

ISSN 2411-3336

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА



НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ



ИЗДАЕТСЯ С 1907 ГОДА

том 219



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ • 2016



Издаются с 1907 года

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

научный журнал

Том 219
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ • 2016

Учредитель Санкт-Петербургский горный университет

Разделы

- Геология • Горное дело • Нефтегазовое дело
- Металлургия и обогащение
- Электромеханика и машиностроение
- Геонаноматериалы
- Геоэкология и безопасность жизнедеятельности
- Геоэкономика и менеджмент
- Горное образование: традиции и перспективы в XXI веке
- Слово молодому ученому

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 № ФС77-64439 от 31.12.2015

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.02

Редакция

Начальник РИЦ В.Л. Лебедев
Начальник отдела И.Г. Ребещенкова

Редакторы:
Е.С. Дрибинская
И.В. Неверова
Н.И. Сочивко

Компьютерная верстка:
В.И. Каширина
Н.Н. Седых
Л.П. Хлюпина

Редакционный совет

В.С. Литвиненко, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербург, Россия (председатель)
А.А. Барях, д-р техн. наук, профессор, Пермь, Россия
Л.А. Вайсберг, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербург, Россия
Г.Б. Клейнер, чл.-кор. РАН, д-р экон. наук, профессор, Москва, Россия
Ю.Б. Марин, чл.-кор. РАН, д-р геол.-минерал. наук, профессор, Санкт-Петербург, Россия
С.С. Набойченко, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург, Россия
М.А. Пашкевич, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербург, Россия
В.Е. Сомов, д-р экон. наук, канд. техн. наук, профессор, Кириши, Россия

Иностранные члены редакционного совета

Олег Анцуткин, профессор, Лулео, Швеция
Хал Гургенчи, профессор, Брисбен, Австралия
Волли Калм, профессор, Тарту, Эстония
Анджей Краславски, профессор, Лаппеенранта, Финляндия
Эдвин Кроек, профессор, Фрайберг, Германия
Илпо Мутикайнен, профессор, Хельсинки, Финляндия
Павел Власак, профессор, Прага, Чехия
Габриэль Вейсс, профессор, Кошице, Словакия

Редакционная коллегия

В.С. Литвиненко, д-р техн. наук, Санкт-Петербург, Россия (главный редактор)
В.Л. Трушко, д-р техн. наук, Санкт-Петербург, Россия (зам. главного редактора)
В.Г. Афанасьев, д-р ист. наук, Санкт-Петербург, Россия
В.Н. Бричкин, д-р техн. наук, Санкт-Петербург, Россия
С.Г. Гендлер, д-р техн. наук, Санкт-Петербург, Россия
М.А. Иванов, д-р геол.-минерал. наук, Санкт-Петербург, Россия
Д.Н. Лигоцкий, канд. техн. наук, Санкт-Петербург, Россия
Т.В. Пономаренко, д-р экон. наук, Санкт-Петербург, Россия
А.Г. Протосеня, д-р техн. наук, Санкт-Петербург, Россия
М.К. Рогачев, д-р техн. наук, Санкт-Петербург, Россия
А.Г. Сырков, д-р техн. наук, Санкт-Петербург, Россия
Ю.А. Сычев, канд. техн. наук, Санкт-Петербург, Россия
А.Е. Череповицын, д-р экон. наук, Санкт-Петербург, Россия
В.А. Шпенст, д-р техн. наук, Санкт-Петербург, Россия



Published since 1907

JOURNAL OF MINING INSTITUTE

Volume 219
ST. PETERSBURG • 2016

Scientific Journal

Founded by the Saint-Petersburg Mining University

Sections

- Geology • Mining • Oil and gas
- Metallurgy and mineral processing
- Electromechanics and mechanical engineering
- Geo-nanomaterials
- Engineering geology and occupational health and safety
- Geoeconomics and management
- Mining education: traditions and perspectives in the XXI century
- Young Scientists Speak

The journal is included in the Russian Science Citation Index
Scientific Electronic Library <http://elibrary.ru>
and international reviewing database GeoRef

The Journal is included by the State commission for academic degrees
and titles of the Russian Federation to the active list of leading
peer-reviewed scientific journals and publications, where basic scientific
results of dissertations for the Degree of Doctor and Candidate
of Sciences should be published.

Certificate of registration PI № ФС77-64439 from 31.12.2015

License for publishing N 06517 from 09.01.02

Editorial

Head of the Editing and Publishing Center V.L.Lebedev
Head of the Department I.G.Rebeshchenkova

Copy team:
E.S.Dribinskaya
I.V.Neverova
N.I.Sochivko

Computer-aided makeup:
V.I.Kashirina
N.N.Sedykh
L.P.Khlyupina

Editorial board

V.S.Litvinenko, Dr. of Engineering Sciences, Professor, St. Petersburg, Russia (chairman)
A.A.Baryakh, Dr. of Engineering Sciences, Professor, Perm', Russia
K.A.Vaisberg, Associate Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. of Engineering
Sciences, Professor, St. Petersburg, Russia
G.B.Kleiner, Associate Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. of Economics,
Professor, Moscow, Russia
Y.B.Marin, Associate Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. of Geological and
Mineral Sciences, Professor, St. Petersburg, Russia
S.S.Naboichenko, Associate Member of the Russian Academy of Sciences,
Dr. of Engineering Sciences, Professor, Ekaterinburg, Russia
M.A.Pashkevich, Dr. of Engineering Sciences, Professor, St. Petersburg, Russia
V.E.Somov, Dr. of Economics, PhD in Engineering Sciences, Professor, Kirishi, Russia

Foreign members of the editorial board

Oleg Antzutkin, Professor, Lulea, Sweden
Hal Gurgenci, Professor, Brisbane, Australia
Volli Kalm, Professor, Tartu, Estonia
Andrzej Kraslawski, Professor, Lappeenranta, Finland
Edwin Kroke, Professor, Freiberg, Germany
Ilpo Mutikainen, Professor, Helsinki, Finland
Pavel Vlasak, Professor, Prague, Czech Republic
Gabriel Weiss, Professor, Kosice, Slovakia

Editorial panel

V.S.Litvinenko, Dr. of Engineering Sciences, St. Petersburg, Russia (Editor)
V.L.Trushko, Dr. of Engineering Sciences, St. Petersburg, Russia (Deputy Editor)
V.G.Afanasyev, Dr. of Historical Sciences, St. Petersburg, Russia
V.N.Brichkin, Dr. of Engineering Sciences, St. Petersburg, Russia
S.G.Gendler, Dr. of Engineering Sciences, St. Petersburg, Russia
M.A.Ivanov, Dr. of Geological and Mineral Sciences, St. Petersburg, Russia
D.N.Ligotsky, PhD in Engineering Sciences, St. Petersburg, Russia
T.V.Ponomarenko, Dr. of Economics, St. Petersburg, Russia
A.G.Protosenya, Dr. of Engineering Sciences, St. Petersburg, Russia
M.K.Rogachev, Dr. of Engineering Sciences, St. Petersburg, Russia
A.G.Syrkov, Dr. of Engineering Sciences, St. Petersburg, Russia
Y.A.Sychev, PhD in Engineering Sciences, St. Petersburg, Russia
A.E.Cherepovitsin, Dr. of Economics, St. Petersburg, Russia
V.A.Shpensht, Dr. of Engineering Sciences, St. Petersburg, Russia

СОДЕРЖАНИЕ

Геология

- *Бродская Р.Л., Марин Ю.Б.* Онтогенический анализ на микро- и наноуровне минеральных индивидов и агрегатов для реставрации условий рудобразования и оценки технологических свойств минерального сырья 369

Горное дело

- *Галкин А.Ф.* Тепловой режим рудников криолитозоны 377
■ *Господариков А.П.* Разработка нелинейных математических моделей и численное моделирование прогноза напряженно-деформированного состояния массива горных пород 382
■ *Селюков А.В.* Инструмент корректировки распределения объемов вскрыши по отвалам действующего угольного разреза 387
■ *Сухомлинов В.С., Мустафаев А.С.* Влияние неупругих столкновений на релаксацию энергии пучка быстрых электронов в воздухе 392

Нефтегазовое дело

- *Иванова И.В., Шабер В.М.* Современные перспективы получения газа 403
■ *Николаев Н.И., Леушева Е.Л.* Разработка составов промывочных жидкостей для повышения эффективности бурения твердых горных пород 412
■ *Ушаков И.Е.* Радиолокационный мониторинг загрязнений морской поверхности нефтепродуктами с буровых платформ и транспортных судов 421

Металлургия и обогащение

- *Алексеев А.И.* Научные основы переработки алюминийсодержащих отходов 428

Электромеханика и машиностроение

- *Лебедев В.А.* Эксергетический метод оценки энергоэффективности оборудования систем энергообеспечения предприятий минерально-сырьевого комплекса 435
■ *Менухова Т.А., Солодкий А.И.* Экономическая эффективность эксплуатации автомобиля 444
■ *Терентьев А.В., Канустин А.А.* Оценка качества автомобиля 449
■ *Vöth Stefan, Vasilyeva M.A.* Properties that determine the efficiency and safety of form fitting safety couplings 455

Геозкология и безопасность жизнедеятельности

- *Голдобина Л.А., Орлов П.С.* Анализ причин коррозионных разрушений подземных трубопроводов и новые решения повышения стойкости стали к коррозии 459
■ *Рудаков М.Л.* Корпоративные программы «ноль несчастных случаев» как элемент стратегического планирования в области охраны труда для угледобывающих предприятий 465
■ *Федосеев И.В., Баркан М.Ш.* К вопросу о нейтрализации цианистых соединений при проведении средозащитных мероприятий при извлечении тонковкрапленного самородного золота из коренных пород ... 472
■ *Черкай З.Н., Ковшов С.В.* Экспертная оценка состояния производственной безопасности в территориальных единицах минерально-сырьевого комплекса России 477

Геоэкономика и менеджмент

- *Недосекин А.О.* Альтернативные методы инвестирования базовых отраслей экономики РФ 482
■ *Рейшахрит Е.И.* Особенности управления энергоэффективностью на предприятиях нефтеперерабатывающей отрасли 490

Горное образование: традиции и перспективы в XXI веке

- *Рассадина С.А.* Культурологические основания концепции «edutainment» как стратегии формирования общекультурных компетенций в вузах негуманитарного профиля 498
■ *Сищук Ю.М.* Заимствования из немецкого языка в русской горно-геологической терминологии ... 504
■ *Щукина Д.А.* Теория и практика научного диалога в современном техническом вузе 508

CONTENTS

Geology

- *Brodskaya R.L., Marin Yu.B.* Ontogenic analysis of mineral individuals at micro- and nanolevel for the restoration of ore-forming conditions and assessment of minerals processing properties..... 369

Mining

- *Galkin A.F.* The thermal condition of the mines in cryolite zone..... 377
- *Gospodarikov A.P.* Nonlinear math model development and numerical model of strain deformed rock mass conditions prognosis..... 382
- *Selyukov A.V.* To correct the distribution of the volume of overburden waste dumps existing coal mine ... 387
- *Soukhomlinov V.S., Mustafaev A.S.* Influence of inelastic collisions on fast electron beam energy relaxation in gas..... 392

Oil and gas

- *Ivanova I.V., Chaberv.S.* Modern method for gas production..... 403
- *Nikolaev N.I., Leusheva E.L.* Development of drilling fluids composition for efficiency increase of hard rocks drilling..... 412
- *Ushakov I.E.* Detection of floods of oil products in the sea radar-tracking means 421

Metallurgy and mineral processing

- *Alekseev A.I.* Scientific basis of processing aluminum-containing waste..... 428

Electromechanics and mechanical engineering

- *Lebedev V.A.* Exergy method to evaluate the efficiency of the equipment of power supply systems of enterprises of mineral-raw complex..... 435
- *Menukhova T.A., Solodkiy A.I.* Economic efficiency of car..... 444
- *Terentiev A.V., Kapustin A.A.* Quality assessment of the car..... 445
- *Vöth Stefan, Vasilyeva M.A.* Properties that determine the efficiency and safety of form fitting safety couplings..... 455

Engineering geology and occupational health and safety

- *Goldobina L.A., Orlov P.S.* Analysis of the corrosion destruction causes in underground pipelines and new solutions for increasing corrosion steel's resistance 459
- *Rudakov M.L.* «Zero accident» corporate programmes as an element of strategic planning in the field of occupational safety and health at coal mining enterprises 465
- *Fedoseev I.V., Barkan M.Sh.* Theme of cyanide neutralization during environment measures implementation in case of native gold finely disseminated extraction from bedrocks 472
- *Cherkay Z.N., Kovshov S.V.* Expert assessment of industrial safety in Russian mineral-resources complex territorial units..... 477

Geoeconomics and management

- *Nedosekin A.O.* Alternative investment on basic materials industry in the Russian economy 482
- *Reishahrit E.I.* Specific features of energy efficiency management at enterprises of oil processing industry.. 490

Mining education: traditions and perspectives in the XXI century

- *Rassadina S.A.* Culturological elements of edutainment employed in basic cultural formation of non-humanities students..... 498
- *Sishchuk Yu.M.* German borrowings in russian mining-and-geological terminology 504
- *Shchukina D.A.* Theory and practice of modern scientific dialogue in technical Higher educational institution..... 508



Геология

УДК 549:553:622.7

ОНТОГЕНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НА МИКРО- И НАНОУРОВНЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ИНДИВИДОВ И АГРЕГАТОВ ДЛЯ РЕСТАВРАЦИИ УСЛОВИЙ РУДОБРАЗОВАНИЯ И ОЦЕНКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Р.Л.БРОДСКАЯ¹, Ю.Б.МАРИН²

¹ *Всероссийский научно-исследовательский геологический институт (ВСЕГЕИ), Санкт-Петербург, Россия*

² *Санкт-Петербургский горный университет, Россия*

В организации системы рудоподготовки и выбора оптимальных методов сепарации минерального сырья важно учитывать типоморфные признаки и свойства минералов и их агрегатов, определяющие минералогическо-технологические особенности типов и сортов руд. В технологические схемы вовлекаются тонкодисперсные руды, учет размеров частиц становится определяющим фактором в технологиях обогащения.

При дезинтеграции минерального агрегата, при раскрытии сростков и освобождении поверхности сростания, структура минерального зерна релаксирует, образуя новые связи. Граница минерального индивида может «открыть индивид» для его разрушения (растворения) или роста, может взять на себя функции сохранения объема зерна. Адаптация агрегата к внешним условиям происходит за счет изменения ориентировки, протяженности и площади границ индивидов и буферной зоны их сростания. В соответствии с энергетическим балансом границ индивидов и границ их сростания осуществляются все структурные преобразования в минеральном агрегате. При этом происходит «рафинирование» вещества, кристаллической решетки минеральных индивидов, аннигилируются ее дефекты и дислокации. В процессе релаксации структуры одного минерала может зародиться другой, индивиды которого могут остаться в рассеянном состоянии, могут обнаружить способность к агрегации в зависимости от энергетического баланса их границ и матрицы.

Онтогенетический подход к оценке особенностей минеральных индивидов и агрегатов позволяет реставрировать условия рудобразования, обеспечивает выбор оптимальных условий раскрытия зерен полезного компонента, когда кроме размера зерен учитывается их форма, природа сростаний, особенности границ сростающихся минералов, неоднородности состава и свойств минеральных индивидов. В результате открываются новые возможности рентабельной и экологически более чистой разработки месторождений, переоценки масштабов рудоносности в сторону понижения кондиций, определения рентабельного спектра попутно извлекаемых компонентов.

Ключевые слова: минеральные индивиды и агрегаты, микро- и наноминералогия, онтогенетический анализ, границы сростания, технологические свойства.

Как цитировать эту статью: Бродская Р.Л. Онтогенетический анализ на микро- и наноуровне минеральных индивидов и агрегатов для реставрации условий рудобразования и оценки технологических свойств минерального сырья / Р.Л.Бродская, Ю.Б.Марин // Записки Горного института. 2016. Т.219. С.369-376. DOI 10.18454/PMI.2016.3.369

Минерально-сырьевая база России по многим видам полезных ископаемых представлена труднообогатимыми, нередко комплексными рудами. Одним из путей решения проблемы их переработки является детальное изучение тонких особенностей строения и вещественного состава руд с привлечением широкого комплекса современных физико-химических методов анализа и использование новых знаний в области кристаллохимии, кристаллофизики и минералогии. Еще В.И.Ревнивцев, первый председатель Комиссии по технологической минералогии Российского минералогического общества, отмечал, что только учет генезиса кристалла минерала, его образования и преобразования, возникающих в ходе этого изменений состава и структуры может дать объективные представления о его реальных технологических свойствах, добавляя, что именно этим объясняется то, что одни и те же минералы из разных месторождений или разных участков одного месторождения ведут себя при обогащении по-разному [17].

Особое место занимают отходы добычи и переработки полезных ископаемых, оказывающие, с одной стороны, значительную экологическую нагрузку на окружающую среду, с другой, являющиеся потенциальными источниками черных, цветных, благородных, редких металлов и неметаллического сырья. Перспективы промышленного освоения такого сырья могут быть связаны только с созданием эффективных технологий его переработки, базирующихся на максимально полной информации о вещественном составе и строении техногенного сырья.

В последние два десятилетия, благодаря современным методам определения изотопного, химического, минерального состава пород, руд и техногенных отходов и новым, получающим все большее развитие технологиям переработки минерального сырья [9-14], появились принципиально новые возможности выделения нетрадиционных видов металлических и неметаллических полезных иско-



паемых с выявлением новых типов природных и техногенных месторождений. Установление ранее неизвестных свойств природных и возникающих в ходе переработки наночастиц открывает большие возможности разработки нанотехнологий извлечения и обогащения нужных химических соединений и элементов [3, 5]. В результате содержания благородных и редких элементов в считавшихся «пустыми» породах (главным образом, в осадочных породах, корах выветривания и черных сланцах) становятся промышленными, резко возрастает возможность комплексного использования сырья месторождений бурых и каменных углей, углеродистых пород, фосфоритов, бокситов, битумов нефтегазоносных залежей и др.

Минеральный индивид рассматривается как физическое тело, построенное из регулярно распределенных в пространстве атомов, как химическое соединение, как продукт химических реакций, как элементарная составляющая горных пород и руд, как кристаллический организм с особым строением и функциями, как источник генетической информации, как объект практического использования. Интервенция в микромир является важным этапом развития современной минералогии с появлением таких ее направлений, как микро- и наноминералогия [12, 14]. Этому способствовал прогресс методов структурных и морфологических исследований, особенно различных видов микроскопии (электронной, туннельной, атомно-силовой) и спектроскопии (инфракрасной и комбинационного рассеяния), позволяющих осуществлять наиболее точную диагностику минеральных индивидов и исследовать отдельные атомы и их мельчайшие закономерные группировки. С помощью этих методов раскрывается структурно-химическая неоднородность как неотъемлемое свойство минеральных индивидов, надмолекулярная структурная упорядоченность некристаллического характера в природных твердых веществах, считавшихся аморфными. Новые необычные структуры и явления открываются в результате изучения твердых углеводородов, углеродистых веществ и самого углерода.

Теоретически можно определить размер минеральных индивидов до несколько нанометров. Это образования из нескольких элементарных ячеек – наноиндивиды (10^{-7} - 10^{-9} м), в сочетании которых уже устанавливается регулярность, периодичность и формируется структурно несопряженная граница с окружающей средой (нанокристаллы и другие наноразмерные твердые частицы с регулярной структурой). Подобные наноиндивиды известны в различных рентгеноаморфных образованиях, например в железомарганцевых конкрециях, среди продуктов распада изоморфных минеральных систем и др. Форма, физико-химические свойства наноиндивидов (температура плавления, реакционная способность, магнитность, электропроводность, прочность) существенно отличаются от макро- и микроиндивидов [6, 8, 9, 12-14] вследствие несравнимо большей доли поверхностных атомов (нижняя граница наноструктур около 1 нм, когда все атомы являются поверхностными).

А.М.Асхабовым развиваются представления о структурной организации вещества в нанометровом диапазоне размеров и ее роли в формировании кристаллических и некристаллических материалов («кватаронная концепция») [2]. Кватароны – это новая форма атомно-молекулярной организации вещества на наноуровне, новое состояние вещества, которое, однако, не имеет макроскопических аналогов. Кватаронное состояние при определенных условиях трансформируется в обычное агрегатное состояние вещества (жидкое, кристаллическое и др.). Кватароны являются основой для формирования всего комплекса возможных форм структурной организации вещества на наноуровне, начиная от обычных тетра- или октаэдрических группировок до широко известных фуллеренов (и нанотрубок) либо плотных додекаэдрических или икосаэдрических кластеров. С этих позиций к минералам относят и рентгеноаморфные твердые вещества с определенным образом организованной структурой (фуллериты, кватариты – ультрадисперсные упорядоченные материалы с дискретным внутренним строением, опалы и т.д.).

Формирование наноиндивидов и наноразмерных структурных кластеров вследствие химического ультрадиспергирования или конденсации атомов [2, 12] в области кристаллизации минеральных индивидов ведет к увеличению их неоднородности. Исследование нанонеоднородности минералов затруднено в связи с особыми физико-химическими свойствами наночастиц, которые практически не учитываются в современной аналитической практике [6, 7]. Можно наметить следующие структурные типы вещественной неоднородности минеральных индивидов: 1) квазиоднородные кристаллические структуры с изоморфными компонентами и микропримесями; 2) кристаллические сверхструктуры с регулярной неоднородностью; 3) структуры с аномальными структурно-вещественными кластерами; 4) структуры с микро- и нановключениями [1, 16].

Химическая неоднородность выступает как самостоятельный «двигатель» онтогенетического развития кристалла, приводя к саморазвитию дефектов в виде кластеризации, гетерометрии, автодеформации и других явлений [1]. Дефектообразование в кристалле определяет возможность диффузии и твер-



дофазных реакций в кристаллических телах [3, 5]. Многие элементы-примеси, рассматривавшиеся ранее как изоморфные, входят в состав собственных минеральных фаз либо в состав флюидных и расплавных включений в минерале-хозяине. Это важно, поскольку нарушения гомогенности состава минералов влияют на поведение минерального вещества в технологических процессах, а ультратонкие минеральные фазы, определяющие эти неоднородности, могут сами по себе иметь промышленную ценность. Структуры с микро- и нановключениями осложняются двух- и трехмерными дефектами, блоками с углами разориентации более $0,1^\circ$ и фазовыми границами. Главной причиной появления минералов-узников является захват растущими гранями кристалла кристаллических частиц вследствие поверхностного агрегирования примеси и сопряженного зарождения кристаллов синтактической фазы, гравитационного осаждения кристаллических зародышей либо неполного растворения замещающей при метасоматозе фазы [16].

