики, возрастают. Это приводит к увеличению площади контакта инструмента с породой при ударе со снижением интенсивности ударного разрушения. В результате, начиная с некоторого момента, процесс внедрения пики в породу практически прекращается и для его возобновления требуется замена или перезаточка пики. Например, как показывает опыт работы гидромолота DAEMO B180, этот момент для данной машины наступает при изнашивании заостренной части пики примерно на 50 %, вследствие чего пики хватает на 4-5 перезаточек. С учетом того, что замена массивной пики и ее перезаточка являются весьма трудоемкими процессами, разработка способов, повышающих стойкость материалов пик гидромолотов к ударно-абразивному изнашиванию и, как следствие, время эксплуатации пик до перезаточки, является актуальной задачей.

Вопросам разрушения породы ударным инструментом и, в частности, гидравлическими молотами посвящено значительное количество исследований. На основании законов механики и классической теории Герца разработаны классическая и волновая теории удара, связывающие энергию, силу и время взаимодействия ударника и разрушаемого материала с глубиной внедрения ударника в породу. Вопросы, связанные с механизмом изнашивания материала ударника и влиянием на производительность гидромолотов величины площадки притупления его острия, изменяющейся во времени в зависимости от износостойкости материала, изучены недостаточно.

В настоящей работе в условиях, приближающихся к условиям работы пик машин ударного разрушения отбойкой и скалыванием, исследованы закономерности процесса изнашивания материала свободно падающего ударника при нанесении им единичных ударов по породе.

Методика эксперимента. Объектом исследования являлись ударники длиной $L = 25$ мм с цилиндрической частью ($D = 6$ мм, $l_1 = 13,8$ мм) и конусообразным заострением с углом при вершине $\beta = 30^\circ$ на длине $l_2 = 11,2$ мм, изготовленные из сталей 38ХМ, У8, Х12МФ, как материалов пик гидромолотов, отличающиеся прочностью и износостойкостью. Часть сталей подвергали типовой термической обработке (ТТО) – закалке с $800-1000^\circ\text{C}$ в масле и отпуску при 200°C , практикуемой на заводах-изготовителях пик, другую – дополнительной обработке [4] холодом (выдержке при -75°C в течение 5 ч) как операции, широко применяемой для улучшения износостойкости инструментальных сталей [8, 10, 11, 13]. С использованием универсального твердомера Zwick/Roell ZHU определяли твердость материалов ударника, достигнутую в результате термических обработок.

Испытания проводили на установке (рис.1) конструкции, близкой к описанной в [2].

Ударник 2, изготовленный из стали одной из указанных марок, после взвешивания на аналитических весах ($\pm 0,0001$ г) закрепляли в вертикальном положении в массивном бойке 3 ($M = 2,8$ кг). Под ударником размещали фрагмент породы 1 гранита крепостью 6,2 по шкале М.М.Протоdjяконова с агрегатной твердостью ~ 450 HV и твердостью составляющих его минералов до 1200 HV (для кварца), превышающей твердость использованных материалов ударника.

При падении бойка с ударником с определенной высоты ($H = 42$ мм) осуществляли серию ударов n острием ударника в различные точки поверхности фрагмента, каждый удар в другую точку. Кинетическая энергия A_0 и предударная скорость v_0 бойка с ударником, рассчитанные из величин M и H , составляли 1,16 Дж и 0,91 м/с. После каждого удара ударник подвергали повторному взвешиванию и замеру L (точность замера $\pm 0,01$ мм) с определением убыли массы Δm и длины Δl его острия, по Δl с учетом β рассчитывали диаметр d , образовавшейся площадки притупления. При числе ударов свыше 40 установление Δm и Δl производили через интервал n (от 10 до 100) и рассчитывали как частное от деления суммарной величины функций за этот интервал на число ударов в интервале. Анализировали вид лунок выкола в породе с замером их глубины h (точность замера 0,01 мм). Изменяя материал ударника, для каждого из них строили зависимости Δl , d , h от числа ударов n .

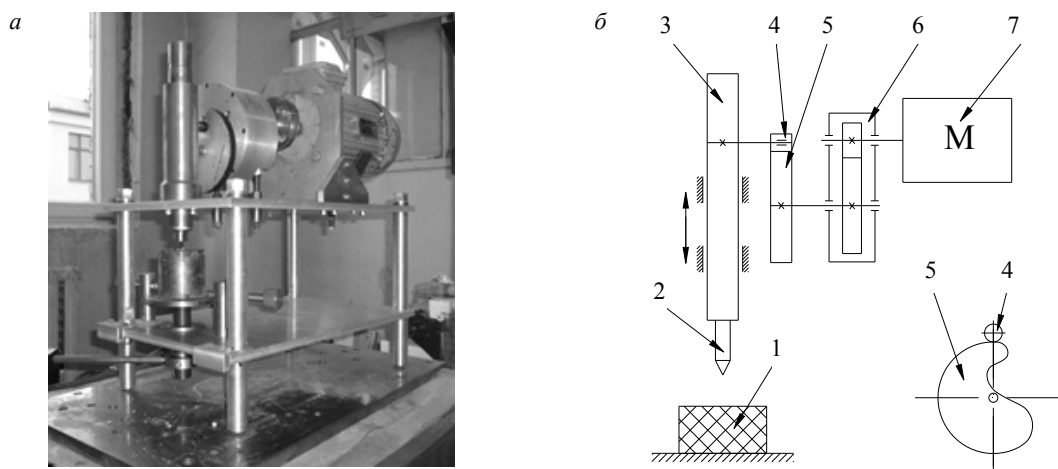


Рис.1. Установка для изучения процесса ударного разрушения горной породы и материала ударника (а) и ее принципиальная схема (б)

1 – фрагмент породы; 2 – ударник; 3 – боек; 4 – ролик; 5 – кулачок; 6 – редуктор; 7 – электродвигатель

Результаты эксперимента. Как показали наблюдения, процесс удара о гранит сопровождается незначительным (на несколько миллиметров) отскоком ударника. Результатом первого удара является появление на заостренной части ударника кругообразной площадки притупления, диаметр d которой возрастает по мере увеличения числа ударов.

Разрушение гранита характеризуется вылетом из зоны разрушения частичек и пылеобразных фрагментов с образованием лунок выкола формы, близкой к конфигурации внедряющейся части ударника большего диаметра. На дне лунок обнаруживается уплотненное ядро порошкообразных продуктов разрушения, отличающееся цветом (белым) от остальной части породы.

Установлено, что с увеличением числа ударов величины Δl и h монотонно убывают (рис.2). Причем, кривые $\Delta l = f(n)$ для анализируемых сталей расположены на графике относительно друг друга в последовательности, обратной расположению кривых $h = f(n)$ для этих же материалов.

Типичный вид полученных зависимостей $\Delta m = f(n)$ представлен на рис.3. Как можно заключить из вида кривых на рис.3, процесс убыли массы ударника Δm в зависимости от числа ударов n для всех анализируемых материалов характеризуется тремя стадиями. На первой (стадия I), включающей несколько первых ударов до некоторого критического, различающегося для каждой стали, числа ударов $n^* = 8-10$, величина Δm исчисляется десятками миллиграммами и снижается с каждым последующим ударом с заметной скоростью (0,3-0,4 мг/удар). На стадии II, начинающейся при $n \geq n^*$ и продолжающейся до второго критического значения $n^{**} = 3600-5400$, величина Δm составляет только несколько сотых миллиграмма, а скорость ее снижения с ростом n резко замедляется. На стадии III при $n > n^{**}$, продолжающейся до конца серии опытов, убыль массы Δm становится независимой от числа ударов. Это значение Δm , определенное для каждой стали, принимали за скорость ударно-абразивного изнашивания K материала на установившейся стадии процесса изнашивания, а величину I , обратную K – за ударно-абразивную износостойкость этого материала ударника.

Для объяснения процессов, происходящих на каждой стадии изнашивания ударника, использовали данные о величине напряжений, возникающих на площадке контакта ударника и породы, рассчитанных с использованием разработанной математической модели.

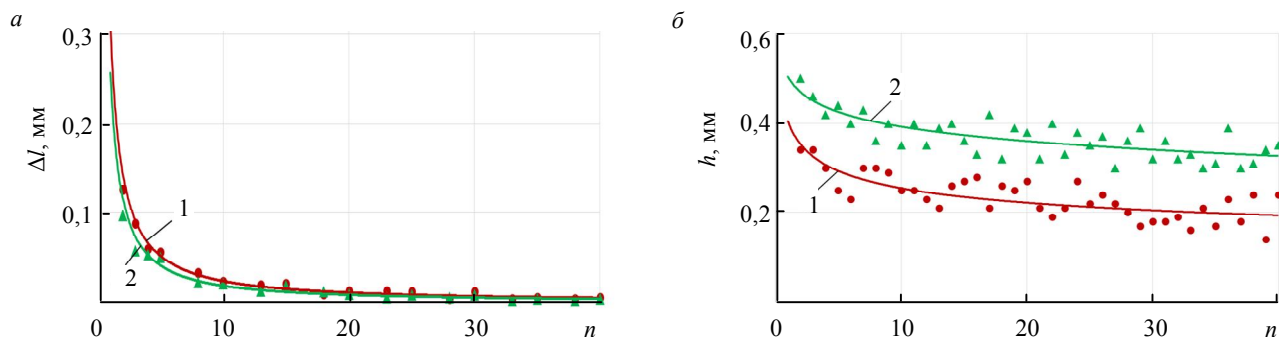


Рис.2. Зависимость убыли длины ударника Δl (а) и глубины лунки h (б) от числа ударов n для различных материалов ударника 1 – сталь 38ХМ; 2 – сталь Х12МФ_х (здесь и далее индекс x указывает на обработку стали холодом)

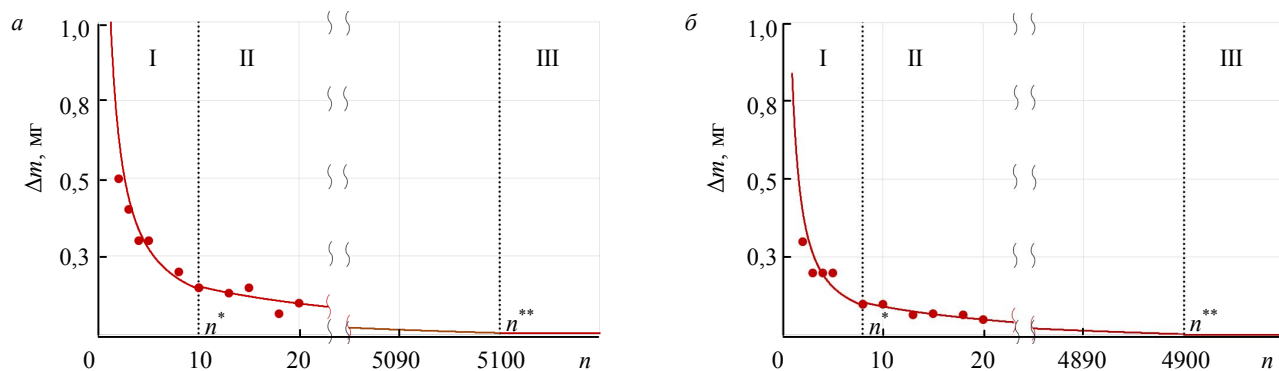


Рис.3. Зависимость убыли массы Δm ударника из сталей 38ХМ (а) и Х12МФ_х (б) от числа ударов n

Математическая модель процесса ударного разрушения породы в условиях эксперимента. При разработке модели исходили из того, что ударник вместе с бойком представляет собой конструкцию сравнительно небольшой длины ($L_\Sigma = 340$ мм). Считали, что влиянием волновых процессов на параметры удара можно пренебречь и процесс взаимодействия ударника и разрушаемого материала может быть описан уравнениями двухэлементной классической ударной системы [5]. Как показали результаты расчета? выполняется условие применимости этих уравнений

$$t_m \geq 3T,$$

где t_m – время удара, $t_m = 0,6-1,4$ мс; T – период собственных колебаний ударника и бойка, $T = 0,13$ мс.

Исходя из выводов [5] о существующих видах нагрузочных характеристик разрушения, с учетом наших наблюдений за процессом удара, предполагали, что внедрение ударника в породу в условиях эксперимента характеризуется тремя основными стадиями:

- упругой деформацией породы до достижения на площади ее контакта с ударником напряжения σ_k , при котором происходит взрывоподобное разрушение породы под площадкой контакта;
- продвижением ударника через ядро разрушения породы с вытеснением части продуктов из лунки и прессованием оставшихся продуктов без достижения дна зоны разрушения;
- отбрасыванием ударника силами остаточной упругости спрессованных продуктов разрушения.

Зависимость силы сопротивления породы N от деформации α (рис.4) для этого случая соответствует нагрузочной характеристике типа *V* [5] и состоит из трех силовых функций: нагрузки N_1 при упругом деформировании породы под площадкой контакта, нагрузки N_2 при внедрении ударника в продукты разрушения породы и разгрузки N_3 , каждая из которых характеризуется своей жесткостью (g_1, g_2, g_3). При этом функции N_1, N_2, N_3 , как и для внедрения тела с постоянной площадью контакта, имеют линейный характер. Площадь фигуры на рис.4 – работа нагружения A_n , заштрихованная площадь – работа A_p , затраченная на разрушение.

Максимальная сила сопротивления породы N_m и внедрение $\alpha_{вн}$, а также время удара t_m для такой нагрузочной характеристики [5]:

$$N_m = N_p \sqrt{1 - \frac{g_2}{g_1} + \frac{2A_n g_2}{N_p^2}};$$

$$\alpha_{вн} = \alpha_m - \frac{N_m}{g_3} = N_p \left(\frac{1}{g_2} - \frac{1}{g_1} \right) \left(\sqrt{1 - \frac{g_2}{g_1} + \frac{2A_n g_2}{N_p^2}} - 1 \right);$$

$$t_m = \sqrt{\frac{M}{g_2}} \arctg \sqrt{\frac{2A_n g_2}{N_p^2}},$$

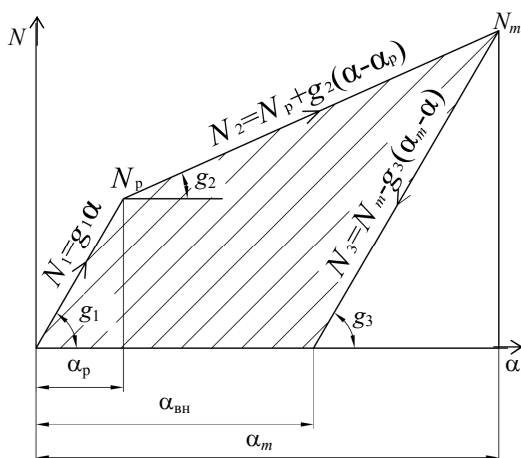


Рис.4. Вид нагрузочной характеристики системы, принимаемой при расчетах параметров удара

где M – масса падающего объекта; N_p – усилие контактного разрушения породы,

$$N_p = f_k \sigma_{кр},$$

$f_k = \pi d^2/4$ – площадь контакта; $\sigma_{кр}$ – напряжение в месте контакта, при котором возникающие при ударе растягивающие и сдвиговые напряжения σ_p в породе приводят к ее взрывоподобному разрушению под площадкой контакта.

Допущения, принятые при расчетах:

- за значение критического контактного напряжения $\sigma_{кр}$ может быть принята величина динамической твердости породы (для гранита 1305 МПа [9]);

• для установления контактной жесткости системы g_1 , как и для круговой площадки контакта диаметром d , справедлива формула из [5]:

$$g_1 = \frac{2E_n d}{3(1-\mu_n^2)},$$

при модуле упругости $E_n = 50$ ГПа и коэффициенте Пуансона $\mu_n = 0,2$ гранита [5];

• по аналогии с соотношением жесткостей g_2/g_1 и g_3/g_1 , которое можно установить из анализа приведенных в работе [6] экспериментальных силовых характеристик контактного разрушения хрупких горных пород, за жесткость g_2 в нашем случае может быть принята величина, равная $0,16 g_1$, а за g_3 – величина g_1 ;

• только около половины кинетической энергии A_0 ударника затрачивается на упругую деформацию и разрушение породы (для гранита 58,6 % [5]), остальная энергия затрачивается на тепловые потери в окружающую среду, упругую и пластическую деформацию ударника, а также износ его контактной поверхности [9]), вследствие чего принимали $A_n = 0,586$, $A_0 = 0,68$ Дж.

На рис.5 представлены значения времени удара t_m (кривая 1), максимальных силы сопротивления породы N_m (кривая 2), контактного напряжения $\sigma_k = N_m/\pi d^2/4$ (кривая 3) и внедрения $\alpha_{вн}$ ударника в породу (кривая 4), рассчитанные по величине N_p для интервала диаметров d площадок контакта, имеющего место в экспериментах (площадок притупления). На рис.5 для соответствующих значений d приведены значения глубин h лунок, установленные экспериментально (см. рис.2, б).

Как видно из графика на рис.5, при постоянном импульсе силы $M v_0 = N_m t_m$ с увеличением диаметра d контактной площади (площадки притупления ударника) максимальная сила сопротивления породы N_m монотонно возрастает, а время удара t_m , максимальное контактное напряжение σ_k и глубина внедрения $\alpha_{вн}$ индентора снижаются. Как можно заключить из сопоставления местоположения экспериментальных точек и кривой 4, линия регрессии зависимости $\alpha_{вн} = f(d)$ показывает удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными для всех сталей.

Полученная удовлетворительная сходимость результатов расчета и эксперимента может служить подтверждением предлагаемой математической модели и правомочности принятых допущений.

Закономерности разрушения материала ударника. Установленные величины K и I , расположенные в порядке возрастания износостойкости ударников из анализируемых марок сталей, а также определенные экспериментальным путем значения твердости HV и рассчитанные [12] по ним пределы текучести σ_t и прочности σ_b сталей для условий статического растяжения образцов представлены в табл.1. Там же приведены значения числа ударов n^* , n^{**} , при которых для ударника из каждой стали наблюдается переход к последующей стадии взаимодействия, соответствующие им диаметры d^* , d^{**} площадки притупления, напряжения σ_k^* , σ_k^{**} на площадке контакта ударника с породой из кривой 3 (рис.5) для d^* , d^{**} .

Как следует из данных табл.1, установленная ударно-абразивная износостойкость сталей соотносится, в целом, с их твердостью и величиной прочностных показателей σ_b , σ_t , возрастая с увеличением этих параметров. При этом наименьшая износостойкость наблюдается для стали 38ХМ после типовой термической обработки, наивысшая, в 2,7 раза большая – для стали Х12МФ после обработки холодом. Можно отметить, что обработка холодом приводит к повышению износостойкости и всех других сталей (от 11 до 26 %).

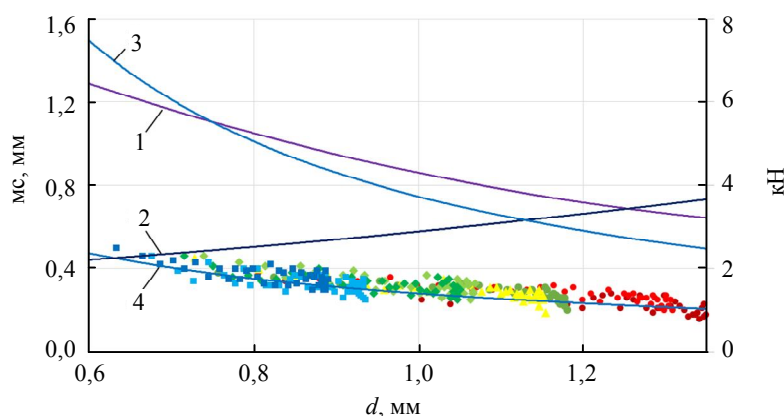


Рис.5. Расчетные параметры единичного удара t_m (1), N_m (2), σ_k (3), $\alpha_{вн}$ (4) в зависимости от диаметра площадки контакта d в сопоставлении с экспериментально установленной глубиной полученных лунок для ударников из анализируемых сталей



Таблица 1

Ударно-абразивная износостойкость исследованных материалов ударника в сопоставлении с их прочностными характеристиками и критическими параметрами взаимодействия ударника и породы

Марка стали ударника	K , мг/удар	I , удар/мг	HV	σ_b , МПа	σ_T , МПа	n^*	n^{**}	d^* , мм	d^{**} , мм	σ_k^* , МПа	σ_k^{**} , МПа
38ХМ	0,0027	370	529	1933	1478	10	~ 5100	1,011	2,114	3643	1651
38ХМ _x	0,0023	435	536	1953	1529	10	~ 5400	0,986	2,047	3767	1691
У8	0,0019	526	707	2540	1943	8	~ 3600	0,889	1,763	4340	1915
У8 _x	0,0017	588	717	2577	1971	8	~ 3900	0,876	1,724	4435	1955
Х12МФ	0,0013	741	694	2492	1905	8	~ 4100	0,866	1,680	4502	2003
Х12МФ _x	0,0010	1000	708	2544	1946	8	~ 4900	0,836	1,620	4729	2076

Видно, что по мере возрастания прочности и износостойкости сталей величины контактного напряжения σ_k^{**} , σ_k^* , соответствующие переходу от стадии к стадии взаимодействия, возрастают. При этом между значениями σ_k^* и σ_b , а также σ_k^{**} и σ_T существует определенная корреляция: первые (σ_k^* , σ_k^{**}) примерно в одинаковое количество раз больше вторых. Из фактов наличия трех характерных стадий взаимодействия (см. рис.3) и существования указанной пропорции для всех сталей можно предположить, что установленные расчетно-экспериментальным путем критические значения σ_k^* , σ_k^{**} контактного напряжения соответствуют напряжению в прилегающем к площадке контакта слое данного материала ударника, начиная с которого он способен в динамических условиях разрушаться σ_k^* или пластически деформироваться σ_k^{**} . Для условий статического растяжения образцов аналогом напряжения σ_k^* является параметр «истинное разрушающее напряжение S_k », а напряжения σ_k^{**} – предел текучести σ_T материала со значениями меньшими, чем соответственные динамические характеристики сталей. Можно отметить, что примерно такое же превышение значений предела текучести σ_T (до 1,1 раза) и предела прочности σ_b (до 2 раз), установленных при высоких скоростях деформации, над установленными при статическом сжатии и растяжении образцов, описано в работах [2, 6] для технического железа и среднеуглеродистой легированной стали.

При малых диаметрах площадки притупления ($n < n^*$, $d < d^*$, стадия I) развиваемые при ударе контактные напряжения σ_k превышают истинное динамическое разрушающее напряжение σ_k^* данной стали и на площадке контакта возникают трещины, развитие которых приводит к выкрашиванию значительных объемов металла, что регистрируется в виде заметной убыли массы ударника. При больших диаметрах ($d^* < d \leq d^{**}$, $n^* < n \leq n^{**}$, стадия II) возникающих напряжений не хватает для разрушения материала ударника, но оказывается достаточно для его пластической деформации, сопровождаемой перемещением металла с центральной части площадки контакта на периферийную. Исходя из факта наличия заметной убыли массы ударника на этой стадии, можно заключить, что значительная часть деформированного и ослабленного трещинами объема металла уносится движущимися продуктами разрушения породы.

Такой вывод о разрушении и значительной пластической деформации острия ударника на первых стадиях взаимодействия подкрепляется результатами специально проведенных авторами испытаний, при которых удары ударником наносили не по абразиву, а по гладкой пластине из более твердого материала, не подвергаемого разрушению. Как можно заключить из результатов этого эксперимента, представленных на рис.6, при малом числе ударов имеет место откалывание частей острия ударника с появлением на площадке контакта волн деформированного металла, направленных от центра к периферии. На рис.6 видно проявление краевого эффекта – выкрашивания периферийных участков площадки контакта.

Чем больше число ударов n на первых стадиях взаимодействия и больше площадка притупления ударника, тем меньше возникающее контактное напряжение σ_k и его превышение над σ_k^* или σ_k^{**} использованной стали, и, соответственно, тоньше зона металла на площадке контакта,

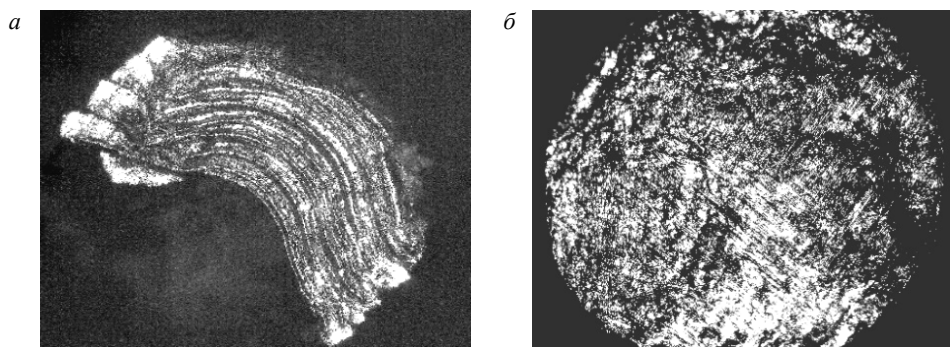


Рис.6. Вид площадки притупления ударника из стали У8 после удара о твердую металлическую подложку на стадии I взаимодействия (а) и гранит на стадии III (б)

подвергаемого разрушению или деформации и, следовательно, меньше величина Δm . При $n \geq n^{**}$, $d \geq d^{**}$ (стадия III), возникающие контактные напряжения σ_k не достигают уровня σ_k^{**} и острие ударника не подвергается пластической деформации. Появление на этой площадке параллельных царапин при переходе к удару по породе свидетельствует о том, что в этом случае металл площадки подвергается воздействию движущихся абразивных частиц. Результатом царапания является существенно меньшая, по сравнению со стадиями I, II, убыль массы металла, величина которой определяется абразивной износостойкостью использованной для изготовления ударника стали, зависящей от ее твердости и особенностей структуры [3]. Необходимо отметить, что наличие на площадке контакта, наряду с царапинами, лунки может свидетельствовать о том, что кроме изнашивания движущимися частицами абразива материал ударника при ударе подвергается и внедрению в него неподвижных абразивных частиц [2], что имеет место на стадии уплотнения остающихся в лунке продуктов разрушения породы.

Долю энергии, затрачиваемую при разрушении породы на изнашивание ударника на установившейся (третьей) стадии его износа, оценивали, исходя из установленных скоростей изнашивания материалов K и критических напряжений σ_k^* соответствующих сталей. При этом предполагали, что, поскольку в нашем случае износ материала происходит преимущественно за счет разрушения (царапания) его поверхности абразивом, удельная работа $A_{уд}$ этого процесса может быть оценена по формуле, предложенной в работе [1] для разрушения металлов при растяжении образцов

$$A_{уд} = \frac{S_k}{\rho},$$

где S_k – истинное разрушающее напряжение металла, в соответствии с приведенными предположениями авторов, для динамических условий равно σ_k^* конкретной стали из табл.1; ρ – плотность, $\rho = 7,85 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ для всех сталей.

Тогда работа, затраченная на изнашивание материала ударника за удар,

$$A_{ме} = KA_{уд} = \frac{K\sigma_k^*}{\rho},$$

а количество $A_{ме}$ на изнашивание металла в энергии удара A_0

$$A_{ме\%} = \frac{A_{ме}}{A_0} = \frac{K\sigma_k^*}{A_0\rho}.$$

Работу $A_{упр}$, затрачиваемую на упругую деформацию ударника в процессе единичного внедрения в гранит на установившейся стадии взаимодействия III, рассчитывали как произведение максимальной силы сопротивления породы N_m для $d = d^{**}$ на суммарное уменьшение длин $\Delta l_{\Sigma упр}$ цилиндрической $\Delta l_{1 упр}$ и конической $\Delta l_{2 упр}$ частей ударника при его упругой деформации, когда

$$\Delta l_{1 упр} = \frac{N_m l_1}{S_1 E},$$



где S_1 – площадь сечения цилиндрической части; E – модуль Юнга, $E = 200 \cdot 10^9$ МПа для всех сталей.

Для определения $\Delta l_{2\text{упр}}$ усеченного конуса с основаниями, равными площадям цилиндрической части ударника и площадки притупления, переменную по высоте площадь его поперечного сечения S_i выражали через расстояние x от вершины конуса и угол заострения $\beta = 30^\circ$

$$S_i = \pi x^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\beta}{2}$$

и решали дифференциальное уравнение относительного изменения высоты конуса за счет упругой деформации как функции от x

$$\frac{dl}{dx} = \frac{\sigma}{E} = \frac{N_m}{E \pi x^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\beta}{2}},$$

которое интегрировали по текущей координате x от вершины конуса до площадки притупления x_1 (Δl при d^{**}) и до основания x_2 (l_2), в результате чего конечное уравнение имело вид

$$\Delta l_{2\text{упр}} = \frac{N_m}{E \pi \operatorname{tg}^2 \frac{\beta}{2}} \int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{x^2} dx = - \frac{N_m}{E \pi \operatorname{tg}^2 \frac{\beta}{2}} \frac{1}{x} \Big|_{x_1}^{x_2} = \frac{N_m}{E \pi \operatorname{tg}^2 \frac{\beta}{2}} \left(\frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_2} \right).$$

Соответственно, величина $A_{\text{упр}\%}$ равна $A_{\text{упр}}/A_0$.

В предположении, что установленные скорости ударно-абразивного изнашивания сталей K из табл.2 сохраняются при дальнейших ударах вплоть до диаметра 3,55 мм, при котором прекращается образование лунки, рассчитывали число ударов n^{***} и получаемую суммарную глубину лунок h_Σ к этому моменту для ударника из каждой стали.

Таблица 2

Энергетические параметры процесса ударно-абразивного изнашивания и упругой деформации ударника из различных марок сталей

Марка стали	$A_{\text{уд}}$, Дж/мг	$A_{\text{ме}}$, Дж	$A_{\text{ме}\%}$, %	$A_{\text{упр}}$, Дж	$A_{\text{упр}\%}$, %	n^{***}	h_Σ , мм
38ХМ	0,464	0,0013	0,108	0,114	9,8	~ 68500	3410
38ХМ _х	0,480	0,0011	0,095	0,107	9,3	~ 79900	4219
У8	0,553	0,0011	0,091	0,085	7,3	~ 93800	6352
У8 _х	0,565	0,0010	0,083	0,082	7,1	~ 104700	7376
Х12МФ	0,574	0,0008	0,067	0,080	6,9	~ 131000	9569
Х12МФ _х	0,602	0,0006	0,052	0,076	6,6	~ 176200	13623

Как можно заключить из табл.2, работа $A_{\text{ме}\%}$, затрачиваемая на разрушение материала ударника в процессе единичного внедрения в гранит, составляет ~ 0,1 % от энергии удара. При этом с увеличением износостойкости использованной для изготовления ударника стали доля работы $A_{\text{ме}\%}$ убывает. Работа $A_{\text{упр}\%}$ на упругую деформацию ударника составляет несколько процентов от энергии удара и, как и $A_{\text{ме}\%}$, уменьшается с увеличением износостойкости материала ударника. Так, если для наименее прочной стали 38ХМ это 9,8% ($d^{**} = 2,11$ мм, $N_m = 5,80$ кН, $\Delta l_{1\text{упр}} = 0,0182$ мм, $\Delta l = 3,94$ мм, $\Delta l_{2\text{упр}} = 0,0211$ мм), то для наиболее прочной (Х12МФ_х) – 6,6 % ($d^{**} = 1,62$ мм, $N_m = 4,28$ кН, $\Delta l_{1\text{упр}} = 0,0127$ мм, $\Delta l = 3,02$ мм, $\Delta l_{2\text{упр}} = 0,0229$ мм). Как показывают расчеты, при дальнейшем увеличении числа ударов (сверх n^{**}) и соответственном увеличении диаметра площадки притупления (сверх d^{**}) доля работы $A_{\text{упр}\%}$ возрастает и достигает для всех сталей к моменту полного притупления острия ударника величины ~ 36 %.

Из табл.2 следует, что к моменту прекращения внедрения ударника в породу суммарная глубина лунок h_Σ , выбитых ударником из стали Х12МФ_х после обработки холодом, в четыре раза превышает аналогичный показатель для ударника из стали 38ХМ из-за существенно большей износостойкости ударника из стали Х12МФ_х.



Закключение. Таким образом, как показали расчеты и эксперименты, процесс изнашивания конусообразного стального ударника при его единичных ударах по граниту характеризуется существованием трех стадий взаимодействия, каждая из которых определяется соотношением прочностных характеристик σ^* , σ^{**} , демонстрируемых материалом ударника в динамических условиях, с величиной напряжения σ_k , возникающего на площадке контакта ударника с породой и снижающегося по мере увеличения числа ударов n . На последней установившейся стадии взаимодействия убыль массы ударника с увеличением числа ударов практически не изменяется и определяется износостойкостью использованной стали, вследствие чего число ударов до полного притупления острия ударника и получаемая суммарная глубина лунок для анализируемых сталей различаются в 2,6 и 4,0 раз соответственно.

Благодарность. Авторы выражают глубокую признательность доценту А.П.Баталову за помощь, оказанную при подготовке данной статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болобов В.И. К вопросу о разогреве фрагментов разрушения конструкций // Металловедение и термическая обработка металлов. 2010. № 2. С. 44-45
2. Виноградов В.Н. Изнашивание при ударе / В.Н.Виноградов, Г.М.Сорокин, А.Ю.Албагачиев. М.: Машиностроение. 1982. 192 с.
3. Ле Тхань Бинь. Влияние обработки холодом на механические свойства и износостойкость материалов пик гидромолотов / Ле Тхань Бинь, В.И.Болобов, Нгуен Кхак Линь // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 12 (специальный выпуск 25). 12 с.
4. Обработка холодом как способ повышения износостойкости материала бурового инструмента / Ле Тхань Бинь, В.И.Болобов, Г.А.Юсупов, М.П.Мосеев // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 11. С. 108-114.
5. Соколинский В.Б. Машины ударного разрушения. М.: Машиностроение. 1982. 185 с.
6. Третьяков А.В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением / А.В.Третьяков, В.И.Зюзин. М.: Металлургия. 1973. 224 с.
7. Ушаков Л.С. Гидравлические машины ударного действия / Л.С.Ушаков, Ю.Е.Котылев, В.А.Кравченко. М.: Машиностроение. 2000. 416 с.
8. Холод в машиностроении / А.П.Клименко, Н.В.Новиков, Б.Л.Смоленский, В.И.Могильный, В.И.Климентьев, М.А.Рохленко. М.: Машиностроение. 1969. 248 с.
9. Шелковников И.Г. Использование энергии удара в процессах бурения. М.: Недра, 1977. 160 с.
10. Candane D. Effect of Cryogenic Treatment on Microstructure and Wear Characteristics of AISI M35 HSS / D.Candane, N.Alagumurthi, K.Palaniradja // International Journal of Materials Science and Applications. 2013. Vol. 2. P. 56-65
11. Metallurgical Principles of Cryogenically Treated Tool Steels – a Review on the Current State of Science / S.S.Gill, J.Singh, R.Singh, H.Singh // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2010. Vol. 54. P. 59-82.
12. Pavlina E.J. Correlation of Yield Strength and Tensile Strength With Hardness for Steels / E.J.Pavlina, C.J.Van-Tyne // Journal of Materials Engineering and Performance. 2008. Vol. 17(6). P. 888-893
13. Tated R.G. Improvement in Tool Life of Cutting Tool by Application of Deep Cryogenic Treatment / R.G.Tated, S.R.Kajale, Iyer Kumar // 7th International Tooling Conference Held / Politecnico di Torino, Italy, 2006. P. 135-141.

Авторы: Болобов В.И., д-р техн. наук, профессор, boloboff@mail.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), Ле Тхань Бинь, аспирант (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Статья поступила в редакцию 10.01.2018.

Статья принята к публикации 25.05.2018.



УДК 62-83, 621.833, 62-97/-98

РАСЧЕТЫ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ САМОХОДНЫХ ГОРНЫХ МАШИН

Е.К.ЕЩИН

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева, Кемерово, Россия

Рассмотрена задача совершенствования расчетов динамических режимов электроприводов самоходных горных машин, в частности, проходческих комбайнов. Обращается внимание на возможность в динамических режимах работы пространственного изменения положения корпуса статора асинхронного электродвигателя, входящего в состав электропривода, вокруг оси его ротора из-за конечной жесткости опор горной машины. В связи с этим возможны изменения абсолютной угловой скорости вращения электромагнитного поля статора этого электродвигателя. Отмечена необходимость введения в существующие математические модели, определяющие состояние и поведение асинхронных электродвигателей, дополнительных дифференциальных и алгебраических связей для вычисления абсолютной скорости электромагнитного поля статора и характера движения корпуса статора электродвигателя как части конструкции горной машины. Приведены результаты расчетов режима пуска вхолостую электродвигателя электропривода исполнительного органа проходческого комбайна, показывающие отличие характера изменения его электромагнитного момента, скорости вращения ротора, а также усилий в отдельных элементах редуктора исполнительного органа проходческого комбайна при движении корпуса статора от аналогичных результатов расчетов без учета движения корпуса статора. Сделан вывод о возможном расхождении расчетных и экспериментальных результатов при исследовании динамических режимов самоходных горных машин.

Ключевые слова: электропривод; статор электродвигателя; абсолютная скорость электромагнитного поля; динамические режимы работы

Как цитировать эту статью: Ещин Е.К. Расчеты динамических режимов работы электроприводов самоходных горных машин // Записки Горного института. 2018. Т. 233. С. 534-538. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.534

Введение. Горные машины (ГМ) обычно делят на две группы: машины, которые не изменяют своего положения в пространстве – стационарные, и машины, работа которых принципиально связана с изменениями в пространстве положения их корпусов (ГОСТ Р 54976-2012. Оборудование горно-шахтное. Термины и определения) – самоходные, например, проходческие комбайны. К самоходным также можно отнести очистные комбайны с встроенной системой подачи. Электроприводы этих машин составляют единое целое с их корпусами и при всяком пространственном изменении также изменяются. В первую очередь это относится к пространственному изменению статоров асинхронных электродвигателей (АД) относительно продольных осей их роторов. АД являются основными электромеханическими преобразовательными устройствами электроприводов самоходных ГМ. Эти изменения могут оцениваться угловой скоростью корпуса статора АД (ω_{st} на рис.1), которая алгебраически суммируется с переносной синхронной скоростью вращения поля статора ω_n и образует абсолютную скорость вращения электромагнитного поля статора $\omega_{abc} = \omega_n \pm \omega_{st}$.

При работе с изменяющейся нагрузкой на исполнительном органе СГМ изменение угловой скорости корпуса статора АД по результату действия эквивалентно введению в цепь питания статора преобразователя частоты. При этом известно, что даже малые изменения частоты питающего напряжения могут привести к существенному изменению динамического состояния электромеханической системы ГМ [3].

Увеличение мгновенного значения скорости вращения поля статора $\omega_{abc} = \omega_n \pm \omega_{st}$ при неизменных условиях питания приведет к снижению мгновенного значения электромагнитного момента, развиваемого АД. Снижение мгновенного значения скорости вращения поля статора обеспечит рост перегрузочной способности и увеличение мгновенного значения электромагнитного момента двигателя.

Возникающий электромагнитный момент АД при его пуске способствует возникновению колебательных вращательных движений вокруг оси ротора жестко незакрепленного статора, которые, в свою очередь, обеспечивают изменение абсолютной электрической скорости вращения электромагнитного поля статора и породившего эти процессы электромагнитного момента. Происходит качественная и количественная деформация характера изменения электромагнитного момента, развиваемого двигателем. Изменяется воздействие со стороны АД на механическое передаточное устройство (МПУ) – редуктор.

При исследовании состояния АД обычно используется теория описания переходных процессов в электромеханических преобразователях, которая ориентирована на неподвижный статор электродвигателя [2, 5, 6, 8, 11-16], например [2, с.9; 8, с.52; 15, с. 81]), и не учитывает изменения возможных изменений электромагнитного момента АД из-за пространственных движений статора.

Таким образом, вопросы формирования электромагнитных моментов асинхронных электродвигателей с жестко незакрепленным статором в достаточной мере не изучены. Уточнение влияния возможных изменений скорости вращения поля статора из-за его жесткой незакрепленности на характеристики АД – актуально и значимо для целого ряда электроприводов ГМ [10].

Постановка проблемы. Понятно, что естественным путем уточнения влияния возможных изменений абсолютной скорости вращения электромагнитного поля статора АД в динамических режимах работы является определение правил формирования в математических моделях АД значений параметра $\omega_{абс}$. Этот параметр должен явно присутствовать в модели АД. Отсюда возникает проблема дополнения математической и компьютерной моделей АД уравнениями и реализующими их блоками, определяющими возможные движения корпуса статора АД и значения абсолютной скорости вращения электромагнитного поля статора – параметра $\omega_{абс}$. В результате появляется возможность уточнения расчетов электромагнитных состояний АД и механических компонентов электропривода ГМ в динамических режимах работы.

Методология. Рассмотрим решение задачи на конкретном примере электропривода исполнительного органа проходческого комбайна КСП-32 [7]. Кинематическая схема приведена на рис.2. Исходную математическую модель АД примем с обозначениями [6, с.493]:

$$\begin{cases} U_s = R_s I_s + \frac{d\Psi_s}{dt} + j\omega_k \Psi_s, \\ U_r = R_r I_r + \frac{d\Psi_r}{dt} + j(\omega_k - p\omega) \Psi_r, \end{cases} \quad (1)$$

где U_s, U_r – векторы напряжений питания статорной и роторной обмоток; I_s, I_r – векторы токов статора и ротора; Ψ_s, Ψ_r – векторы потокоцеплений статора и ротора; ω_k – скорость вращения координатной системы; ω – геометрическая скорость вращения ротора; p – число пар полюсов; R_s, R_r – активные сопротивления обмоток статора и ротора.

Приведенная совокупность дифференциальных связей должна быть дополнена уравнениями движения, определяющими движения ротора и возможные движения корпуса статора АД:

$$\begin{cases} \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J_{ад}} (M - M_{cad}), \\ \frac{d\omega_{st}}{dt} = \frac{1}{J_{st}} (M - M_{yst}), \\ \frac{dM_{yst}}{dt} = c_{st} \omega_{st} + b_{st} \frac{d\omega_{st}}{dt}, \end{cases} \quad (2)$$

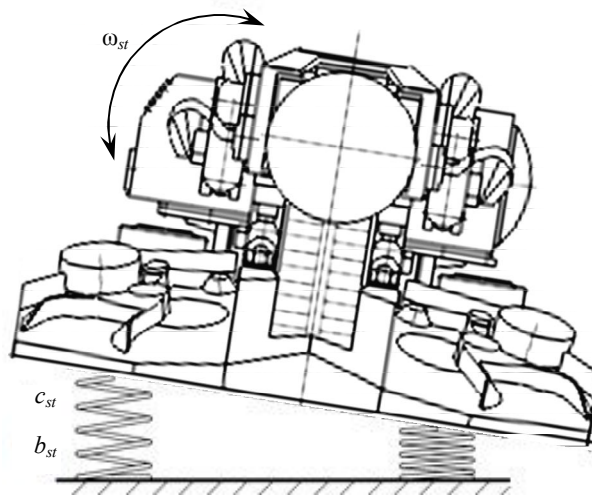


Рис.1. Возможное пространственное изменение корпуса комбайна КСП-32 из-за реакции опор при изменяющейся нагрузке

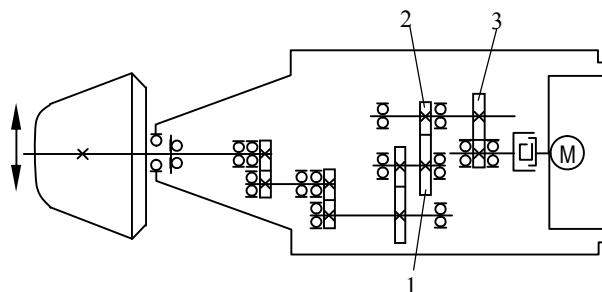


Рис.2. Кинематическая схема редуктора исполнительного органа проходческого комбайна КСП-32 [7]
1 – зубчатое колесо; 2 – шестерня; 3 – вал (вал-шестерня)

где ω , ω_{st} – угловые скорости вращения ротора и корпуса статора АД; M – электромагнитный момент АД; M_{cad} – момент сопротивления на валу АД; J_{ad} – момент инерции АД; J_{st} – момент инерции объединенных с корпусом АД частей ГМ; M_{yst} – упругий момент, возникающий в опорах ГМ при ее движении; c_{st} – жесткость (упругость) опор ГМ; b_{st} – коэффициент демпфирования колебаний (вязкости) в опорах.

Заметим, что движения корпуса статора АД определяются режимом его работы «на упор».

В синхронной системе координат (u , v) абсолютная угловая скорость вращения электромагнитного поля статора определится алгебраической суммой угловых переносной (ω_n – номинальная скорость вращения поля) и относительной (ω_{st}) скоростей – $\omega_{abc} = \omega_n \pm \omega_{st}$.

В неподвижной системе координат (α , β) $\omega_{abc} = \pm \omega_{st}$. Знак перед ω_{st} определяется режимом ускорения или торможения ротора АД и определяется по правилу $-sign(d\omega/dt)$, т.е. в практических вычислениях абсолютная скорость электромагнитного поля статора определится как

$$\begin{cases} \omega_{abc} = \omega_n - \omega_{st} sign(d\omega/dt) (u, v), \\ \omega_{abc} = -\omega_{st} sign(d\omega/dt) (\alpha, \beta). \end{cases} \quad (3)$$

Реализация связей (1)-(3) в инструментальной среде Matlab/Simulink с учетом формирования нагрузки на валу АД по [4] для режима пуска АД прямым включением в питающую сеть без нагрузки позволила получить результаты, приведенные на рис.3-6. Отметим, что в этом режиме момент сопротивления на валу АД определяется последовательным подключением инерционных масс шестерен и зубчатых колес редуктора (см. рис.2).