Новые знания о минеральном микромире позволяют говорить об иерархических уровнях структурно-химической неоднородности кристаллов, на каждом из которых действуют специфические минералогенетические тенденции [12]: макроуровень индивидов и агрегатов (> 100 мкм), микроуровень анатомии индивидов (0,1-100 мкм) и наноуровень атомных кластеров (0,001-0,1 мкм). Методически правильной является такая последовательность онтогенетического анализа минеральной системы: агрегат – индивид (матрица) – микронеоднородность индивида – нанонеоднородность индивида [1].

Типоморфными особенностями строения минерального агрегата (в том числе рудного) являются все элементы его структуры и текстуры, охарактеризованные количественно. По количественным оценкам строения агрегата можно моделировать условия его образования и преобразования. На каждой стадии эволюции процесса минералообразования возникает соответствующий ей «отклик» в системе кристаллизации – минеральная генерация. Генерации минеральных индивидов при их агрегации не могут быть равновесны друг с другом. При образовании их границы аккумулировали разное количество энергии, поскольку зарождались и росли на разных этапах развития процесса. Сформировавшийся в условиях высоких скоростей диссипации энергии (например, на магматической стадии) агрегат имеет энергетически и структурно неравновесные внутренние границы. Оказавшись в других условиях, агрегат адаптируется к новым условиям за счет энергии, накопленной на внутренних границах и в кристаллической решетке минералов. Изменяется энергия системы, и энергии индивидов приходят в равновесие друг с другом на общих границах срастания, границы в агрегате становятся (в идеале) структурно равновесными. Границы могут быть неравновесными, но устойчивыми.

Сложные системы представляют собой и минеральные индивиды, состоящие из матрицы минерала-хозяина и заключенных в ней микро- и нановключений других минеральных фаз, газов и жидкостей. Эти включения могут иметь по отношению к матрице прото-, син- и эпигенетическую природу. Микровключения находятся в закономерных, иногда достаточно сложных связях с компонентами, входящими в состав матрицы в качестве изоморфных примесей. Многие элементы-примеси входят в состав минеральных микро- и нанофаз или многофазных микровключений. В одном и том же минерале из разных генетических типов пород и руд могут присутствовать различные виды включений – микропарагенезисы, меняющиеся под влиянием внешних условий и, следовательно, имеющие типоморфное значение. Микропарагенезисы могут видоизменяться и в пределах одного индивида, имеющего зональное строение и претерпевшего сложную эволюцию в ходе своего развития. Варьирует состав и самой матрицы. Вариации выражены в отклонениях от стехиометрии и колебаниях содержания элементов-примесей.

Отметим, что прочность минерального агрегата определяется плотностью его внутренних границ – границ минеральных индивидов – в единице объема разрушаемого агрегата. Основные тенденции развития технологий рудоподготовки к обогащению заключаются в снижении конечной крупности продукта [13, 14]. В технологические схемы вовлекаются тонкодисперсные руды, учет размеров частиц становится определяющим фактором в технологиях обогащения. С уменьшением размеров в области 1-100 нм наночастица как структурная единица представляется почти пределом в увеличении площади поверхности. Такая большая площадь поверхности обеспечивает нанокристаллам специфические характеристики, которые и создают непредсказуемый потенциал нанотехнологиям, в том числе и в процессах обогащения. Речь идет о необычных физических, химических и механических свойствах нанокристаллов, изменяющих кинетические и динамические характеристики руды.

Существует несколько методов получения наноминералов: плазменный; осаждение из газовой фазы, включая диссоциативную фотосорбцию; электроосаждение; синтез из гелевых растворов; ударное измельчение. Указанные подходы становятся составной частью технологий комплексной



переработки природного и техногенного минерального сырья. Огромные возможности энергии поверхностных процессов наглядно продемонстрированы в адсорбифизических методах сепарации [9, 14]. Наноразмерные технологии предполагают изучение и внедрение механизмов извлечения ценных компонент на молекулярном, атомарном и электронном уровнях, когда появляется возможность управления технологическими процессами на уровне формирования полезного компонента [9-14].

Вовлечение новых видов минерального сырья в обогащительные технологии ведет к изменению понятия самого полезного компонента. Сегодня среди индустриальных наноминералов выделяют нанокомпозиты, нанотрубки, нановолокна. В большинстве случаев наноминералы превосходят по своим свойствам обычные аналоги. Нанокристаллы, благодаря своей способности менять длину световой волны, значительно увеличат возможности оптических свойств материалов. Наибольший интерес представляют оксидные наноминералы [14]. Наиболее активно разрабатывается использование оксидных наноминералов в области катализа. Оксидные наноминералы позволяют создавать наноразмерные активные слои, которые способны заменить традиционно применяемые драгоценные металлы и сплавы, используемые в преобразователях для снижения выбросов угарного газа, гидрокарбонатов и оксидов азота. Важную роль, несомненно, будут играть наноминералогические исследования как основа для дальнейших разработок в области направленного модифицирования физико-химических свойств минералов с целью расширения возможностей обогащительных нанотехнологий. Приоритетными исследованиями в этом направлении представляются кристаллохимические и кристаллофизические исследования в системе «газ – наночастица» в физических полях [9]. Важным параметром, определяющим эффективность модификации поверхности, является отношение площади поверхности к объему частиц, известная характеристика – удельная поверхность, зависящая *не только от размеров, но и от геометрии наночастиц*.

Чтобы учесть особенности изменения свойств минералов в динамике, в том числе и направленные на повышение степени их контрастности в технологическом режиме, следует иметь в виду, что они формируются на различных дискретных уровнях (макро-, микро-, наноуровнях) и проявляются в широком гранулометрическом спектре как при рудоподготовке, так и в различных узлах схемы обогащения. При тонком измельчении могут значительно измениться конституция минералов (вплоть до появления новообразованных фаз, явлений аморфизации и др.), свойства поверхности и др.

Онтогенетический подход к оценке технологических особенностей минералов и руд обеспечивает: выбор оптимальных условий раскрытия зерен полезного компонента, когда кроме размера зерен учитывается их форма, природа срастаний, особенности границ срастающихся минералов; оптимизацию технологического процесса с учетом неоднородности состава и свойств минеральных индивидов (путем исследования их анатомии). В организации системы рудоподготовки и выбора наиболее оптимальных методов сепарации минерального сырья важно учитывать типоморфные признаки и свойства минералов и их агрегатов, определяющие минералого-технологические особенности типов и сортов руд с учетом глубины, комплексности, экологичности их переработки, высоких экономических показателей [5, 14, 17].

Граница срастания двух минеральных индивидов представляет собой область с постепенно меняющимися от одного индивида к другому значениями энергии, плотности, состава и других параметров. Структура границы несколько отличается от структуры кристаллической решетки минерального индивида. Отличие вызвано тем, что граница представляет собой краевую дислокацию кристаллической решетки и является буферной областью. Целесообразно различать понятия граница и поверхность границы минерального индивида [4, 5]. Поверхность границы индивида принято считать *двумерной фазой*. Она доступна исследованию методами оптической, электронной, атомно-силовой микроскопии, характеризуется некой микроскульптурой, шероховатостью и может быть сравнима с поверхностью грани. Мера шероховатости зависит от степени связанности структуры граничной области, от ее толщины, от скорости релаксации кристаллической решетки индивида в направлении той или иной границы, т.е. от энергии границы. Следовательно, и шероховатость поверхности индивида определяется кинетическими параметрами процесса роста индивидов и формирования агрегатов. Энергетические параметры границы могут фиксироваться геометрическим путем, при определении угловых отношений границы и узнаваемых габитусных граней, границы и кристаллооптических осей или иных кристаллографических элементов, а также путем количественной оценки шероховатости границы и расчета ее поверхностной энергии, удельной поверхностной энергии.

Известно два способа оценки энергетических характеристик границ срастания. Один из них состоит в измерении величины, пропорциональной удельной поверхности границы. Вторым – является оценка и расчет *атомарной плотности границы*. При этом вклад в поверхностную энергию дефектов кристаллической решетки разного типа, примесных ионов, нестехиометричность состава, объема и гра-



ницы индивидов остаются неучтенными. Главный вклад в значение величины поверхностной энергии вносит оценка периметра и шероховатости границы, а также расчет удельной поверхности зерна.

Структура границы непосредственно влияет на величину и оценку поверхностной энергии минерального зерна. При дезинтеграции минерального агрегата, т.е. при раскрытии сростков, при освобождении поверхности срастания, структура минерала релаксирует, образуя новые связи. Таким образом, граница минерального индивида функционально является мобильной и устойчивой, она может «открыть индивид» для его разрушения (растворения) или роста, может взять на себя функции сохранения объема зерна в зависимости от условий формирования. Адаптация агрегата к внешним геологическим или техногенным условиям происходит за счет изменения ориентировки, протяженности и площади границ индивидов и буферной зоны их срастания. В соответствии с энергетическим балансом границ индивидов и границ их срастания осуществляются все структурные преобразования в минеральном агрегате. Энергетический баланс и структура границ контролируются типом организации, насыщенности ионов в пределах краевой дислокации индивидов, типом организации краевых дислокаций в буферную зону, что определяет скорость и возможности «связывания» ионов поверхности в «границу» индивида. В этом смысле ее функция похожа на мембрану живой клетки.

Преобразование границ, изменение их структуры, ориентировки, энергонасыщенности происходит за счет не только внешних сил, но и освобождающейся энергии дефектов решетки при их миграции. Перекристаллизация агрегата приводит к формированию новых внутренних границ, новой структуры, адаптирующей агрегат к меняющимся условиям. Одновременно происходит «рафинирование» вещества и кристаллической решетки минеральных индивидов, аннигилируются ее дефекты и дислокации. Захваченные при предыдущей «быстрой» кристаллизации дисперсные рудные примеси отжимаются к границам зерен, образуют кластеры, которые, будучи структурированными, формируют решетку и, возможно, границу, т.е. новую фазу. Так, в процессе релаксации кристаллической структуры одного минерала может зародиться другой, индивиды которого могут остаться в рассеянном состоянии, но могут обнаружить способность к агрегации в зависимости от энергетического баланса их границ и матрицы. Их локализация остается рассеянной в пространстве агрегата до тех пор, пока эволюция системы не приведет к необходимости снижения ее внутренней энергии. Тогда рассеянные зерна нано- и микроскопических размеров, срастаясь друг с другом и снижая тем самым значение внутренней энергии агрегата, образуют сростки или мономинеральные субагрегаты [3, 15]. Дальнейший процесс самоорганизации может привести к образованию самостоятельных рудных тел.

Из сказанного следует, что любой процесс изменения энергетического поля, в котором оказывается минеральный агрегат, вызывает не просто отклик его внутренней энергии, но и специфические трансформации состава и строения. Это позволяет осуществлять стадийный анализ формирования наблюдаемого ансамбля минеральных зерен, онтогенический анализ *минерального агрегата*.

Таким образом, наметилась некая систематика границ срастания минеральных зерен, связанная с технологическими свойствами агрегата. Исходя из логических соображений о том, что энергия разрушения не может быть больше, чем энергия образования, в рассматриваемом случае – образования границ срастания, можно определить несколько типов границ. Границы структурно равновесные и структурно неравновесные, т.е. с равной и неравной поверхностной энергией срастающихся индивидов. Границы срастания структурно неравновесные, как правило, более устойчивы при дезинтеграции, чем равновесные. Однако если граница срастания двух зерен образована с одной стороны габитусной гранью индивида, а с другой – высокосимвольной (по И.И.Шафрановскому – иррациональной), то она «раскроется» сравнительно легко, так как габитусная, атомарно плотная грань, обладая неким запасом энергетической прочности, защитит объем минерального зерна. Эта модель прочности агрегата позволяет понять, почему существуют границы равновесные и неравновесные, устойчивые и неустойчивые. Однако для прогноза раскрываемости границ срастания или прогноза раскрытия сростков при дезинтеграции рудных образований требуется дополнительное изучение в области взаимодействия поля разрушающих сил и сил сопротивления, порождаемых строением минерального агрегата.

Выводы

Онтогенический подход к оценке технологических особенностей минералов и руд (учет кроме размера зерен их формы, природы срастаний, особенностей границ и их поверхности) обеспечивает: *выбор оптимальных условий раскрытия зерен полезного компонента; оптимизацию технологического*



процесса с учетом неоднородности состава и свойств минеральных индивидов (путем исследования их анатомии). Поэтому в ходе опробования месторождений, рудоподготовки и выбора оптимальных методов сепарации минерального сырья необходимо выявлять формы нахождения полезного компонента, учитывать типоморфные признаки и свойства минералов и их агрегатов, определяющие минералогическо-технологические особенности типов и сортов руд, прогнозируя на этой основе глубину, комплексность, экологичность их переработки, экономические показатели извлечения.

Таким образом, выявление форм нахождения полезного компонента, количественное изучение типоморфных особенностей строения минеральных индивидов и агрегатов позволит реставрировать условия рудобразования, сертифицировать качество минерального сырья и разработать технологические схемы извлечения полезного компонента. В результате открываются широкие возможности экономически рентабельной и экологически более чистой разработки месторождений полезных ископаемых, переоценки масштабов рудоносности в сторону понижения кондиций, определения рентабельного спектра попутно извлекаемых полезных компонентов. Все это создаст научно обоснованную базу увеличения масштабов балансовых запасов известных месторождений и перевода многих «рудопроявлений», «участков минерализации» в объекты лицензирования и промышленной разработки.

Для успешного продвижения в этих направлениях необходимо создание специализированных центров и подготовка специалистов, владеющих не только знаниями традиционных геологических дисциплин, но и современными аналитическими методами, достижениями микро- и наноминералогии, компьютерными технологиями, рациональными методами разработки месторождений, обогащения руд и их переработки.

Благодарность. Работа выполнена в рамках проектной части госзадания в сфере научной деятельности № 5.2115.2014/К на 2014-2016 гг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев В.И. Структурно-химическая неоднородность природных кристаллов и микрогеохимическое направление в онтогении минералов / В.И.Алексеев, Ю.Б.Марин // Записки Российского минералогического общества. 2012. Вып.1. С.3-21.
2. Асхабов А.М. Кватеронный механизм образования наночастиц и ультрадисперсных материалов / Наноминералогия. Ультра- и микродисперсное состояние минерального вещества. СПб: Наука, 2005. С.61-90.
3. Бродская Р.Л. Онтогенетический анализ индивидов оливина в ультрамафитах / Р.Л.Бродская, И.В.Бильская, Б.А.Марковский // Записки Российского минералогического общества. 2009. Вып.5. С.18-32.
4. Бродская Р.Л. Проблемы моделирования внутреннего строения упорядоченных и равновесных минералогическо-петрографических систем / Р.Л.Бродская, Ю.Б.Марин // Записки Всероссийского минералогического общества. 2001. Вып.6. С.1-14.
5. Бродская Р.Л. Энергетическая характеристика внутренних границ и технологические свойства минеральных агрегатов / Р.Л.Бродская, Ю.Б.Марин // Доклады РАН. 1995. Т.344. № 5. С.654-656.
6. Жмодик С.М. Наночастицы благородных и редких элементов в геологических процессах // Проблемы геохимии эндогенных процессов и окружающей среды. Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2007. Т.3. С.145-148.
7. Зависимость концентрации микроэлемента от размера кристалла в пробе / В.Л.Таусон, Т.М.Пастушкова, Д.Н.Бабкин, Т.С.Краснощекова, Э.Е.Лустенберг // Геология и геофизика. 2010. Т.51. № 7. С.981-992.
8. Конеев Р.И. Наноминералогия и наногеохимия руд месторождений золота Узбекистана / Р.И.Конеев, Р.А.Халматов, Ю.С.Мун // Записки Российского минералогического общества. 2010. № 2. С.1-14.
9. Котова О.Б. Поверхностные процессы в тонкодисперсных минеральных системах. Екатеринбург: Изд-во УрОРАН, 2004. 194 с.
10. Лазерная агломерация ультрадисперсного золота из минеральных и техногенных ассоциаций высокоглинистых песков / Н.А.Леоненко, А.П.Кузьменко, М.В.Петерсон, Н.А.Кузьменко // Записки Горного института. 2007. Т.171. С.113-116.
11. Леоненко Н.А. Терморadiационная активация и формирование упорядоченных структур в дисперсных минеральных средах при лазерном воздействии / Н.А.Леоненко, Е.А.Ванина // Физика и химия обработки материалов. 2011. № 2. С.23-26.
12. Минералогическая интервенция в микро- и наномир / Под ред. Н.П.Юшкина. Сыктывкар: Геопринт, 2009. 548 с.
13. Наночастицы в процессах разрушения и вскрытия геоматериалов / В.А.Чантурия, К.Н.Трубецкой, С.Д.Викторов, И.Ж.Бунин; ИПКОН РАН. М., 2006. 276 с.
14. Перспективные геотехнологии / Гл. ред. акад. Н.П.Юшкин. СПб: Наука, 2010. 376 с.
15. Типоморфные особенности строения минеральных агрегатов ультрамафитов и механизм концентрации в них хромшпинелидов / Р.Л.Бродская, И.В.Бильская, Ю.В.Кобзева, В.Д.Ляхницкая // Записки Всероссийского минералогического общества. 2003. Вып.4. С.18-37.
16. Урусов В.С. Геохимия твердого тела / В.С.Урусов, В.Л.Таусон, В.В.Акимов. М.: ГЕОС, 1997. 500 с.
17. Revnivitsev V.I. Technological mineralogy as a scientific trend in applied mineralogy // Geologic-technological assessment of ore minerals, samples and deposits. Leningrad: Mekhanobr, 1990. P.4-10.

Авторы: Р.Л.Бродская, д-р геол.-минерал. наук, ведущий научный сотрудник, Rimma_Brodskaaya@vsegei.ru (Всероссийский научно-исследовательский геологический институт (ВСГЕИ), Санкт-Петербург, Россия), Ю.Б.Марин, д-р геол.-минерал. наук, профессор, чл.-кор. РАН, marin@minsoc.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Россия)
Статья принята к публикации 16.02.2016.



ONTOGENIC ANALYSIS OF MINERAL INDIVIDUALS AT MICRO- AND NANOLEVEL FOR THE RESTORATION OF ORE-FORMING CONDITIONS AND ASSESSMENT OF MINERALS PROCESSING PROPERTIES

R.L.BRODSKAYA¹, Yu.B.MARIN²

¹ Russian science-research geological institute «VSEGEI», Saint-Petersburg, Russia

² Saint-Petersburg Mining University, Russia

While organizing the ore preparation system and selecting optimal methods for minerals separation, it is necessary to take into account typomorphic characteristics and properties of minerals and their aggregates that determine mineralogical and technological features of ore types and grades. Fine-dispersed ore is included into the process flow sheet; accounting particle size becomes the determining factor in ore processing technologies.

With disintegration of mineral aggregate, disclosure of intergrowths, and release of intergrowth surface, its structure is relaxed to form new bonds. Mineral individual boundary can «open an individual» for its decomposition (dissolution) or growth; it can take over the functions of grain volume conservation. Adapting the aggregate to the external environment is due to the change in orientation, length and area of boundaries of individuals and the buffer zone of their intergrowth. All structural changes in mineral aggregate proceed in accordance with the energy balance of individual boundaries and boundaries of their intergrowth; therewith, substance, crystal lattice of mineral individuals are being «refined», its defects and dislocations are being annihilated. In the process of relaxation of the structure of a mineral, another mineral can arise, which individuals can remain in a dispersed state or be capable of aggregation depending on the energy balance of their boundaries and the matrix.

Ontogenetic approach to the assessment of the features of mineral individuals and aggregates serves the purpose of restoration of ore-formation environment, provides a choice of optimum conditions of the disclosure of useful component grains, when in addition to the grain size, their shape, intergrowth nature, features of the boundaries of intergrowing minerals, heterogeneities of the composition and properties of mineral individuals are taken into account. It is resulted in the appearance of new opportunities of profitable and more environmentally friendly mining, ore potential revaluation towards lowering the grade, determination of cost-effective range of components extracted simultaneously.

Key words: mineral individuals and aggregates, micro- and nanomineralogy, ontogenetic analysis, intergrowth boundaries, technological properties.

How to cite this article: Brodskaya R.L., Marin Yu.B. Ontogenetic analysis of mineral individuals at micro- and nanolevel for the restoration of ore-forming conditions and assessment of minerals processing properties. Zapiski Gornogo instituta. 2016. Vol.219, p. 369-376. DOI 10.18454/PMI.2016.3.369

REFERENCES

1. Alekseev V.I., Marin Yu.B. Strukturno-khimicheskaya neodnorodnost' prirodnykh kristallov i mikrogeokhimicheskoe napravlenie v ontogenii mineralov (*Structural and chemical heterogeneity of virgin crystals and microgeochemistry in ontogeny of minerals*). Zapiski Rossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva. 2012. Iss.1, p.3-21.
2. Askhabov A.M. Kvataronnyi mekhanizm obrazovaniya nanochastits i ul'tradispersnykh materialov (*Quataron mechanism of the formation of nanoparticles and ultrafine materials*). Nanomineralogiya. Ultra- i mikrodispersnoe sostoyanie mineral'nogo veshchestva. St. Petersburg: Nauka, 2005, p.61-90.
3. Brodskaya R.L., Bil'skaya I.V., Markovskii B.A. Ontogenicheskii analiz individov olivina v ul'tramafitakh (*Ontogenic analysis of olivine individuals in ultramafite*). Zapiski Rossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva. 2009. Iss.5, p.18-32.
4. Brodskaya R.L., Marin Yu.B. Problemy modelirovaniya vnutrennego stroeniya uporyadochennykh i ravnovesnykh mineralo-petrograficheskikh sistem (*Problems of modeling the internal structure of ordered and equilibrium mineralogical and petrographic systems*). Zapiski Vserossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva. 2001. Iss.6, p.1-14.
5. Brodskaya R.L., Marin Yu.B. Energeticheskaya kharakteristika vnutrennikh granits i tekhnologicheskiesvoistva mineral'nykh agregatov (*Energy characteristics of internal borders and technological properties of mineral aggregates*). Doklady RAN. 1995. Vol.344. N 5, p.654-656.
6. Zhmodik S.M. Nanochastitsy blagorodnykh i redkikh elementov v geologicheskikh protsessakh (*Nanoparticles of precious and rare elements in geological processes*). Problemy geokhimii endogennykh protsessov i okruzhayushchei sredy. Irkutsk: Izd-vo In-ta geografii SO RAN, 2007. Vol.3, p.145-148.
7. Tauson V.L., Pastushkova T.M., Babkin D.N., Krasnoshchekova T.S., Lustenberg E.E. Zavisimost' kontsentratsii mikroelementa ot razmera kristalla v probe (*Dependence of trace element concentrations on the crystal size in the sample*). Geologiya i geofizika. 2010. Vol.51. N 7, p.981-992.
8. Koneev R.I., Khalmatov R.A., Mun Yu.S. Nanomineralogiya i nanogeokhimiya rud mestorozhdenii zolota Uzbekistana (*Nanomineralogy and nanogeochemistry of gold deposits in Uzbekistan*). Zapiski Rossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva. 2010. N 2, p.1-14.
9. Kotova O.B. Poverkhnostnye protsessy v tonkodispersnykh mineral'nykh sistemakh (*Surface processes in fine-grained mineral systems*). Ekaterinburg: Izd-vo UrORAN. 2004, p.194.
10. Leonenko N.A., Kuz'menko A.P., Peterson M.V., Kuz'menko N.A. Lazernaya aglomeratsiya ul'tradispersnogo zolota iz mineral'nykh i tekhnogennykh assotsiatsii vysokoglinistykh peskov (*Laser agglomeration of ultrafine gold from mineral and technogenic associations of high-argillaceous sand*). Zapiski Gornogo instituta. 2007. Vol.171, p.113-116.
11. Leonenko N.A., Vanina E.A. Termoradiatsionnaya aktivatsiya i formirovanie uporyadochennykh struktur v dispersnykh mineral'nykh sredakh pri lazernom vozdeistvii (*Thermoradiation activation and the formation of ordered structures in disperse mineral media under laser action*). Fizika i khimiya obrabotki materialov. 2011. N 2, p.23-26.