Видно (рис.3), что учет возможных движений корпуса статора АД в режиме пуска приводит к существенному изменению формы зависимости электромагнитного момента M во времени (1 на рис.3). Происходит существенный сдвиг «влево» относительно расчетной формы изменения M без учета влияния движения корпуса статора АД. Последнее вполне объяснимо. При пуске АД возникает движение его корпуса, оцениваемое угловой скоростью статора ω_{st} (5 на рис.4). Оно практически всегда может быть зафиксировано как небольшой «толчок», который ощущается даже без использования специальной регистрирующей аппаратуры.

Максимальное значение (в приводимом примере) ω_{st} равно 0,09 о.е. (при $t \approx 0,1$ с) или $14,13 \text{ с}^{-1}$. Эти, сравнительно небольшие, изменения ω_{st} повлекут за собой снижение абсолютной величины скорости вращения электромагнитного поля статора ω_{abc} (в максимуме ω_{st} до 143 с^{-1} или частоты питающего напряжения с 50 до 45,5 Гц). В свою очередь, это снижение ω_{abc} при сохранении амплитуды питающего напряжения неизменным вызывает увеличение величины электромагнитного момента, что и приводит к существенным деформациям переменных состояния АД (2 в 1, 4 в 3 на рис.3; 2 в 1, 4 в 3 на рис.4).

Заметим, что изменение (снижение) амплитуды питающего напряжения АД в режиме пуска при питании АД от трансформаторной подстанции через кабельную сеть естественным образом снижает амплитудные значения момента M , однако практически сохраняет его качественную форму (кривая 5 на рис.3).

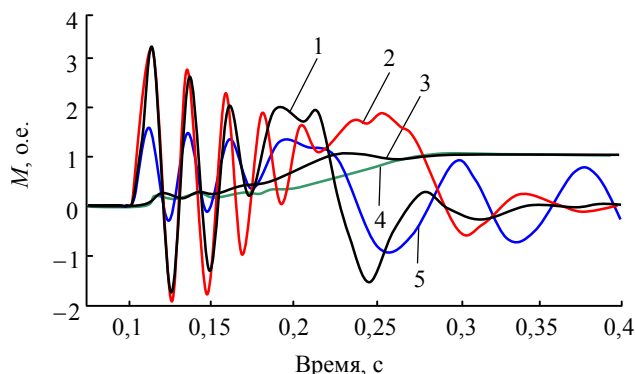


Рис.3. Характер изменения электромагнитного момента АД (1, 2, 5) и его скорости (3, 4) с учетом (1, 3) и без учета (2, 4) движений корпуса статора в режиме пуска, 5 – при питании через кабель

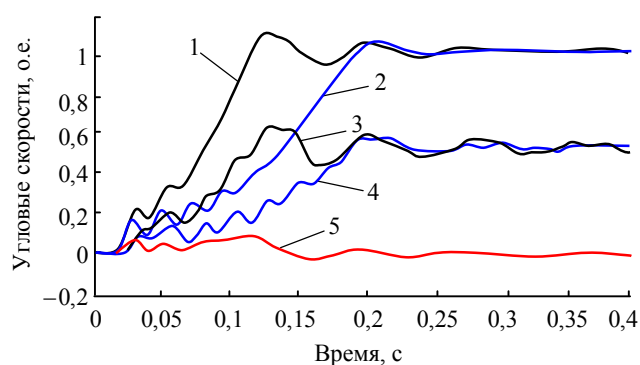


Рис.4. Изменение угловой скорости ротора АД (1, 2), зубчатого колеса 4 (2, 3 на рис.2) и угловой скорости корпуса статора ω_{st} (5) при учете (1, 3) и без учета (2, 4) движений корпуса статора в режиме пуска

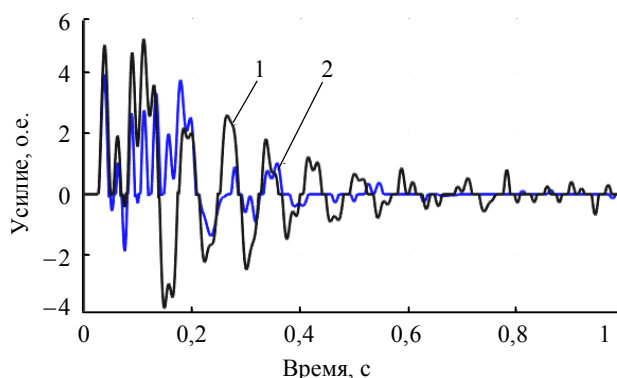


Рис.5. Изменение усилия в зацеплении шестерни и зубчатого колеса (1, 2 на рис.2) при учете (1) и без учета (2) движений корпуса статора АД в режиме пуска

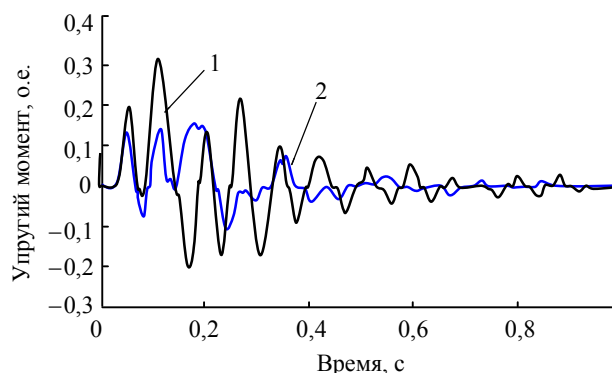


Рис.6. Изменение упругого момента вала (3 на рис.2) при учете (1) и без учета (2) движений корпуса статора АД в режиме пуска

Изменение усилия в зацеплении шестерни и зубчатого колеса (1, 2 на рис.2), а также изменение упругого момента вала (3 на рис.2) иллюстрируют изменение состояния отдельных элементов механического передаточного устройства (редуктора) при учете подвижности корпуса статора АД. Можно отметить, что происходит увеличение пиковых значений усилий и упругого момента, что является следствием увеличения значений электромагнитного момента АД.

Расчетная сравнительная практика при учете возможных движений корпуса статора АД (рис.3-6) показывает их существенное влияние на динамическое состояние АД и далее на процессы в МПУ (редукторе). Движение корпуса статора АД подтверждает чрезвычайную чувствительность характеристик АД к изменению частоты питающего напряжения [1, 9].

Таким образом, практическая значимость работы заключается в возможности повышения достоверности расчетной оценки состояния электропривода самоходных горных машин в динамических режимах работы.

Выводы. При исследовании динамических режимов работы электроприводов самоходных ГМ проблематично использование классической теории описания состояния асинхронного электродвигателя из-за допущения в ней неподвижности статора электрической машины. Подвижность корпуса статора АД, возникающая из-за технологических особенностей работы СГМ, приводит к изменению абсолютной угловой скорости вращения электромагнитного поля статора АД, что, как известно, равносильно изменению характеристик АД путем изменения частоты питающего напряжения. Последнее влечет за собой возникающую неконтролируемую погрешность расчетов и возможное необъяснимое расхождение результатов экспериментов и теоретических расчетов при выполнении исследовательских работ с реальными электроприводами самоходных горных машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Булгаков А.А. Частотное управление асинхронными двигателями. М.: Энергоиздат, 1982. 216 с.
2. Горев А.А. Переходные процессы синхронной машины. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1950. 551 с.
3. Ещин Е.К. Вариант частотного управления асинхронным электроприводом горных машин // Электротехника. 1996. № 1. С. 28-30.
4. Ещин Е.К. Детализация расчетов динамических режимов работы электроприводов горных машин // Горное оборудование и электромеханика. 2017. № 5. С. 35-39.
5. Ключев В.И. Теория электропривода. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.
6. Ковач К.П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К.П.Ковач, И.Рац. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. 744 с.
7. Комбайн проходческий КСП-32. Руководство по эксплуатации / В.Т.Антипов, Н.С.Тапехин, Е.С.Серов, В.А.Гафанович; АО «Ясиноватский машиностроительный завод». 1999. Кн. 1. 119 с. // <https://www.twipx.com/file/22907/>
8. Копылов И.П. Электромеханические преобразователи энергии. М.: Энергия, 1973. 400 с.
9. Костенко М.П. Работа многофазного асинхронного двигателя при переменном числе периодов // Электричество. 1925. № 2. С. 85-95.
10. Обеспечение устойчивости проходческого комбайна с двухкорончатым реверсивным рабочим органом / А.А.Хорешок, Л.Е.Маметьев, А.М.Цехин, А.Ю.Борисов // Горное оборудование и электромеханика. 2016. № 6. С. 3-7.



11. *Dieter Gerling*. Electrical Machines. Mathematical Fundamentals of Machine Topologies. New York: Springer, 2015. P. 472.
12. *Jan A. Melkebeek*. Electrical Machines and Drives. Fundamentals and Advanced Modelling. Cham (Switzerland): Springer International Publishing AG, 2018. P.442.
13. *Juha Pyrhönen*. Design of rotating electrical machines / Juha Pyrhönen, Tapani Jokinen, Valéria Hrabovcová. Chichester (United Kingdom), John Wiley & Sons, Ltd., 2008. P.512.
14. *Lyshevski S.E.* Electromechanical systems and devices. New York: Taylor & Francis Group, 2008. P.565.
15. *Park R.H.* Two-Reaction Theory of Synchronous Machines. Generalized Method of Analysis – Part I // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. 1929. Vol. 48. Iss. 3. P. 716-727.
16. *Sen P.C.* Principles of electric machines and power electronics. Chennai (India): John Wiley & Sons, Inc., 2014. P.618.

Автор Ещин Е.К., д-р техн. наук, профессор, eke_kuzstu@mail.ru (Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф.Горбачева, Кемерово, Россия).

Статья поступила в редакцию 16.03.2018.

Статья принята к публикации 21.06.2018.



ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПЕРЕВОДНИКОВ И БУРИЛЬНЫХ ТРУБ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

С.К.ФЕДОРОВ¹, Л.В.ФЕДОРОВА¹, Ю.С.ИВАНОВА¹, М.В.ВОРОНИНА², А.В.САДОВНИКОВ³, В.Н.НИКИТИН⁴

¹ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

² Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

³ ООО «Материалы Технологии Сервис», Москва, Россия

⁴ ООО «Интехно», Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, Нижневартовск, Россия

Определены направления проведения исследований по повышению износостойкости замков бурильных труб, резьбовых соединений и обсадной бурильной колонны: нанесение на замок бурильных труб износостойких наплавов российскими и зарубежными материалами (хардбендинг); закалка поверхностного слоя замков бурильных труб электромеханической обработкой; закалка наружной и внутренней замковой резьбы бурильных труб электромеханической обработкой. Проведены сравнительные испытания износостойкости различных наплавочных материалов (хардбендинг) российского и зарубежного производства и замка бурильных труб без наплавов. Разработаны рекомендации по повышению износостойкости резьбовых соединений способом электромеханической обработки, которые определяют пути повышения ресурса и надежности бурильных труб и переводников, формирования уникальных свойств деталей, снижения трудоемкости изготовления и восстановления деталей, повышения эффективности работы предприятий и организаций, защиты окружающей среды и создания конкурентоспособной продукции.

Материалы статьи представляют практическую ценность для специалистов различных областей, занимающихся вопросами повышения надежности технологического оборудования.

Производственный успех использования технологии нанесения износостойких наплавов на тело бурильного замка обусловлен возможностью использования относительно простого и мобильного оборудования для сварки, проведения работ в местах использования бурильного инструмента или временных (постоянных) производственных баз с небольшим транспортным плечом от месторождения, повторного нанесения наплавочных материалов при восстановлении замков бурильных труб; широким и постоянно растущим списком компаний, которые получают аккредитацию на производство данных работ.

Ключевые слова: хардбендинг; переводники; бурильные трубы; износостойкость; резьба; поверхностный слой; электромеханическая обработка; твердость

Как цитировать эту статью: Федоров С.К. Повышение долговечности переводников и бурильных труб электромеханической обработкой / С.К.Федоров, Л.В.Федорова, Ю.С.Иванова, М.В.Воронина, А.В.Садовников, В.Н.Никитин // Записки Горного института. 2018. Т. 233. С. 539-546. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.539

Введение. Увеличение долговечности бурильных труб (БТ) и переводников является актуальной задачей, решение которой позволит повысить эффективность работы нефтяных компаний. Наиболее характерными дефектами БТ и переводников являются износ наружного диаметра замков и повреждение резьбы. Низкая долговечность указанных участков деталей объясняется невысокой твердостью поверхностного слоя – не более 32-36 HRC. Кроме того, недостаточная износостойкость резьбы перечисленных деталей связана с особенностями конструкции, технологическими сложностями при ее изготовлении и восстановлении, схемой нагружения витков, условиями эксплуатации резьбовых соединений при бурении, а также при сборке-разборке БТ и переводников.

Одной из проблем низкой долговечности бурильных труб является абразивный износ и износ замков при трении о внутренние стенки обсадных труб [1]. Более 60 % труб отбраковываются из-за износа наружного диаметра замка, при этом остальные параметры трубы соответствуют допустимым нормам. Основной причиной изнашивания замков бурильных труб в открытом стволе является наличие твердого слоя в агрессивных геологических образованиях. Существующие исследования доказывают, что и при проектировании технико-технологических параметров разрушения горных пород при бурении необходимо учитывать не только их физико-механические и деформационные характеристики, но и характер технико-технологических взаимодействий породоразрушающего инструмента с горной породой [2].

При бурении нефтяных и газовых скважин нижнюю часть бурильной колонны составляют утяжеленные бурильные трубы (УБТ), толстостенные бурильные трубы (ТБТ) и стальные бурильные трубы (СБТ). УБТ и ТБТ изготавливают из цельной заготовки конструкционных легированных сталей марок 40ХГМА, 40ХН2МА. СБТ являются составными, с замками, приварен-

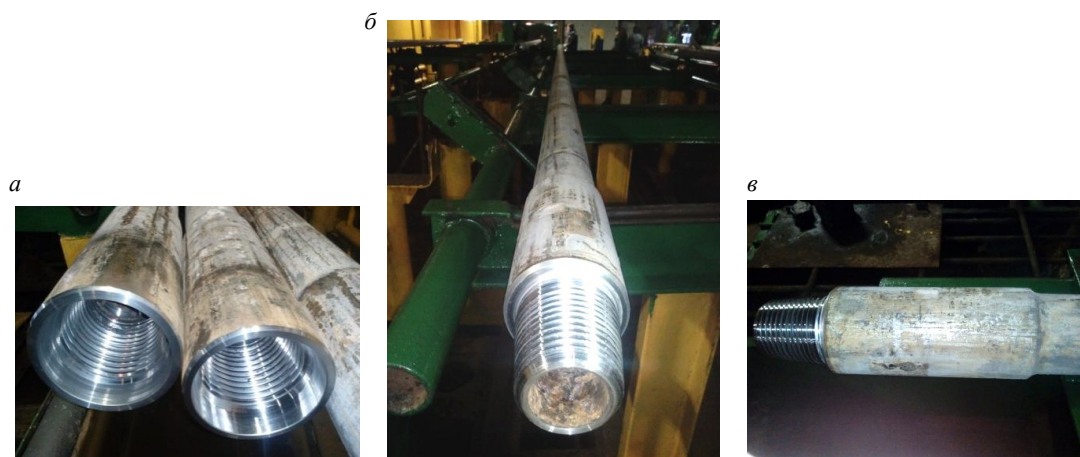


Рис.1. Стальная бурильная труба (а), фрагменты ее муфтовой (б) и ниппельной (в) частей

ными к телу трубы сваркой трением. Каждую из перечисленных деталей СБТ (рис.1) изготавливают из качественных конструкционных низколегированных сталей и подвергают термической обработке. Длина БТ составляет 8,5-12,5 м.

Постановка проблемы. В целях повышения долговечности БТ на наружный диаметр замков наплавкой наносят пояски с износостойкими материалами. Чаще всего таких поясков три, каждый из которых имеет ширину 25,4 мм при общей ширине $76,2 \pm 6,35$ мм. Наплавку поясков выполняют в среде аргона. Наплавленный металл возвышается над телом замка до 2,5 мм. Такой способ повышения долговечности БТ широко используется зарубежными компаниями [3, 11]. Таким образом, одним из приоритетных направлений при производстве и капитальном ремонте бурильных труб стала упрочняющая наплавка износостойкими материалами (хардбендинг) наружной поверхности замков. Хардбендинг – износостойкое защитное металлическое покрытие, нанесенное методом электросварки на наружную поверхность замка бурильной трубы с целью увеличения ресурса замка и уменьшения износа обсадной колонны [6, 10].

Не менее важной проблемой является повышение износостойкости замковой резьбы БТ. Решение указанной проблемы невозможно без увеличения поверхностной твердости витков резьбы при сохранении высоких физико-механических свойств середины витков [8]. Необходимые физико-механические свойства резьбы БТ можно обеспечить применением комбинированных методов обработки, основанных на использовании концентрированных потоков энергии.

Одним из таких методов является электромеханическая обработка (ЭМО), основанная на одно-временном термомеханическом воздействии высококонцентрированного потока электрической энергии на поверхностный слой заготовок из стали и формирующая высокую твердость и мелкодисперсную структуру. Результаты исследований и опытно-экспериментальных работ указывают на возможность повышения долговечности БТ и переводников за счет целенаправленного повышения твердости наиболее нагруженных участков деталей до оптимального значения [4, 5, 7, 9, 12-14].

Методика исследования. Дальнейшее применение износостойких наплавов в составе бурильной колонны невозможно без определения степени их эффективности. С этой целью необходимо провести сравнительный анализ износостойкости различных наплавочных материалов и замков БТ без наплавов.

Приведены результаты сравнительных испытаний износостойких наплавов российских и зарубежных компаний, а также технология электромеханической обработки в сравнении с исходным состоянием бурильных замков СБТ89 в группе прочности G105 по двум тестам в соответствии со стандартом ASTM G65и CasingWearTest.

Аккредитованные сервисные компании, оказывающие услуги по нанесению износостойких наплавов, предоставили для испытаний образцы следующих параметров:

Ниппель (или муфта) замка бурильной трубы СБТ89 в группе прочности G105	Внешний диаметр замка 127 мм
Высота покрытия, мм	2,38 (+0,8)
Ширина покрытия, мм	$76,2 \pm 6,35$
Вариант нанесения наплавки	Стандартный



На испытания были предоставлены следующие образцы (рис.2):

- исходный (ниппельная часть бурильной трубы без наплавки);
- Duraband NC (Postle Industries);
- OTW-12Ti (Castolin Eutectic);
- ARNCO 350XT (Arnco Technology Trust);
- НП 57 (Интерпро, Россия);
- НП 58 (Интерпро, Россия);
- ASM NGN-GS (ACM – специальные наплавочные материалы, Россия);
- OTW-13 CF (Castolin Eutectic);
- электромеханическая обработка (ЭМО).



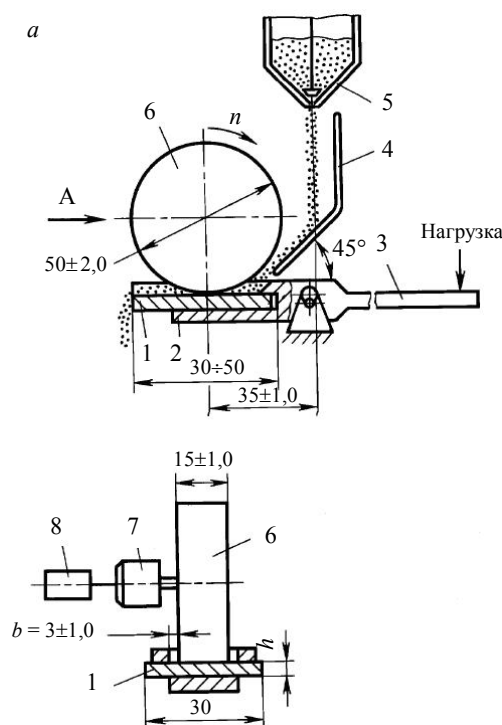
Рис. 2. Образцы для исследований

Для изготовления образцов замки СБТ 89 прошли механическую обработку: точение по наружному диаметру до устранения неровностей наплавки; растачивание внутреннего диаметра до 105 мм; отрезание кольца высотой $20 \pm 0,1$ мм. Кольцо разрезали на сегменты длиной 35 мм. Из каждого кольца отрезали четыре сегмента, три из которых использовали для износных испытаний, а один образец – для металлографических исследований.

Параметры представленных образцов:

Муфта замка бурильной трубы	СБТ 89 в группе прочности G105
Наружный диаметр замка, мм	127
Высота наплавки, мм	2,38 (+0,8)
Ширина наплавки, мм	76,2 $\pm$ 6,35
Вариант нанесения наплавки	Стандартный

Принципиальная схема износных испытаний приведена на рис.3. Образец неподвижно закреплен на основании маятникового рычага, с торца которого ввинчивается рычаг. На правый край рычага подвешивается груз, который обеспечивает постоянную нагрузку в зоне контакта



б

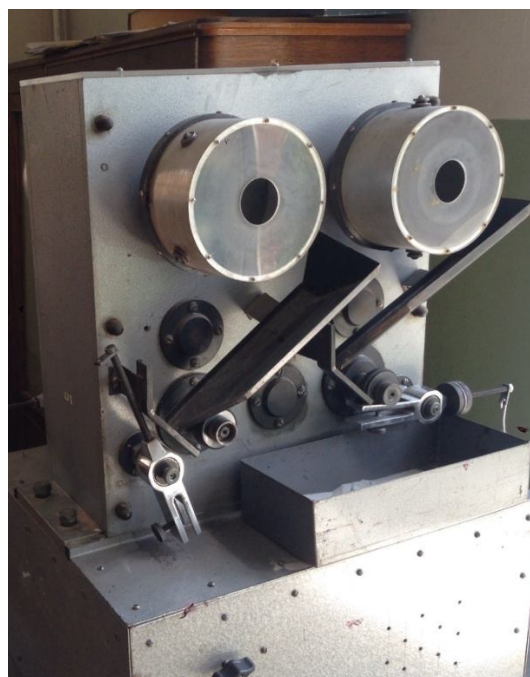


Рис.3. Принципиальная схема испытаний (а) и фотография стенда (б)

- 1 – образец; 2 – рычаг маятниковый; 3 – рычаг; 4 – направляющий лоток;
5 – дозатор подачи абразивных частиц; 6 – резиновый ролик; 7 – привод;
8 – счетчик контроля суммарного количества оборотов ролика

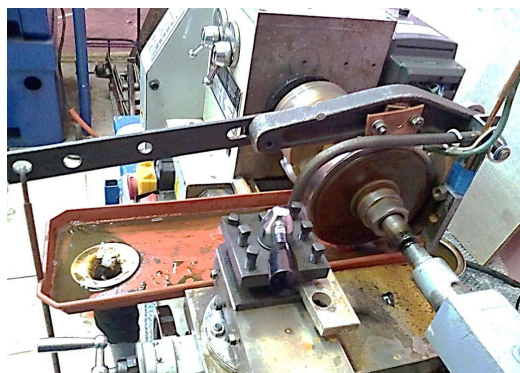


Рис.4. Стенд для проведения испытаний
(тест Casing Wear Test)

образца и вращающегося резинового ролика. Через вращающийся дозатор по направляющему лотку в зону контакта образца и резинового ролика подается абразив зернистостью 16 мкм. Продолжительность испытаний, установленная стандартами ASTM G65 и ГОСТ 23.208-79, составляла 30 мин на каждый образец.

Стенд (рис.4.) для проведения износных испытаний замка БТ и обсадных труб (тест Casing Wear Test) оснащен:

- системой частотного регулирования для соблюдения точных и необходимых параметров частоты вращения (155 об/мин);
- рычажным механизмом, обеспечивающим необходимые параметры прижатия образца наплавки к обсадной трубе;

- устройством подачи в зону контакта «обсадная труба – наплавка» жидкого бурового раствора плотностью 1050-1080 кг/м³ и наличием в нем абразивных частиц из расчета 20 г на 1 л бурового раствора.

Химический анализ образцов проводили на лазерном атомно-эмиссионном спектрометре «ЛАЭС». Шлифы готовили по стандартной методике на оборудовании для пробоподготовки «Stuers». Травление образцов осуществляли в 4 %-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте. Травление наплавленного металла на образцах проводили в реактиве Марбле (20 г CuSO₄, 100 мл HCl, 100 мл этилового спирта).

Металлографические исследования проводили на оптическом микроскопе Carl Zeiss AxioObserver.D1m при увеличениях от 200 до 1000 крат. Микротвердость измеряли на твердомере DuraScan 70 при нагрузке 100 г.

Результаты исследования и их интерпретация. В процессе бурения скважин нижняя часть бурильной колонны находится в непосредственном контакте с абразивными частицами породоразрушающих пластов. Интенсивность разрушения поверхностных слоев БТ при абразивном износе практически не зависит от исходных прочностных свойств материала замков. Химический состав материала замков [5, 6] бурильных труб указывает на значительный разброс сталей по содержанию углерода (0,22-0,37), что в сочетании с другими легирующими элементами соответствует маркам сталей 20ХГНМ-38ХГНМ. Твердость материала замковой части БТ составляет 28-36 HRC и обеспечивается индукционной объемной термической обработкой.

Легирующие элементы хром, марганец, молибден, никель значительно повышают прокаливаемость стали. Эффект прокаливаемости усиливается при легировании стали несколькими элементами.

Все легирующие элементы уменьшают критическую скорость закалки.

Следовательно, в легированных сталях твердость можно увеличить при охлаждении с меньшими скоростями, чем в углеродистых сталях. Кроме того, закалку легированных сталей можно проводить в менее резких охладителях, что снизит вероятность возникновения дефектов закалки, в первую очередь закалочных трещин. Это особенно важно для БТ и замка, соединяемых между собой контактной сваркой трением.

Результаты износных испытаний образцов по ASTM G65 следующие:

Номер	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Образец	Исходный	Duraband NC	OTW-12Ti	ARNCO 350 XT	НП 57	НП 58	ASM NGN-GS	13 CF	ЭМО
Износ, г	0,2869	0,0534	0,1185	0,0944	0,0615	0,0644	0,1220	0,0628	0,1213

Испытания наплавленных материалов в сравнении с материалами замков серийного производства свидетельствуют об эффективности всех исследуемых образцов. В целом сохраняется зависимость износостойкости от твердости материала наплавки.

Испытания (тест Casing Wear Test) показали высокую износостойкость замков БТ всех наплавочных материалов (табл.1). Подтверждена закономерность о том, что материалы с относительно невысокой твердостью наплавки в меньшей степени изнашивают образец обсадной трубы



(табл.2), а износостойкость наплавленной поверхности замка более чем в 5 раз превышает износостойкость исходных образцов.

Следует отметить, что замки БТ, закаленные ЭМО (рис.5), показали повышение износостойкости более чем в 3 раза в сравнении с исходными трубами без наплавки. Износостойкость обсадных труб в контакте с образцами замков БТ после ЭМО повысилась в 2,8 раза (табл.2).

Таблица 1

Результаты износа контрообразцов (наплавки)

Образец	Масса образца бурильной трубы, г					Износ образца замка, г
	Исходная	2 ч	4 ч	6 ч	8 ч	
Исходный	592,80	591,20	591,00	590,80	590,70	2,10
Duraband NC	765,50	765,20	765,00	765,95	764,90	0,60
OTW-12Ti	692,30	692,25	692,20	692,15	692,10	0,20
ARNCO 350XT	722,25	722,10	722,00	721,95	721,90	0,35
НП 57	721,80	721,60	721,40	721,20	721,05	0,75
НП 58	720,80	720,70	720,65	720,60	720,55	0,25
ASM NGN-GS	718,10	718,00	717,95	717,90	717,80	0,30
13 CF	614,80	614,50	614,45	614,40	614,35	0,45
ЭМО	646,30	646,10	645,90	645,80	645,70	0,60

Таблица 2

Результаты износа образцов обсадной трубы

Образец	Масса образца бурильной трубы, г					Износ образца замка, г
	Исходная	2 ч	4 ч	6 ч	8 ч	
Исходный	65,2	60,9	59,5	58,6	57,2	8
Duraband NC	65,9	64,9	64,3	63,9	63,4	2,5
OTW-12Ti	64,6	64,2	63,8	63,3	63	1,6
ARNCO 350XT	63,5	62,3	61,7	61,3	60,8	2,7
НП 57	65,1	64,3	63,8	63,1	62,6	2,5
НП 58	64,9	64,3	63,8	63,1	62,6	2,3
ASM NGN-GS	64,1	63,2	62,5	62	61,7	2,4
13 CF	65,2	64,2	63,5	62,9	62,6	2,6
ЭМО	63,3	62,2	61,7	61	60,2	3,1

Для определения эффективности износостойких наплавки на изменение наружного диаметра замков СБТ 86 в условиях трубной базы ООО «БИС-Сервис» (г.Нижневартовск) использовали метрологические измерения. СБТ 86 поступили на ремонт в связи с выбраковкой их по наружной и внутренней замковой резьбе. Измерения наружного диаметра замков проводили штангенциркулем ШЦ 250 с точностью 0,05 мм. Выявлено, что в составе одной бурильной колонны использовали как СБТ 86 с наплавленными по наружному диаметру поясками (наплавка BoTn 3000), так и трубы с замками без наплавки (рис.6).

Наружный диаметр замков СБТ 86 без наплавки составил 103,5-104,8 мм, тогда как с наплавленными поясками –

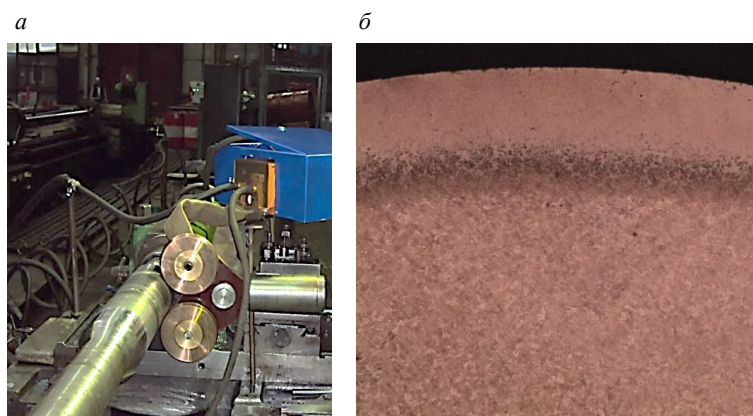


Рис.5. Фрагмент ЭМО наружного диаметра замка бурильной трубы (а) и микроструктура закаленного поверхностного слоя (б)



Рис.6. Фрагменты замков СБТ без наплавки (в середине) и с хардбендингом

$108 \pm 0,1$ мм. Измерение наружного диаметра наплавленных участков СБТ 86 свидетельствует о незначительном износе наплавки (диаметр 110,8-112,0 мм) и отсутствии износа замков БТ. Выкрашивания и отслоения наплавленного металла не отмечено.

По результатам метрологических исследований СБТ 86, поступивших в ремонт, можно сделать следующее заключение:

- наплавка повышает долговечность деталей, способствуя повышению износостойкости замков БТ в условиях абразивного воздействия агрессивных геологических образований;
- использование БТ без износостойких наплавок недопустимо, так как дальнейшая их эксплуатация в составе бурильной колонны может привести к аварийным последствиям;

– применение в бурильной колонне труб с наплавкой и без наплавки поясков с различной степенью износа замков также недопустимо;

– в бурильной колонне необходимо применять трубы с одинаковой наплавкой замков.

Не менее важной является проблема низкой износостойкости замковой резьбы БТ и переводников. Значительный разброс сталей (20ХГНМ-38ХГНМ), используемых для изготовления

замков бурильных труб, отрицательно влияет на износостойкость не только тела бурильного замка, но и на самое слабое место труб – резьбовые соединения. В сочетании с невысокой твердостью 210-260 НВ и прочностью витков резьбы это приводит к низкой износостойкости резьбовых соединений и восстановлению их на трубных базах. Вопрос стойкости резьбовых соединений является «самым узким местом» жизненного цикла бурильной трубы с наплавленными по телу замками.

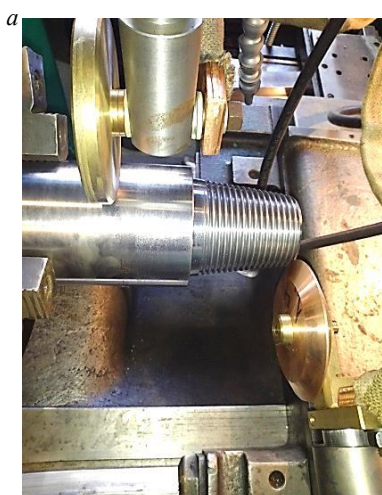


Рис.7. Фрагменты электромеханической обработки резьбы ниппеля (а) и муфты (б) переводника



Рис.8. Фрагмент муфтовой (а) и ниппельной (б) частей переводников производства ООО «ПТФ НИГМАШ» П-133/133 – 3 шт., П-147/147 – 3 шт. после электромеханической обработки резьбы

Металлографические и метрологические исследования переводников, изготовленных в условиях Александровского завода бурового оборудования (рис.7 и 8), стендовые испытания, проведенные на базе Ковровского завода бурового оборудования, подтвердили эффективность технологии ЭМО при навинчивании-свинчивании резьбовых соединений.

В условиях ООО «УК «Татбурнефть» проводятся эксплуатационные испытания переводников П-133/133, П-147/147 производства ООО «ПТФ НИГМАШ», изготовленных из стали 40ХН2МА с резьбой, подвергнутой ЭМО. Промежуточные результаты испытаний сви-



детельствуют, что при бурении скважин после 978 циклов (норматив 500) навинчивания-свинчивания переводников П-147/147, износа резьбы не зафиксировано.

Выводы

1. В работе были определены направления проведения исследований по повышению износостойкости замков бурильных труб, резьбовых соединений и обсадной бурильной колонны:

- нанесение на замок бурильных труб износостойких наплавов российскими и зарубежными материалами (хардбендинг);
- закалка поверхностного слоя замков бурильных труб электромеханической обработкой;
- закалка наружной и внутренней замковой резьбы бурильных труб электромеханической обработкой.

2. Производственный успех использования технологии нанесения износостойких наплавов на тело бурильного замка обусловлен:

- использованием простого и мобильного оборудования для сварки;
- проведением работ в местах использования бурильного инструмента или временных (постоянных) производственных баз с небольшим транспортным плечом от месторождения;
- повторным нанесением наплавочных материалов при восстановлении замков бурильных труб;
- широким и постоянно растущим списком компаний, которые получают аккредитацию на производство данных работ.

3. Химический состав наплавочных материалов указывает на наличие карбидообразующих элементов (Cr, Ti, Al, V, Nb, Mn), неравномерно распределенных по наплавленному покрытию, увеличивающих твердость и образующих с углеродом простые или сложные карбиды, которые обладают высокой твердостью с сохранением достаточной вязкости.

4. Результаты износных испытаний наплавленных материалов в сравнении с материалами замков серийного производства (тест ASTM G65 на степень сопротивления абразивному износу) свидетельствуют об эффективности всех исследуемых образцов российского и зарубежного производства. В целом сохраняется прямая зависимость значений износостойкости от твердости материала наплавов.

5. Износостойкость наплавочных материалов НП 57, НП 58 (Интерпро, Россия) находится на уровне лучших исследованных мировых образцов Duraband NC, 13 CF (Castolin Eutectic). Однако для НП 57, НП 58 требуется доработка технологии нанесения наплавов и повышения качества выполненных покрытий.

6. Трибологические испытания (тест Casing Wear Test) также подтверждают эффективность российских и зарубежных наплавочных материалов. При этом материалы с относительно невысокой твердостью наплавов в меньшей степени изнашивают образец обсадной трубы, а износостойкость наплавленной поверхности замка более чем в 5 раз превышает износостойкость исходных образцов.

7. Испытания по двум видам тестов показали, что достичь универсальности наплавочных материалов сложно, но использование буровыми подрядчиками компоновок бурильной колонны с различными наплавками еще более сложнее, поэтому рекомендуется выбирать наплавочные материалы для нанесения на замки, которые дали бы лучшие средние результаты. По результатам показателей тестов к таким материалам мы могли бы отнести: Duraband NC, 13 CF (Castolin Eutectic) и при надлежащем качестве технологии нанесения российские материалы НП 57 и 58.

8. Химический состав материала замков российских и зарубежных производителей бурильных труб указывает на значительный разброс сталей по содержанию углерода (0,22-0,37), что в сочетании с другими легирующими элементами соответствует маркам сталей 20ХГНМ-38ХГНМ.

9. Значительный разброс сталей, используемых для изготовления замков бурильных труб, отрицательно влияет на износостойкость не только тела бурильного замка, но и на самое слабое место труб – резьбовые соединения. В сочетании с невысокой твердостью 210-260 HV и прочностью витков резьбы это приводит к низкой износостойкости резьбовых соединений и необходимости их восстановления на трубных базах. Вопрос стойкости резьбовых соединений является «самым узким местом» жизненного цикла бурильной трубы с наплавленными по телу замками.



10. Технология ЭМО указывает на возможность повышения износостойкости замков и резьбы бурильных труб и переводников, обеспечивает сохранность обсадной колонны посредством закалки поверхностного слоя бурильных замков как альтернатива хардбендингу.

Коммерческий успех технологии ЭМО может быть продиктован следующим:

- стоимость оборудования для проведения технологии ЭМО незначительна и соизмерима со стоимостью мобильного комплекса по нанесению износостойких наплавов;
- расходные наплавочные материалы и защитные газы не требуются;
- ЭМО выполняется на металлорежущем станке токарем, нарезающим резьбу;
- производительность операции ЭМО равна времени нанесения износостойкой наплавки в тех же габаритах изделий;
- энергетическая составляющая затрат на порядок ниже, чем при наплавке;
- при ЭМО отсутствуют вредные и опасные факторы;
- повышение износостойкости наружной и внутренней замковой резьбы бурильных труб, переводников и переходников выполняется на трубонарезных станках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Басарыгин Ю.М. Осложнения и аварии при бурении нефтяных и газовых скважин / Ю.М.Басарыгин, А.И.Булатов, Ю.М.Проселков. М.: Недра. 2000. 679 с.
2. Долгий И.Е. Сопротивление горных пород разрушению при бурении скважин / И.Е.Долгий, Н.И.Николаев // Записки Горного института. 2016. Т. 221. С. 655-660. DOI 10.18454/PMI.2016.5.655
3. Дафф К. Duraband NC уже более 7 лет успешно защищает используемые в России бурильные трубы // Бурение и нефть. 2016. № 9. С. 72-74.
4. Патент 2482942 РФ. Способ изготовления резьбы на детали / Л.В.Федорова, С.К.Федоров, В.С.Жаренников, М.В.Песин, Ю.П.Смольский. Заявл. 24.06.2011. Оpubл. 27.05.2013. Бюл. № 15.
5. Патент 2486994 РФ. Способ изготовления резьбы на детали / Л.В.Федорова, С.К.Федоров, В.С.Жаренников, М.В.Песин, Ю.П.Смольский. Заявл. 24.06.2011. Оpubл. 10.07.2013. Бюл. № 19.
6. ССК: Отчет по хардбендингу / А.В.Садовников, С.К.Федоров, Л.В.Федорова, А.М.Ломпас, О.И.Фомин // ROGTEC. Российские нефтегазовые технологии. 2017. № 49. С. 12-25.
7. Технологические основы повышения износостойкости деталей электромеханической поверхностной закалкой / С.К.Федоров, Л.В.Федорова, Ю.С.Иванова, А.М.Ломпас // Машиностроение. 2017. № 9 (690). С. 85-92. DOI: 10.18698/0536-1044-2017-9-85-92
8. Федорова Л.В. Повышение износостойкости резьбовых соединений бурильных труб электромеханической поверхностной закалкой / Л.В.Федорова, Ю.С.Иванова, М.В.Воронина // Записки Горного института. 2017. Т. 226. С. 456-461. DOI: 10.25515/PMI.2017.4.456
9. Федорова Л.В. Электромеханическая обработка / Л.В.Федорова, С.К.Федоров // РИТМ. 2012. Т. 2. № 70. С. 14-16.
10. Хардбендинг как эффективный метод увеличения ресурса бурильных труб и защиты обсадной колонны. Результаты трибологических испытаний износостойких наплавов для бурильных замков / А.В.Садовников, С.К.Федоров, Л.В.Федорова, А.М.Ломпас, О.И.Фомин // Бурение и нефть. 2017. № 6. С. 30-35.
11. Шиловский А.В. Хардбендинг на защите бурильной трубы // Бурение и нефть. 2016. № 4. С. 58-59.
12. ЭМО для повышения надежности машин / С.К.Федоров, Л.В.Федорова, А.В.Садовников, Ю.С.Иванова, А.М.Ломпас, М.В.Власов // РИТМ. 2017. № 4. С. 96-98.
13. Electromechanical surface hardening of tubing steels / L.V.Fedorova, S.K.Fedorov, A.A.Serzhant, V.V.Golovin, S.V.Systero // Metal Science and Heat Treatment. 2017. Vol. 59. № 3. P. 173-175. DOI 10.1007/s11041-017-0123-z
14. Increase of wear resistance of the drill pipe thread connection by electromechanical surface hardening / S.K.Fedorov, L.V.Fedorova, Yu.S.Ivanova, M.V.Voronina // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Vol. 12. № 18. P. 7485-7489.

Авторы: **С.К.Федоров**, д-р техн. наук, профессор, tomd@yandex.ru (Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия), **Л.В.Федорова**, д-р техн. наук, профессор, Fedorova.lv@bmstu.ru (Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия), **Ю.С.Иванова**, канд техн. наук, доцент, yuulianius@gmail.com (Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия), **М.В.Воронина**, канд техн. наук, доцент, maria.vv@mail.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), **А.В.Садовников**, генеральный директор, m_t_servis@mail.ru (ООО «Материалы Технологии Сервис», Москва, Россия), **В.Н.Никитин**, генеральный директор, nvn1976@mail.ru (ООО «Интехно», Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, г. Нижневартовск, Россия),

Статья поступила в редакцию 29.10.2017

Статья принята к публикации 02.04.2018.



УДК 338.0

ОЦЕНКА СТОИМОСТИ ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С УЧЕТОМ ВЕЛИЧИНЫ КАПИТАЛЬНЫХ ЗАТРАТ

А.Ю.ЗАЙЦЕВ

АО «Полиметалл УК», Санкт-Петербург, Россия

В статье рассматриваются вопросы геолого-экономической и стоимостной оценки месторождений полезных ископаемых. Существующие методики обладают рядом преимуществ и недостатков, но строятся на единых показателях оценки без учета особенностей каждого месторождения. Автором предлагается методика, позволяющая быстро и просто определить стоимость месторождения золота на основе данных рудных запасов. Предлагаемая методика позволяет определить реальную стоимость месторождения золота с учетом включения затрат на развитие и освоение месторождения, а также рассчитать предельную (рекомендуемую) величину инвестиций по сделке. Кроме того, методика дает возможность оценить вклад запасов и ресурсов минерального сырья в общую рыночную стоимость горно-добывающего предприятия.

Методика основана на анализе эмпирического материала, в качестве которого послужили факты реальных сделок покупки месторождений золота (и сопутствующих металлов) компанией Polymetal International plc. В результате статистического исследования получена формула для определения предельной стоимости месторождения с учетом включения затрат на развитие и освоение месторождения. Сопоставление реальной стоимости месторождений, определенной по результатам сделок с прогнозными значениями, показывает довольно высокую сходимость ($R = 0,97$). Основную ошибку в уравнения прогноза вносит недоучет факторов географической позиции объектов, инфраструктуры и наличия имущественного комплекса. Проверка методики на трех примерах сделок по приобретению золотых активов компанией Polymetal International plc показала хорошую сходимость с реальной ценой сделок.

Ключевые слова: оценка месторождений; инвестиции; стоимость месторождения; оценка запасов

Как цитировать эту статью: Зайцев А.Ю. Оценка стоимости золоторудных месторождений с учетом величины капитальных затрат // Записки Горного института. 2018. Т. 233. С. 547-553. DOI:10.31897/PMI.2018.5.547

Введение. В последнее десятилетие золоторудная промышленность является одной из наиболее привлекательных отраслей для инвестирования, что подтверждается проявлением интереса к ней со стороны достаточного количества инвесторов. С 2008 г. мировое производство золота постоянно растет, однако активное освоение золоторудных месторождений приводит к истощению легкодоступных участков недр, минерально-сырьевой базы и включению в освоение более сложных, труднодоступных месторождений. Освоение сложных месторождений приводит к росту инвестиционных затрат, потенциальные инвесторы предъявляют более высокие требования к инструментам оценок перспективности приобретения месторождения и будущего дохода. Разработка методики оценки стоимости месторождения, которая бы позволяла потенциальному инвестору корректно определить перспективность его приобретения и освоения, имеет большое значение, как в нашей стране, так и за рубежом [11, 12]. Методика может быть полезна и для определения экономического эффекта от проведения геологоразведочных работ [4, 7].

Обсуждение. Основные методы оценки месторождений полезных ископаемых в мире и России: на основе доходного подхода (метод дисконтирования денежных потоков), его разновидности – модели Ольсона [2], на основе затратного и сравнительного подхода. Наиболее распространенным методом оценки стоимости приобретения месторождения является метод аукционных торгов с элементами стоимостной оценки [1, 5].