12. Mineralogicheskaya interventsia v mikro- i nanomir (*Mineralogical intervention in micro- and nanoworld*). Pod red. N.P.Yushkina. Syktyvkar: Geoprint, 2009, p.548.
13. Chanturiya V.A., Trubetskoi K.N., Viktorov S.D., Bunin I.Zh. Nanochastitsy v protsessakh razrusheniya i vskrytiya geomaterialov (*Nanoparticles in the processes of destruction and dissection of geological material*); IPKON RAN. Moscow, 2006, p.276.
14. Perspektivnye geotekhnologii (*Advanced geotechnologies*). Gl. red. akad. N.P.Yushkin. St. Petersburg: Nauka, 2010, p.376.
15. Brodskaya R.L., Bil'skaya I.V., Kobzeva Yu.V., Lyakhnitskaya V.D. Tipomorfnye osobennosti stroeniya mineral'nykh agregatov ul'tramafitov i mekhanizm kontsentratsii v nikh khromshpinelidov (*Typomorphic structural features of ultramafite mineral aggregates and mechanism of chrome spinellide concentration in them*). Zapiski Vserossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva. 2003. Iss.4, p.18-37.
16. Urusov V.S., Tauson V.L., Akimov V.V. Geokhimiya tverdogo tela (*Solid state geochemistry*). Moscow: GEOS, 1997, p.500.
17. Revnitshev V.I. Technological mineralogy as a scientific trend in applied mineralogy. Geologic-technological assessment of ore minerals, samples and deposits. Leningrad; Mekhanobr. 1990, p.4-10.

Authors: **R.L.Brodskaya**, Dr. of Geological & Mineral Sciences, Leading Researcher, Rimma_Brodskaya@vsegei.ru (Russian science-research geological institute «VSEGEI», Saint-Petersburg, Russia), **Yu.B.Marin**, Dr. of Geological & Mineral Sciences, Professor, Associate Member of the Russian Academy of Sciences, marin@minsoc.ru (Saint-Petersburg Mining University, Russia)

Manuscript Accepted 16.02.2016.



Горное дело

УДК 536.24: 622.413

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ РУДНИКОВ КРИОЛИТОЗОНЫ

А.Ф.ГАЛКИН

Санкт-Петербургский горный университет, Россия

Приведены результаты качественного и количественного анализа формирования теплового режима современных механизированных рудников криолитозоны. Установлены основные закономерности формирования теплового режима в выработках рудника и окружающих их горных пород в течение годового цикла. Сделана оценка жесткости микроклимата при эксплуатации рудника без регулирования теплового режима. Установлено, что для большинства существующих и проектируемых рудников криолитозоны на всем протяжении вентиляционного пути жесткость параметров микроклимата в холодный период года превышает допустимые значения. Это может вызвать существенное увеличение производственно-обусловленных простудных заболеваний рабочих. Показано, что часть выработок рудника при эксплуатации в условиях нерегулируемого теплового режима не отвечает критерию безопасности при возникновении чрезвычайных ситуаций. В частности, это связано с тем, что типовые самоспасатели, используемые в рудниках, имеют предельную температуру эксплуатации -20°C . В холодный период года воздух в большинстве выработок имеет температуру ниже этого значения. По результатам исследований предложен алгоритм прогноза и оценки параметров теплового режима рудников, который позволит обеспечить безопасную эксплуатацию рудников как в обычный период, так и при возникновении чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: рудник, тепловой режим, проветривание, безопасность, регулирование, криолитозона.

Как цитировать эту статью: Галкин А.Ф. Тепловой режим рудников криолитозоны // Записки Горного института. 2016. Т.219. С.377-381. DOI 10.18454/PMI.2016.3.377

Развитие горнодобывающей промышленности России происходит, в основном, за счет северных регионов, климат которых характеризуется большой продолжительностью зимнего периода с низкими отрицательными температурами воздуха. Соответственно, и энергетические затраты на регулирование теплового режима шахт и рудников Севера значительно выше, чем в других горнодобывающих регионах [4, 6, 7, 9].

При проектировании и эксплуатации современных высокомеханизированных рудников Севера регулирование теплового режима не предусматривается вовсе, так как не считается, что работники находятся в дискомфортной температурной зоне, а устойчивость горных выработок, а следовательно, и безопасность работ при нерегулируемом тепловом режиме выше. Спорность этого утверждения не является очевидной и требует научного обоснования в каждом конкретном случае. Как проектировщики, так и контролирующие органы едины во мнении, что при нерегулируемом тепловом режиме возникает проблема в области безопасности при возникновении чрезвычайных ситуаций (ЧС) в руднике, например при пожаре. Дело в том, что при отсутствии регулирования теплового режима температура воздуха в отдельных выработках рудника в определенный период года может составлять -40°C и ниже [4, 5]. Это делает невозможным использование обычных типовых самоспасателей, которые могут применяться только при температурах выше -20°C . Соответственно, при проектировании необходимо предусмотреть комплекс специальных мероприятий для безопасного подъема горняков на поверхность с учетом данного ограничения.

При проектировании рудников с нерегулируемым тепловым режимом для минимизации негативных последствий возможных чрезвычайных ситуаций разрабатываются специальные «Мероприятия по ведению спасательных работ при пожарах в подземных горных выработках в условиях отрицательных температур воздуха», которые потом используются при разработке планов ликвидации аварий. Как правило, основные рекомендуемые мероприятия заключаются в следующем: 1) прекращение работ в руднике при температуре ниже -40°C ; 2) использования калориферных установок для подогрева воздуха в период реверсии вентиляционной струи; 3) контроль формирования теплового режима в выработках; 4) корректировка планов ведения горных работ в течение сезонов года.

Выполненный качественный и количественный анализ проектных разделов данного документа показал, что они не учитывают ряд специфических моментов, которые характерны для рудников криолитозоны и нуждаются в корректировке. Причем многие недостатки вызваны отсутствием теоретического и практического опыта исследований теплового режима в механизированных рудниках криолитозоны. В частности, в качестве критерия для определения возможности эффективного проведения гипотетической спасательной операции выбирается температура воздуха, равная -20°C . Это предельная температура эксплуатации горнорабочими типовых самоспасателей марки ШСС-Т и

ШСС-М. Таким образом, в данном случае прямого расчетного запаса нет. Существует только косвенный, определяемый вероятностью появления низких температур в районе строительства рудника. Следует учесть, что с течением времени при эксплуатации рудника будет происходить прогрессирующее охлаждение горных пород. И общее количество выработок, которые попадут в зону недопустимых температур, будет увеличиваться.

Кроме того, при разработке мероприятий не учитывается ни прямо, ни косвенно факт резкого увеличения энергетической стоимости работ горноспасателей при низких температурах. Известно, что энергозатраты на выполнение работы любой степени тяжести при понижении температуры повышаются [1, 2], например, при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ они увеличиваются почти на 30 %. Следует ожидать, что при работе в изолирующих самоспасателях эти значения будут еще выше. Увеличивается и время физиологически необходимого отдыха человека для восстановления нормальной работоспособности.

Изменяется и собственно градация труда по тяжести. Например, труд «средней тяжести» переходит в «тяжелый». А «тяжелый», соответственно, в «очень тяжелый». Если данный показатель учесть в известных расчетных формулах, то изменится и допустимая температура воздуха в выработках, а следовательно, и требуемая мощность калориферной установки. Контрольные расчеты показывают, что установочная мощность калорифера в этом случае увеличится в 1,3-1,5 раза (соответственно при подогреве воздуха на выходе из калорифера до -15 и $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Следует отметить, что суть предлагаемых конкретных мероприятий (реверсия с подогревом воздуха) останется прежней. Изменится только количество задействованных установок, т.е. установка, которую обычно относили к резервной, должна рассматриваться как основная. Должен также увеличиться и резервный запас топлива. В материальной составляющей это практически не изменяет суть технических предложений, но существенно увеличивает их надежность. В качестве дополнительного замечания укажем на отсутствие при разработке разделов типовых мероприятий расчетов по величине и изменению естественной тяги воздуха при реверсии вентиляционной струи при пожаре в руднике в различные периоды года.

При подготовке разделов мероприятий для плана ликвидации аварий целесообразен следующий порядок действий. В первую очередь необходимо сделать прогноз ожидаемого изменения температуры воздуха по сети горных выработок в течение года. Затем следует определить предельную длину вентиляционного пути, на котором даже в самый холодный период года температура не превысит значение, допустимое по правилам технической эксплуатации самоспасателей. Последнее дает возможность квалифицированно оценить риски, возникающие в условиях ЧС, и разработать превентивные мероприятия уже на стадии проектирования рудника.

Для прогноза теплового режима в горных выработках рудников целесообразно использовать модифицированные для рассматриваемых условий модели, приведенные в работах [3, 8]. На их основе были проведены многовариантные расчеты для строящихся и проектирующихся рудников криолитозоны. Рассмотрим результаты расчетов на примере проектирующегося механизированного рудника криолитозоны «Джульетта» (расчеты выполнены аспирантами А.В.Дормидонтовым, А.А.Ивашиным, А.А.Наумовым, Д.В.Николаевой). Целью тепловых расчетов являлась оценка влияния теплового режима на безопасность и комфортность условий труда горнорабочих в различные периоды года, в том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций в руднике.

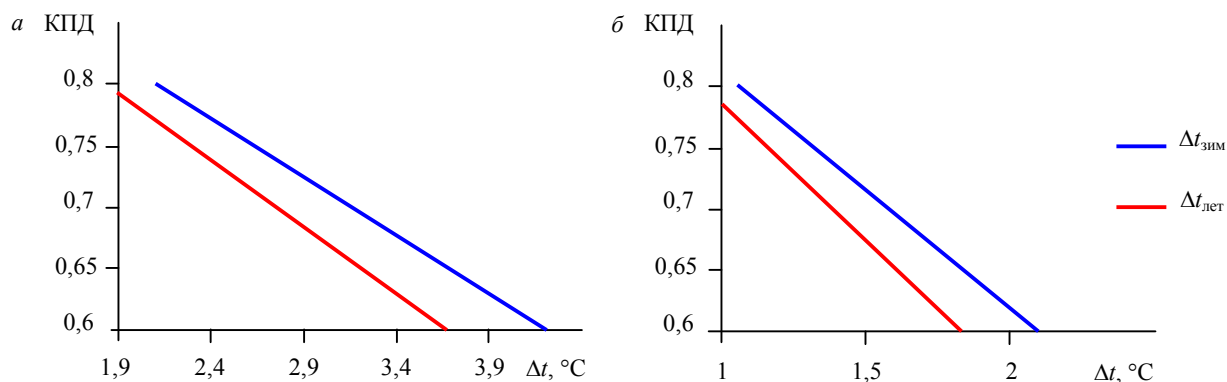


Рис. 1. Приращение температуры рудничного воздуха в зависимости от КПД дизельных машин при общей мощности силовых установок 708 кВт и расходе воздуха $60,1\text{ м}^3/\text{с}$ (а) и $120,2\text{ м}^3/\text{с}$ (б)



Результаты расчетов свидетельствуют о том, что полученные качественные закономерности в большинстве случаев соответствуют традиционным представлениям о формировании естественного (нерегулируемого) теплового режима в горных выработках рудников при постоянном проветривании [4-6] и различаются только количественными характеристиками, обусловленными небольшими геометрическими размерами рудника. Расчеты были проведены для характерных участков вентиляционного пути.

Установлено, что в условиях обычной эксплуатации наблюдается прогрессивное охлаждение горных выработок. Существенное влияние на формирование теплового режима оказывают абсолютные источники тепловыделений (работающие дизельные машины).

При построении графиков повышения температуры воздуха в выработках за счет действия абсолютных источников последние рассматривались как равномерно распределенные по длине вентиляционного пути, по которым они осуществляют движение (рис.1).

Из графиков (рис.1, а) видно, что с уменьшением коэффициента полезного действия машины прирост температуры увеличивается. Например, при КПД, равном 0,6, прирост температуры может составить 3,7 °С в летний период и почти 4,2 °С в зимний период. Разный уровень нагрева воздуха в зимний и летний периоды объясняется тем, что воздух зимой достаточно сухой и теплоемкость его ниже, чем в летний период года, когда абсолютная влажность воздуха значительно выше.

Очевидно также, что чем больше расход воздуха, тем меньше влияние машин и механизмов на формирование теплового режима в руднике как в летний, так и в зимний периоды года (рис.1, б).

Прогноз глубины оттаивания горных пород является важной составляющей, позволяющей оценить устойчивость горных выработок. Прогноз проводился по модифицированной методике, приведенной в работе [4]. Поскольку свойства горных пород и их естественный температурный режим в реальных условиях могут изменяться, рассматривались расчетные варианты от наилучшего ($n = 0,6$) до наихудшего ($n = 1,0$). Анализ показал, что даже в наихудшем случае глубина ореола оттаивания в выработках рудника не превысит 2 м. В реальных условиях это значение будет колебаться от 1,7 до 1,5 м. Пример расчета для пород характерного инженерно-геологического элемента (№ 7, андезиты) приведен на рис.2. Характеристики пород ИГЭ 7 являются наиболее часто встречающимися по всей длине выработок, и поэтому могут рассматриваться как типичные.

Поскольку свойства пород и температура в выработках носят случайный характер, были проведены многовариантные расчеты для различных теоретически возможных случаев, например, необычайно жаркого лета или увеличения длительности периода оттаивания от 3 до 5 месяцев. Построены гистограммы возможного изменения глубины оттаивания пород по всей длине вентиляционного пути. Установлено, что глубина оттаивания изменяется незначительно даже при увеличении расхода воздуха в 2 раза. Это объясняется тем, что уже при расходе воздуха 60,1 м³/с коэффициент теплоотдачи от воздуха к породам имеет очень большое значение и, практически, температура стенки горной выработки равна температуре воздуха. Следует отметить, что при нерегулируемом тепловом режиме происходит прогрессирующее охлаждение горных пород деятельного слоя выработок, в связи с чем глубина оттаивания пород будет уменьшаться от года к году.

Используя результаты прогноза теплового режима выработок, была сделана оценка жесткости микроклимата в руднике. Под жесткостью микроклимата понимается такое сочетание параметров микроклимата, суммарное воздействие которых на рабочего не приводит к производственно-обусловленным простудным заболеваниям [4]. Для подземных горных выработок в криолитозоне рекомендуется использовать следующие предельные сочетания температуры и скорости воздуха v в метрах в секунду: а) для очистных и подготовительных выработок $t \geq 2v - 8$ °С; б) для остальных выработок $t \geq 2v - 15$ °С.

Анализ данных расчетов показал, что в большинстве горных выработок рудника при естественном тепловом режиме жесткость микроклимата в зимний период года существенно превышает предельные рекомендуемые значения. При эксплуатации рудника следует учитывать этот факт и предусмотреть, наряду с индивидуальными средствами защиты горнорабочих от охлаждающего микроклимата, специальные обогревательные пункты.

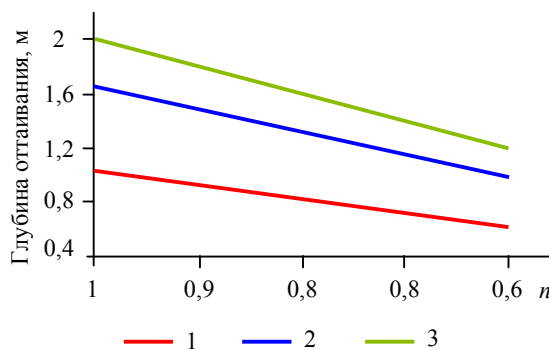


Рис.2. Изменение глубины оттаивания пород для инженерно-геологического элемента № 7
1 – за 1 месяц (июнь); 2 – за 2 месяца (июнь – июль);
3 – за 3 месяца (июнь – август)



Выводы

Выполненный анализ показал, что проведение исследований и разработка рекомендаций по прогнозу, выбору и обеспечению оптимальных параметров теплового режима золотодобывающих рудников Севера с целью повышения надежности и безопасности их эксплуатации как с естественным (нерегулируемым), так и с регулируемым тепловым режимом является актуальной проблемой горной теплофизики на современном этапе. Для достижения цели должны быть решены следующие основные задачи.

1. Организация системных наблюдений за формированием естественного теплового режима в горных выработках рудников и окружающем массиве пород на различных стадиях отработки рудного тела.

2. Разработка экспериментально-теоретического метода прогноза теплового режима в рудниках для проведения прямых и обратных расчетов, в том числе при реверсии вентиляционной струи с переменным расходом воздуха.

3. Экспериментально-аналитическая оценка влияния теплового режима на основные и вспомогательные процессы горного производства, включая безопасность ведения горных работ и обеспечение длительной устойчивости горных пород.

4. Оценка целесообразности и выбор рациональных параметров горнотехнических систем регулирования теплового режима, в том числе на основе вторичного использования отработанных горных выработок.

5. Оценка и выбор рациональных параметров теплового режима рудников в условиях чрезвычайных ситуаций.

6. Разработка практических рекомендаций для проектирования и эксплуатации рудников по выбору и обеспечению рациональных параметров теплового режима, минимизирующих негативное влияние теплового фактора на ведение горных работ.

7. Разработка требований и типовой методики по составлению планов ликвидации аварий на рудниках криолитозоны, эксплуатирующихся без регулирования теплового режима.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Афанасьева Р.Ф.* Холодовой стресс // Библиотека инженера по охране труда. 2007. № 6. С.73-82.
2. *Галкин А.Ф.* Экспериментальные исследования энергетических затрат работников в условиях охлаждающего микроклимата / А.Ф.Галкин, Р.Г.Хусаинова // Записки Горного института. 2014. Т.207. С.103-105.
3. *Галкин А.Ф.* Теплоаккумулирующие выработки / А.Ф.Галкин, Ю.А.Хохолов. Новосибирск: Наука, 1992. 133 с.
4. *Дядькин Ю.Д.* Основы горной теплофизики. М.: Недра, 1968. 256 с.
5. *Дядькин Ю.Д.* Тепловой режим рудных, угольных и россыпных шахт Севера / Ю.Д.Дядькин, А.Ф.Зильберборд, П.Д.Чабан. М.: Наука, 1968. 172 с.
6. *Шувалов Ю.В.* Теория и практика оптимального управления тепловым режимом подземных сооружений криолитозоны / Ю.В.Шувалов, А.Ф.Галкин // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2010. № 8. С.365-370.
7. *Galkin A.F.* Integrated use of mine openings in criolithic zone // Metallurgical and mining Industry. 2015. N 2. P.312-315.
8. *Galkin A.F.* Programmer complex for deciding problems of mining thermal physics / A.F.Galkin, Y.A.Hoholov, E.K.Romanova // CHMTYG Proceedings of the Int. Conf. of Computational Heat and Mass Transfer / Eastern Mediterranean University, G. Magasa, April 26-29, Turkey, 1999. P.153-157.
9. *Galkin A.F.* Thermal control mining system design // Metallurgical and mining Industry. 2015. N 4. P.396-399.

*Автор А.Ф.Галкин, д-р техн. наук, профессор, afgalkin@yandex.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Россия).
Статья принята к публикации 17.02.2016.*

THE THERMAL CONDITION OF THE MINES IN CRYOLITE ZONE

A.F.GALKIN

Saint-Petersburg Mining University, Russia

Are given the results of the qualitative and quantitative analysis of the formation of the thermal condition of the contemporary mechanized mines in cryolite zone. Are established basic laws governing the formation of thermal condition in workings of mine and their surrounding rocks during the annual cycle. The estimation of the hardness of microclimate with the operation of mine without the regulation of thermal condition is made. It was established that for most existing and planned mines in permafrost areas the gravity of microclimate during the cold period of the year exceeds the maximum permissible values along the whole length of the ventilation path. This can cause a significant increase in occurrence of cold-like occupational diseases in the workers. It is shown that the part of the productions of



mine, with the operation under the conditions of the uncontrolled thermal condition, does not answer the criterion of safety with the appearance of extraordinary situations. In particular, it is connected with that the standard self-rescuers commonly used in the mines have the lowest operating temperature not less than -20°C . During the cold period of the year the air temperature in most workings is lower than this value. In accordance with the results of research an algorithm for prognosis and assessment of parameters of heat regime of mines which would allow to secure a safe exploitation of the mine during both normal operating conditions and in cases of emergency situations.

Key words: mine, thermal condition, ventilation, safety, regulation, cryolite zone.

How to cite this article: Galkin A.F. The thermal condition of the mines in cryolite zone. Zapiski Gornogo instituta. 2016. Vol.219, p.377-381. DOI 10.18454/PMI.2016.3.377

REFERENCES

1. Afanas'eva R.F. Holodovoj stress (*Cold stress*). Biblioteka inzhenera po ohrane truda. 2007. N 6. C.73-82.
2. Galkin A.F., Husainova R.G. Jeksperimental'nye issledovanija jenergeticheskikh zatrat rabotnikov v uslovijah ohlazhdajushhego mikroklimate (*Experimental studies of power expenditures of workers in the conditions of the cooling microclimate*). Zapiski Gornogo instituta. 2014. Vol.207, p.103-105.
3. Galkin A.F., Hoholov Ju.A. Teploakkumulirujushhie vyrabotki (*Heat-retaining Workings*). Novosibirsk: Nauka, 1992, p.133.
4. Djad'kin Ju.D. Osnovy gornoj teplofiziki (*Basics of Mining Thermophysics*). Moscow: Nedra, 1968, p.256.
5. Djad'kin Ju.D., Zil'berbord A.F., Chaban P.D. Teplovoj rezhim rudnyh, ugol'nyh i rossypnyh shaht Severa (*The thermal regime of ore, coal and placer mines in the North*). Moscow: Nauka, 1968, p.172.
6. Shuvalov Ju.V., Galkin A.F. Teorija i praktika optimal'nogo upravlenija teplovym rezhimom podzemnyh sooruzhenij kriolitozony (*The theory and practice of optimal thermal management of underground facilities permafrost*). Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'. 2010. N 8, p.365-370.
7. Galkin A.F. Integrated use of mine openings in criolithic zone. Metallurgical and mining Industry. 2015. N 2, p.312-315.
8. Galkin A.F., Hoholov Y.A., Romanova E.K. Programmer complex for deciding problems of mining thermal physics. CHMTYG Proceedings of the Int. Conf. of Computational Heat and Mass Transfer. Eastern Mediterranean University, G. Magasa, April 26-29, Turkey, 1999, p.153-157.
9. Galkin A.F. Thermal control mining system design. Metallurgical and mining Industry. 2015. N 4, p.396-399.

Author A.F.Galkin, Dr. of Engineering Sciences, Professor, afgalkin@yandex.ru (Saint-Petersburg Mining University, Russia)
Manuscript Accepted 17.02.2016.



УДК 622.831

РАЗРАБОТКА НЕЛИНЕЙНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОГНОЗА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

А.П.ГОСПОДАРИКОВ

Санкт-Петербургский горный университет, Россия

В статье рассмотрены вопросы, связанные с построением нелинейных математических моделей напряженно-деформированного состояния слоистого неоднородного массива горных пород в окрестности выработки в пологих пластах. К основной системе разрешающих дифференциальных уравнений в частных производных (уравнения равновесия) и известных зависимостей Коши (формулы связи между деформациями и перемещениями) приводятся нелинейные физические соотношения между напряжениями и деформациями. Последние задаются как с помощью упругого потенциала, так и в виде степенного закона упрочнения или линейного закона упрочнения.

В рамках принятых гипотез теории малых упругопластических деформаций Генки – Ильюшина разработаны алгоритмы и вычислительные комплексы решения прикладных задач геомеханики с применением численных методов: метода конечных разностей, метода конечных элементов, метода граничных элементов. Нелинейные краевые задачи на основе метода линеаризации Ньютона – Канторовича – Рафсона сводятся к итерационному процессу решения последовательности линейных краевых задач.

Ключевые слова: неоднородный массив горных пород, горная выработка, нелинейное деформирование пород, теория малых упругопластических деформаций Генки – Ильюшина, метод линеаризации Ньютона – Канторовича – Рафсона, общий итерационный процесс, численные методы и вычислительные комплексы.

Как цитировать эту статью: Господариков А.П. Разработка нелинейных математических моделей и численное моделирование прогноза напряженно-деформированного состояния массива горных пород // Записки Горного института. 2016. Т.219. С.382-386. DOI 10.18454/PMI.2016.3.382

Проектирование и строительство горных выработок, сооружение подземных объектов различного назначения на больших глубинах и добыча полезных ископаемых в сложных горно-геологических условиях тесно связаны с анализом основных параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) массивов горных пород: полей напряжений, деформаций и перемещений. Под действием статических и динамических нагрузок горные породы вокруг горных выработок переходят в предельное состояние и разрушаются в условиях неоднородного поля напряжений. Как правило, при этом наблюдается динамическое разрушение горных пород в форме вывалов, внезапных выбросов, горных ударов.

Поэтому обработка запасов полезных ископаемых связана с техногенным «возмущением» исследуемой среды – массива горных пород. Последний весьма сложен по строению, различен по своим геомеханическим свойствам и характеризуется широким разнообразием законов изменения его НДС. Широкий круг проблем управления геомеханическими процессами в массиве горных пород связан с очистными выработками и, как следствие, выемкой полезного ископаемого из недр, т.е. наличием в пределах выемочных участков выработанных пространств. Результаты решения таких задач геомеханики позволяют не только обеспечивать безопасность работ в очистных застоях, но и определять выбор рациональных технологических решений. Последнее достигается исследованием НДС горных пород непосредственной и основной кровли пластов, представленной неоднородными элементами массива.

Таким образом, важная задача обеспечения длительного срока службы горных выработок в условиях неоднородного объемного (или в силу принятых обоснованных допущений плоского) напряженного состояния, возникающего вследствие ведения горных работ на больших глубинах (800 м и более), приводит исследователя к необходимости дальнейшего совершенствования методов оценки основных параметров НДС приконтурного массива горных пород с последующей проверкой полученных результатов как в лабораториях, так и в шахтных условиях.

Отметим, что многие инженерные методы расчета в силу принимаемых гипотез и допущений, как правило, не дают обоснованных ответов на разнообразные вопросы, выдвигаемые горной геомеханикой. Поэтому наряду с расчетными методами, основанными на шахтных наблюдениях и физическом моделировании, в настоящее время весьма успешно разрабатываются и применяются также эффективные методы численного моделирования [1, 4, 9, 12, 15].

Численное математическое моделирование для решения важных прикладных задач геомеханики является наиболее перспективным по ряду причин, во-первых, в связи наличием мощных ЭВМ (в том числе и ПК) и, во-вторых, в силу высокой эффективности современных приближенных вычислительных методов, позволяющих проектировать и эксплуатировать горные выработки на основе результатов прогнозного расчета основных параметров НДС вмещающего их реального (неоднородного) массива горных пород.



Таким образом, обеспечение надежных прогнозных оценок геомеханических процессов в массиве, в том числе параметров полей напряжений, деформаций и перемещений, адекватно соответствующих горно-техническим условиям, тесно связано с разработкой универсальных методов численного математического моделирования, позволяющих в прикладном плане своевременно предотвращать опасные проявления горного давления, обеспечивать безопасность ведения горных работ, минимизировать затраты на проведение и эксплуатацию горных выработок и т.д.

На основе разработанных геомеханических моделей массива горных пород при разработке пластовых месторождений в виде трехмерных (двумерных) пакетов нелинейно-деформируемых породных слоев с различными условиями на контактах и расположенных внутри них полостей, имеющих конфигурации исследуемых горных выработок, обоснован выбор математических моделей, характеризующихся системами нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных с соответствующими граничными условиями на контурах полостей и в точках массива горных пород за пределами зон влияния последних [4-8].

Отметим, что практически определить НДС массива горных пород в рамках применения классических (аналитических) методов сплошных сред не представляется возможным. Для исследуемого объема – массива, вмещающего горные выработки, характерны не только процесс нелинейного деформирования пород, но и наличие неоднородности, трещиноватости, анизотропности и т.д. Поэтому для исследования НДС массива горных пород необходимо применять комплекс эффективных численных методов: конечных разностей (МКР), конечных элементов (МКЭ), граничных элементов (МГЭ) и др., позволяющих получить численные результаты решения важных прикладных геомеханических задач, достаточно точно описывающих реальное поведение массива горных пород [1, 4-9, 12, 15].

В работах [5, 8] предложены математические модели НДС массива горных пород в виде двумерного пакета нелинейно-деформируемых породных слоев с различными граничными условиями на контактах и расположенных внутри них полостей, имеющих конфигурации исследуемых горных выработок.

Построение эффективных численных алгоритмов решения прикладных задач механики горных пород тесно связано также и с разработками эффективных программных продуктов (вычислительных комплексов) [1, 4-8]. Последние базируются на комплексном использовании численных методов МКР, МКЭ и МГЭ в зависимости от решаемой важной прикладной задачи, учитывающей не только конструктивные особенности горной выработки, геомеханические свойства горных пород (E, ν), но и вид упругого потенциала Π , или закона упрочнения [10, 16]. Так, для упругой среды (грунтового массива) можно в качестве потенциала рассматривать выражение вида [6, 7]:

$$\Pi = \frac{\lambda}{\nu} [I_1^2(1-\nu) - I_2(1-2\nu)], \quad (1)$$

где I_1, I_2 – первый и второй инварианты тензора деформаций, соответственно; λ – константа Ламе; ν – коэффициент Пуассона.

В работе при построении математических моделей для определения НДС массива горных пород используются гипотезы малых упругопластических деформаций, введенные Г.Генки [3], развитые и обоснованные А.А.Ильюшиным [10]. Необходимые для построения таких моделей физические соотношения базируются на следующих основных гипотезах теории пластичности А.А.Ильюшина: гипотеза упругости объемной деформации (изменение объема происходит только за счет упругих деформаций, а при пластических деформациях материал горных пород ведет себя как несжимаемый); гипотеза пропорциональности девиаторов (компоненты девиатора тензора напряжений пропорциональны компонентам девиатора тензора деформаций); гипотеза упрочнения (для любого материала горных пород независимо от характера напряженного состояния имеется вполне определенная зависимость между интенсивностью напряжений и интенсивностью деформаций), заданная функциональной зависимостью вида [13]:

$$\sigma_i = \Phi(\varepsilon_i). \quad (2)$$

Таким образом, необходимая функциональная зависимость (2) напряжений от деформаций (при условии пропорционального возрастания внешних сил) является в общем случае нелинейной. Выделим в зависимости (2) упругую часть:

$$\sigma_i = 3G\varepsilon_i [1 - \omega(\varepsilon_i)], \quad (3)$$

где G – модуль сдвига материала горных пород; $\omega(\varepsilon_i)$ – введенная функция, вычисляемая по формуле



$$\omega = \omega(\varepsilon_i) = 1 - \frac{1}{3G} \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}. \quad (4)$$

В частности, если кривая функциональной зависимости $\Phi(\varepsilon)$ (диаграмма деформирования $\sigma - \varepsilon$) допускает с достаточной точностью замену ее ломанной с координатами точки излома $(\varepsilon_s, \sigma_s)$, где $\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E}$; σ_s – предел текучести материала горных пород; E – модуль упругости материала горных пород, то аналитическое выражение введенной функции ω в случае линейного закона упрочнения можно принять в виде

$$\begin{cases} \omega = 0, & \varepsilon \leq \varepsilon_s; \\ \omega = \left(1 - \frac{E_1}{E}\right) \left(1 - \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon}\right), & \varepsilon \geq \varepsilon_s, \end{cases} \quad (5)$$

где E_1 – модуль упрочнения; $E_1 = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$.

Для соляных пород калийных рудников экспериментально установлено, что функциональная зависимость (2) с достаточной точностью описывается степенной функцией вида

$$\sigma_i = \Phi(\varepsilon_i) = A\varepsilon_i^s, \quad (6)$$

где параметры A, s – определяются по данным лабораторных испытаний образцов калийной соли конкретных месторождений [16]. Соответственно, введенная функция

$$\omega(\varepsilon_i) = 1 - \frac{A}{3G} \varepsilon_i^{s-1}. \quad (7)$$

Для горных пород необходимый физический закон устанавливается на основе кривой деформирования $\sigma - \varepsilon$, например, в виде известной модели Баха:

$$\sigma_i = B_i \varepsilon_i^n; \quad i = 1, 2, 3, \quad (8)$$

где B_i – коэффициенты деформирования; n – числовой показатель, определяются экспериментально для исследуемых горных пород.

Соответствующая нелинейная краевая задача для определения НДС массива горных пород, вмещающего горную выработку, сводится к некоторому операторному уравнению вида [14]

$$T(v) = 0, \quad (9)$$

где v – вектор-функция неизвестных переменных.

Построение необходимого итерационного процесса для решения операторного уравнения (9) осуществляется на основе метода линеаризации [2], позволяющего записать (9) в виде эквивалентного операторного уравнения вида

$$T_1(v)v + T_2(v) = 0. \quad (10)$$

В качестве метода линеаризации в работах [4-8] принят метод Ньютона – Канторовича – Рафсона [2, 11], в котором

$$T_1(v) \equiv T'_v(v); \quad T_2(v) \equiv T(v) - T_1(v)v,$$

где T'_v – производная Фреше оператора T [14].

Используя метод линеаризации уравнения (9) в виде метода Ньютона – Канторовича – Рафсона [2, 11, 12] и вводя индексы итерации $n, n - 1$, получим уравнение вида

$$T'_v(v^{n-1})v^n + T(v^{n-1}) - T'_v(v^{n-1})v^{n-1} = 0. \quad (11)$$

Последовательность $v^n, n = 1, 2, \dots$, определяется путем решения на каждом шаге итерационного процесса линейной краевой задачи, а с учетом перехода для численной реализации к соответствующей дискретной задаче, решение которой осуществляется МКР или МКЭ, или МГЭ, в зависимости от особенностей рассматриваемой прикладной геомеханической задачи.



ЛИТЕРАТУРА

1. *Баклашов И.В.* Геомеханика. В 2-х томах. М.: Изд-во МГГУ, 2004.
2. *Беллман Р.* Квазилинеаризация и нелинейные краевые задачи / Р.Беллман, Р.Калаба. М.: Мир, 1968. 184с.
3. *Генки Г.* К теории пластических деформаций и вызываемых ими в материале остаточных напряжений // Теория пластичности. М.: Изд-во иностранной литературы, 1948. С.114-135.
4. *Господариков А.П.* Метод расчета нелинейных задач механики горных пород при подземной разработке пластовых месторождений / СПГИ. СПб, 1999. 127 с.
5. *Господариков А.П.* Применение прямого варианта метода граничных элементов при решении геомеханических задач для условий Старобинского месторождения /А.П. Господариков, Л.А. Беспалов // Записки Горного института. 2008. Т.182. С.234-237.
6. *Господариков А.П.* Об одном алгоритме численного решения нелинейных краевых задач геомеханики / А.П.Господариков, М.А.Зацепин, А.В.Мелешко // Записки Горного института. 2012. Т.196. С.306-310.
7. *Господариков А.П.* Математическое моделирование прикладных задач механики горных пород и массивов / А.П.Господариков, М.А.Зацепин // Записки Горного института. 2014. Т.207. С.217-221.
8. *Господариков А.П.* Вычислительный комплекс для расчета прогнозируемых смещений контура протяженной горной выработки / А.П.Господариков, М.В.Максименко, А.А.Сидоренко // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 5. С.36-42.
9. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 541 с.
10. *Ильюшин А.А.* Пластичность. М.: Гостехиздат, 1948. 376 с.
11. *Канторович Л.В.* Приближенные методы высшего анализа / Л.В.Канторович, В.И.Крылов. М.: Физматгиз, 1962. 708 с.
12. *Крауч С.* Методы граничных элементов в механике твердого тела / С.Крауч, А.Старфилд. М.: Мир, 1987. 328 с.
13. *Новожилов В.В.* Основы нелинейной теории упругости. Л.: Гостехиздат, 1948. 211 с.
14. Приближенное решение операторных уравнений / М.А.Красносельский, Г.М.Вайникко, П.П.Забрейко, Я.Б.Рунтцкий, В.Я.Стеценко. М.: Наука, 1969. 456 с.
15. *Рихтмайер Р.* Разностные методы решения краевых задач / Р.Рихтмайер, К.Мортон. М.: Мир, 1972. 418 с.
16. *Ставрогин А.Н.* Механика деформирования и разрушения горных пород / А.Н.Ставрогин, А.Г.Протосеня. М.: Недра, 1992. 222 с.

Автор А.П.Господариков, *д-р техн. наук, профессор, gospodarikov@mail.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Россия)*

Статья принята к публикации 15.03.2016.

NONLINEAR MATH MODEL DEVELOPMENT AND NUMERICAL MODEL OF STRAIN DEFORMED ROCK MASS CONDITIONS PROGNOSIS

A.P.GOSPODARIKOV

Saint-Petersburg Mining University, Russia

The article deals with the questions related to the development of math models of nonlinear strain deformed conditions of a laminar heterogeneous rock mass in the area of excavation in shallow formations. The non-linear relations between physical strains and deformations are added to the basic system of resolving differential equations in partial derivatives (equilibrium equations) and well-known Cauchy dependencies (formulas of connection between deformations and displacements). This ratio is defined by both the elastic potential and by exponential law of hardening or by linear hardening law.

Within the framework of the accepted hypotheses of Genki – Ilyushin theory of small elastoplastic deformations some algorithms and calculating complexes of solutions of applied geomechanics problems have been developed. They include such numerical methods as finite difference method, finite element method, and boundary element method. Nonlinear boundary problem based on Newton – Kantorovich – Raphson linearization method comes to the iterative process of a linear boundary problems sequence solution.

Key words: heterogeneous rock mass, excavation, nonlinear deformation of rocks, Genki – Ilyushin theory of small elastoplastic deformations, Newton – Kantorovich – Raphson linearization method, general iterative process, numerical methods and calculating complexes.

How to cite this article: Gospodarikov A.P. Nonlinear math model development and numerical model of strain deformed rock mass conditions prognosis. Zapiski Gornogo instituta. 2016. Vol.219, p.382-386. DOI 10.18454/PML2016.3.382

REFERENCES

1. *Baklashov I.V.* Geomekhanika (*Geomechanics*). In 2 vol. Moscow: Izd-vo MGGU, 2004.
2. *Bellman R., Kalaba R.* Kvazilinearizatsiya i nelineynye kraevye zadachi (*Quasilinearization and nonlinear boundary-value problems*). Moscow: Mir, 1968, p.184.
3. *Genki G.* K teorii plasticheskikh deformatsiy i vyzivaemykh imi v materiale ostatochnykh napryazheniy (*About the theory of plastic deformations and residual strains caused by these deformations in material*). Teoriya plastichnosti (*Theory of plasticity*). Moscow, Izd-vo inostrannoi literatury. 1948, p.114-135.



4. *Gospodarikov A.P.* Metod rascheta nelineynykh zadach mekhaniki gornykh porod pri podzemnoy razrabotke plastovykh mestorozhdeniy (*Computing method of nonlinear problems of rock mechanics in underground mining*). SPGGI. St. Petersburg. 1999, p.127.
5. *Gospodarikov A.P., Bespalov L.A.* Primenenie pryamogo varianta metoda granichnykh elementov pri reshenii geomekhanicheskikh zadach dlya usloviy Starobinskogo mestorozhdeniya (*Application of a direct boundary element method for solving geomechanical problems in Starobin deposit*). Zapiski Gornogo instituta. 2008. Vol.182, p.234-237.
6. *Gospodarikov A.P., Zatsepin M.A., Meleshko A.V.* Ob odnom algoritme chislennogo resheniya nelineynykh kraevykh zadach geomekhaniki (*Numerical solution of nonlinear boundary-value problems of geomechanics*). Zapiski Gornogo instituta. 2012. Vol.196, p.306-310.
7. *Gospodarikov A.P., Zatsepin M.A.* Matematicheskoe modelirovanie prikladnykh zadach mekhaniki gornykh porod i masivov (*Mathematical modeling of applied problems of rock mechanics*). Zapiski Gornogo instituta. 2014. Vol.211, p.217-221.
8. *Gospodarikov A.P., Maksimenko M.V., Sidorenko A.A.* Vychislitel'nyy kompleks dlya rascheta prognoziruemykh smeshcheniy kontura protyazhennoy gornoy vyrabotki (*Computing system for calculation of predictable displacements of the lengthy excavation contour*). Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. N 5, p.36-42.
9. *Zenkevich O.* Metod konechnykh elementov v tekhnike (*The finite element method in engineering*) Moscow: Mir, 1975, p.541.
10. *Il'yushin A.A.* Plastichnost' (*Plasticity*). Moscow: Gostekhizdat, 1948, p.376.
11. *Kantorovich L.V., Krylov V.I.* Priblizhennyye metody vysshego analiza (*Approximate methods of higher analysis*). Moscow: Fizmatgiz, 1962, p.708.
12. *Krauch S., Starfild A.* Metody granichnykh elementov v mekhanike tverdogo tela (*Boundary element methods in solid mechanics*). Moscow: Mir, 1987, p.328.
13. *Novozhilov V.V.* Osnovy nelineynoy teorii uprugosti (*Fundamentals of nonlinear theory of elasticity*). Leningrad: Gostekhizdat, 1948. p.211.
14. *Krasnosel'skiy M.A., Vaynikko G.M., Zabreyko P.P., Rutitskiy Ya.B., Stetsenko V.Ya.* Priblizhennoe reshenie operatornykh uravneniy (*Approximate solution of operator equations*). Moscow: Nauka, 1969, p.456.
15. *Richtmyer R.D., Morton K.W.* Raznostnye metody resheniya kraevykh zadach (*Difference methods for solving boundary-value problems*). Moscow: Mir, 1972, p.418.
16. *Stavrogin A.N., Protosenya A.G.* Mekhanika deformirovaniya i razrusheniya gornykh porod (*Mechanics of rock deformation and failure*). Moscow: Nedra, 1992, p.222.

Author A.P.Gospodarikov, Dr. of Engineering Sciences, Professor, gospodarikov@mail.ru (Saint-Petersburg Mining University, Russia).

Manuscript Accepted 15.03.2016.

УДК 622.271

ИНСТРУМЕНТ КОРРЕКТИРОВКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМОВ ВСКРЫШИ ПО ОТВАЛАМ ДЕЙСТВУЮЩЕГО УГОЛЬНОГО РАЗРЕЗА

А.В.СЕЛЮКОВ

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

Продолжающаяся эксплуатация угольных разрезов Кемеровской области системами открытой разработки с размещением вскрышных пород на внешних отвалах приводит к прогрессирующему изъятию земель сельскохозяйственного назначения. Такие системы разработки не всегда отвечают экологическим требованиям. Необходимо изыскивать более совершенные технологические решения, основанные на рациональном соотношении способов разработки и воздействия на окружающую среду. Сократить негативное влияние можно, изменив порядок отработки угольных разрезов и применив при этом системы разработки с внутренним отвалообразованием. Необходимо комплексно и целенаправленно управлять такими объектами, как выработанное пространство и отвалы вскрышных пород. В статье предлагается один из возможных путей решения, основанный на аккумулирующих способностях незаполненного выработанного пространства и внешних отвалов вскрышных пород. Инструментом выступает авторский подход, проиллюстрированный графической схемой баланса распределения пород вскрыши по отвалам. На примере действующего угольного разреза «Прокопьевский» показан и численно оценен механизм реализации предлагаемых методических подходов, позволяющих при проектировании карьеров более детально подходить к обоснованию инженерных решений.

Ключевые слова: угольный разрез, отвал вскрышных пород, регулирование баланса, объем пород.

Как цитировать эту статью: Селюков А.В. Инструмент корректировки распределения объемов вскрыши по отвалам действующего угольного разреза // Записки Горного института. 2016. Т.219. С.387-391. DOI 10.18454/PMI.2016.3.387

Развитие масштабов и технической оснащенности открытой угледобычи в Кемеровской области привлекает повышенное внимание в связи с ограниченностью сельскохозяйственных земель.