Существующие методы оценки стоимости приобретения месторождения имеют ряд недостатков. В них в полной мере не учитываются: сложность геологии месторождения; неопределенность технологических и технических параметров освоения; изменчивость экономических, горно-технических условий в процессе эксплуатации месторождения. Данные факторы не дают возможности однозначно определить стоимость приобретения месторождения, что усложняет (или даже делает невозможным) принятие решения о его приобретении. Таким образом, очевидно, что на сегодняшний день нет эффективного метода геолого-экономической и стоимостной оценки месторождений полезных ископаемых.

Качество оценки потенциала, а также возможных рисков его освоения непосредственно связано с повышением доходности месторождений. Для принятия решения о покупке месторождения самым логичным и очевидным является построение технико-экономической, а по сути математической модели месторождения. Подобная модель позволяет сопоставить характеристики месторождения с затратами на его освоение, тем самым подтвердить вероятность успешного результата. Одной из систем, позволяющей принять решение о приобретении и освоении месторождения, является скоринговая модель оценки месторождения [10]. Такая модель оценки строится на основе данных подтвержденных запасов категорий *measured*, *indicated* и *inferred*, *proved* ранее успешно освоенных месторождений-аналогов. В результате оценки происходит разделение потенциальных месторождений на те, которые выгодно отрабатывать в текущей экономической ситуации и те, освоение которых на сегодняшний день неэффективно.

Скоринговая модель оценки месторождения значительно увеличивает скорость принятия решения инвестором о возможности его приобретения с целью дальнейшего освоения, а также наделяет его уверенностью относительно принимаемого решения. Для классификации месторождений на различные группы должны быть известны характеристики:

- местонахождение, климат, транспортная логистика;
- масштаб месторождения, величина запасов месторождения по категориям;
- технология способа добычи и переработки руд;
- предполагаемый способ отработки;
- горно-геологические и гидрогеологические условия;
- наличие перерабатывающих мощностей и логистической инфраструктуры.

Таким образом, скоринговые модели – статистические модели оценки платежеспособности предприятия, поскольку месторождение или группа месторождений составляют основу и суть горно-добывающего предприятия.

Для оценки возможности освоения месторождения производится анализ наличия подтвержденных запасов. Инвестору необходимо понимание величины готовых к отработке балансовых запасов, а также определение возможной перспективы забалансовых запасов, освоение которых в данный момент экономически нецелесообразно.

К факторам, оказывающим значительное влияние на возможность освоения и стоимость месторождения, относятся:

- условия эксплуатации – мощность рудного тела, глубина залегания с оптимальным для отработки содержанием, гидрологические особенности;
- качество минерального сырья, например, содержание ценных компонентов;
- развитость инфраструктуры в районах ведения горных работ;
- внутренние и международные цены на золото;
- горно-технические и экологические условия эксплуатации месторождения;
- технологические свойства руды (первичная, окисленная, упорная);
- расположение месторождения по отношению к транспортным магистралям, центрам переработки и использования руды или полуфабрикатов;
- период строительства горного предприятия и его мощность;
- период эксплуатации месторождения;
- наличие трудовых ресурсов;
- существующая система налогообложения, отчислений и платежей в сфере недропользования и другие.

Условно все перечисленные факторы можно разделить на три группы: горно-геологические, географические, экономические. В самом упрощенном виде скоринговая модель представляет собой взвешенную сумму определенных горно-геологических, географических, экономических характеристик. В результате получается показатель стоимости капитальных затрат месторождения.

Показатель каждого месторождения сравнивается с рассчитанным числовым порогом, который, по существу, является линией безубыточности. Его физический смысл заключается в следующем: количество потраченных средств на капитальные вложения для того, чтобы запустить месторождение в эксплуатацию, но при этом окупить первоначальные капитальные и последующие текущие затраты на его отработку. Месторождения с показателем ниже этого порога являются кандидатами к освоению.



Методология. В сложившейся ситуации предлагается использовать методику оценки стоимости месторождения, основанную на анализе данных сделок по месторождениям, публикуемой крупными российскими золотодобывающими компаниями, и анализе инвестиций в действующие месторождения. Методика оценки формируется на основании стоимости сделок купли – продажи месторождений, затрат на геологоразведку, вложений капитального характера в строительство и приобретение техники и оборудования.

Данный подход рассматривался ранее [3, 6] и оценивал стоимость месторождения на основании запасов месторождения. Однако в нем отсутствует один из определяющих факторов для запуска и последующей эксплуатации месторождения – стоимость геологоразведки и капитальных вложений. С учетом растущей сложности и труднодоступности освоения новых месторождений роль этих расходов становится определяющей. Уточнение типизации руд, горно-геологических условий и содержания полезного металла требуют различных принципов переработки и в значительной степени влияют на инвестиции в проект (капитальные затраты).

Включение данных затрат в оценку необходимо не только для инвестора, как потенциального покупателя, но и для государства, которое администрирует геологоразведочный процесс, а также формирует поступления в части доходов бюджета от продажи права на освоение недр и налогов от разработки месторождений.

Предложенная методика оценки позволит более корректно оценить:

- стоимость месторождений с небольшой долей запасов или низким качеством руд;
- объективную стоимость низкорентабельных месторождений, числящихся на государственном балансе запасов;
- риски разработки новых месторождений.

Объективная проведенная оценка месторождений создаст предпосылки для определения льготных, эффективных условий для привлечения инвестора.

Разработка методики оценки стоимости месторождения проводилась на основе анализа деятельности одного из активных участников сделок купли – продажи на рынке золотых и комплексных золотосодержащих месторождений стран СНГ – Polymetal International plc (табл.1). Выбор компании обусловлен следующими факторами:

- месторождения приобретались у бывших владельцев на основе рыночных сделок и в условиях конкуренции, что позволяет говорить об объективности оценок,
- информация о рентабельности эксплуатируемых месторождения с разными типами руд, в том числе, и сложной типизации (упорные и другие типы руд), в различных регионах стран СНГ (разнообразие климатических, логистических, энергетических условий);
- открытость деятельности компании (критерий рентабельности на основе финансовой отчетности позволяет выбрать месторождения для их последующего анализа).

Таблица 1

Данные по сделкам купли-продажи и величины CAPEX* месторождений компаний Polymetal

Месторождение	Запасы и ресурсы, Au экв. т		Сумма сделки, млн дол.	CAPEX, млн дол.	Стоимость приобретения + CAPEX			
Магадан								
Кубака	Measured	4,48	21,3	55	76,3			
	Indicated	3,93						
	Inferred	2,41						
Биркачан	Proved	13,29	94	42	136			
	Inferred	0,00						
Ороч	Measured	5,99				13,5	15	28,5
	Indicated	14,92						
	Inferred	10,13						
Сопка Кварцевая и Дальнее	Indicated	31,52	94	42	136			
	Inferred	11,14						
Ольча	Inferred	22,43				13,5	15	28,5

* CAPEX – от англ. capital expenditure – капитальные затраты, расходы на приобретение или обновление необоротных активов



Окончание табл.1

Месторождение	Запасы и ресурсы, Аи экв. т		Сумма сделки, млн дол.	CAPEX, млн дол.	Стоимость приобретения + CAPEX
Чукотка					
Майское	Proved	1,80	99,5	205	304,5
	Indicated	9,98			
	Inferred	139,42			
Хабаровский край					
Светлое Албазино	Inferred	34,30	9,3	51	60,3
	Proved	44,15	7	58	65
Казахстан					
Варваринское	Indicated	99,23	277,5	81	358,5
	Inferred	13,6			
Комаровское	Indicated	43,5	100	6	106
	Inferred	0			
Бакырчик и Большевик	Indicated	258	618,5	320	938,5
	Inferred	91			
Перспективные месторождения					
Кутын	Measured	11,14	67		67
	Inferred	22,25			
Светлоборское Маминское	Inferred	28,41	9,7	1	9,7
	Proved	9,16			
	Measured	1,37			
	Indicated	1,71			

Другие золотодобывающие российские компании публикуют только общие данные по сделкам, не указывая конкретную стоимость сделок по своим приобретениям, либо приобретают их непосредственно у государства, поэтому такие сделки нельзя признать рыночными, а их стоимость – объективной (справедливой).

Для проведения сравнительного анализа были отобраны месторождения, удовлетворяющие следующим условиям:

- с запасами категорий measured, indicated и inferred, proved. Запасы категории probable не учитываются, поскольку содержат высокую степень неопределенности, что увеличивает риск некорректности расчета [13, 14]. В расчете используются запасы, подтвержденные на момент сделки;
- приобретенные в конкурентных условиях, т.е. с рыночной ценой, за исключением месторождений, прилегающих к действующим лицензионным площадям. Все месторождения, показанные в табл.1, отвечают данному условию.

Оценка стоимости золоторудных месторождений будет основана на выявлении линейной зависимости инвестиций от величины запасов на основе метода наименьших квадратов (МНК)

$$F(a, b) = \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b))^2. \quad (1)$$

В предложенной методике результатом будет определение коэффициентов линейной зависимости, при которых функция переменных a и b принимает наименьшее значение.

Данные табл.1 обобщим для проведения расчетов (табл.2).

Удельный показатель инвестиций равен 2,4 млн дол./т. Показатели месторождений Кутын, Светлоборское, Маминское являются некорректными для включения в анализ из-за отсутствия величины CAPEX в расчете. С целью точной оценки зависимости путем исключения выбросов при расчете данные по этим месторождениям будут исключены из анализа.

Составим стандартную систему уравнений:

$$\begin{cases} a \sum x_i^2 + b \sum x_i = \sum x_i y_i, \\ a \sum x_i + b n = \sum y_i, \end{cases} \quad (2)$$

где x – величина запасов, т; y – величина стоимости сделки с учетом CAPEX, млн дол.

Система будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} 167775a + 855b = 434224, \\ 855a + 9b = 2074. \end{cases}$$

Таблица 2

Удельный показатель инвестиций на тонну запасов месторождений компании Polymetal

Месторождения	Запасы, т	Величина сделки +CAPEX, млн дол.	(Сделка +CAPEX)/запас, млн дол./т	Отклонение от удельного показателя, %
Кубака	55,15	76,3	1,4	– 42,5
Ольча	22,43	28,5	1,3	– 45,8
Майское	151,20	304,5	2,0	– 16,7
Светлое	34,30	60,3	1,8	– 25,0
Албазино	44,15	65,0	1,5	– 37,5
Кутын	33,39	67,0	2,0	– 16,7
Сопка Кварцевая	42,66	136,0	3,2	+33,3
Комаровское	43,50	106,0	2,4	0
Варваринское	112,83	358,5	3,2	+33,3
Кызыл	349,00	938,5	2,7	+12,5
Светлоборское	28,41	9,7	0,3	– 87,5
Маминское	12,24	87,5	7,1	+195,8
Среднее	929,26	2237,8	2,4	–

Решаем систему методом Крамера:

$$\Delta a = \begin{vmatrix} 434224 & 855 \\ 2074 & 9 \end{vmatrix} = 2134642 ;$$

$$\Delta b = \begin{vmatrix} 167775 & 434224 \\ 855 & 2074 \end{vmatrix} = -23456831 .$$

По итогам вычислений коэффициенты аппроксимирующей функции равны:

$$y = ax + b, \text{ где } a = 2,74, b = -30,13. \quad (3)$$

Графический вариант зависимости представлен на рис. 1.

Величины инвестиций (табл.2) и запасов показывают довольно высокую сходимость (рис.1) $R^2 = 0,97$. В результате предложенная модель оценки представляет собой разновидность сравнительного подхода и удобный инструмент для расчета стоимости сделки с учетом будущих инвестиций.

В явном виде формула для определения оптимального размера инвестиций с учетом CAPEX имеет вид:

$$y_{\text{CAPEX}} = (2,74x + 30,13) - M_{100}, \quad (4)$$

где M_{100} – полная (100 %) стоимость приобретения месторождения, млн. дол.

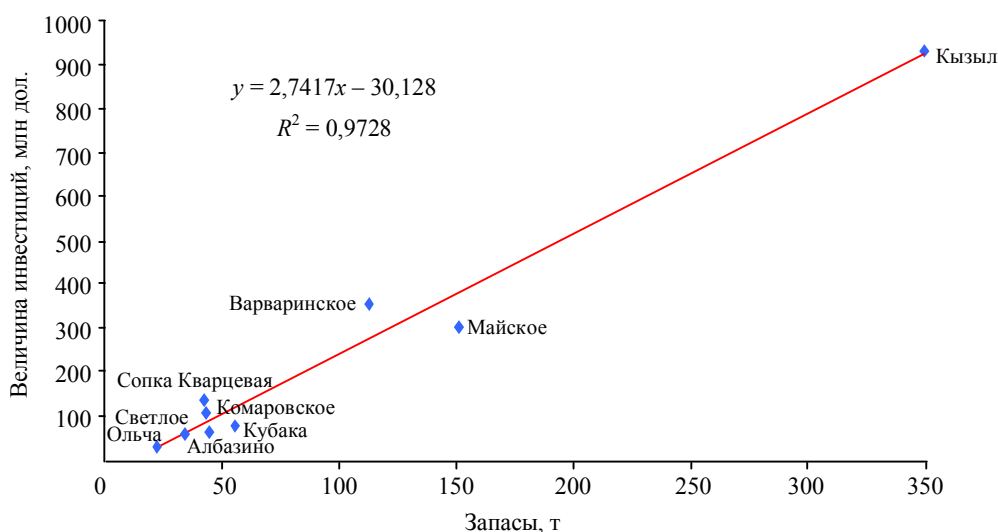


Рис. 1. График зависимости размера инвестиций с учетом CAPEX от запасов месторождения

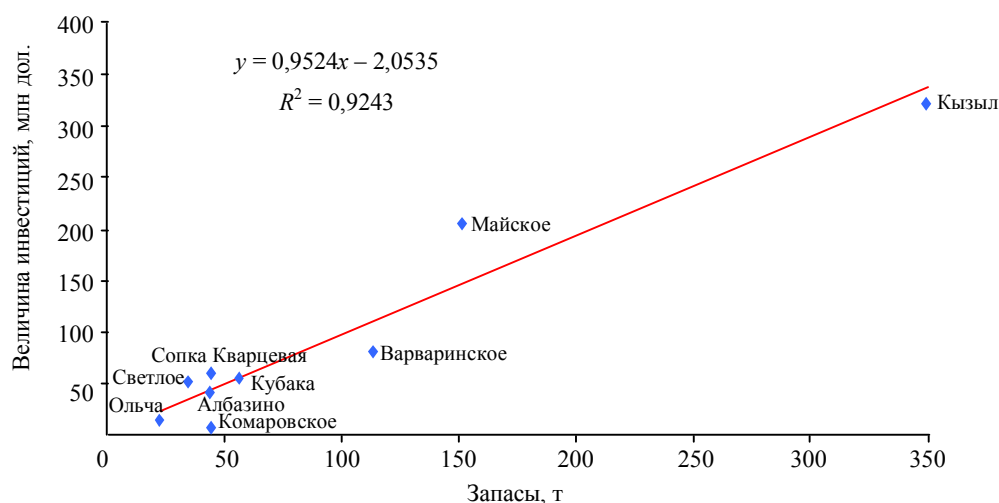


Рис.2. График зависимости величины CAPEX от запасов месторождения

Величина CAPEX является предельной для инвестора, в случае если прогнозное значение CAPEX выше оптимальной расчетной величины, то сделка по своим параметрам хуже среднерыночной, и инвестиции будут экономически неоправданными.

На основе полученной расчетной формулы были определены предельные величины CAPEX для месторождений, не включенных в анализ, а также рассматриваемых как проектные (перспективные) для компании Polymetal.

Предельная величина CAPEX для месторождений, не попавших в анализ, составит, млн дол.: Светлоборское 38,1, Кутын – 5,6, Маминское – 83,1. Как видно из полученных результатов, величины CAPEX для месторождений Кутын и Маминское являются отрицательными, что говорит о завышенной цене их приобретения.

Перспективный проект – месторождение Нежданинское, в котором Polymetal приобрел долю 15,3 % за 18 млн дол. при ориентировочной стоимости приобретения 100 %-ной доли за 120 млн дол., с запасами золота категорий measured, indicated, inferred, proved в объеме 230 т, предельная величина CAPEX составит 480,5 млн дол.

Данный подход применим в случае, когда известна стоимость приобретения месторождения. Но что делать в случае, если стоимость приобретения неизвестна, либо наоборот, покупатель обладает ограниченными финансовыми ресурсами и хочет добиться определенной для себя стоимости месторождения? Можно использовать тот же подход, но в качестве зависимых величин использовать стоимость сделки и величину капитальных вложений. В данном случае наблюдается весьма высокая сходимость (рис.2) $R^2 = 0,9243$.

В явном виде формула для определения оптимального размера CAPEX имеет вид:

$$y_{\text{CAPEX}} = 0,9524x + 2,0535. \quad (5)$$

Таким образом, определив в соответствии с формулой (5) предельную стоимость инвестиций и отняв от полученного результата стоимость CAPEX из формулы (4), получим предельную стоимость месторождения.

Учитывая принципы оценки и возможность добавления новых данных, можно отметить, что рассмотренная методика позволяет корректно и эффективно оценить стоимость месторождения, а также благодаря своей гибкости с возможностью включения информации по новым сделкам дать более точную оценку для расчетов и рекомендаций по приобретению месторождений.

Заключение. Предлагаемая методика является начальным шагом для эффективной оценки золоторудных месторождений с учетом растущей сложности и труднодоступности освоения. Однако требуется создание единой базы по инвестициям, проведенным сделкам и капитальным вложениям, что позволит инвесторам более точно определять стоимость сделки, будущих капитальных вложений, значительно снижать финансовый риск, а государству эффективно реализовывать проекты по освоению минерально-сырьевой базы и формировать эффективную цену для реализации недропользователю. Все это в комплексе позволит быстрее осваивать и запускать месторождения в эксплуатацию.



Предложенная методика позволит оценить предельную стоимость проекта, а также возможность влиять на переговорный процесс в ходе сделки купли-продажи и корректно определить потенциальному инвестору перспективность приобретения месторождения и получаемого будущего дохода.

Методика оценки имеет перспективу на дальнейшее совершенствование и развитие, поскольку сейчас востребован простой, прозрачный и доступный метод определения как стоимостной оценки месторождения, основанной на величине его запасов, так и ожидаемой величины инвестиций в его разработку.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ампилов Ю.П. Экономическая геология / Ю.П.Ампилов, А.А.Герт. М.: Геоинформмарк, 2006. 344 с.
2. Косовцева Т.Р. Управление ценностью горной компании при реализации стратегических инвестиционных проектов / Т.Р.Косовцева, Т.В.Пономаренко // Записки Горного института. 2014. Т. 208. С. 124-131.
3. Котляров И.Д. Методика учета рисков при геолого-экономической и стоимостной оценке месторождений / И.Д.Котляров, С.В.Петров // Горный журнал. 2014. № 9. С. 94-99.
4. Котляров И.Д. Оценка экономического эффекта от использования аутсорсинга в нефтегазовой отрасли // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. 2014. № 3. С. 20-23.
5. Подтуркин Ю.А. Проблемы стоимостной оценки месторождений полезных ископаемых / Ю.А.Подтуркин, В.А.Коткин // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2004. № 4. С. 30-33.
6. Прогнозирование цены золота в недрах / С.В.Петров, И.Д.Котляров, А.Б.Кацнельсон, М.С.Сень // Обогащение руд. 2016. № 2. С. 3-8.
7. Сень М.С. Оценка добавленной стоимости минерального актива в результате проведения геологоразведочных работ // Недропользование XXI век. 2013. № 3. С. 45.
8. Шаклеин С.В. Использование отечественного и зарубежного опыта при разработке новой российской «Классификации запасов и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых» // Недропользование XXI век. 2014. № 6. С. 64-68.
9. Эпштейн И.В. Концепция новой классификации запасов ТПИ с позиций недропользователя, привлекающего инвестиции через биржи // Недропользование XXI век. 2015. № 2. С. 74-91.
10. Anderson R. The Credit Scoring Toolkit: Theory and Practice for Retail Credit Risk Management and Decision Automation. Oxford: Oxford University Press. 2007. 108 p.
11. Kreuzer O.P. Risk and Uncertainty in Mineral Exploration: Implications For Valuing Mineral Exploration Properties / O.P.Kreuzer, M.A.Etheridge // AIG News. 2010. № 100. P. 20-28.
12. Saluga P. Simple and Advanced Methods of Mineral Projects Risk Analysis – Application Examples / P.Saluga, E.J.Sobczyk // Underground Mining: New Technologies, Safety and Sustainable Development, Proceedings of the 6th International Mining Forum 2005, Cracow – Szczyrk – Wieliczka, Poland, 23-27 February 2005. Taylor & Francis, 2005. P. 137-152.

Автор А.Ю.Зайцев, руководитель проектов, azaitsev72@mail.ru (АО «Полиметалл УК», Санкт-Петербург, Россия).

Статья поступила в редакцию 18.03.2018.

Статья принята к публикации 10.07.2018.



УДК 332.1+ 338.47+330.15

ОБОСНОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ПРЕИМУЩЕСТВА МОРСКОЙ ТРАНСПОРТИРОВКИ АРКТИЧЕСКОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА В ВИДЕ СПГ

С.Ю.КОЗЬМЕНКО¹, В.А. МАСЛОБОВЕВ², Д.А.МАТВИИШИН¹

¹ Мурманский государственный технический университет, Мурманск, Россия

² Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр РАН», Апатиты, Россия

Российская Арктика является крупнейшим экспортером отечественного природного газа, что приносит федеральному бюджету весомую долю доходов. Подавляющие объемы добываемого арктического природного газа транспортируются по трубопроводам в единственном направлении – в страны Европы. Из-за ряда причин ЕС ведет планомерную работу по сокращению зависимости от российского природного газа, в том числе путем увеличения импорта сжиженного природного газа (СПГ). Это происходит на фоне процесса переориентации мировых рынков природного газа с трубопроводного газа на сжиженный. Очевидное решение – увеличение производства СПГ в Российской Арктике с последующей транспортировкой морским путем. Учитывая удаленность арктических месторождений от основных рынков сбыта, требуется выполнение сравнительного анализа себестоимости транспортировки газа по трубопроводам и морским путем в виде СПГ.

Авторами разработана методика определения себестоимости трубопроводной и морской транспортировки газа в сопоставимых условиях. Выполнены расчеты себестоимости транспортировки газа при доставке в Германию, Италию, Турцию и Китай. В результате анализа выявлено, что морская доставка 1 тыс. м³ дешевле трубопроводной по всем рассмотренным маршрутам в среднем на 106,30 дол. (–40,2 %). Расчеты подтверждают наличие экономического преимущества морской транспортировки арктического природного газа в виде СПГ на ключевые существующие и перспективные рынки сбыта природного газа. Этим обосновывается необходимость рациональной замены трубопроводного газа сжиженным на рынках стран Европы (особенно Южной, где конкурентоспособность СПГ выше) и увеличение экспорта сжиженного природного газа в страны АТР. Предлагаемые меры позволят сократить себестоимость морской транспортировки природного газа в виде СПГ, что значительно повысит конкурентоспособность арктического природного газа на мировом и региональных рынках природного газа.