Повсеместно применяемые углубочные продольные системы разработки [3] (по классификации, предложенной академиком В.В.Ржевским) наиболее полно соответствуют простым по строению месторождениям, представленным одиночными пластами, когда обеспечивается полнота и качество выемки вследствие привязки вскрытия и развития фронта работ к одному пласту. При этом обеспечивается возможность размещения всего объема вскрышных пород или значительной его части в выработанном пространстве. При отработке сложноструктурных угольных залежей, к числу которых относится подавляющее большинство месторождений Кемеровской области, использование углубочных продольных систем разработки приводит к необходимости размещения всех пород вскрыши на внешних отвалах, что влечет за собой увеличение темпов изъятия земельных угодий (рис. 1, 2). Перемещение огромных объемов вскрыши на внешние отвалы, расположенные, как правило, на значительном расстоянии от забоев, приводит к росту количества транспортных средств и вспомогательного оборудования. Все это повышает затраты на добычу угля открытым способом и снижает его конкурентоспособность на рынке. Следовательно, применяемые системы разработки не всегда соответствуют современным экологическим требованиям, поэтому необходимо изыскивать более совершенные технологические решения.

В настоящее время практическая деятельность угольных разрезов Кемеровской области сопровождается единичными случаями применения систем открытой разработки наклонных и крутых залежей с размещением вскрышных пород в выработанном пространстве. Однако из научных публи-

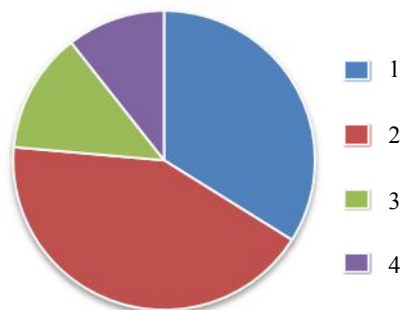


Рис.1. Укрупненная структура поэлементного нарушения сельскохозяйственных земель Кемеровской области открытыми горными работами в процентах [http://expert.ru/siberia]

1 – карьерное поле; 2 – внешние отвалы;
3 – объекты инфраструктуры; 4 – прочие нарушения

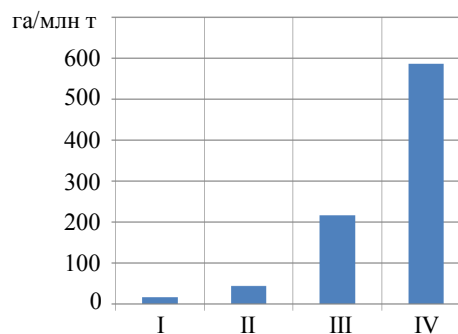


Рис.2. Землеемкость открытой угледобычи по состоянию на 2015 г. [http://expert.ru/siberia]: среднеотраслевая по РФ (I), по Кемеровской области (II), эксплуатационная среднеотраслевая по РФ (III) и эксплуатационная по Кемеровской области (IV)



каций [1, 2, 4, 5, 8] известно, что для наклонных и крутопадающих угольных залежей могут применяться следующие системы разработки с внутренним отвалообразованием: блоковая, углубочно-сплошная, поэтапно-углубочная, блочно-слоевая, челочно-слоевая.

Эти системы разработки характеризуются двумя этапами развития горных работ:

- 1) формирование первоначальной емкости в границах карьерного поля для внутренних отвалов;
- 2) отработка основной части карьерного поля со складированием вскрышных пород в выработанном пространстве карьера.

Сущность блоковой системы разработки заключается в следующем. Предварительно карьерное поле делится на отдельные блоки, разрабатываемые последовательно. Оработка первоочередного блока осуществляется по продольной углубочной системе разработки с транспортной технологией и вывозкой всего объема вскрыши на внешние отвалы. Последующий блок обрабатывается по той же технологии, что и первый, но вскрыша вывозится в выработанное пространство от первого блока. Вся порода во внутреннем отвале размещается с применением транспортной технологии.

Сущность поперечной системы разработки с созданием карьера первой очереди, по П.И.Томакову [8], заключается в следующем. В одном из торцов залежи от текущей глубины сооружают карьер ограниченных размеров до проектной глубины – так называемый карьер первой очереди. Основное назначение этого карьера – создание первоначальной емкости для размещения вскрышных пород при отработке оставшейся части залежи. После завершения строительства карьера первой очереди производят отработку оставшейся части залежи по простиранию с размещением пород вскрыши в выработанное пространство. После сооружения карьера первой очереди осуществляется переход на технологию с внутренним отвалообразованием.

В Кузнецком филиале НИИОГР и Кузбасском политехническом институте была разработана поэтапно-углубочная система разработки, сущность которой состоит в следующем. В одном из торцов угольной залежи сооружают от текущей глубины котлован вкrest простирания залежи на глубину, равную высоте уступа. Порода вскрыши вывозят на внешний отвал. После сооружения котлована породу от разработки первого горизонта размещают в выработанном пространстве. Углубка горных работ ведется до проектной глубины карьера. После этого рабочая зона становится постоянной и вся порода вскрыши перемещается во внутренний отвал.

Поперечная блочно-слоевая система разработки является дальнейшим развитием поперечной системы разработки с карьером первой очереди. Отличительная особенность – деление всего месторождения по простиранию на блоки и последовательная их отработка слоями сверху вниз.

Сущность челочно-слоевой системы разработки заключается в отработке месторождения горизонтальными слоями с разнонаправленным продвижением фронта работ и размещением всех пород вскрыши в выработанном пространстве. Оработку месторождения начинают с сооружения в одном из торцов карьерного поля поперечной карьерной выемки на глубину обрабатываемого слоя. После сооружения подготовительной углубочной горной выработки на втором горизонте производят отработку второго горизонта (слоя) с размещением пород вскрыши в выработанном пространстве этого же горизонта. Порода вскрыши из внутреннего отвала первого горизонта перемещают во внутренний отвал этого же горизонта на поверхность внутреннего отвала нижележащего слоя. Затем направление продвижения фронта работ меняется на противоположное, т.е. отработка нижнего слоя ведется в обратную сторону. После отработки второго слоя осуществляют, при необходимости, углубку на третий горизонт (слой) с соблюдением всех технологических операций, указанных при углубке на второй горизонт, и изменением направления продвижения фронта работ на противоположное, и так до конечной глубины карьера.

Отдельные элементы таких систем разработки находят применение при составлении проектов разработок угольных разрезов «Кедровский», «Краснобродский», «Виноградовский», «Прокопьевский». Комплексный анализ данных показывает, что внедрение в проектную практику таких систем открытой разработки не лишено недостатков. В частности, при их реализации повсеместно наблюдается рассогласованность долевого участия внешнего и внутреннего отвалов в общем объеме извлекаемой вскрыши, т.е. объемы вскрышных пород, предназначенных для размещения во внутреннем отвале, приходится отсыпать во внешнем. Иными словами, формирование внутреннего отвала задерживается во времени. Основой таких недостатков являются современные требования к тем или иным разделам проекта и некорректность выполнения более глубоких детализированных теоретических проработок. К примеру, обоснование принятых инженерных решений базируется подчас на морально устаревших нормативно-справочных документах, и более детального обоснования вопроса чаще всего не требуется, ограничиваются лишь применением при проектировании отработанных за долгие годы морально устаревших «шаблонных» технологических решений. Применительно к разрезу «Прокопьевский» такие проектные решения были заложены в 2010 г. (проект выполнен инжиниринговой компанией ООО «Сибгеопроект»), корректировались в 2013 г. (документация изготовлена проектным

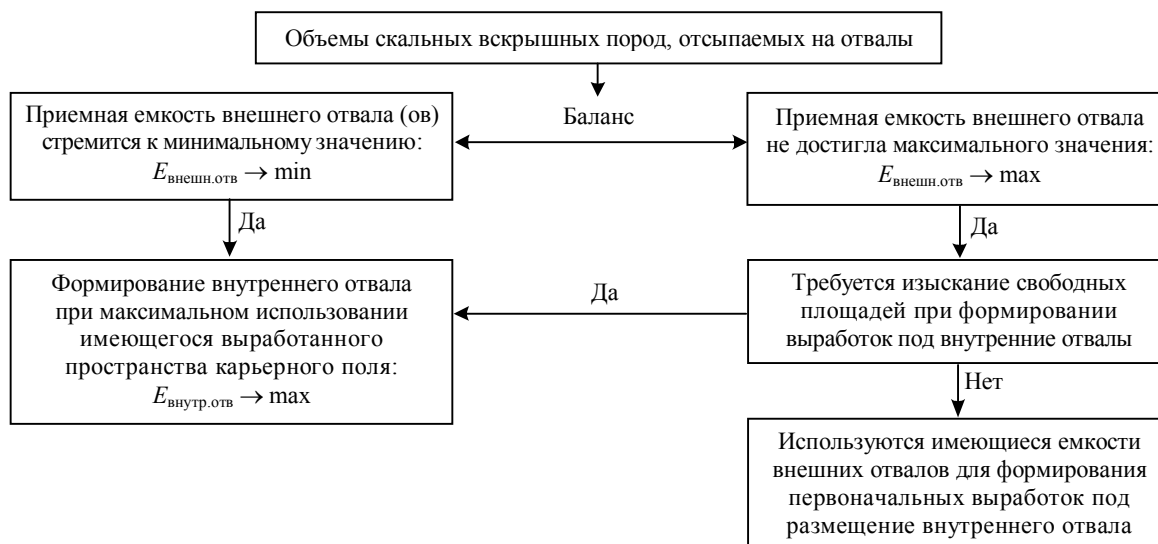


Рис.3. Логическая блок-схема представления укрупненного баланса распределения вскрышных пород, отсыпаемых на внешний или внутренний отвалы

институтом ОАО «Кузбассгирошахт»), в настоящее время вновь предусматривается изменение проектных данных 2015-2016 годов (проект корректируется ООО «Сибгеопроект»).

В развитие методических положений к обоснованию способа регулирования распределения пород вскрыши по отвалам угольного разреза автором предлагается инструмент корректировки отсыпаемых пород вскрыши по внешним и внутренним отвалам посредством логической блок-схемы укрупненного баланса распределения вскрышных пород (рис.3).

Графическая модель баланса основана на разработке следующих теоретических вопросов:

- 1) методически обоснована точка отсчета момента времени (технологическая, экологическая или иная) перераспределения объемов вскрышных пород, отсыпаемых на внешнем отвале, с направлением их на внутренний отвал [6];
- 2) проанализирована динамика развития контуров карьерного поля во взаимосвязке с параметрами карьерного поля и внешнего отвала при достижении ими конечных размеров [7];
- 3) определены направление и цикличность развития контуров карьерного поля и внешнего отвала, исходя из момента перераспределения баланса вскрыши с внешнего отвала на внутренний [7];
- 4) установлено местоположение внешних отвалов, их количество, взаимное слияние, наличие свободных земель под отвальную емкость в горизонтальном пространстве между карьерным полем и внешним отвалом.

В отличие от ранее выполненных работ новизна заключается в том, что применительно к условиям разрезов Кемеровской области предложена интерпретация баланса распределения объемов вскрыши в процессе трансформации углубочной продольной системы разработки с преимущественно внешним отвалообразованием в поперечные сплошные системы разработки с максимальным складированием вскрышных пород в выработанном пространстве действующего карьерного поля.

Баланс распределения вскрышных пород, отсыпаемых на внешний или внутренний отвал, должен основываться только на фактическом положении горных работ, параметрах горных выработок и отвалов, динамике пространственного развития отвала и рабочей зоны карьера (рис.3). В логическую блок-схему в качестве дополнительного оценочного параметра внутреннего отвала следует вводить такую величину, как его конечная высота, отражающая уровень (полноту) заполнения вскрышными породами карьерной выемки или степень восстановления рельефа поверхности. В данном случае параметр является ограниченным и достаточным для полного восстановления поверхности до проектных рельефных отметок. В более ранних авторских публикациях дополнительный подход не рассматривался, а в проектах по угольным разрезам Кемеровской области вообще не затрагивается.

С точки зрения перераспределения вскрыши с внешнего отвала на внутренний отвал такая модель баланса является универсальной и охватывает всевозможные условия эксплуатации различных угольных разрезов.

Рассмотрим пример реализации модели баланса для условий разреза ООО «Прокопьевский» (Кемеровская область). Согласно данным по проекту, обработка карьерного поля предусматривается тремя блоками (блоковая система разработки):

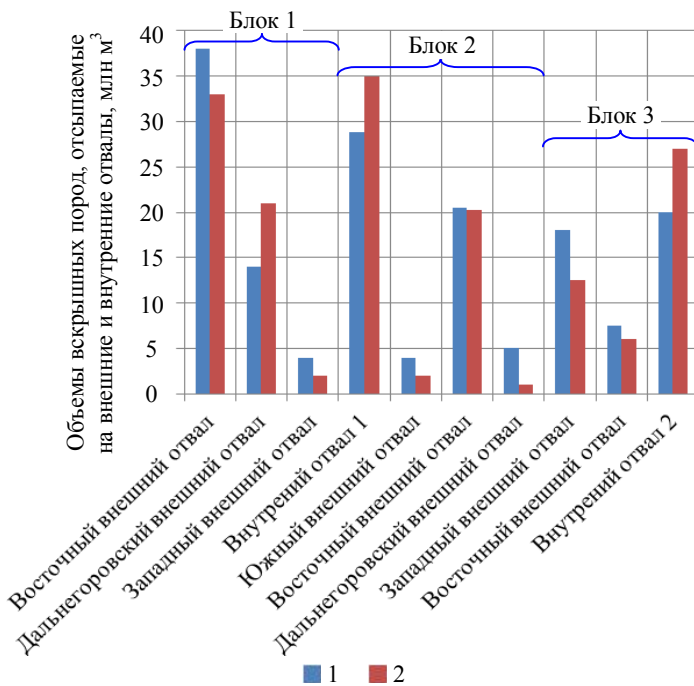


Рис.4. Гистограмма распределения объемов вскрышных пород по отвалам угольного разреза «Прокопьевский» через укрупненную графическую схему баланса

1 – проектные данные; 2 – корректировка объемов по графической схеме баланса (см. рис.3)

валов, увеличить объем отсыпки Внутреннего отвала 1 на 6,2 млн м³. При отработке третьего блока сокращение объемов складирования 5,5 млн м³ и 1,5 млн м³ соответственно при отсыпке внешних отвалов Западного и Восточного, прибавление объема 7 млн м³ по Внутреннему отвалу 2. В целом суммарная корректировка складированных объемов по отвалам равна 40,4 млн м³.

В отличие от проектных данных, максимальное заполнение карьерной выемки вскрышными породами при отработке второго и третьего блоков будет достигаться, когда на отвалы Внутренний 1 и 2 будет дополнительно направляться 13,2 млн м³ вскрышной породы. Тогда будет достигнуто максимальное заполнение внутреннего отвала до проектных рельефных отметок.

Таким образом, совместный анализ проектной документации и практической деятельности угольного разреза по распределению объемов вскрыши, отсыпаемых на отвалы, через предлагаемый инструмент корректировки позволяет регулировать складированные объемы с использованием больших аккумулирующих возможностей выработанного пространства карьера. В частности, по угольному разрезу «Прокопьевский», не нарушая технологические и геомеханические решения, заложенные в проекте в части отсыпки отвалов вскрышных пород, по совокупности можно снизить эксплуатационную землеемкость до 21 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корякин А.И. Пути создания малоземлеемких технологий открытой угледобычи в Кузбассе // Вестник КузГТУ. 1991. № 2. С.60-62.
2. Михальченко В.В. Землесберегающая технология отработки наклонных и крутых залежей / В.В.Михальченко, С.А.Прокопенко, В.Г.Орлов // Уголь. 1991. № 5. С.44-46.
3. Ржевский В.В. Открытые горные работы. Ч.2. Технология и комплексная механизация. М.: Недра. 1985. 549 с.
4. Рутковский Б.Т. Блочный способ отработки месторождений открытым способом // Добыча угля открытым способом. 1972. № 1. С.81-87.
5. Саканцев Г.Г. Установление области применения внутреннего отвалообразования при открытой разработке крутопадающих месторождений полезных ископаемых / Г.Г.Саканцев, В.И.Ческидов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. № 3. С.87-96.
6. Селюков А.В. О технологической значимости внутреннего отвалообразования при открытой разработке угольных месторождений Кемеровской области // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2015. № 5. С.23-34.
7. Селюков А.В. Оценка численного моделирования процесса адаптации внутреннего отвалообразования к режиму действующих карьерных полей Кемеровской области // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т.326. № 12. С.60-71.



8. Томаков П.И. Природоохранные технологии открытой разработки крутых и наклонных угольных месторождений Кузбасса / П.И.Томаков, В.С.Коваленко // Уголь. 1992. № 1. С.16-20.

Автор А.В.Селюков, канд. техн. наук, доцент, alex-sav@rambler.ru (Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф.Горбачева, Кемерово, Россия)
Статья принята к публикации 10.02.2016.

TO CORRECT THE DISTRIBUTION OF THE VOLUME OF OVERBURDEN WASTE DUMPS EXISTING COAL MINE

A.V.SELYUKOV

T.F.Gorbachev Kuzbass state technical university, Kemerovo, Russia

The continued operation of the coal mines of the Kemerovo region with an open development system based with the placement of overburden on the outer-shafts, contributes to the progressive growth of withdrawal of land for agricultural purposes. Widely used, such systems develop not always reflect a environmental requirements, and the need to find better technological solutions are based on approaches with upgraded bases science and technological focus coordination of the development methods and the who's actions on the environment. To reduce the negative effects perhaps modifying smacking dock of mining coal, applying system development with internal dumping. The identification of the causes of a small implement such approaches and their elimination in domestic production should be based on integrated and targeted management of such objects, as internal dump and overburden dump. The article proposes one of possible solutions based on accumulating abilities blank-out space and an external overburden dump. The tool supports the author's approach distinct illustrative graphic diagram of the balance of the overburden heaps. On the example of the coal mine "Prokop'jevski" shows the number of estimated and the mechanism of implementation of the proposed methodological approaches. The practical significance lies in the fact that reveals a number of features to help in the design of quarries more detailed approach to the justification of engineering solutions.

Key words: coal mine, the overburden rocks, the adjustment of the balance, the volume of rocks.

How to cite this article: Selyukov A.V. To correct the distribution of the volume of overburden waste dumps existing coal mine. Zapiski Gornogo instituta. 2016. Vol.219, p.387-391. DOI 10.18454/PMI.2016.3.387

REFERENCES

1. Korjakin A.I. Puti sozdaniya malozemleemkikh tekhnologii otkrytoi ugledobychi v Kuzbasse (*The way of creating a little land open technology of coal mining in Kuzbass*). Vestnik KuzGTU. 1991. N 2, p.60-62.
2. Mihal'chenko V.V., Prokopenko S.A., Orlov V.G. Zemlesberegayushchaya tekhnologiya otrabotki naklonnykh i krutykh zalezhei (*Earth saving technology of mining of inclined and steep deposits*). Ugol'. 1991. N 5, p.44-46.
3. Rzhetskij V.V. Otkrytye gornye raboty. Ch.2. Tekhnologiya i kompleksnaya mekhanizatsiya (*Open-pit mining, part 2. Technology and complex mechanization*). Moscow: Nedra. 1985, p.549.
4. Rutkovskij B.T. Blokovi sposob otrabotki mestorozhdenii otkrytym sposobom (*Block method of mining the deposits by open pit mining*). Dobycha uglja otkrytym sposobom. 1972. N 1, p.81-87.
5. Sakancev G.G., Cheskidov V.I. Ustanovlenie oblasti primeneniya vnutrennego otvaloobrazovaniya pri otkrytoi razrabotke krutopadayushchikh mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh (*Determining the scope of internal dumping in opencast mining of steeply dipping mineral deposits*). Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh. 2014. N 3, p.87-96.
6. Seljukov A.V. O tekhnologicheskoi znachimosti vnutrennego otvaloobrazovaniya pri otkrytoi razrabotke ugol'nykh mestorozhdenii Kemerovskoi oblasti (*About the technological significance of internal dumping in opencast mining of coal deposits in Kemerovo region*). Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh. 2015. N 5, p.23-34.
7. Seljukov A.V. Otsenka chislennogo modelirovaniya protsessa adaptatsii vnutrennego otvaloobrazovaniya k rezhimu deistvuyushchikh kar'ernykh polei Kemerovskoi oblasti (*Evaluation of numerical simulation of the process of adapting internal dumping mode to the existing career fields of the Kemerovo region*). Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring geoursorov. 2015. Vol.326. N 12, p.60-71.
8. Tomakov P.I., Kovalenko V.S. Prirodookhrannye tekhnologii otkrytoi razrabotki krutykh i naklonnykh ugol'nykh mestorozhdenii Kuzbassa (*Environmental technology open pit mining of steep and inclined coal deposits of Kuzbass*). Ugol'. 1992. N 1, p.16-20.

Author A.V.Selyukov, PhD of Engineering Sciences, Associate Professor, alex-sav@rambler.ru (T.F.Gorbachev Kuzbass state technical university, Kemerovo, Russia)
Manuscript Accepted 10.02.2016.

УДК 02.2, 04.1

ВЛИЯНИЕ НЕУПРУГИХ СТОЛКНОВЕНИЙ НА РЕЛАКСАЦИЮ ЭНЕРГИИ ПУЧКА БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ВОЗДУХЕ

В.С.СУХОМЛИНОВ¹, А.С.МУСТАФАЕВ²¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Россия² Санкт-Петербургский горный университет, Россия

Работа посвящена разработке аналитической теории для расчета пространственного распределения энерговыделения при распространении пучка быстрых электронов в газе (в частности, в воздухе) с учетом неупругого взаимодействия. Рассматриваются энергии электронов 1-100 кэВ. На основании анализа данных о сечениях упругого и неупругого взаимодействия электронов с молекулами газов, содержащихся в воздухе, делается вывод о том, что неупругое взаимодействие, в основном, приводит к релаксации энергии, а упругое – к релаксации импульса. При решении кинетического уравнения Больцмана для электронов используется модельное сечение неупругих столкновений электронов с молекулами, которое обеспечивает хорошее описание экспериментально найденной энергетической зависимости массовой тормозной способности электронов. Полученные результаты для зависимости средней энергии электронов от числа неупругих столкновений находятся в хорошем соответствии с расчетами по методу разложения функции распределения по числам столкновений и решению аналогичной задачи методом Монте-Карло.

Ключевые слова: взаимодействие пучка электронов с энергией 1-100 кэВ с плазмой, упругое и неупругое взаимодействие, релаксация энергии, релаксация импульса, кинетическое уравнение Больцмана, численное моделирование методом Монте-Карло.