Ключевые слова: Арктика; природный газ; СПГ; стоимость транспортировки; арктические СПГ-проекты

Как цитировать эту статью: Козьменко С.Ю. Обоснование экономического преимущества морской транспортировки арктического природного газа в виде СПГ / С.Ю.Козьменко, В.А.Маслобоев, Д.А.Матвишин // Записки Горного института. 2018. Т. 233. С. 554-560. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.554

Введение. Российская Арктика богата полезными ископаемыми, среди которых особенно выделяются углеводородные ресурсы. Запасы нефти, природного газа, газового конденсата и каменного угля во всей Арктике оценены в размере 646 млрд б.н.э. (баррелей нефтяного эквивалента), в том числе 233 млрд б.н.э. разведанных и ориентировочно 413 млрд б.н.э. неразведанных. Это порядка 1/5 от общего объема мировых запасов углеводородных ресурсов, причем природный газ в структуре этих запасов занимает наибольшую часть и составляет 73,8 % от общего объема. В пределах российского арктического пространства локализовано около 17 % всей арктической нефти и 70 % всего арктического природного газа [11, с. 61-63].

Нефтегазовые доходы федерального бюджета Российской Федерации составляют (2017) 39,58 % от общего объема доходов [8, с. 269-271]. При этом в Российской Арктике добывается около 17 % нефти и более 85 % природного газа от общего объема отечественной добычи. При этом освоение ресурсов нефти и газа активно переносится в акваторию арктического континентального шельфа и становится важнейшей составляющей стратегии морской деятельности России в Арктике в аспекте развития рационального недропользования и освоения морских ресурсов арктического континентального шельфа [9, с. 62].

Основная доля арктического природного газа на сегодняшний день доставляется потребителям с использованием трубопроводного транспорта, причем в единственном, традиционном со времен газопровода «Союз» направлении – в страны Европы. Однако в целом на рынках стран ЕС рост спроса на природный газ практически отсутствует как в последние десятилетия, так и не ожидается в долгосрочной перспективе (потребление в 2001 г. – 475,5 млрд м³, в 2016 г. – 480,7 млрд м³, в 2040 г. – 510 млрд м³).

Более того, на этом фоне происходит снижение доли арктического природного газа в газовом импорте европейских стран, поскольку Европейский Союз, заявляя о необходимости обеспечения энергетической безопасности стран-членов, проводит политику диверсификации поставщиков природного газа, в том числе путем поиска альтернативы российскому природному газу, с целью

устранить геополитический характер использования национальных трубопроводных газотранспортных систем. Результатом принимаемых ЕС мер стало сокращение доли российского природного газа в общем объеме импорта стран Европы с 41 до 35 % за период с 2001 по 2016 гг.

В то же время, около 50 % европейского потребления газа покрываются импортом, 4/5 объема которого обеспечивается «большой четверкой» – ПАО «Газпром» (Россия), Statoil ASA (Норвегия), Sonatrach (Алжир) и N.V.Nederlandse Gasunie (Нидерланды) [13, с. 96]. Таким образом, несмотря на сохранение значительной зависимости стран ЕС от импортного природного газа, происходит перераспределение объемов поставок между поставщиками не в пользу России. При этом сегодня главной альтернативой трубопроводному газу становится инновационный сжиженный природный газ (СПГ) [2, с. 73-82].

Общемировое потребление сжиженного природного газа растет примерно на 6 % ежегодно, в то время как трубопроводного газа – только на 2,4 % в год; доля СПГ в потреблении природного газа в энергетике уже составляет 10 % [3, с. 49]. Доля СПГ в общемировом экспорте постоянно растет и составляет уже 32 % – 346,6 млрд м³ природного газа из общего объема в 1 084,1 млрд м³ (данные 2016 г.). Тенденция замещения трубопроводного природного газа сжиженным отчетливо прослеживается в последние годы. Сохранение этой тенденции ожидается в долгосрочной перспективе (до 2040 г.) [5, с. 69-77].

Таким образом, экономическая привлекательность трубопроводного газа по сравнению с СПГ снижается. Это выражается и в утрате экономического значения так называемой groningenской модели ценообразования [14, с. 31], которая предполагает реализацию природного газа исключительно в рамках долгосрочных контрактов. Соответственно, бывшее инновационное значение теряют как сам трубопроводный газ, так и порядок определения контрактной цены, которая рассчитывается по так называемой «роттердамской формуле» в соответствии с котировками Роттердамской биржи (FOB ARA Barges). Торговля СПГ, изначально начавшаяся также в рамках долгосрочных контрактов, сегодня значительно изменяется, поскольку растет объем спотовой торговли СПГ на специализированных газовых биржах – хабах. Это ведет к становлению СПГ в качестве самостоятельного глобального продукта [12, с. 57-67].

На этом фоне в Российской Арктике ПАО «НОВАТЭК» реализует крупные СПГ-проекты: «Ямал СПГ» и «Арктик СПГ-2». Следует особо подчеркнуть, что реализация крупных инфраструктурных проектов в нефтегазовой сфере окажет положительное влияние на социально-экономическое развитие арктических регионов [например, 10, с. 275-279].

В рамках проекта «Ямал СПГ», ресурсной базой которого является Южно-Тамбейское месторождение, на западном берегу Обской губы построен п. Сабетта, рядом с которым размещен завод по сжижению природного газа. Введена в эксплуатацию первая очередь завода мощностью 5,5 млн т, отгрузки газа на газозовы арктического класса Arc7 [1, с. 55] ведутся с конца 2017 г. После ввода в эксплуатацию второй, третьей и четвертой очередей в 2018-2020 гг. общая мощность проекта достигнет 17,5 млн т СПГ. Отгрузки СПГ ведутся в страны Европы и АТР, с апреля 2018 г. – в рамках долгосрочных контрактов.

Проект «Арктик СПГ-2», реализуемый на базе Салмановского (Утреннего) месторождения, предполагает строительство СПГ-завода общей мощностью 16,5-18 млн т с запуском линий в 2022-2025 гг. Главным отличием проекта от предыдущего станет концепция размещения линий СПГ-завода на плавучих железобетонных платформах гравитационного типа, для строительства которых в Кольском заливе создаются четыре искусственных острова [7].

Таким образом, с учетом реализации указанных проектов, к 2025 г. общий объем производства арктического СПГ достигнет 35,5 млн т (почти 14 % от объема торговли СПГ в 2016 г.). В то же время, учитывая удаленность арктических месторождений от основных потребителей, реализация арктических СПГ-проектов требует обоснования экономического преимущества морской транспортировки газа в виде СПГ в сравнении с традиционной трубопроводной доставкой.

Методология исследования. Обоснование экономического преимущества морской транспортировки газа в виде СПГ заключается в выполнении сравнительного анализа себестоимости транспортировки 1 тыс. м³ природного газа от арктических месторождений крупнейшего газодобычного региона страны (Ямальская, Надым-Пурская и Пур-Тазовская нефтегазоносные области Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции [6, с. 15-18]) до ключевых сегодняшних и потенциальных потребителей российского природного газа.



Себестоимость транспортировки 1 тыс. м³ природного газа при его доставке по трубопроводам рассчитывается по формуле:

$$CP_{\text{pipeline}} = \frac{E_{\text{pipeline}}}{100} r,$$

где CP_{pipeline} – себестоимость транспортировки 1 тыс. м³ природного газа по трубопроводу, дол.; E_{pipeline} – протяженность трубопроводов для выбранного маршрута, км; r – средняя стоимость прокачки природного газа по трубопроводам для выбранного маршрута, дол. за 1 тыс. м³ на 100 км.

При расчете себестоимости доставки природного газа по трубопроводам конечным пунктом доставки принимается граница страны-потребителя газа.

Себестоимость транспортировки 1 тыс. м³ природного газа при его доставке морским путем в виде СПГ рассчитывается по формуле

$$CP_{\text{lng}} = L + \frac{\left(\frac{E \ln g \cdot 2}{S/24} + 1 \right) dfr}{C} + \frac{GTit}{C} \cdot 2 + Tr + P,$$

где CP_{lng} – себестоимость транспортировки 1 тыс. м³ природного газа при его доставке морским путем в виде СПГ, дол.; L – стоимость сжижения 1 тыс. м³ природного газа, дол.; $E \ln g$ – протяженность морского маршрута, морские мили (nm); S – скорость движения газовоза, узлы; dfr – суточная ставка фрахта газовоза, дол.; C – вместимость газовоза по объему СПГ, тыс. м³; GT – валовая вместимость газовоза; it – тариф ледокольной проводки судна за единицу валовой вместимости судна, дол.; Tr – стоимость перевалки 1 тыс. м³ СПГ с газовоза ледового класса на газовоз конвенционного типа (если применимо), дол.; P – стоимость прохода газовоза через Суэцкий канал в расчете на 1 тыс. м³ СПГ (если применимо), дол.

Дискуссия и результаты. При расчете себестоимости доставки природного газа морским путем в виде СПГ конечным пунктом доставки принимается порт отгрузки СПГ, в котором расположен регазификационный терминал (поставка на условиях CIF). В себестоимости доставки природного газа морским путем в виде СПГ учитывается круговой рейс судна (т.е. с учетом возврата в первоначальный порт на следующую погрузку), включая сутки, отведенные на погрузку или разгрузку СПГ.

В расчетах используются следующие коэффициенты для перевода единиц измерения: 1 т СПГ = 1,38 тыс. м³ природного газа в свободном виде; 1 м³ СПГ = 572,6 м³ природного газа в свободном виде; 1 MMBtu = 35,99 тыс. м³ природного газа в свободном виде.

Авторами разработаны формулы с учетом особенностей математического моделирования систем добычи и транспорта природного газа в Арктической зоне России [4, с. 705-716] для расчета себестоимости транспортировки природного газа при его доставке по трубопроводам и морским путем в виде СПГ. Рассчитаем такую себестоимость для выбранных маршрутов: в страны Северной Европы (на примере Германии), в страны Южной Европы (на примере Италии и Турции) и в страны Азиатско-Тихоокеанского региона (на примере Китая). Выбор государств обусловлен возможностью сравнения себестоимости доставки обоими видами транспорта при сопоставимости маршрутов.

В расчетах использованы следующие исходные данные. В зависимости от территории, по которой пролегает трубопровод, примеряются различные средние стоимости прокачка газа. Средняя стоимость прокачки газа по газопроводам ЕСГ России и по территории стран-транзитеров составляет 5,5 дол. за 1 тыс. м³ на 100 км; по территории Бельгии, Германии, Словакии и Австрии – 2,5 дол. за 1 тыс. м³ на 100 км; по территории Китая – 2,0 дол. за 1 тыс. м³ на 100 км.

Себестоимость сжижения 1 MMBtu природного газа составляет 2,85 дол., 1 тыс. м³ – 102,57 дол. Стоимость регазификации составляет 15 дол. Для доставки СПГ в страны Северной Европы и напрямую в страны АТР по Северному морскому пути используются газовозы арктического класса Arc7. Для последующей доставки в страны Южной Европы и страны АТР по «южному» маршруту через Суэцкий канал используются газовозы конвенционного типа Conventional без ледового класса; перевалка СПГ с газовозов Arc7 на газовозы Conventional выполняется в порту Зебрюгге. Скорость движения газовоза Arc7 во льдах (Карское море в зимне-весенний

период, остальные арктические моря в летне-осенний период в тяжелых ледовых условиях) составляет 10 узлов, а скорость движения газозовов обоих типов по чистой воде (в свободных от льда водах) – 18 узлов.

Вместимость газозова Arc7 по объему СПГ составляет 172,6 тыс. м³ СПГ (98 830,76 тыс. м³ природного газа в свободном виде), а газозова Conventional – 145 тыс. м³ СПГ (83 027 тыс. м³). Суточная ставка фрахта газозова Arc7 составляет 110 тыс. дол., газозова Conventional – 33,5 тыс. дол. Стоимость перевалки 1 тыс. м³ природного газа в порту Зебрюгге составляет 4,6 дол.; стоимость прохода газозова по Суэцкому каналу (в обе стороны) – 6,37 дол. за 1 тыс. м³ свободно природного газа или около 9 дол. за 1 т СПГ.

При движении газозова Arc7 в Карском море в зимне-весенний период и в остальных арктических морях в летне-осенний период в тяжелых ледовых условиях ему необходима ледокольная проводка. Стоимость ледокольной проводки рассчитывается, исходя из валовой вместимости газозова (128 806 ед.) и тарифа ледокольной проводки судна за единицу валовой вместимости: 5,42 дол. для Карского моря в зимне-весенний период, 4,38 дол. для остальных арктических морей в летне-осенний период.

Расчет себестоимости транспортировки газа по трубопроводам выполнен от месторождений Бованенковское НГК и Уренгойское НГК, а себестоимости транспортировки газа морским путем в виде СПГ – от месторождения Южно-Тамбейское ГК. Для сопоставления рассчитанной по маршрутам себестоимости транспортировки газа каждым из видов транспорта при расчете средних значений учтены дополнительные расходы на транспортировку природного газа между месторождениями: по маршруту «Южно-Тамбейское ГКМ – Бованенковское НГКМ» (общая протяженность 170 км) эти расходы составляют 9,35 дол., а по маршруту «Южно-Тамбейское ГКМ – Уренгойское НГКМ» (760 км) – 41,8 дол. Сравнение себестоимости трубопроводной (CP_{pipeline}) и морской (CP_{lng}) транспортировки 1 тыс. м³ природного газа с Южно-Тамбейского ГКМ (ЮТГМК) по основным маршрутам представлено в таблице.

Сравнение стоимости трубопроводной и морской транспортировки природного газа (дол./тыс. м³)

Маршрут транспортировки	Трубопроводная транспортировка		Морская транспортировка	
	Протяженность, км (средняя)	CP _{pipeline} (средняя)	Протяженность, км	CP _{lng}
ЮТГМК – Германия	4270	235,84	4700	152,98
ЮТГМК – Италия	5570	279,38	8840	152,06
ЮТГМК – Турция	5720	293,95	10330	153,56
ЮТГМК – Китай, через Суэцкий канал	7370	247,60*	24000	165,0
ЮТГМК – Китай, через Северный морской путь	7370	247,60*	11600	151,0

* Стоимость прокачки 1 тыс. м³ природного газа на 100 км по трубопроводу «Сила Сибири» составляет порядка 6,3 дол., по китайским магистральным трубопроводам – 2 дол.

По газопроводам в Германию российский арктический газ может доставляться по трем основным маршрутам: «Бованенковское НГКМ – Северный поток/Северный поток-2 – Германия» (общая протяженность 4 294 км); «Бованенковское НГКМ – Ямал – Европа – Германия» (4 160 км); «Уренгойское НГКМ – Ямал – Европа – Германия» (3 860 км). Себестоимость транспортировки 1 тыс. м³ газа по указанным маршрутам составляет 236,17; 228,80 и 212,30 дол. соответственно. С учетом дополнительных расходов на транспортировку газа с Южно-Тамбейского ГКМ средняя себестоимость трубопроводной доставки 1 тыс. м³ российского арктического газа в Германию составляет 235,84 дол.

По газопроводам в Италию российский арктический газ может доставляться по двум основным маршрутам: «Бованенковское НГКМ – Северный поток/Северный поток-2 – Италия» (общая протяженность 5 579 км, в том числе по территории Германии, Словакии и Австрии 1 285 км) и «Уренгойское НГКМ – Дружба – Италия» (5 254 км, в том числе по территории Словакии и Австрии 803 км). Себестоимость транспортировки 1 тыс. м³ газа по указанным маршрутам составляет 268,30 и 264,88 дол. соответственно. С учетом дополнительных расходов на транспортировку газа с Южно-Тамбейского ГКМ средняя себестоимость трубопроводной доставки 1 тыс. м³ российского арктического газа в Италию составляет 279,38 дол.



По газопроводам в Турцию российский арктический газ может доставляться по двум основным маршрутам: «Уренгойское НГКМ – Голубой поток – Турция» (общая протяженность 4 709 км) и «Уренгойское НГКМ – Турецкий поток – Турция» (5 220 км). Себестоимость транспортировки 1 тыс. м³ газа по указанным маршрутам составляет 259,00 и 287,10 дол. соответственно. С учетом дополнительных расходов на транспортировку газа с Южно-Тамбейского ГКМ средняя себестоимость трубопроводной доставки 1 тыс. м³ российского арктического газа в Турцию составляет 293,95 дол.

По газопроводам в Китай российский арктический газ может доставляться по маршруту «Уренгойское НГКМ – Сила Сибири-2 – Китай» (общая протяженность 2 700 км). Себестоимость транспортировки 1 тыс. м³ газа по указанному маршруту составляет 169,40 дол. Однако следует отметить, что основные потребители природного газа в Китае расположены в индустриально развитых районах страны – преимущественно на юго-востоке. Соответственно, себестоимость транспортировки природного газа в Китай представляется более корректным рассчитывать с учетом доставки не до границы страны, а до основных потребителей. Себестоимость дальнейшей транспортировки 1 тыс. м³ газа с северо-запада Китая на юго-восток составляет от 65,60 (Пекин, 3 280 км по территории Китая) до 90,80 дол. (Гуанчжоу, 4 540 км). Тогда с учетом дополнительных расходов на транспортировку газа с Южно-Тамбейского ГКМ средняя себестоимость трубопроводной доставки 1 тыс. м³ российского арктического газа в Китай составляет 247,60 дол.

Таким образом, средняя себестоимость транспортировки 1 тыс. м³ природного газа при его доставке по трубопроводам по всем рассмотренным маршрутам составляет 264,19 дол.

Рассмотрим стоимость морской доставки российского арктического газа в виде СПГ в Германию по двум маршрутам: «Южно-Тамбейское ГКМ (п. Сабетта) – Зебрюгге – Бельгийская ГТС – Германия» (в Зебрюгге расположены как перегрузочный терминал для проекта «Ямал СПГ», так и регазификационный терминал Zeebrugge); «Южно-Тамбейское ГКМ (п. Сабетта) – Брунсбюттель / Штаде (Германия)» (в одном из этих портов Германия планирует строительство собственного регазификационного терминала). Общая протяженность морского пути от п. Сабетта до Зебрюгге составляет 2 537,80 nm, включая 485,96 nm в акватории Карского моря и 2 051,84 nm в свободных от льда водах. После регазификации природный газ доставляется до Германии по Бельгийской ГТС (общей протяженностью 230 км). Себестоимость транспортировки 1 тыс. м³ по этому маршруту составляет в зимне-весенний период 153,64 дол., в летне-осенний – 139,51 дол. Общая протяженность морского пути от п. Сабетта до Брунсбюттель / Штаде составляет 2 429,81 nm, включая 1 943,85 nm в свободных от льда водах. Себестоимость транспортировки 1 тыс. м³ по этому маршруту составляет в зимне-весенний период 132,34, в летне-осенний – 118,21 дол. С учетом дополнительных расходов на транспортировку газа с Бованенковского НГКМ и Уренгойского НГКМ средняя себестоимость морской транспортировки 1 тыс. м³ российского арктического газа в виде СПГ в Германию составляет 152,98 дол.

Рассмотрим стоимость морской доставки российского арктического газа в виде СПГ в Италию по маршруту «Южно-Тамбейское ГКМ (п. Сабетта) – Зебрюгге – Ливорно (Италия)» (в Ливорно расположен регазификационный терминал LNG Toscana). Общая протяженность морского пути от п. Сабетта до Зебрюгге и, соответственно, себестоимость доставки газа по этому маршруту рассчитана ранее. В Зебрюгге выполняется перевалка СПГ на газовоз Conventional. Общая протяженность морского пути от п. Зебрюгге до Ливорно составляет 2 235,42 nm. Себестоимость транспортировки 1 тыс. м³ по всему маршруту от п. Сабетта до Ливорно составляет в зимне-весенний период 142,07 дол., в летне-осенний – 127,94 дол. С учетом дополнительных расходов на транспортировку газа с Бованенковского НГКМ и Уренгойского НГКМ средняя себестоимость морской транспортировки 1 тыс. м³ российского арктического газа в виде СПГ в Италию составляет 152,06 дол.

Рассмотрим стоимость морской доставки российского арктического газа в виде СПГ в Турцию по маршруту «Южно-Тамбейское ГКМ (п. Сабетта) – Зебрюгге – Алиага (Турция)» (в Алиага расположены регазификационные терминалы Aliaga LNG и Etki LNG). Общая протяженность морского пути от Сабетта до Зебрюгге и, соответственно, себестоимость доставки газа по этому маршруту рассчитана ранее. В Зебрюгге выполняется перевалка СПГ на газовоз Conventional. Общая протяженность морского пути от Зебрюгге до Алиага составляет 3 039,96 nm. Себестоимость транспортировки 1 тыс. м³ по всему маршруту от п. Сабетта до Алиага составляет в зимне-

весенний период 143,57, в летне-осенний – 129,45 дол. С учетом дополнительных расходов на транспортировку газа с Бованенковского НГКМ и Уренгойского НГКМ средняя себестоимость морской транспортировки 1 тыс. м³ российского арктического газа в виде СПГ в Турцию составляет 153,56 дол.

Рассмотрим стоимость морской доставки российского арктического газа в виде СПГ в Китай по следующим маршрутам: «Южно-Тамбейское ГКМ (п. Сабетта) – Зебрюгге – Цаофэйдянь / Тяньцзинь (Китай)» (в указанных портах, располагающихся вблизи г. Пекин, находятся регазификационные терминалы Hebei Tangshan Caofeidian LNG и Tianjin соответственно); «Южно-Тамбейское ГКМ (п. Сабетта) – Зебрюгге – Яншань / Жудун (Китай)» (в указанных портах, располагающихся вблизи г. Шанхай, находятся регазификационные терминалы Shanghai Yangshan и Jiangsu Rudong LNG соответственно); «Южно-Тамбейское ГКМ (п. Сабетта) – Зебрюгге – Шэньчжэнь / Дунгуань / Чжухай (Китай)» (в указанных портах, располагающихся вблизи г. Гуанчжоу, находятся регазификационные терминалы Guangdong Dapeng LNG I, Guangzhou Dongguan LNG и Guangdong Zhuhai LNG соответственно); «Южно-Тамбейское ГКМ (п. Сабетта) – Северный морской путь – Цаофэйдянь / Тяньцзинь (Китай)»; «Южно-Тамбейское ГКМ (п. Сабетта) – Северный морской путь – Яншань / Жудун (Китай)»; «Южно-Тамбейское ГКМ (п. Сабетта) – Северный морской путь – Шэньчжэнь / Дунгуань / Чжухай (Китай)».

Общая протяженность морского пути от п. Сабетта до Зебрюгге и, соответственно, себестоимость доставки газа по этому маршруту рассчитана ранее. В Зебрюгге выполняется перевалка СПГ на газозов Conventional. Общая протяженность морского пути от Зебрюгге через Суэцкий канал составляет до китайских портов: Цаофэйдянь / Тяньцзинь – 11 339,09 nm, Яншань / Жудун – 10 745,14 nm, Шэньчжэнь / Дунгуань / Чжухай – 9 989,20 nm. Себестоимость транспортировки 1 тыс. м³ по всему маршруту от п. Сабетта до указанных портов составляет 166,25; 165,14 и 163,73 дол. соответственно.

Общая протяженность морского пути от п. Сабетта по Северному морскому пути до Берингова пролива составляет 2 370,41 nm. Протяженность дальнейшего пути до китайских портов: Цаофэйдянь / Тяньцзинь – 3 785,10 nm, Яншань / Жудун – 3 542,12 nm, Шэньчжэнь / Дунгуань / Чжухай – 4 287,26 nm. Себестоимость транспортировки 1 тыс. м³ по всему маршруту от п. Сабетта до указанных портов составляет 145,17; 143,92 и 147,76 дол. соответственно. В случае тяжелых ледовых условий, с учетом проводки ледоколом, себестоимость транспортировки 1 тыс. м³ по указанным маршрутам составляет 156,59; 155,34 и 159,18 дол. соответственно.

С учетом дополнительных расходов на транспортировку газа с Бованенковского НГКМ и Уренгойского НГКМ средняя себестоимость морской транспортировки 1 тыс. м³ российского арктического газа в виде СПГ в Китай составляет 172,95 дол.

Таким образом, средняя себестоимость транспортировки 1 тыс. м³ природного газа при его доставке морским путем в виде СПГ по всем рассмотренным маршрутам составляет 157,89 дол.

Заключение. На основании изложенных расчетов выполним сравнительный анализ себестоимости трубопроводной и морской (в виде СПГ) транспортировки российского арктического природного газа по приведенным маршрутам. Морская доставка 1 тыс. м³ дешевле трубопроводной при доставке: в Германию – на 82,86 дол. (–35,1 %); в Италию – на 127,32 дол. (–45,6 %); в Турцию – на 140,39 дол. (–47,8 %); в Китай – на 74,65 дол. (–30,1 %). По всем рассмотренным маршрутам морская доставка 1 тыс. м³ российского арктического газа в виде СПГ дешевле трубопроводной в среднем на 106,30 дол. (–40,2 %).

Выполненные авторами расчеты подтверждают экономическое преимущество морской транспортировки арктического природного газа в виде СПГ на ключевые существующие и перспективные рынки сбыта природного газа. Этим обосновывается необходимость рациональной замены трубопроводного газа сжиженным на рынках стран Европы (особенно Южной, где конкурентоспособность СПГ выше) и увеличение экспорта сжиженного природного газа в страны АТР. Учитывая актуальные тенденции развития мирового и региональных рынков природного газа, это позволит России сохранить и увеличить собственную долю в мировом импорте природного газа, выйти на новые рынки сбыта и диверсифицировать направления транспортировки природного газа.

Однако, для становления Российской Федерации конкурентоспособным экспортером природного газа в виде СПГ, требуется:



- продолжить реализацию запущенных и приступить к реализации новых проектов по производству и транспортировке природного газа в сжиженном виде;
- увеличить инвестиции в разработку собственных технологий сжижения газа, которые позволят сократить себестоимость данного этапа транспортировки СПГ;
- проработать вопрос об уровне требуемого ледового усиления для газозовозов, исходя из опыта эксплуатации газозовозов Arc7 в рамках проекта «Ямал СПГ», что при снижении ледового класса судов позволит уменьшить ставку фрахта газозовозов;
- локализовать на российских судовых верфях строительство газозовозов для транспортировки СПГ;
- сохранить и увеличить государственную поддержку компаний, выполняющих разработку новых технологий в сфере производства и транспортировки СПГ, а также непосредственно его производство и транспортировку.

Указанные меры позволят сократить себестоимость морской транспортировки природного газа в виде СПГ, что значительно повысит конкурентоспособность арктического природного газа на мировом и региональных рынках природного газа.

Благодарность. Исследование выполнено в соответствии с базовой частью государственного задания высшим учебным заведениям Минобрнауки России в части инициативных научных проектов по теме НИР «Рациональная организация экономического освоения и морской транспортировки энергетических ресурсов в Российской Арктике», № 13.12713.2017/8.9.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агарков С.А. Влияние модернизации морской газотранспортной системы на развитие арктического региона / С.А.Агарков, Д.А.Матвишин // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2017. Т. 2. № 53. С. 50-57.
2. Агарков С.А. Экономические региональные особенности морской транспортировки сжиженного природного газа / С.А.Агарков, Г.П.Евдокимов, С.Ю.Козьменко // Геополитика и безопасность. 2015. № 2 (30). С. 73-82.
3. Андреев П.С. Преимущества и перспективы расширения экспорта сжиженного природного газа из России в страны АТР // Азиатско-Тихоокеанский регион: экономика, политика, право. 2015. № 2 (35). С. 47-55.
4. Бондарев Э.А. Особенности математического моделирования систем добычи и транспорта природного газа в Арктической зоне России / Э.А.Бондарев, И.И.Рожин, К.К.Аргунов // Записки Горного института. 2017. Т. 228. С. 705-716. DOI: 10.25525/PMI.2017.6.705.
5. Кравченко М.П. Геополитика природного газа // Вестник Московского государственного лингвистического университета. Серия: общественные науки. 2015. № 2 (713). С. 69-77.
6. Кравченко М.Н. Перспективы нефтегазоносности глубокопогруженных отложений осадочного чехла северных районов Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции // Геология нефти и газа. 2012. № 6. С. 13-21.
7. О заключении договоров о создании 4 искусственных земельных участков в Кольском заливе (среднее колено) Баренцева моря: Распоряжение Правительства РФ от 15.06.2017 № 1245-р // Собрание законодательства РФ. № 25. Ст. 3739. 19.06.2017.
8. Остапенко Н.А. Нефтегазовые доходы в федеральном бюджете Российской Федерации // Аллея науки. 2017. № 15. Т. 2. С. 269-271.
9. Стратегия морской деятельности и экономики природопользования в Российской Арктике / С.Ю.Козьменко, А.Н.Савельев, В.С.Селин, А.А.Щеголькова // Морской сборник. 2012. Т. 1988. № 11. С.58-63.
10. Череповицын А.Е. Экономическое развитие региона в ходе реализации морских нефтегазовых проектов (на примере освоения месторождений проектов «Сахалин-1» и «Сахалин-2») / А.Е.Череповицын, Н.В.Смирнова // Записки Горного института. 2013. Т. 205. С. 275-279.
11. Швеиц Н.Н. Нефтегазовые ресурсы Арктики: правовой статус, оценка запасов и экономическая целесообразность их разработки / Н.Н.Швеиц, П.В.Береснева // Вестник МГИМО-Университета. 2014. № 4 (37). С. 60-67.
12. Щеголькова А.А. Модернизация системы транспортировки арктического природного газа в стратегической перспективе / А.А.Щеголькова, Л.Е.Евграфова // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2017. Т. 2. № 53. С. 57-67.
13. Щеголькова А.А. Пространственная организация транспортировки энергетических ресурсов: экономика и геополитика // Геополитика и безопасность. 2015. № 2 (30). С. 95-99.
14. Kopolyanik A.A. Evolution of Gas Pricing in Continental Europe: Modernization of Indexation Formulas Versus Gas to Gas Competition. Dundee: University of Dundee. 2010. 31 p.

Авторы: С.Ю.Козьменко, д-р экон. наук, профессор, fregat22@mail.ru (Мурманский государственный технический университет, Мурманск, Россия). В.А.Маслобоев, д-р техн. наук, профессор, masloboev@ksc.ru (Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр РАН», Апатиты, Россия). Д.А.Матвишин, младший научный сотрудник, beshtik@rambler.ru (Мурманский государственный технический университет, Мурманск, Россия).

Статья поступила в редакцию 15.05.2018.

Статья принята к публикации 10.07.2018.



УДК 330.83

СОВРЕМЕННАЯ СПЕЦИФИКА КОРПОРАТИВНЫХ ОТНОШЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ ВЕРТИКАЛЬНО-ИНТЕГРИРОВАННОЙ КОМПАНИИ

А.А.ЛАПИНСКАС

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Рассматриваются особенности современной модели российских корпоративных отношений (КО) на примере вертикально-интегрированной и диверсифицированной компании. На состояние КО до сих пор оказывают влияние последствия процессов приватизации государственных и муниципальных предприятий в 1990-е годы, в результате которых сложилась своеобразная экономическая модель олигархического капитализма и специфическая модель КО. На конкретном примере проанализированы плюсы и минусы данной модели с учетом процессов консолидации предпринимательской деятельности в металлургии и золотодобывающей отрасли. Сделан вывод о преобладании квазикорпоративных отношений, предложены направления совершенствования КО.

Ключевые слова: корпоративные отношения; акционерное общество; эффекты масштаба; мажоритарные и миноритарные акционеры; стейкхолдеры; аффилированные лица

Как цитировать эту статью: Лапинскас А.А. Современная специфика корпоративных отношений на примере вертикально-интегрированной компании // Записки Горного института. 2018. Т. 233. С. 561-570. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.561

Введение. Нередко понятия «корпорация», «корпоративные связи, отношения» применяются ко всему, что относится к организационно-управленческим проблемам современных российских акционерных обществ. Термин «корпорация» в широком смысле подразумевает организацию по достижению общих целей (например, максимизация дохода) и защите интересов членов данного объединения. Корпорации в Европе (чуть позже и в России) в большом количестве возникли в средние века как объединения лиц по сословному или профессиональному признаку. В узком смысле под этим термином подразумевается акционерное (публичное) общество как организационно-правовая форма субъекта хозяйствования. Члены корпорации – акционеры являются собственниками (совладельцами) имущества организации, а текущие вопросы хозяйственной деятельности решает наемный менеджмент. В связи с этим возникает целая система противоречивых отношений, так как каждый участник имеет свои определенные интересы. Эта система включает отношения между миноритарными, мажоритарными, рядовыми акционерами и обществом в целом, обществом как эмитентом ценных бумаг и инвесторами, обществом и государственными органами и т.д.

Актуальность темы обусловлена следующим: 1) вертикально-интегрированные и диверсифицированные корпорации в добывающих отраслях и металлургии определяют современный российский производственный и экспортный потенциал; 2) существующие теоретические и практические различия в формах КО в РФ и странах «триады» (США, ЕС, Япония) требуют анализа причин и последствий этих различий; 3) сложившаяся модель КО в современной российской экономике неоднозначна по своей эффективности и нуждается в углубленном изучении на теоретическом и практическом уровне.

Методология. В результате приватизации государственных и муниципальных предприятий в российской экономике еще в 1990-е гг. появилось множество акционерных обществ открытого типа (АООТ) – корпораций. В связи с этим появился и новый тип социально-экономических отношений – КО. Форма и условия их появления определили значительную специфику возникших российских КО, которые по ряду причин, рассмотренных в данной статье, можно определить как «квазикорпоративные». Сформулируем основы методологии для формирования нового научного направления «Причины и условия формирования квазикорпоративных отношений в российской золотодобывающей отрасли»:

1) «корпоративные отношения» – это связи между обладателями имущественных отношений (акций, долей, паев) и наемным менеджментом организации, а также между акционерами и внешними субъектами (органами государственного и муниципального управления, другими организациями и лицами), в том числе так называемыми «стейкхолдерами»;



2) вводятся понятия «корпоративные отношения в узком смысле» – между акционерами и наемным менеджментом и «корпоративные отношений в широком смысле» – с многочисленными внешними субъектами, включая «стейкхолдеров» и др.;

3) выделяются и даются варианты определений «формальных» и «неформальных» КО;

4) с учетом специфики современной российской экономики вводятся понятия «квазикорпорация» и «квазикорпоративные отношения»; они определяются отсутствием в современном российском обществе широкого слоя субъектов корпоративных отношений – держателей акций частных, государственных и смешанных корпораций, отсюда проблемы с формированием среднего класса, который является основой стабильного социально-экономического развития страны в долгосрочной перспективе;

5) эффективность КО определяется социально-экономическими выгодами субъектов КО; однако, участие миноритарных акционеров в решении основных финансово-хозяйственных задач незначительно (исследование проведено на примере металлургической и золотодобывающей отраслей);

6) в результате приватизации в 1990-е годы в российской экономике возникла олигархическая форма собственности, которая значительно модифицировала КО по сравнению с их классическим пониманием;

7) современная российская модель КО имеет не только минусы (что отмечают многие авторы), но и плюсы, отмеченные в данной статье;

8) выделена альтернативная форма развития отношений собственности, которая могла бы способствовать повышению эффективности КО в российской экономике в целом и в добывающих отраслях в частности;

9) в качестве доказательной базы проведен анализ разделов первичных документов ПАО «Северсталь» и ПАО «Бурятзолото», касающихся содержания КО.

Результаты и их обсуждение. КО – это прежде всего социально-экономические связи между субъектами самой корпорации, включают отношения между различными группами участников корпорации, рядовыми участниками и менеджментом, менеджментом и советом директоров как представителем акционеров, мажоритарными и миноритарными акционерами и т.д. Сложность корпоративных взаимоотношений порождает проблему экономической власти, ее «прозрачности», подотчетности, ответственности, реальной и мнимой мотивации управленческой деятельности и др.

КО – стандартный подход; эффекты масштаба, холдинги. Понятие «корпорация» используется в нескольких значениях. Чаще всего применяется как определение организации, функционирующей в сфере экономики и обладающей набором специфических признаков. «Корпорация – это разновидность организации, которая отличается большими размерами и географией продаж и функционирования, наличием широкой сети экономически независимых организаций, входящих в нее» [11, с. 16]. В данном примере подчеркиваются масштабы организации. Некоторые авторы в своих определениях акцентируют формальные, другие – неформальные аспекты термина «корпорация».

Под определение «корпорация» также попадают: «совокупность лиц, объединившихся для достижения общих целей, осуществляющих совместную деятельность и образующих самостоятельный субъект права – юридическое лицо»; любое акционерное общество; некоторые формы международных хозяйственных связей и др. [10, с. 17]. М.А.Овчинников подчеркивает значение неформальных отношений, в частности, понятия единой «команды», в которой все сотрудники привержены общим целям и базовым ценностям. «Это коллектив единомышленников, объединившихся вокруг лидера. Команда обычно существует и действует как структура, внутри которой неформальные отношения могут иметь не меньшее, а порой и более важное значение, нежели формальные» [10, с. 58].

В этом смысле «корпорация» (т.е. – общество, союз, объединение людей, имеющих общие интересы) реализуется в качестве проекции личных интересов на организацию, в которой члены «команды» в предельном варианте не разделяют свои и общие интересы. Корпоративные отношения в широком смысле не имеют жесткой институционализации, они складываются как неявные и зачастую не всегда четко фиксируемые взаимодействия. На практике довольно сложно

разграничить явные и неявные, организационные и корпоративные отношения, которые тесно переплетаются. Важный аспект неформальных КО – благоприятность внутренней атмосферы.

А.В.Гумеров, наоборот, акцентирует формальную сторону понятия «корпорация»: «корпорация представляет собой законодательно определенную организацию, совокупность юридических лиц с правом ограниченной ответственности, формирующих ее имущество и осуществляющую как коммерческую, так и некоммерческую деятельность, при этом взаимодействие участников КО несет не суммарный, а эмерджентный эффект» [5]. «Корпорация создается для обеспечения относительной стабильности рыночной экономики. Масштабы корпорации, концентрация структур позволяют существенно влиять не только на определенный экономический сектор или регион, но и на развитие страны и мира в целом, обеспечивая определенную стабильность, планируемость, регулируемость и прогнозируемость рыночной экономики» [5].

Современная макроэкономическая модель национального хозяйства представляет собой не чисто рыночную, а смешанную организационно-управленческую структуру, сочетающую рыночную конкуренцию и элементы планомерности. В этом аспекте корпорации играют мезо- и макроэкономическую роль на основе реализации проектов и формальных и неформальных соглашений между корпорациями и стейкхолдерами. При этом происходит симбиоз административного (унитарного) и рыночного регулирования, когда значительные производственные инфраструктуры одновременно контролируются рынком и самой корпорацией, в той или иной степени формирующей этот рынок.

На значение масштабности единой организации обращает внимание О.В.Брижак: «Современные российские корпорации объединяют большое количество предприятий. Это позволяет сконцентрировать ресурсы, необходимые для реализации инвестиционных проектов, выхода на новые рынки и т.д. Кроме того, укрупнение обеспечивает стабильность и возможность решать более масштабные задачи» [3]. Именно концентрированная собственность в разных формах нередко считается основным экономическим механизмом корпоративного контроля, который формирует базу для реального влияния инвесторов и способствует повышению экономической эффективности. «Концентрированная собственность» дает возможность максимального использования положительного эффекта масштаба («эмерджентность»), однако многие авторы, акцентируя положительный, забывают про отрицательный эффект масштаба, который можно в какой-то степени нейтрализовать путем создания холдинговой структуры.

Многие авторы путают понятия «корпорация» и «холдинг». Холдинг – это акционерное общество, владеющее контрольным пакетом акций юридически самостоятельных предприятий (дочерние и зависимые общества – ДЗО) для осуществления контроля над ними. Компании, входящие в холдинг, заключают коммерческие сделки от своего имени. Однако право решения основных вопросов, относящихся к их деятельности, принадлежит холдинговой компании. Таким образом, основное преимущество холдинговой структуры по сравнению с унитарной заключается в сочетании единой стратегии и возможности относительно эффективного решения оперативных задач на уровне низовых звеньев, что обеспечивает их юридическая и экономическая самостоятельность. Соответственно, холдинг – это подобие кластера, состоящего из большего или меньшего количества корпораций. В масштабах холдинга КО еще более усложняются: двойственность положения корпоративных объединений, с одной стороны, как совокупности независимых юридических лиц, а с другой стороны – как единого хозяйствующего субъекта, тоже составляет проблему развития КО, создания условий эффективного управления.

Таким образом, стандартным (классическим) подходом КО можно определить как систему формальных и неформальных отношений, складывающихся между субъектами КО вследствие осознания ими общности целей и задач, определении единой системы ценностей и соответствующих им атрибутов; как процесс объединения организационных и финансовых ресурсов для достижения общих целей.

КО – современный подход; положительный и отрицательный эффекты масштаба. Важнейшей проблемой анализа КО является проблема экономической власти. Одним из первых эту проблему всесторонне анализировал видный американский экономист Дж. К.Гэлбрейт [17]. Он доказывал, что по мере развития корпорации управление ею переходит от акционеров к технократии; по мере развития индустриальной системы изменились цели деятельности корпо-



раций – основной целью становится уже не получение максимальной прибыли, а экспансия (слияния и поглощения). По мнению Гэлбрейта, это соответствует интересам общества [17, с. 16], однако, это не всегда так.

Дж. К. Гэлбрейт обратил внимание, что крупный размер предприятия необходим для стабильности и возможности стратегического планирования, которое позволяет максимально устранить неопределенность рынка. Крупные размеры обязательны также для сектора экономики, где единственным покупателем выступает государство. Гэлбрейт полагал, что под углом зрения потребностей планирования (контроля над предложением и спросом, обеспечения капиталом, минимизации риска и др.) желательный размер фирмы не имеет четкого верхнего предела: «возможно, что чем крупнее фирма, тем лучше. Корпоративная форма отвечает этой потребности» [17, с. 124]. Это весьма спорный тезис, оправдывающий концентрацию корпоративной власти.

Многие современные зарубежные экономисты отмечают, что реальные корпорации значительно отличаются от образа, навеянного формально-юридической и неформальной характеристикой корпорации [13, 18, 21]. Крупные корпорации пользуются на рынках, где они закупают материалы, сырье, оборудование и рабочую силу и продают свои готовые продукты, гораздо большим влиянием, чем «единоличный собственник». Корпорация нередко лишает своих акционеров возможности управлять ею (проблема миноритарных акционеров, часто акцентируемая российскими авторами), вырастает до огромных размеров, распространяет свою деятельность на области, совершенно не связанные с основной отраслью, выступает как монополия в тех случаях, когда она покупает, и как монополия в тех случаях, когда она продает, что явно не вписывается в неоклассический образ корпорации, функционирующей в условиях рыночной системы.

Главная объективная причина экспансии корпораций и возникновения указанных явлений – стремление к использованию положительного эффекта масштаба («эмерджентности»). Однако, мало кто обращает внимание, что по мере роста масштабов производства на определенной стадии возникает и отрицательный эффект масштаба, который оказывает значительное влияние на эффективность функционирования крупной корпорации любой формы собственности и развитие КО.

Если о причинах и последствиях положительного эффекта масштаба говорится повсеместно, то этого нельзя сказать про отрицательный. В крупнейших хозяйственных организациях при наличии недостаточно эффективной организационно-управленческой структуры операционные издержки могут существенным образом влиять на динамику общих средних издержек (АТС – average total costs), зеркальным отражением которой является кривая эффективности. Усложнение управленческой вертикали в процессе концентрации собственности и рост объемов полномочий верхних «этажей» управления создают основу для возникновения отрицательного эффекта масштаба. Он проявляется прежде всего в росте АТС и снижении эффективности функционирования организации в целом.

Положительный эффект масштаба (эффект синергии, эмерджентность) в крупных организациях возникает благодаря простой и сложной кооперации факторов производства; отрицательный – в результате снижения эффективности обратных информационных связей: верхние уровни управления начинают испытывать хроническую нехватку времени для своевременной ассимиляции полученной информации, для нижних это проявляется потерей мотивации труда, отсюда – рост тенденций оппортунистического поведения, необходимость многоуровневой системы контроля и т.д. Увеличение размера хозяйственной организации и рост степени централизации управления неизбежно ведет к ужесточению вертикальных (иерархических) связей и падению эффективности обратных связей. Передача информации по этим уровням сопровождается искажениями, которые, как показывает опыт функционирования крупных корпораций, являются кумулятивными и экспоненциальными по форме [7, с. 123-129]. Эти явления приводят к фактической потере контроля над низовыми структурными подразделениями, а также к материальным и финансовым потерям, превышающим доходы от роста масштабов производства. С точки зрения эффективности управления этот предел определяется как «граница управляемости», причины возникновения которой описал еще А.А.Богданов [2]. Отрицательный эффект масштаба способствует нарушению принципа «организационного равновесия», сформулированного А.А.Богдановым. Безусловно, это отрицательно сказывается также и на эффективности КО.

Следовательно, подход Дж. Гэлбрейта и других экономистов, одобряющий неограниченный рост масштабов корпорации, является неверным: неограниченная экспансия в виде слияний и поглощений приводит к значительному росту внутрифирменных транзакционных издержек и снижению эффективности функционирования данной хозяйственной организации. Следовательно, эффективная корпорация должна обладать организационно-управленческой структурой, соответствующей требованиям эффектов масштаба, что непосредственно связано и с эффективностью КО. Для крупных корпораций оптимальной организационно-управленческой структурой является холдинг [11].