Как цитировать эту статью: Сухомлинов В.С. Влияние неупругих столкновений на релаксацию энергии пучка быстрых электронов в воздухе / В.С.Сухомлинов, А.С.Мустафаев // Записки Горного института. 2016. Т.219. С.392-402. DOI 10.18454/PMI.2016.3.392

Введение. В настоящее время для создания гиперзвуковых летательных аппаратов [9, 16] одной из актуальных задач является релаксация быстрых электронов с энергиями до 100 кэВ в газе. Для оптимизации внешнего аэродинамического обтекания, а также улучшения характеристик двигателей таких летательных аппаратов предлагается использовать МГД-управление газовыми потоками [10, 14]. При этом для ионизации газа (необходимой для создания МГД-эффекта) можно использовать высокоэнергетичный электронный пучок [12]. Расчет степени ионизации возникающей плазмы сводится к вычислению пространственного распределения выделяемой в газе энергии. В свою очередь, это распределение рассчитывается с использованием метода Монте-Карло. Поскольку начальные энергии электронов велики, а дифференциальное сечение столкновения электронов с атомами и молекулами газа быстро падает с увеличением переданной атому энергии, потери энергии электронов при каждом столкновении малы. Это обстоятельство приводит к необходимости учета многих тысяч столкновений, что даже при современном быстродействии вычислительной техники требует больших затрат машинного времени [17, 18].

В работе [15] для решения поставленной задачи был реализован известный метод разложения функции распределения электронов по числам столкновений [6], который существенно снижает время расчета зоны энерговыделения при прохождении пучка быстрых электронов в газе. Однако для задач плазменной аэродинамики и этого оказывается недостаточно. Действительно, для описания взаимодействия пучка быстрых электронов с неоднородным газом необходимо решать самосогласованную задачу. Так, например, для неоднородности, вызванной ударной волной, распределение плотности зависит от пространственного распределения энерговыклада в области ударного слоя. Последнее, в свою очередь, определяется распределением плотности, что требует решения самосогласованной задачи. С учетом того, что задача о кривой ударной волне при наличии источника энергии в области ударного слоя решается численно, можно ожидать, например, что реализация метода последовательных приближений для решения самосогласованной задачи с использованием численного расчета зон энерговыделения также потребует больших затрат машинного времени.

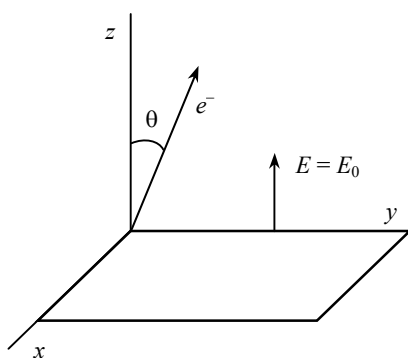


Рис.1. Система координат в задаче о релаксации пучка электронов

Электрон испытывает упругие и неупругие столкновения, в результате чего направление их движения отклоняется от оси z , а энергия уменьшается. Пусть функция распределения элект-

1. Постановка задачи и основные уравнения. Рассмотрим задачу в одномерном приближении. Пусть в полупространство $z > 0$, заполненное газом с концентрацией молекул (атомов) $N(z)$, по нормали к плоскости $z = 0$ влетает поток электронов с энергией E_0 (рис.1). Электроны испытывают упругие и неупругие столкновения, в результате чего направление их движения отклоняется от оси z , а энергия уменьшается. Пусть функция распределения элект-



тронов по энергиям и направлениям движения $f(E, \mu, z)$, где $\mu = \cos \theta$; θ – угол между осью z и направлением движения электрона. В задаче требуется найти величину $dE_1(z)/dz$. При этом

$$E_1(z) = \int_0^{E_0} \int_{-1}^1 E f(E, \mu, z) \mu dE d\mu; \quad \int_0^{E_0} \int_{-1}^1 f(E, \mu, z) dE d\mu = 1. \quad (1)$$

Поставленная задача сводится к решению следующего интегродифференциального уравнения Больцмана для функции $f(E, \mu, z)$:

$$\begin{aligned} \mu \frac{\partial f}{\partial z} + \Lambda_n(E, z) f + \Lambda_e(E, z) f = 2\pi N(z) \int_{E-1}^{E_0} \int_{-1}^1 f(E', \mu', z) \sigma_n(E', \mu' \rightarrow E, \mu) d\mu' dE' + \\ + 2\pi N(z) \int_{E-1}^{E_0} \int_{-1}^1 f(E', \mu', z) \sigma_e(E', \mu' \rightarrow E, \mu) d\mu' dE', \end{aligned} \quad (2)$$

где $\Lambda_n(E, z)$ и $\Lambda_e(E, z)$ – обратные длины свободного пробега электрона соответственно до неупругого и упругого столкновений; $\sigma_n(E', \mu' \rightarrow E, \mu)$ и $\sigma_e(E', \mu' \rightarrow E, \mu)$ – сечения соответственно неупругого и упругого рассеяния электрона на атоме (молекуле), без штриха обозначаются переменные после столкновения, а со штрихом – до столкновения.

Для обратной длины свободного пробега выполняется

$$\begin{aligned} \Lambda_n(E, z) = 2\pi N(z) \int_0^E \int_{-1}^1 \sigma_n(E, \mu \rightarrow E', \mu') d\mu' dE'; \\ \Lambda_e(E, z) = 2\pi N(z) \int_0^E \int_{-1}^1 \sigma_e(E, \mu \rightarrow E', \mu') d\mu' dE'. \end{aligned} \quad (2a)$$

Уравнение (2) дополняется граничными условиями

$$\begin{aligned} f(E, \mu, 0) = \delta(E - E_0) \delta(\mu - 1) \quad \text{при } \mu > 0; \\ f(E, \mu, z)_{z \rightarrow \infty} \rightarrow 0. \end{aligned} \quad (2б)$$

Соотношения (2), (2a) и (2б) и являются исходными для решения поставленной задачи.

В общей постановке найти решение уравнения (2) не удастся. Для математического упрощения поставленной задачи проанализируем процессы, происходящие при упругих и неупругих столкновениях с учетом конкретных зависимостей сечений столкновений от энергии и угла рассеяния электрона на атомах (молекулах) газа.

Дифференциальное сечение по переданной энергии при неупругих столкновениях электрона (на один электрон мишени) определяется соотношением [4]

$$\frac{d\sigma_n(E, W)}{dW} = \frac{2\pi r_0^2 m_e c^2}{\beta^2 W^2} \left[1 + \frac{W^2}{(E - W)^2} + \frac{\tau^2}{(1 + \tau)^2} \frac{W^2}{E^2} - \frac{(1 + 2\tau)}{(1 + \tau)^2} \frac{W}{(E - W)} \right], \quad (3)$$

а средние потери энергии при одном столкновении

$$\bar{W}_n = \int W \frac{d\sigma_n}{dW} dW / \int \frac{d\sigma_n}{dW} dW, \quad (3a)$$

где E – энергия электрона; $W = E' - E$ – энергия, переданная атому (молекуле) газа при неупругом столкновении; r_0 – классический радиус электрона; $\beta = v/c$; $\tau = E/m_e c^2$.

Принимается, что максимальное значение $W = E/2$ [4] или $W = E$ [7]. При релятивистских энергиях электрона параметр β следует рассчитывать по формуле $\beta^2 = \tau(\tau + 2)/(\tau + 1)^2$. При этом вводят понятия далеких и близких столкновений с помощью задания некоторой пороговой энергии W_c . Для далеких столкновений $W < W_c$, для близких $W > W_c$. При расчете угла рассеяния быстрого электрона используется соотношение

$$\mu_{0n} = \sqrt{\frac{(1 - w)(2 + \tau)}{2(1 - w) + \tau}}, \quad (4)$$

где $w = W/E$.



Для дифференциального сечения упругого рассеяния σ_e по углу рассеяния Ω авторами [12] было предложено следующее выражение:

$$\frac{d\sigma_e}{d\Omega} = \frac{r_0^2 Z^2 (1-\beta^2)}{\beta^4 (1-\cos\theta + 2\eta)^2}, \quad (5)$$

где Z – заряд ядра атома.

Параметр экранирования η в приближении Мольер определяется соотношением [2]

$$\eta = 1,7 \cdot 10^{-5} Z^{\frac{2}{3}} \frac{(1-\beta^2)}{\beta^2} \left(1,33 + 3,76 \frac{\alpha^2}{\beta^2} \right), \quad (5a)$$

где $\alpha = Z/137$.

Косинус угла рассеяния при упругом столкновении определяется соотношением

$$\mu_0 = \int \mu \frac{d\sigma_e}{d\Omega} d\Omega / \int \frac{d\sigma_e}{d\Omega} d\Omega. \quad (6)$$

Потери электрона \overline{W} при упругом столкновении определяются по формуле

$$\overline{W}(E) = \int \mu \frac{d\sigma_e}{d\Omega} W(\mu, E) d\Omega / \int \frac{d\sigma_e}{d\Omega} d\Omega, \quad (6a)$$

при этом

$$W(\mu, E) = E \left[\frac{\sqrt{M^2 - 1 + \mu^2} - \mu}{M - 1} - 1 \right]^2, \quad (6b)$$

где M – отношение массы атома к массе электрона.

Соотношение (6б) справедливо для упругих столкновений при любом потенциале сталкивающихся частиц [6].

С использованием формул (3)-(6б) проведено большое число расчетов среднего косинуса угла рассеяния и средней потери энергии при упругом и неупругом рассеянии электрона на молекулах азота, кислорода и углекислого газа (основных газов воздуха). Расчеты проводились в диапазоне энергий электронов от нескольких единиц до 100 кэВ. Выяснилось, что основной вклад в торможение электронов в этих условиях вносят неупругие столкновения, а в изменение направления движения электронов – упругие. Кроме того, интегральное сечение неупругих столкновений оказывается много больше такового для упругих столкновений. Исходя из этого, можно упростить уравнение (2), считая, что неупругие столкновения происходят при сохранении направления, а упругие – при сохранении энергии.

Таким образом, мы имеем возможность считать, что в интеграле неупругих столкновений сечение столкновений зависит только от переменных E, W , а в интеграле упругих столкновений – от E, μ_0 , где μ_0 – косинус угла рассеяния электрона. Это существенно упрощает задачу.

Дальнейшее решение поставленной задачи разобьем на три этапа. Сначала рассмотрим процесс распространения электронов в газе с учетом только неупругих столкновений, затем – только упругих и на заключительном этапе – с учетом обоих процессов.

2. Решение кинетического уравнения с учетом только неупругих столкновений. Введем безразмерные переменные:

$$x = \frac{E}{E_0}; \quad \bar{z} = \int_0^z \Lambda_n(1, E_0, y) dy, \quad (7)$$

где $\Lambda_n(1, E_0, z) = \Lambda_n(E_0 x, z)_{x=1}$.

Тогда с учетом вышесказанного уравнение (2) переписывается в виде

$$\frac{\partial f(\bar{z}, x)}{\partial \bar{z}} + f(\bar{z}, x) A(x) = a \int_x^1 f(\bar{z}, x') \sigma_{nd}(x', x' - x) dx'; \quad (8)$$

$$f(0, x) = \delta(x - 1),$$



где $A(x) = \Sigma_n(x, E_0) / \Sigma_n(1, E_0)$; $a = 1 / \Sigma_n(1, E_0)$; $\Sigma_n(x, E_0) = E_0 \int_0^x \sigma_{nd}(x, x-x') dx'$; $\sigma_{nd}(x', x'-x) = d\sigma_n(E_0 x', E_0(x'-x)) / (E_0 d(x'-x))$ – дифференциальное по переданной энергии сечение неупругого столкновения электрона.

Для решения уравнения (8) введем функцию $\varphi(\bar{z}, x)$:

$$f(\bar{z}, x) = \varphi(\bar{z}, x) + \exp(-\bar{z})\delta(x-1). \tag{9}$$

Очевидно, что это соотношение соответствует разбиению потока электронов на рассеянную (функция $\varphi(\bar{z}, x)$) и нерассеянную части. Для дальнейшего упрощения задачи предположим, что полное сечение неупругого рассеяния слабо зависит от энергии электронов. Как будет видно из дальнейшего, это предположение оправдано. Тогда $\sigma_n(x, x-x') = \sigma_n(x-x')$; $A(x) = 1$. Вводя переменные $t = 1-x$; $t' = 1-x'$ и функцию

$$F(\bar{z}, t) = \varphi(\bar{z}, 1-t) \text{ при } t < 1;$$

$$F(\bar{z}, t) = 0 \text{ при } t > 1,$$

из (8) получим кинетическое уравнение в виде

$$\frac{\partial F(\bar{z}, t)}{\partial \bar{z}} + F(\bar{z}, t) = a \int_0^t F(\bar{z}, t') \sigma_{nd}(t-t') dt' + a \exp(-\bar{z}) \sigma_{nd}(t). \tag{10}$$

Применяя преобразование Лапласа по переменной t и пользуясь теоремой о свертке [5], получим

$$\frac{\partial g(\bar{z}, p)}{\partial \bar{z}} + [1 - al(p)]g(\bar{z}, p) = a \exp(-\bar{z})l(p) \text{ при } g(0, p) = 0, \tag{11}$$

где $g(\bar{z}, p) = \int_0^\infty F(\bar{z}, t) \exp(-pt) dt$; $l(p) = \int_0^\infty \sigma_{nd}(t) \exp(-pt) dt$.

Линейное дифференциальное уравнение первого порядка (11) с нулевыми граничными условиями при $\bar{z} = 0$ имеет решение

$$g(\bar{z}, p) = \exp(-\bar{z}) \{ \exp[al(p)\bar{z}] - 1 \}. \tag{12}$$

Соответственно, для $\varphi(\bar{z}, x) = F(\bar{z}, t)_{t=1-x}$ получим

$$F(\bar{z}, t) = \frac{\exp(-\bar{z})}{2\pi i} \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} \{ \exp[azl(p)] - 1 \} \exp(pt) dp \text{ при } t = 1-x. \tag{13}$$

Для вычисления обратного преобразования Лапласа можно воспользоваться теоремой о разложении образа Лапласа в ряд Лорана по степеням $1/p$ в окрестности точки $p \rightarrow \infty$ [5]. Тогда имеем

$$F(\bar{z}, t) = \sum_{k=0}^{\infty} c_{k+1}(\bar{z}) t^k, \text{ если } g(\bar{z}, p)_{p \rightarrow \infty} = \sum_{k=0}^{\infty} c_k p^{-k}. \tag{14}$$

Для получения явных выражений для функций $c_k(\bar{z})$ удобно пользоваться тем, что разложение в ряд Лорана в окрестности бесконечности по отрицательным степеням аргумента тождественно разложению в ряд Тейлора в окрестности нуля. Кроме того, можно получить соотношение, которое оказывается полезным при вычислении коэффициентов в (14):

$$l(p) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\sigma_{nd}^{(k)}(0)}{p^{k+1}}, \tag{15}$$

где $\sigma_{nd}^{(k)}(0) = \left. \frac{\partial^k \sigma_{nd}(x)}{\partial x^k} \right|_{x=0}$.

Ряд авторов при решении задач, подобных той, которая рассматривается в данной работе, используют приближение непрерывного торможения [11, 13]. Оказывается, в рассматриваемой ситуации это не совсем правомерно. Действительно, как известно, приближение непрерывного торможения



ния используется в случаях, когда обмен энергией между сталкивающимися частицами за одно столкновение мал. Тогда в интеграле столкновений используют разложение функции распределения в ряд Тейлора

$$f(\bar{z}, x') = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{f^{(k)}(x)}{k!} (x' - x)^k . \quad (16)$$

Подставляя выражение (16) в уравнение (8), получим

$$\frac{\partial f(\bar{z}, x)}{\partial \bar{z}} + f(\bar{z}, x)A(x) = a \sum_{k=0}^{\infty} b_k(x) f^{(k)}(\bar{z}, x) , \quad (17)$$

где $b_k(x) = \frac{1}{k!} \int_x^1 (x' - x)^k \sigma_{nd}(x', x' - x) dx' .$

Далее используют метод последовательных приближений, увеличивая число слагаемых в правой части формулы (17). Как правило, ограничиваются членами $k = 1$ или $k = 2$. Отметим, что в общем случае нельзя ожидать быстрой сходимости ряда в правой части (17). Для этого необходимо, чтобы члены ряда в правой части этого выражения, по крайней мере, не возрастали. В работе [6] показано, что можно ограничиться членами до $k = 2$, если функция распределения по энергиям близка к максвелловской с истинной средней энергией. Однако в нашем случае это не так в силу граничного условия (8).

Оценим сходимость ряда в правой части уравнения (17), считая, что $f(\bar{z}, x)$ как функция переменной x имеет колоколообразную форму с максимумом около $x = x_0 < 1$ и шириной Δ . Легко видеть, что модуль первой производной $|f^{(1)}(\bar{z}, x)|$ имеет два максимума, при этом

$$|f^{(1)}(\bar{z}, x)|_{\infty} \approx \frac{2f(\bar{z}, x_0)}{\Delta} .$$

Аналогично модуль второй производной имеет три максимума и по порядку величины

$$|f^{(2)}(\bar{z}, x)|_{\infty} \approx \frac{2f(\bar{z}, x_0)}{\Delta^2} ,$$

где знак « ∞ » означает «по порядку».

Таким образом, выполняется уравнение

$$a_k(\bar{z}, x) = \frac{2f^{(k)}(\bar{z}, x)}{k!} \int_x^1 (x' - x)^k \sigma_{nd}(x, x' - x) dx' \approx \frac{2f(\bar{z}, x_0)}{\Delta^k k!} \int_x^1 (x' - x)^k \sigma_{nd}(x, x' - x) dx' .$$

Как показывают расчеты, для оценок достаточно считать, что дифференциальное сечение неупругого столкновения по переданной энергии имеет следующую зависимость:

$$\sigma_{nd}(x, x' - x) \cong \Sigma(x)(x' - x)^{-2} \text{ при } x' - x > x_{\min}; x_{\min} \ll 1 ,$$

где $\Sigma(x)$ – некоторая функция безразмерной энергии.

Используя это выражение, для величины $a_k(\bar{z}, x)$ получим оценку

$$a_k(\bar{z}, x) \approx \frac{2f(\bar{z}, x_0)\Sigma(x)}{k!(k-1)\Delta^k} [(1-x)^{k-1} - (x_{\min})^{k-1}] . \quad (18)$$

Видно, что ряд $\sum_{k=0}^{\infty} a_k$ сходится. Как уже говорилось, из-за резко падающей зависимости дифференциального сечения от переданной энергии релаксация энергии электронов в рассматриваемых условиях происходит очень медленно. Учитывая, что при $\bar{z} = 0$ выполняется условие $\Delta = 0$, можно полагать, что в широкой пространственной области полуширина функции распределения мала. Тогда, считая, что $\Delta \ll 1, f(\bar{z}, x_0) \cong 1; 1 - x \gg x_{\min}$, оценим величину k , при которой выполняется соотношение $a_k(\bar{z}, x) \approx f(\bar{z}, x_0)\Sigma(x)$. Именно при выполнении этого соотношения поправки, вносимые при



добавлении следующего члена в оборванный ряд в правой части (18), начинают убывать. Используя для $k!$ формулу Стирлинга, имеем

$$k \approx \left[\frac{e(1-x)}{\Delta} \right],$$

где $[x]$ означает целую часть числа x .

Видно, что в основной области значений безразмерной энергии выполняется неравенство $k \gg 1$. Таким образом, доказано, что применение приближения непрерывного торможения с $k = 1, 2$ в рассматриваемой задаче неправомерно. Использование же дифференциальных уравнений более четвертого порядка наталкивается на известные трудности.

При выборе конкретной функции $\sigma_{nd}(x' - x)$ поступим следующим образом. К сожалению, в литературе отсутствуют экспериментальные данные о реальной зависимости $\sigma_{nd}(x' - x)$ и формула (8) получена чисто теоретически. Однако при ее использовании в соотношениях, приведенных выше, возникает необходимость в громоздких вычислениях. На наш взгляд, критерием применимости той или иной зависимости дифференциального сечения неупругого рассеяния от переданной атому газа энергии должно служить совпадение рассчитанной с ее помощью и экспериментально измеренной массовой тормозной способности. Как известно, она определяется следующим образом [7]:

$$\frac{1}{\rho} S = NZ \int_{E_{\min}(E_0)}^{E_0} W \sigma_{nd}(E_0, W) dW, \quad (19)$$

где S – тормозная способность; ρ – плотность.

Предположим, что сечение $\sigma_{nd}(x' - x)$ описывается следующей зависимостью:

$$\sigma_{nd}(x' - x) = \Sigma_n(1, E_0) b(E_0) \exp[-b(E_0)(x' - x)]. \quad (20)$$

При этом параметры $\Sigma_n(1, E_0), b(E_0)$ находят из наилучшего совпадения рассчитанной и экспериментально определенной [7] зависимостей массовой тормозной способности воздуха $S(E_0)/\rho$.

Таким образом, нами было получено:

$$b(E_0) = \frac{\frac{E_0}{E_{\min}} - 1}{\ln\left(\frac{E_0}{E_{\min}}\right) + \frac{E_{\min}}{E_0} - 1}; \quad (21)$$

$$\Sigma_n(1, E_0) = \frac{A(E_0)}{b(E_0)} \frac{1}{E_0} \left\{ \exp\left[-b(E_0) \frac{E_{\min}(E_0)}{E_0}\right] - \exp[-b(E_0)] \right\}; \quad (21a)$$

$$\frac{E_{\min}(E_0)}{E_0} = 2,258 \frac{\exp[-0,025(E_0 - 0,4)]}{E_0^{0,8}} \text{ при } E_0 < 10 \text{ кэВ};$$

$$\frac{E_{\min}(E_0)}{E_0} = 2,258 \frac{\exp[-0,025(E_0 - 0,4)]}{E_0^{0,8}} \left[1 + 2,7 \cdot 10^{-4} (E_0 - 10)^2 \right] \text{ при } E_0 > 10 \text{ кэВ};$$

$$A(E_0) = 16,2 \frac{b(E_0)}{E_0} \frac{\left(\frac{E_0}{E_{\min}} - 1\right)}{E_0^2} \exp\left(b(E_0) \frac{E_{\min}}{E_0}\right).$$

Величины $\Sigma_n(1, E_0)$ и E_0 в (21a) выражены соответственно в квадратных сантиметрах и килоэлектрон-вольтах; $E_{\min}(E_0)$ – в электрон-вольтах; $A(E_0)$ – в 10^{-18} квадратных сантиметров на килоэлектрон-вольт.

Далее сравнивали значения $S(E_0)/\rho$ для воздуха. Видно, что рассчитанные и экспериментальные данные по тормозной способности хорошо совпадают (рис.2). Зависимость $E_{\min}(E_0)$ оказывается падающей функцией (рис.3). При этом абсолютная величина $E_{\min}(E_0)$ весьма мала. Полное сечение

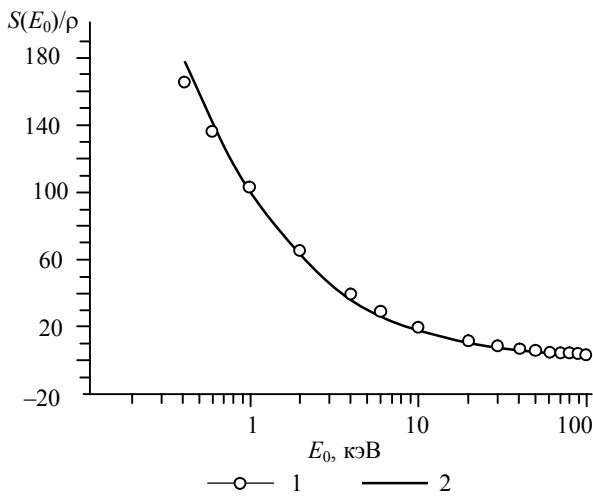


Рис.2. Экспериментальные данные работы [5] (1) и рассчитанная по разработанной теории зависимость (2) массовой тормозной способности воздуха от энергии электронов

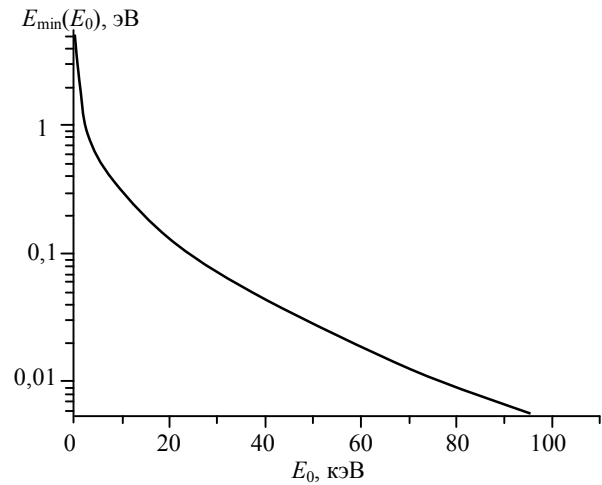


Рис.3. Рассчитанная по разработанной теории зависимость величины $E_{\min}(E_0)$ от энергии электронов E_0

неупругого рассеяния, полученное из формулы (20), оказывается слабо зависящим от энергии и для воздуха равно приблизительно $3 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$.

Когда $\sigma_{nd}(x' - x)$ определяется формулой (20), выполняется соотношение

$$al(p) = \frac{b(E_0)}{p + b(E_0)}. \quad (22)$$

Вычисления функции $F(\bar{z}, t)$ с помощью уравнения (13) дают [3]

$$F(\bar{z}, t) = \sqrt{\frac{b(E_0)\bar{z}}{t}} \exp[-(\bar{z} + b(E_0)t)] I_1(2\sqrt{b(E_0)\bar{z}t}), \quad (23)$$

где $I_1(y)$ – модифицированная функция Бесселя первого рода первого порядка.

Соответственно для функции распределения электронов по энергиям $f(\bar{z}, x)$ и средней энергии $E_1(\bar{z}, E_0)$ имеем

$$f(\bar{z}, x) = \sqrt{\frac{b(E_0)\bar{z}}{1-x}} \exp[-(\bar{z} + b(E_0)(1-x))] I_1(2\sqrt{b(E_0)(1-x)\bar{z}}) + \exp(-\bar{z})\delta(x-1); \quad (23a)$$

$$E_1(\bar{z}, E_0) = E_0 \left\{ \exp(-\bar{z}) + 2\sqrt{b(E_0)\bar{z}} \int_0^1 (1-y^2) f_1(\bar{z}, y, E_0) dy \right\}, \quad (24)$$

где $f_1(\bar{z}, y, E_0) = \exp[-(\bar{z} + b(E_0)y^2)] I_1(2\sqrt{b(E_0)\bar{z}y})$.

Дифференцируя выражение (24), получим

$$\frac{dE_1(\bar{z}, E_0)}{d\bar{z}} = E_0 \left\{ -\exp(-\bar{z}) + \sqrt{\frac{b(E_0)}{\bar{z}}} \int_0^1 (1-y^2) [f_1(\bar{z}, y, E_0) + 2\bar{z}f_2(\bar{z}, y, E_0)] dy \right\}, \quad (25)$$

где

$$f_2(\bar{z}, y, E_0) = \exp[-(\bar{z} + b(E_0)y^2)] \times \left\{ -I_1(2\sqrt{b(E_0)\bar{z}y}) + \sqrt{\frac{b(E_0)}{\bar{z}}} \left[I_0(2\sqrt{b(E_0)\bar{z}y})y - \frac{I_1(2\sqrt{b(E_0)\bar{z}y})}{2\sqrt{b(E_0)\bar{z}}} \right] \right\};$$

$I_0(y)$ – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Можно показать, что в области существенного энерговыделения с точностью до нескольких процентов выполняется соотношение



$$\frac{dE_1(\bar{z}, E_0)}{d\bar{z}} = K(E_0) = -E_0 \left\{ \frac{1}{b(E_0)} - \exp[-b(E_0)] \left[1 - \frac{1}{b(E_0)} + \frac{1}{b^2(E_0)} \right] \right\}. \quad (26)$$

В случае, когда выполняется условие $\sqrt{b(E_0)\bar{z}}y > 200$ для вычислений удобно использовать асимптотику модифицированных функций Бесселя [1]. Тогда при $\sqrt{b(E_0)\bar{z}}y > 200$ формулы для функций $f_1(\bar{z}, y, E_0)$ и $f_2(\bar{z}, y, E_0)$ приобретут следующий вид:

$$f_1(\bar{z}, y, E_0) = \frac{\exp\left[2\sqrt{b(E_0)\bar{z}}y - b(E_0)y^2 - \bar{z}\right]}{2\sqrt{\pi y (b(E_0)\bar{z})^{0.25}}}, \quad (27)$$

$$f_2(\bar{z}, x, E_0) = -f_1(\bar{z}, x, E_0) \left(1 + \frac{1}{4\bar{z}} - y\sqrt{\frac{b(E_0)}{\bar{z}}} \right).$$

Напомним, что безразмерная координата \bar{z} выражена в числах столкновений.

3. Сравнение расчетов по полученным формулам с известными данными и обсуждение результатов. Результаты вычислений сравнивали с данными, полученными с помощью численного метода разложения функции распределения по числам столкновений [15], при $E_0 = 2$ кэВ и $E_0 = 10$ кэВ (рис.4-6). Как видно из рис.4 оба метода дают достаточно близкие результаты. Расчеты показывают,

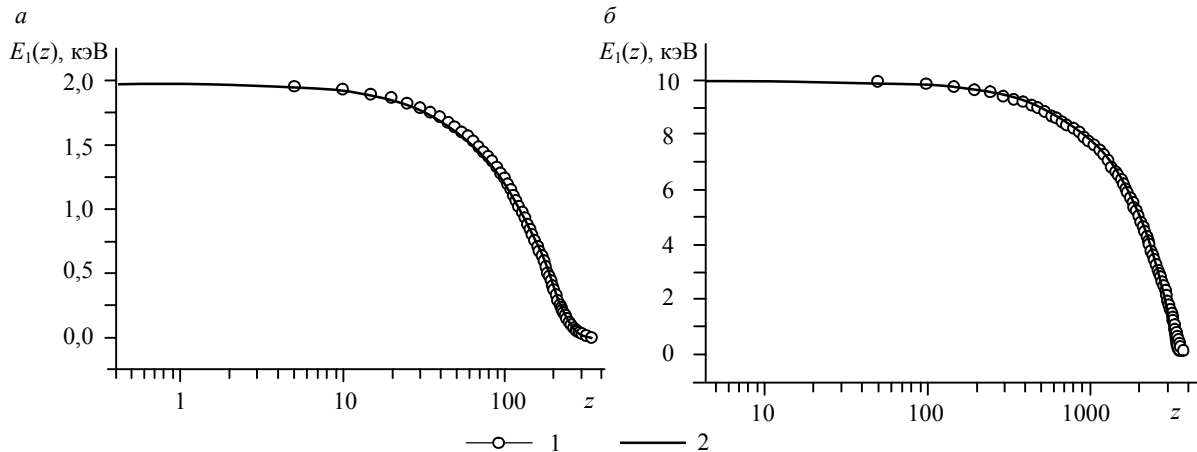


Рис.4. Сравнение средней энергии электронов от числа неупругих столкновений в воздухе, взятой из работы [15] (1) и рассчитанной по полученным формулам (2), при начальной энергии электронов $E_0 = 2$ кэВ (а) и $E_0 = 10$ кэВ (б)

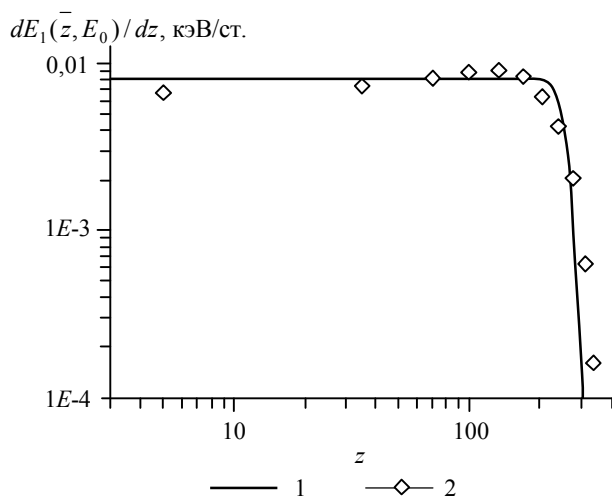


Рис.5. Сравнение энергосвыделений $dE_1(\bar{z}, E_0)/dz$ от числа неупругих столкновений (ст.) в воздухе: 1 – рассчитанных по формуле (25); 2 – приведенных в работе [15], – при начальной энергии электронов $E_0 = 2$ кэВ

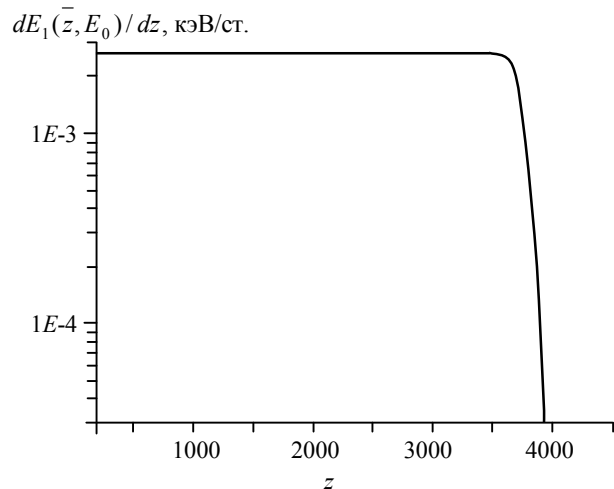


Рис.6. Зависимость энергосвыделения $dE_1(\bar{z}, E_0)/dz$ от числа неупругих столкновений (ст.) в воздухе, рассчитанная по формуле (25), при начальной энергии электронов $E_0 = 10$ кэВ

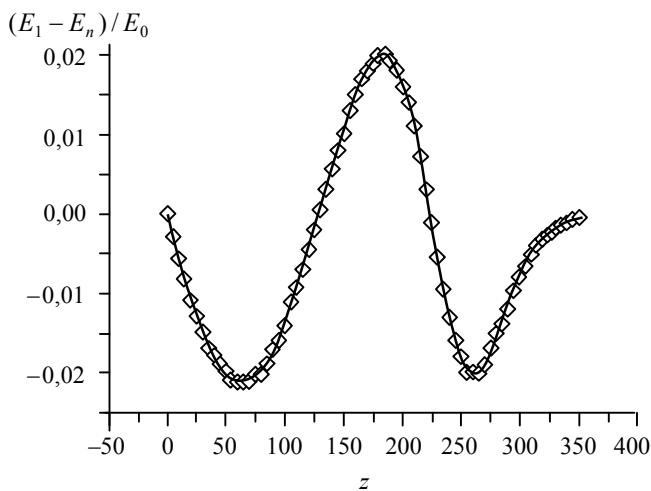


Рис.7. Относительная разность средних энергий $(E_1 - E_n)/E_0$ при распространении пучка электронов в воздухе; начальная энергия электронов $E_0 = 2$ кэВ; E_1 рассчитана по формуле (24); E_n приведена в работе [15]

что расхождение при $E_0 = 2$ кэВ не превосходит 2 %, а при $E_0 = 10$ кэВ – 5 % (рис.7). Зависимость $E_1(\bar{z}, E_0)$ имеет монотонно падающий характер, что физически вполне понятно. Видно, что даже при $E_0 = 10$ кэВ электроны полностью теряют энергию после порядка 4000 столкновений. Это говорит о том, что для $E_0 = 100$ кэВ расчеты методами Монте-Карло по адекватным моделям столкновений будут, по-видимому, затруднительны.

Сравнение данных, приведенных на рис.5, 6, показывает, что расчеты обоими методами дают качественно схожие результаты. Отличие лишь в том, что начальная величина $dE_1(\bar{z}, E_0)/dz_{z=0}$, вычисленная в настоящей работе, несколько выше. Далее она остается практически постоянной, а затем резко падает. Аналогичная зависимость, полученная методом

разложения по числам столкновений, вначале растет и при некотором значении координаты начинает превышать величину $dE_1(\bar{z}, E_0)/dz$, вычисленную по формуле (25), а затем также резко падает. В целом размеры областей существенного энерговыделения, рассчитанные обоими методами, хорошо согласуются, а средние величины $dE_1(\bar{z}, E_0)/dz$ близки. Это, по-видимому, вызвано тем, что при расчете тормозной способности оба метода дают одинаковые результаты. Тот факт, что величина $dE_1(\bar{z}, E_0)/dz$, полученная в данной работе, практически постоянна в области существенного энерговыделения, видимо, связан с пренебрежением зависимостью полного сечения неупругого рассеяния от текущей энергии электронов.

Заключение. Основные полученные результаты следующие:

- найдено аналитическое решение уравнения Больцмана для электронов: 1) в случае, когда учитываются только неупругие столкновения; 2) полное сечение неупругих столкновений не зависит от энергии электронов; 3) для произвольной зависимости дифференциального сечения неупругого столкновения от переданной энергии и без учета изменения направления движения в результате неупругих столкновений;
- получены аналитические выражения для средней энергии по потоку и значения энерговыделения в газе; рассчитанная массовая тормозная способность воздуха хорошо описывает известные экспериментальные данные;
- проведены расчеты величин $dE_1(\bar{z}, E_0)/dz, E_1(\bar{z}, E_0)$ при различных начальных энергиях вылета электронов; результаты хорошо согласуются с численными расчетами по методу разложения функции распределения по числам столкновений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абрамовиц М.* Справочник по специальным функциям / М.Абрамовиц, И.Стиган. М.: Наука, 1979. 830 с.
2. *Аккерман А.Ф.* Моделирование траекторий заряженных частиц в веществе. М.: Энергоатомиздат, 1991. 200 с.
3. *Бейтмен Г.* Таблицы интегральных преобразований / Г.Бейтмен, А.Эрдейи. М.: Наука, 1969. Т.1. 343 с.
4. *Кольчужкин А.М.* Введение в теорию прохождения частиц через вещество / А.М.Кольчужкин, В.В.Учайкин. М.: Атомиздат, 1978. 255 с.
5. *Корн Г.* Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г.Корн, Т.Корн. М.: Наука, 1974. 831 с.
6. *Марчук Г.И.* Методы расчета ядерных реакторов. М.: Госатомиздат, 1961. 667 с.
7. *Berger E.* Stopping powers for electrons and positrons // International Commission on Radiation Units and Measurements. Maryland. 1984. Vol.37. P.42-45.
8. E-beam Sustained Low Power Budget Air plasma / P.Palm, E.Plonjes, I.V.Adamovich, J.W.Rich // AIAA Paper. 2002. P.0637-0642.
9. *Fraishtadt V.L.* Use of MHD System in Hipersonic Aircraft / V.L.Fraishtadt, A.L.Kuranov, E.G.Sheikin // Technical Physics. 1998. Vol.43. P.1309-1314.
10. *Kuranov A.L.* Magnetohydrodynamic Control on Hipersonic Aircraft under AJAX Concept / A.L.Kuranov, E.G.Sheikin // Journal of Spacraft and Rockets. 2003. Vol.40. N 2. P.174-182.



11. *Maurizio D.* Secondary electron emission yield calculation performed using two different Monte Carlo strategies // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2011. P.1668-1671.
12. *Mayol R.R.* Total and transport cross section for elastic scattering of electrons by atoms / R.R.Mayol, F.Salvat // Atomic Data and Nuclear Data Tables. 1997. Vol.65. N 21. P.55-154.
13. *O'Macheret S.O.* External Supersonic Flow and Scramjet Intel Control By MHD with Electron Beam Ionization / S.O.O'Macheret, M.N.Shnieder, R.B.Miles // AIAA Paper. 2001. P.0492-0498.
14. *Park C.* Theoretical Performance of a Magnetohydrodynamic-Bypass Scramjet Engine with Nonequilibrium Ionization / C.Park, D.W.Bogdanoff, U.B.Mehta // Journal of Propulsion and Power. 2003. Vol.19. N 4. P.529-537.
15. *Sheikin E.G.* Calculation of Space Distribution of Energy Deposited by E-Beam for Flow Control Applications / E.G.Sheikin, V.S.Sukhomlinov // AIAA Paper. 2006. P.1369.
16. *Sheikin E.G.* MHD Control in Hipersonic Aircraft / E.G.Sheikin, A.L.Kuranov // AIAA Paper. 2005. P.1335-1339.
17. *Sheikin E.G.* The effective differential cross section for elastic scattering of electrons by atoms and its use for Monte Carlo simulation of electron passage through matter // Phys. Scr. 2010. Vol.81. P.045702-045710.
18. *Sheikin E.G.* The effective differential cross section for inelastic energy loss of electrons in matter // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2014. P.1-7.

Авторы: **В.С.Сухомлинов**, д-р физ.-мат. наук, доцент, *prima-ivs@mail.ru* (Санкт-Петербургский государственный университет, Россия), **А.С.Мустафаев**, д-р физ.-мат. наук, профессор, *alexmustafaev@yandex.ru* (Санкт-Петербургский горный университет, Россия).

Статья принята к публикации 18.01.2016.

INFLUENCE OF INELASTIC COLLISIONS ON FAST ELECTRON BEAM ENERGY RELAXATION IN GAS

V.S.SOUKHOMLINOV¹, A.S.MUSTAFAEV²

¹ Saint-Petersburg State University, Russia

² Saint-Petersburg Mining University, Russia

This work is dedicated to the formulation of an analytical theory for calculating the spacial distribution of energy release in a fast electron beam moving in gas and, particularly, in air, considering inelastic interaction. Electron energies of 1-100 keV are considered. Based on the analysis of data on the cross sections for inelastic and elastic interaction of electrons with gas molecules contained in air, it is concluded that inelastic collisions mainly cause energy relaxation, and elastic collisions cause mostly impulse relaxation. Solving Boltzmann's kinetic equation for the electrons, it is used a model cross-section for the inelastic collisions of electrons with molecules, which guarantees a good description of the measured energy dependence of the mass stopping power of the electrons. Obtained results for dependence of electrons' mean energy on the number of inelastic collisions are in good compliance with the results obtained with the method of expanding distribution function in collision numbers and also with the results of Monte-Carlo simulation.

Key words: interaction of electron beam at an energy of 1-100 keV with plasma, elastic and inelastic interaction, energy relaxation, impulse relaxation, Boltzmann's kinetic equation, Monte-Carlo numerical simulation.

How to cite this article: Soukhomlinov V.S., Mustafaev A.S. Influence of inelastic collisions on fast electron beam energy relaxation in gas. Zapiski Gornogo instituta. 2016. Vol.219, p.392-402. DOI 10.18454/PMI.2016.3.392

REFERENCES

1. *Abramovich M., Stigan I.* Spravochnik po special'nym funkciyam (*Handbook of Mathematical Functions*). Moscow: Nauka, 1979, p.830.
2. *Akkerman A.F.* Modelirovanie traektorij zarjzhenykh chastic v veshhestve (*Simulation of trajectories of charged particles in matter*). Moscow: Jenergoatomizdat, 1991, p.200.
3. *Beitmen G., Erdeii M.* Tablicy integral'nykh preobrazovanij (*Tables of integral transforms*). Moscow: Nauka, 1969. Vol.1, p.343.
4. *Kolchuzhkin A.M., Uchaikin V.V.* Vvedenie v teoriyu prohozhdenija chastic cherez veshhestvo (*Introduction to the theory of particles passing through the matter*). Moscow: Atomizdat, 1978, p.255.
5. *Korn G., Korn T.* Spravochnik po matematike dlja nauchnykh rabotnikov i inzhenerov (*Mathematical Handbook for Scientists and Engineers*). Moscow: Nauka, 1974, p.831.
6. *Marchuk G.I.* Metody rascheta jadernykh reaktorov (*Methods of calculation of nuclear reactors*). Moscow: Gosatomizdat, 1961, p.667.
7. *Berger E.* Stopping powers for electrons and positrons. International Commission on Radiation Units and Measurements. Maryland. 1984. Vol.37, p.42-45.
8. *Palm P., Plonjes E., Adamovich I.V., Rich J.W.* E-beam Sustained Low Power Budget Air plasma. AIAA Paper. 2002, p.0637-0642.
9. *Fraishtadt V.L., Kuranov A.L., Sheikin E.G.* Use of MHD System in Hipersonic Aircraft. Technical Physics. 1998. Vol.43, p.1309-1314.
10. *Kuranov A.L., Sheikin E.G.* Magnetohydrodynamic Control on Hipersonic Aircraft under AJAX Concept. Journal of Spacecraft and Rockets. 2003. Vol.40. N 2, p.174-182.
11. *Maurizio D.* Secondary electron emission yield calculation performed using two different Monte Carlo strategies. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2011, p.1668-1671.



12. *Mayol R.R., Salvat F.* Total and transport cross section for elastic scattering of electrons by atoms. *Atomic Data and Nuclear Data Tables.* 1997. Vol.65. N 21, p.55-154.
13. *O'Macheret S.O., Shnieder M.N., Miles R.B.* External Supersonic Flow and Scramjet Inlet Control By MHD with Electron Beam Ionization. *AIAA Paper.* 2001, p.0492-0498.
14. *Park C., Bogdanoff D.W., Mehta U.B.* Theoretical Performance of a Magnetohydrodynamic-Bypass Scramjet Engine with Nonequilibrium Ionization. *Journal of Propulsion and Power.* 2003. Vol.19. N 4, p.529-537.
15. *Sheikin E.G., Sukhomlinov V.S.* Calculation of Space Distribution of Energy Deposited by E-Beam for Flow Control Applications. *AIAA Paper.* 2006, p.1369-1374.
16. *Sheikin E.G., Kuranov A.L.* MHD Control in Hypersonic Aircraft. *AIAA Paper.* 2005, p.1335-1339.
17. *Sheikin E.G.* The effective differential cross section for elastic scattering of electrons by atoms and its use for Monte Carlo simulation of electron passage through matter. *Phys. Scr.* 2010. Vol.81, p.045702-045710.
18. *Sheikin E.G.* The effective differential cross section for inelastic energy loss of electrons in matter. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research.* 2014, p.1-7.