Необходимо учитывать, что и в современных развитых странах КО значительно модифицировались по сравнению с «неоклассической моделью». Если с точки зрения неоклассической модели эффективность компании оценивается согласно динамике товарооборота, прибыли и капитализации [14], то в современных условиях корпорация позиционируется в зависимости и от оценки ее деятельности потребителями, властями, средствами массовой информации и т.д., сотрудничество с которыми становится все более важной задачей в работе любой корпорации. В связи с этим появился новый термин – «стейкхолдер-менеджмент». Содержание этого термина прежде всего связано с трудами Р.Фримана, выделившего лиц, оказывающих влияние на действия компании, и лиц, на которых эти действия влияют [15, с. 58].

К стейкхолдерам относятся лица, заинтересованные в работе предприятия, и лица, имеющие имущественные права, долю и другие условия в отношении компании, отвечающие их потребностям и ожиданиям. Некоторые авторы предлагают более узкое определение данного термина, относя к стейкхолдерам только лица и группы, без поддержки которых корпорация может прекратить свое существование [12]. А.Фридмэн и С.Миль обращают внимание на различие между лицами, чей интерес к бизнесу основан на нормах законодательства, и лицами, чьи интересы не имеют нормативно-правовой базы [16].

Другой современный теоретический подход к развитию сферы КО – это социальная перспектива, которая основывается на теории ресурсной зависимости в контексте влияния социальных сетей на формирование и состав совета директоров [19]. Некоторые авторы приходят к выводу, что действия организации настолько интегрированы в социальные сети, что поведение совета директоров в значительной степени определяется устойчивыми корпоративными и общественными отношениями. Указанные представления значительно расширяют неоклассическое толкование термина КО.

Российская специфика КО. В неоклассическом понимании КО одним из основных принципов их структурирования является принцип разделения прав собственности и контроля. По мнению ряда авторов, в российской модели корпоративного управления этот принцип обычно не признается и преобладает «инсайдерская» модель корпоративного контроля, для которой характерно совмещение функций владения и управления. Как отмечает Р.И.Капелюшников, одна из характерных черт постприватизационного периода состоит в том, что по мере концентрации собственности у внешних акционеров акцент постепенно смещался с проблемы контроля над действиями менеджеров на проблему взаимоотношений между различными внешними акционерами, главным образом между владельцами крупных и мелких пакетов акций. Широкое распространение получила практика экспроприации мелких акционеров крупными собственниками, контролирующими деятельность предприятия [6]. По мнению А.В.Бузгалина, сложилось «лично-клановое владение корпорациями», т.е. контроль над большинством крупных отечественных предприятий принадлежит не широкому кругу акционеров, владеющих мелкими и средними пакетами акций, «а группам частных лиц, состоящим из нескольких партнеров» [4], или всего одному крупному держателю акций. О.В.Брижак данную группу лиц определяет как «корпоративную номенклатуру, сосредоточившую в своих руках преобладающие массы капитала и поэтому занимающую господствующее положение в присвоении дохода» (природной, корпоративной и прочей ренты). Это приводит к углублению проблемы привлечения инвестиций, внедрения инноваций и снижению эффективности КО [3].

Ж.С.Беляева обращает внимание на следующую характеристику современной российской модели КО: из существующих наделенных властью органов компании (общее собрание, совет директоров и глава) «первый преднамеренно отстранен от дел компании, второй не принимает активного участия в них, а контроль находится в руках главы компании» [1]. Его основная цель –

реализовать потенциал предприятия, а главный критерий эффективности – производительность (а не рост капитализации согласно неоклассической модели КО).

Таким образом, современная модель российских КО обладает следующими признаками:

1) чрезмерная концентрация власти и финансов возрождает «докорпоративного» единоличного собственника, который возглавляет совет директоров корпорации; 2) контроль над корпорациями принадлежит не широкому кругу собственников (как это было предусмотрено в программе приватизации), а ограниченной группе лиц и (или) государству; 3) эта группа лиц получает 70-100 % дивидендов в качестве корпоративной ренты; 4) преобладание инсайдерской модели управления (объединение прав собственности и контроля) сводит к нулю роль общего собрания акционеров как высшего органа управления корпорацией; 5) отрицательный эффект масштаба, возникающий как следствие концентрации собственности и власти, приводит к существенному росту организационных транзакционных издержек и снижению эффективности, порождает оппортунистическое поведение, как противоположность корпоративному поведению субъектов организации; 6) отстранение мелких акционеров от управления производством и финансовыми потоками, решения вопросов слияний и поглощений, диверсификации производства и сбыта, продажи активов, изменения размеров уставного капитала и других важнейших вопросов развития корпорации – вплоть до полной их экспроприации; 7) отсутствие внешнего управления и неразвитость механизмов корпоративного контроля; 8) злоупотребления административным ресурсом; 9) закрытость или непрозрачность информации; 10) сложная и запутанная структура собственности; все это определяется как «лично-клановое» владение корпорациями, «корпоративная номенклатура»; 11) не всегда обоснованные с правовой точки зрения слияния и поглощения; 12) извлечение инсайдерской ренты осуществляется за счет урезания инвестиций и заработной платы, нарушения прав рядовых акционеров, нецелевого расходования средств, с помощью сделок с аффилированными лицами, оффшорных схем, уклонения от уплаты налогов и т.д.; 13) понятие «единая команда» распространяется не только на субъектов КО, но и на сотрудников компании, не являющихся ее акционерами. Все эти особенности современной российской модели КО многие авторы представляют как признаки деградации инвестиционных и инновационных процессов, системы КО в целом. Подобные КО можно определить как «квазикорпоративные».

На наш взгляд, указанные проблемы не стоит абсолютизировать и делать поспешные выводы о неэффективности современной модели российских КО. Это довольно спорные утверждения, так как стремление к личному обогащению, в том числе путем извлечения ренты, нормально сочетается с инновационным развитием в корпоративном секторе; данный постулат (принцип «невидимой руки») был сформулирован еще А.Смитом и считается классическим (но его нельзя абсолютизировать). Трудно согласиться и с утверждением, что «в некоторых корпорациях менеджмент в основном не только не имеет опыта работы в области высоких технологий, но и вообще инженерно-технического образования, т.е. есть плохо представляет сущность и значение тех или иных проектов и инноваций, сосредотачиваясь на их финансовых показателях и коммерческой стороне» [8].

В жесткой олигополистической конкурентной борьбе такие корпорации быстро потерпели бы поражение: в рынок олигополистической структуры очень трудно войти и трудно там удержаться (тем более на международном уровне). КО в российской модели в основном воспринимаются как забота о персонале компании и благотворительность в качестве рекламы компании. КО в этом случае охватывают вопросы социальной политики в отношении работников (повышение квалификации и образование, система мотивации; охрана здоровья и улучшение условий труда; добровольное корпоративное медицинское и пенсионное страхование и др.); работа над формированием и внедрением корпоративной культуры компании.

Важной характеристикой российской модели КО является высокая ценность лидерства в системе управления компанией. «Реализация основанной на лидерстве стратегии требует широкого использования ресурсов и скоординированной работы последователей, что является западной характеристикой лидерства» [1]. С этим можно согласиться и обратить внимание на то, что современная российская модель КО не является полностью уникальной, а в ряде случаев соответствует современным моделям ведущих стран.

Корпорации с высокой ролью лидерства в совете директоров в частности и в компании в целом в России наиболее успешно управляют бизнес-процессами и эффективнее выстраивают от-

ношения с внешней деловой средой, по этой причине их можно расценивать как социально ответственные. Развитие лидерства в корпорации и в процессах корпоративных отношений является механизмом, который довольно успешно использует инновационные подходы через потенциал более высокой степени организационного и социально-экономического превосходства над конкурентами.

В целом заимствованные и уникальные черты российской модели КО уже приняли устойчивую форму. За последние 15 лет сформировалась особая российская модель корпоративного управления, отличная от англо-американской, европейской или японской. Регулирующие органы стремятся к внедрению культуры корпоративного управления посредством специально разработанных принципов надлежащей практики корпоративного управления для России.

На наш взгляд, перечисленные выше особенности российской модели КО не являются препятствием для позитивного развития компании, которое возникает, когда для разрешения противоречий и предотвращения конфликтов применяются адекватные меры, например, введение современных норм корпоративного управления, приглашение независимых директоров, проведение внешнего аудита и раскрытие информации, создание определенной корпоративной культуры.

В результате принятия рассмотренных мер у корпорации появляются хорошие перспективы развития: обычно повышается инвестиционная привлекательность, лояльность акционеров и сотрудников, возникают признаки снижения транзакционных издержек (т.е. преодоления последствий отрицательного эффекта масштаба), повышения производительности труда. Большинство успешно развивающихся российских корпораций выбрали именно такую стратегию развития, в частности, добывающие и металлургические корпорации – ПАО «Газпром», «Роснефть», «ЛУКОЙЛ», «Северсталь» и др.

Особенности российской модели КО на примере вертикально-интегрированной компании. Приведем анализ КО на примере ПАО «Северсталь» по линии дочерних обществ Nordgold и ПАО «Бурятзолото». ПАО «Северсталь» – одна из крупнейших в мире вертикально-интегрированных сталелитейных и горно-добывающих компаний, с активами в России, Белоруссии, Украине, Казахстане, Латвии, Польше, Италии, Либерии. Акции «Северстали» включены в котировальный список первого уровня Московской биржи, а депозитарные расписки имеют листинг класса «стандарт» на Лондонской фондовой бирже.

«Северсталь» соблюдает требования нормативных документов: Рекомендации к применению Кодекса корпоративного управления (2014 г.), утвержденные Центральным банком России и рекомендованные к применению акционерным обществам, ценные бумаги которых находятся в обращении на бирже (www.cbr.ru); Британский кодекс корпоративного управления 2016 г. (www.frc.org.uk).

Содержание КО отражается в государственных и корпоративных правовых актах и документах: в уставах, учредительных договорах, годовых отчетах, кодексах корпоративного поведения и др. В развитых странах кодекс корпоративного поведения является неотъемлемой частью преуспевающей компании, важным аргументом для инвесторов.

Кодекс корпоративного управления «Северстали» (2015 г.) опирается на следующие основные принципы: обеспечение соблюдения интересов всех акционеров; единая и четкая структура компании с опорой на корпоративную стратегию; взвешенная стратегия слияний и поглощений, поддерживаемая большинством Совета директоров; опора на надежную команду опытных и профессиональных управленцев; применение передовой практики раскрытия информации и прозрачной системы корпоративной отчетности; надежная платформа обеспечения высокой прибыли для акционеров в долгосрочной перспективе.

Важная особенность КО корпорации «Северсталь» выражается в том, что значительная доля акций находится в собственности одного человека. Согласно данным отчета за 2017 г. (http://www.severstal.com/rus/ir/results_reports/annual_reports), доли от акционерного капитала распределялись следующим образом, %: А.А.Мордашов – 77,03; в свободном обращении – 20,15; казначейские акции – 2,82. А.А.Мордашов приобрел акции, участвуя в аукционах по приватизации ПАО «Северсталь», а также путем прочих покупок, и по состоянию на 31.12.2017 г. опосредованно контролировал 77,03 % акционерного капитала ПАО «Северсталь». Таким образом, распределение акций головной компании и дочерних подразделений полностью отвечает критериям



«инсайдерской модели». Тем не менее, в документах компании предусмотрен целый ряд «противовесов», нацеленных на улучшение ситуации с КО в рамках указанной модели.

Например, в «Заявлении о нормативном соответствии» сказано, что «в течение года «Северсталь» соблюдала все требования, предъявляемые к листингам первого уровня на Московской бирже и к депозитарным распискам категории «стандарт» на Лондонской фондовой бирже, за исключением того, что «Северсталь» не заключила договор об отношениях со своим основным акционером А. Мордашовым». Совет директоров стремится обеспечить должное внимание к интересам миноритарных акционеров и их координацию с интересами основного акционера. Совет директоров тщательно проанализировал, могут ли миноритарные акционеры получить выгоду от заключения договора об отношениях с основным акционером, и пришел к выводу, что имеющаяся нормативная база, направленная на то, чтобы у «Северстали» была возможность осуществлять свою деятельность независимо от основного акционера и связанных с ним компаний, удовлетворительна и что транзакции с контролирующим акционером и связанными с ним компаниями осуществляются по принципу рыночных отношений на справедливых коммерческих условиях» (Годовой отчет ПАО Северсталь за 2017 г.).

В документах компании предусмотрены и механизмы контроля в этой сфере: Совет директоров наполовину состоит из независимых неисполнительных директоров, а Комитет по аудиту и Комитет по кадрам и вознаграждениям работают под председательством независимых неисполнительных директоров; основной акционер реализует свое право на голосование, включая голосование по вопросам, касающимся внесения поправок в устав «Северстали», в форме, не ущемляющей интересы миноритарных акционеров; основной акционер не голосует по вопросам об одобрении сделок со связанными сторонами. Кроме этого, минимум раз в месяц решения об одобрении сделок со связанными сторонами принимаются путем голосования другими членами совета директоров, которые не имеют отношения к этим сделкам, причем перед этим все такие сделки проходят проверку в службе внутреннего аудита. Все сделки со связанными сторонами также проверяются Комитетом по аудиту и внешними аудиторами и раскрываются в ежеквартальной финансовой отчетности в соответствии с требованиями МСФО.

Существенным противовесом потенциальному волюнтаризму основного акционера является состав, структура и полномочия Совета директоров, который состоит из десяти членов. Сбалансированная структура Совета директоров является важным условием обеспечения высокого качества принимаемых решений и управления компанией, а также равной защиты интересов всех акционеров. В структуре Совета директоров исполнительные и неисполнительные директора составляют 50 %, независимые неисполнительные директора – 50 %; имеются представители других стран: граждане РФ – 7 человек, Великобритании – 2, Финляндии – 1. В Совете представлены специалисты в области металлургии, добычи полезных ископаемых, финансов, нефти и газа, сферы образования.

Важным условием эффективности работы Совета директоров является разделение должностей председателя и генерального директора. Роли председателя Совета директоров и генерального директора компании довольно четко разграничены в уставных документах «Северстали». Председателем Совета директоров «Северстали» является А.А.Мордашов; председатель избирается большинством голосов из состава Совета директоров. Можно отметить, что А.А.Мордашов стал лауреатом премии «Директор года» в номинации «Лучший председатель Совета директоров 2017 года: вклад в развитие корпоративного управления». Данная премия вручается Ассоциацией независимых директоров, Российским союзом промышленников и предпринимателей, Московской биржей, известной международной аудиторской компанией «Price waterhouse Coopers» и Сбербанком.

Аналогичная ситуация наблюдается и в нижних структурах компании, в качестве примера приведем дочерние подразделения «Северстали» NordGold и ПАО «Бурятзолото» (в котором автор данной статьи в 1993-1994 гг. являлся членом Совета директоров). В 2008 г. «Бурятзолото» вошло в состав международной золотодобывающей компании Nordgold (в то время – «Северсталь-Ресурс»).

Совет директоров ПАО «Бурятзолото» избран годовым общим собранием акционеров Общества 29.04.2016 г. в количестве 7 человек. Все члены Совета директоров являются функционерами Nordgold. Полномочия исполнительного органа общества в соответствии с решением обще-

го собрания акционеров от 27.10.2014, переданы управляющей организации – ООО «Нордголд Менеджмент» (Годовой отчет ПАО «Бурятзолото» за 2016 г.). Обществом официально не утвержден Кодекс корпоративного управления или иной аналогичный документ, однако, как сказано в годовых отчетах, ПАО «Бурятзолото» обеспечивает акционерам все возможности по участию в управлении обществом и ознакомлению с информацией о деятельности общества в соответствии с федеральным законодательством.

В списке аффилированных лиц ПАО «Бурятзолото» всего несколько обладателей акций данного предприятия: Nordgold с 7,458 % обыкновенных акций и High River Gold Mines Ltd, с 84,938 %. При этом 100 % капитала High River Gold Mines принадлежат Nordgold [9], основным акционером которого является А.А.Мордашов. Сейчас основному владельцу А.А.Мордашову принадлежит 90,73 % компании, остальное находится в свободном обращении.

Компания Nordgold основана в 2007 г. как золотодобывающее подразделение «Северстали». В начале 2012 г. Nordgold стала публичной компанией; будучи ДЗО по отношению к «Северстали», она обладает шестью дочерними золотодобывающими компаниями, включая «Бурятзолото». Таким образом, группа компаний «Северсталь» представляет собой классический холдинг, позволяющий эффективно использовать положительный эффект масштаба и минимизировать последствия отрицательного, о чем свидетельствуют положительные экономические результаты работы всех звеньев холдинга – от головной компании до низовых структур.

Несмотря на ряд несоответствий неоклассической модели КО, современная российская модель обладает специфическими преимуществами, включает в себе как уникальные черты, так и характеристики современной зарубежной модели КО. Следует отметить, что и современные зарубежные модели КО далеко не во всем соответствуют неоклассической модели.

Среда для формирования КО. Как и любая развивающаяся система, современная российская модель КО обладает как преимуществами, так и недостатками. Остается целый ряд нерешенных проблем, сдерживающих развитие российских КО. К ним можно отнести слабость институциональной структуры корпоративного сектора, наличие значительных административных барьеров, неопределенность политики государства и др. Важной проблемой является неопределенность и несовершенство нормативно-правовой базы, регламентирующей организацию деятельности корпоративных образований: правовое регулирование носит поверхностный, фрагментарный характер; не полностью проработаны методы согласования работы промышленных комплексов с федеральными и муниципальными административно-хозяйственными ведомствами. Отсутствуют стандарты и правила формирования крупных диверсифицированных корпоративных образований, предпринимательских союзов (холдингов, концернов), не определен их юридический статус, права и функции органов управления. Наличие проблем существенно осложняет развитие КО в России. В целом можно констатировать, что КО являются важной частью современной российской экономической системы, сферы недропользования, фактором реализации социально-экономических целей национальной экономики.

Заключение.

1. Современная российская модель корпоративных отношений имеет общие черты и различия по сравнению с зарубежными аналогами, обладает как специфическими недостатками, так и преимуществами, нуждается в дальнейшем совершенствовании.

2. «Инсайдерская» специфика данной модели КО приводит к углублению социально-имущественной дифференциации российского общества, является тормозом в процессе формирования среднего класса, формирования эффективного спроса и ускорения экономического роста.

3. Чрезмерно высокая дифференциация доходов и неразвитость «среды» функционирования КО приводит к масштабному вывозу капитала в оффшорные зоны.

4. Все это порождает общую социально-экономическую нестабильность, которая проявляется в скачкообразной инфляции, неожиданных экономических спадах и др.

5. Прорывом в развитии КО могло бы стать поощрение создания предприятий «рабочей собственности», известных за рубежом как система ESOP (Employee Stock Ownership Plan) – «План наделения акциями работников» [20].

Формальное развитие корпоративных отношений, отражающееся в документах компаний и правовых актах, должно быть заполнено реальным содержанием. На практике должны найти применение значительно более разнообразные формы КО, включая формы собственности работников.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. *Беляева Ж.С.* Трансформационные процессы корпоративного развития в России: социальная ответственность бизнеса // Экономика региона. 2011. № 1. С. 137-142.
2. *Богданов А.А.* Тектология. Всеобщая организационная наука. М.: Экономика, 1989. Кн. I. 304 с.
3. *Брижак О.В.* Корпоративные отношения в современной российской экономике и их влияние на инновационное развитие // Научный вестник ЮИМ. 2014. № 1. С. 4-9.
4. *Бузгалин А.В.* Социально-ориентированное инновационное развитие: обновление институционального проекта // Инновационное развитие экономики: институциональная среда: Сборник статей. Т. 1. М.: МАКС Пресс, 2011. 1092 с.
5. *Гумеров А.В.* Проблемы регулирования корпоративных отношений российских промышленных структур / <https://cyberleninka.ru/article/v/problemu-regulirovaniya-korporativnyh-otnosheniy-rossiyskih-promyshlennyh-struktur>
6. *Капелюшников Р.И.* Концентрация собственности в системе корпоративного управления: эволюция представлений // Российский журнал менеджмента. 2004. Т. 4. № 1. С. 3-28.
7. *Лапинскас А.А.* Типы и особенности функционирования экономических систем / НИИ Химии СПбГУ. СПб, 2001. 380 с.
8. *Максимова К.В.* Внутренние противоречия развития корпоративных отношений в российской экономике // <http://izron.ru/articles/ekonomika-finansy-i-menedzhment-tendentsii-i-perspektivy-razvitiya-sbornik-nauchnykh-trudov>
9. Nordgold объявляет делистинг // <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2017/02/09/676830-nordgold-delisting>.
10. *Овчинников М.А.* Корпоративная культура в системе социального управления: Автореф. дис....канд. соц. наук / Академия труда и социальных отношений. М., 2004. 23 с.
11. *Тихомиров П.А.* Корпоративная культура как фактор устойчивости организации: Автореф. дис....канд. соц. наук / Современная гуманитарная академия. М., 2004. 22 с.
12. *Bowie S.N.* The Moral Obligations of Multinational Corporations / Problems of International Justice. Westview Press, Boulder, CO, 1988. P. 97-113.
13. Capitalism is under attack // <https://www.mckinsey.com/global-themes/long-term-capitalism/redefining-capitalism>
14. *Davis K.* The Case For and Against Business Assumption of Social Responsibilities // Academy of Management Journal. 1973. Vol. 16. № 2. P. 312-322.
15. *Freeman R.E.* Strategic management. A stakeholder approach. Boston: Pitman Publishers, 1984. 276 p.
16. *Friedman A.* Developing Stakeholder Theory / A.Friedman, S.Miles // Journal of Management Studies. 2002. Vol. 39. № 1. P. 1-21.
17. *Galbraith J.K.* The New Industrial State // Princeton University Press. With a new foreword by James K.Galbraith, 2007. 576 p.
18. *Gilpin R.* The Challenge of Global Capitalism / The World Economy in the 21st Century; R.Gilpin, J.M.Gilpin // Princeton University Press // <http://www.nytimes.com/books/00/04/30/reviews/000430.30sangert.html>
19. *Granovette M.* Economic action and social structure. A theory of embeddedness // American Journal of Sociology. 1985. № 91. P. 481-510.
20. *Ludwig R.* Conversion of Existing Plans to Employee Stock Ownership Plans // <https://www.wcl.american.edu/journal/lawrev/26/ludwig.pdf>.
21. Monopoly Capital at the Turn of the Millennium // <https://monthlyreview.org/2000/04/01/monopoly-capital-at-the-turn-of-the-millennium/>

Автор А.А.Лапинскас, д-р экон. наук, профессор, larunas@mail.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Статья поступила в редакцию 3.08.2017.

Статья принята к публикации 4.07.2018.