Authors: *V.S.Soukhomlinov, Dr. of Physics & Mathematics, Associate Professor, prima-ivs@mail.ru (Saint-Petersburg State University, Russia), A.S.Mustafaev, Dr. of Physics & Mathematics, Professor, alexmustafaev@yandex.ru (Saint-Petersburg Mining University, Russia).*

Manuscript Accepted 18.01.2016.



Нефтегазовое дело

УДК 662.6.9:662.95

СОВРЕМЕННЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ПОЛУЧЕНИЯ ГАЗА

И.В.ИВАНОВА¹, В.М.ШАБЕР²

¹Санкт-Петербургский горный университет, Россия

²Bio Eco Power, Стокгольм, Швеция

Реализация энергетических проектов крупными компаниями связана с рисками и сложностью выбора технологии инвестирования, какая из них будет наиболее благоприятной. Государства и международные организации влияют на инвестиционный климат в энергетическом секторе, покрывая производство электроэнергии различными формами налогов (сборов) или введением системы поддержки, что усложняет базу затрат. Такого рода действия благоприятствуют возобновляемым источникам энергии, в то время как ископаемое топливо страдает, например, в результате налогов на выбросы двуокиси углерода.

Цель исследования – выявить условия и обосновать возможность использования в качестве современной перспективы получение и использование газа из отходов и продуктов жизнедеятельности человека: пищевые, растительные отходы, продукты жизнедеятельности.

Результаты исследования – доказана экономическая целесообразность разработки топливных ячеек (ТЯ) на «сыром» биометане и выявлены возможности использования таких установок в территориальной близости к потребителю, что делает их идеальными для использования в качестве независимого источника электроэнергии и тепла.

Ключевые слова: использование биометана, топливная ячейка, отходы продуктов жизнедеятельности человека.

Как цитировать эту статью: Иванова И.В. Современные перспективы получения газа / И.В.Иванова, В.М.Шабер // Записки Горного института. 2016. Т.219. С.403-411. DOI 10.18454/PMI.2016.3.403

Введение. Согласно последним исследованиям, из отходов и продуктов жизнедеятельности человека можно получить достаточное количество энергии для энергопитания 138 млн домов. Исследователи Университета ООН по изучению воды, окружающей среды и здоровья (UNUINWEN) предполагают, что потенциально биогаз, созданный из отходов жизнедеятельности людей со всего мира, может быть эквивалентен природному газу на сумму 12,5 млрд долларов.

Кроме того, создание тщательно разработанной системы сбора отходов жизнедеятельности человека в таких развивающихся странах, как Индонезия, Бразилия и Эфиопия с целью производства метана для чистой энергии также решает дополнительные проблемы плохих санитарных условий.

Исследования UNUINWEN ООН направлены на решение двух важных вопросов: загрязнение окружающей среды из-за отсутствия санитарно-технических систем в развивающихся странах и необходимость создания энергетической системы с низким уровнем затрат.

Разработка системы канализации в новом сообществе чрезвычайно дорога, поэтому ученые UNUINWEN обратились к исследованию биогаза. Биогаз является ценным источником чистой энергии. Предполагается, что из анаэробного газа, произведенного с использованием отходов человеческой жизнедеятельности, в общинах развивающихся стран можно производить биогаз на сумму 200-376 млн долларов ежегодно.

«Это начало разговора. Действительно, важно то, что мы видим наши отходы как возможность, а не как бремя», – сказала в своем заявлении Зафар Адиль, руководитель UNUINWEN [3-7].

С таким мнением согласны далеко не все. Одни аналитики считают развитие традиционной энергетики более правильным решением в кратко- и среднесрочной перспективе, позволяющим быстрее электрифицировать население. Другие сомневаются в потенциальной способности возобновляемых источников пробить себе дорогу без щедрой внешней поддержки.

По данным Всемирного банка, строительство электросети в малонаселенных регионах, таких как Мали, обойдется не менее чем в 19 тыс. долларов за километр. Эти затраты на прокладку линий через труднодоступную местность никогда не окупятся ввиду недостатка спроса, обусловленного малочисленностью населения.

Лидс, город в Йоркшире, на реке Эйр, третий по величине город Великобритании, скоро станет центром по превращению отходов в энергию благодаря новой электростанции по переработке и энергетической утилизации отходов, строительством которой занимается компания «Veolia».

Только в США ежегодно в сточные воды попадает около 12 трлн галлонов отходов. Это грязный процесс, который также оставляет массивный углеродный след. Обработка промышленных сточных вод – очистка от нечистот заводами и электростанциями – требует еще больше энергии.

В замкнутых пространствах, например на орбитальных космических станциях, остро стоит проблема утилизации отходов жизнедеятельности человека. Процесс утилизации должен проходить быстро, а вещества, которые при этом образуются, не должны быть едкими, токсичными или угнетать рост растений, а еще лучше, если они окажутся полезными. Решение проблемы предложили специалисты Института биофизики СО РАН Сибирского федерального университета Института катализа им. Г.К.Борескова СО РАН, работу ученых поддержал интеграционный проект № 5.

В нашем кратком исследовании показаны перспективы эффективного и дешевого использования отходов и продуктов жизнедеятельности человека для получения электроэнергии. Возможно, в не столь отдаленном будущем человечество откроет новые, более эффективные, источники энергии, но также должна быть решена проблема использования отходов жизнедеятельности человека.

Когда-нибудь наши теперешние предположения по поводу применения тех или иных средств, необходимых для проживания человека, уничтожение полезных ископаемых – сжигается практически все, что может гореть, отравляется окружающая среда, абсолютно неэффективно используются различные виды энергии, формируется парниковый эффект и т.д. – окажутся банальными.

Цены на энергетические ресурсы постоянно растут и отражаются на бюджете каждого участника экономической системы, что стимулирует специалистов к поискам новых источников энергии. Когда цены падают, взоры обращаются к вопросу охраны окружающей среды – применению экологических технологий. Энергия ветра, солнечная энергия, электрогибридные автомобили, топливные элементы, биодизельное топливо, этанолит и другие источники альтернативной энергии по своему экономическому воздействию могут оказаться непредсказуемыми. Почти все, что может быть сожжено, применено или трансформировано теоретически находит свою нишу в альтернативных источниках энергии.

На сегодняшний день есть сырье, которое всегда будет сопутствовать человеческому существованию и оно практически цены не имеет – только утилизация: пищевые, растительные отходы, продукты жизнедеятельности, включая шлам и пр.

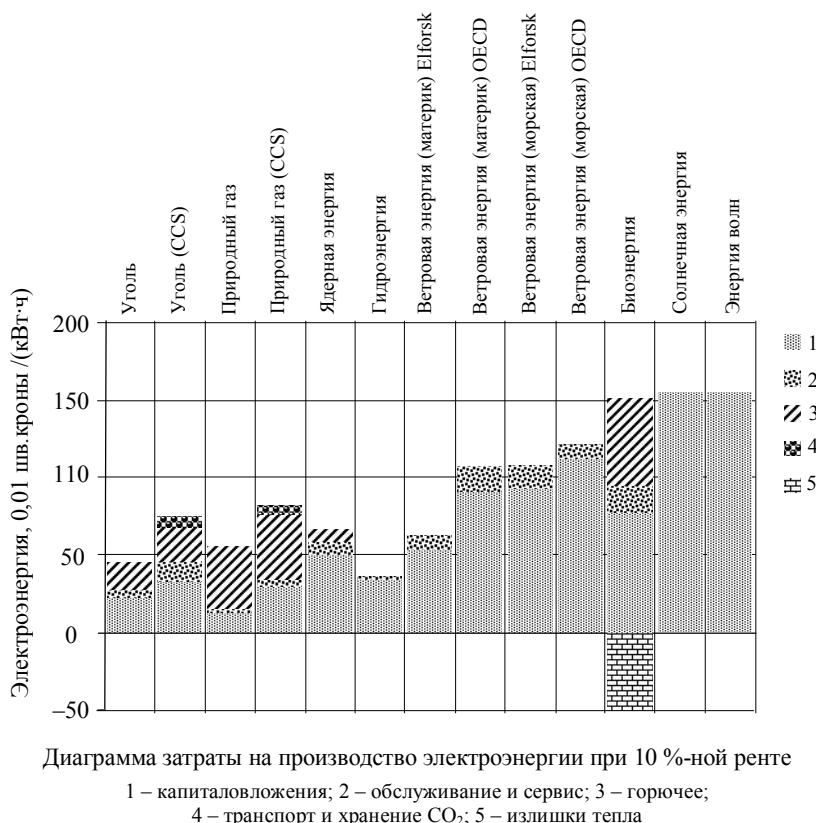


Диаграмма затраты на производство электроэнергии при 10 %-ной ренте

1 – капиталовложения; 2 – обслуживание и сервис; 3 – горючее;
4 – транспорт и хранение CO₂; 5 – излишки тепла

Нас интересует получение электроэнергии из отходов и продуктов жизнедеятельности. Рассмотрим диаграмму, представленную на рисунке [13, 23]. Следует взглянуть на стоимость получения электроэнергии, данные приведены в шведских кронах.

Затраты на производство электроэнергии при создании новых проектов определить сложно, а также достаточно трудно выбрать, на какие технологические инвестиции сделать ставку. Стоимость расчетов должна быть сопоставима с затратами на производство и быть комплексна.

Применяется множество параметров записи условий для различных проектов. Нет единого способа управления выбором самого дешевого проекта для всех ситуаций. Диаграмма (см.рисунок) содержит сведения о ранее опубликованных сметах расходов и факторах, оказывающих влияние на затраты.

Стоимость электроэнергии на новых предприятиях колеблется в широких пределах и зависит от формы производства и распределения.

Постоянные и переменные затраты отличаются. Ядерная и гидроэнергетика требуют больших инвестиций, основная часть производства в этих случаях состоит из капитальных затрат. Таким образом, затраты подвержены изменениям процентных ставок и задержек выплат, следовательно, возникают дополнительные расходы на персонал и оборудование, также инвесторы вынуждены будут пла-



тительное время проценты без какой-либо прибыли. Время до фактического начала строительства влечет за собой затраты на планирование и процесс выдачи разрешений. С другой стороны, у ядерной и гидроэнергетики низкие амортизационные (переменные) затраты. Время эксплуатации больше, чем, например, у ветровой турбины или солнечной батареи. В случае ГЭС и АЭС капитальные затраты больше в сравнении с ветровой энергией и энергией солнечных батарей. Однако у последних сроки ввода в эксплуатацию и общий объем инвестиций меньше, поэтому эти источники питания менее чувствительны к изменению курса.

На электростанциях, работающих на ископаемом топливе, преобладают переменные затраты. Большое количество производств газовой и значительная доля угольной энергетики зависят от расходов на топливо. Следовательно, эти производства чувствительны к изменениям цен на топливо. Получается, что ценовой прогноз контролирует выбор энергии и инвестиций.

Атомная энергетика менее чувствительна к временным колебаниям цены на топливо. Стоимость топлива является лишь небольшой частью от общей стоимости, и экспорт урана часто осуществляется долгосрочными контрактами. Количество урана, покупаемое на слотовом рынке, обычно незначительно.

Прибыль от ветровой энергии и гидроэнергетики лишь косвенно затронута изменениями цен на топливо. Заводы по переработке нефти, газа и угля (ископаемое топливо) представляют собой маргинальное производство электроэнергии, что имеет значение для предельной (максимально целесообразной) цены на электроэнергию. Если текущая цена газа ниже, чем ожидалось в инвестиционном решении для возобновляемых источников энергии, теряется прибыль, а в худшем случае – останавливается производство. Решающими являются также долгосрочные цены на природный газ, что важно для конкурентной способности электростанций, использующих газ.

Распределение между постоянными (капитальными) и переменными затратами влияет на необходимый объем работы. Когда дело доходит до источников питания с высоким уровнем постоянных издержек (ядерной и ветровой энергии), рассчитывают на скорое компенсирование капиталовложений. Таким образом, скорость утилизации становится весьма важным фактором. Также влияют плановые и внеплановые отключения, вызванные техническим обслуживанием и непредвиденными проблемами (для энергии ветра и солнечной энергии – скорость ветра и солнечной радиации).

Для электростанций, использующих газ, картина иная. Переменные затраты доминируют, и это может быть решающим при запуске предприятия. Ядерные реакторы также будут функционировать даже при низкой цене на электроэнергию. Перспективная цена на электроэнергию является одной из основных неопределенностей, связанных с ядерной энергетикой.

Данные для гидроэнергетики и биоэнергетики взяты из [23], для энергии на ископаемом и ядерном топливе – из [13]. Что касается ветроэнергетики, то данные, приведенные в исследованиях, очень разные. Выводы по работам [13, 23] отражены в диаграмме (см. рисунок).

Показатели расходов относятся к шведским или европейским условиям. Чаще всего указывают на строительство новых электростанций и сдачу их в эксплуатацию в 2016 г. без учета налогов, сборов, помощи или субсидий.

При рассмотрении значений на диаграмме нужно учитывать следующее.

Ископаемые источники энергии. В угольной энергетике используются хорошо разработанные технологии, которые позволяют производить дешевое электричество, если деятельность близка к шахте, как в США и Австралии, что снижает затраты в дальнейшем. Недостатки угольной промышленности в сочетании чувствительности к ценам на топливо и воздействию на окружающую среду, в основном, от выбросов двуоксида углерода. Альтернативой будет работа с так называемой CCS-технологией (*carbon capture and storage*), которая, как ожидается, позволит отделить около 85 % образовавшегося диоксида углерода. По сравнению с обычным углем электростанции, работающие по технологии CCS, приведут к снижению эффективности, при этом инвестиционные затраты будут выше. Электрический КПД преобразования составит 7-10 % [1, 23], а это в свою очередь повышает и расходы на топливо. Увеличение инвестиций увеличивает время ввода в строй новых электростанций по сравнению с обычными электростанциями, использующими технологии сжигания ископаемого топлива. Значит, электростанции, использующие CCS-технологии, чувствительны к колебаниям процентных ставок. Стоимость транспортировки и хранения двуоксида углерода сильно зависят от расстояния и объема хранения.

Будут ли предприятия с отделением двуоксида углерода конкурировать с традиционными электростанциями, работающими на угле или нет, зависит от будущих затрат на выбросы при разрешенных квотах на выбросы и приемлемости хранения. Если инвестор выберет технологию переработки угля CCS, то всегда возможна неопределенность ставок по выбросу, что работает в пользу CCS, но неясность всегда рассматривается как что-то негативное при наличии инвестиционного режима.



Заводам, работающим на газовом топливе, благоприятствуют низкие инвестиционные затраты и высокая гибкость. Доля газового топлива за последнее время сильно выросла в странах Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР). Недостатком является чувствительность к ценам на топливо и наличие газа, а также риск существенных расходов при использовании в качестве базовой нагрузки. Аналогичным является сравнение переработки угля с CCS-технологией и электростанциями, работающими на природном газе с CCS-технологией. Эффективность (КПД) падает, инвестиционные затраты по сравнению с работой без CCS-технологии растут, а увеличение рентабельности будет зависеть от будущей цены и квоты на выбросы. Тем не менее выбросов углекислого газа при сжигании газа меньше, чем при сжигании угля. Значит, CCS-технология будет применена на электростанциях, работающих на угле, вероятнее, чем на электростанциях, работающих на газе.

При анализе затрат на постройку и производство электростанций, работающих на угле, и заводов, работающих на природном газе, с CCS-технологией следует помнить, что существуют новые технологии, которые еще не были продемонстрированы в полном масштабе. Это означает неопределенность относительно издержек и затрат. Методы разделения в настоящее время проходят испытания на опытных установках обработки угля в Европе и планируются к демонстрации примерно к 2016 г., а затем смогут использоваться в коммерческой деятельности в 2020 г. в соответствии с [9-12, 13, 23].

Ядерная энергия. Как уже отмечалось, ядерная энергетика является капиталоемким источником энергии, требует больших инвестиций и сравнительно длительного периода строительства, что делает технологию чувствительной к различным уровням процентных ставок. В то же время реактор производит много электроэнергии, обладает долгое время низкими переменными затратами.

Техническая (экономическая) жизнь атомной электростанции оценивается в 40-60 лет. Атомная энергетика, как один из источников энергии, обладает наименьшими затратами на производство. Незначительные выбросы двуокси углерода и тенденции к снижению зависимости от ископаемых видов топлива привели ряд стран к рассмотрению возможности строительства новых реакторов. В последние годы много реакторов было построено во всем мире. Это хорошо зарекомендовавшая себя технология. Тем не менее опыт нового строительства в последние десятилетия неадекватен, особенно в Европе и США. Это означает повышенный риск для инвесторов и кредиторов. С другой стороны, реакторы продолжают возводиться уже в таких странах, как Южная Корея и Япония, с малыми затратами и хорошими результатами.

Как показано на диаграмме (см.рисунок), стоимость обработки отходов невелика – постоянные затраты профинансированы заблаговременно и стоимость обработки сравнительно мало сказывается на стоимости произведенных киловатт-часов. Во всех случаях предусмотрено условие, что реактор должен быть серийного производства, например в случае с ОРЭД, на финской АЭС в г.Олкилуото. Хороший опыт и «крутая кривая обучаемости» среди поставщиков создают условия снижения стоимости расходов на будущие проекты во время «обратного» риска в результате нежелания потенциальных инвесторов расширения строительства. Отрасль работает непрерывно, предусматривая меры сведения к минимуму риски задержек в строительных проектах, тем самым снижая затраты на электроэнергию. Например, применение несколькими странами согласованных (стандартных) конструкций реакторов позволило упростить процесс лицензирования. Ядерная энергия является одним из источников, которые могут масштабироваться с точки зрения размера и количества реакторов. Расположение нескольких реакторов локально упрощает планирование строительства и размещение инфраструктуры, получение разрешений, тогда как количество функций инфраструктуры может быть разделено.

Возобновляемые источники энергии. Гидроэнергетика, как и ядерная энергетика, является капиталоемким источником энергии с низкими переменными затратами. Производство сильно зависит от характеристик конкретных участков и размера гидроэлектростанции. Поэтому трудно обобщать, присутствуют и существенные различия в затратах, указанных в разных странах. Самые низкие показатели были зарегистрированы для огромных гидроэлектростанций в Китае. Швеция имеет ограниченные возможности для новой гидроэнергетики. Значения на диаграмме (см.рисунок) отражают показатели строительства новой гидроэлектростанции в Швеции мощностью 90 МВт [23].

Успешные проекты по ветроэнергетике обусловлены наличием различных программ помощи и субсидий. Наибольшая часть затрат на производство продукции состоит из капитальных затрат для оффшорной ветроэнергетики, так как на материке для них необходим дополнительный прочный фундамент. Техническое обслуживание на море требует больших расходов, связанных с высоким износом, и как результат – возрастает количество неисправностей.



Для ветровой электростанции мощностью 20×2 МВт, установленной на материке, стоимость электроэнергии около 4,5 центов / (кВт·ч) (5 %-ная рента) и 6,5 центов / (кВт·ч) (10 %-ная рента), в то время как для установленной на море мощностью 150×5 МВт стоимость больше – 0,8 центов / (кВт·ч) (5 %-ная рента) и 1,1 центов / (кВт·ч) (10 %-ная рента) [23].

Показатели прогнозируемых расходов на генерирование электроэнергии, приведенные для различных европейских стран, значительно выше; в среднем для береговых ветроэлектростанций 8,0-11 центов / (кВт·ч) (5-10 %-ная рента) и 0,10-0,14 центов / (кВт·ч) (5-10 %-ная рента) для морской установки. Однако, как отмечается в [23], страны с особо благоприятными условиями для ветроэнергетики – Северные страны: Швеция, Норвегия, Дания и Великобритания – не участвовали в исследовании. По оценке Гуннара Фредрикссона (Шведская ветроэнергетическая ассоциация), можно достичь стоимости электроэнергии 5,5 центов / (кВт·ч) при благоприятных условиях. Он считает, что стоимость электроэнергии установленной на море ветровой электростанции в условиях Швеции будет, по крайней мере, 10 центов / (кВт·ч).

Недостаток ветровых станций – это источник не постоянного, но прерывистого электроснабжения, который должен быть задействован в системе, где необходимо наличие и других источников питания, чтобы компенсировать колебания в электроснабжении. Использование газа для балансировки мощности дорого. Стоимость подобных систем в приведенные выше значения не включена. Северные страны используют дешевую гидроэнергетику для регулирования мощности. Однако существует предел мощности регулирования охваченных гидроэнергетической системой ветровых станций при экстенсивном увеличении ветра. Этот вопрос необходимо рассматривать, хотя это может повлечь за собой дополнительные расходы из-за износа гидроэлектростанций. Более того, конструкция для ветровых турбин часто устанавливается в весьма удаленных местах, т.е. требуются большие финансовые затраты на расширение электросети, что также не включено в состав расходов на производство электроэнергии. Ветроэнергетика в последние годы страдает от «перегретого» рынка поставщиков и большой конкуренции за прибыльные места. Все это способствовало резкому повышению цен. Что будет дальше – предстоит увидеть.

Биоэнергетика. В отличие от других возобновляемых источников энергии происходит сгорание биомассы или сжигание биотоплива. Даже если топливо может стоить недорого, но транспортировка и другая обработка влияют на добавленную стоимость и на стоимость производимого тепла, используемого для отопления через так называемый тепловой кредит, который понижает затраты на производство. Данные взяты из работ [14-21, 23] для установки мощностью 30 МВт.

Энергия волн и солнечных батарей. Солнечные батареи представляют собой хорошо отработанную технологию и сегодня генерируют электричество во всей Европе. В ОЭСР (OECD) [23] приводится средняя стоимость для Европы – 20 центов / (кВт·ч) (5 %-ная рента) и 30 центов / (кВт·ч) (10 %-ная рента). Для энергии волн и солнечных батарей стоимость производства электроэнергии превышает 10 центов / (кВт·ч). Значительные различия наблюдаются в предполагаемых инвестиционных затратах и степени использования. Петтер Сестрем (компания «Direct Energy») утверждает, что стоимость солнечной энергии в Швеции будет немного выше – 25-35 центов / (кВт·ч), так как условия для функционирования солнечных батарей немного хуже, чем в Центральной или Южной Европе, кроме того, в Швеции меньше опыта по использованию этого типа установок. Развитие технологии приведет к снижению материальных затрат и повышению эффективности производственных процессов, но это в будущем. В большинстве стран необходимы различные формы систем поддержки для поднятия конкурентоспособности солнечных элементов.

Использование энергии волн – относительно новая технология, которая требует продолжения исследований для разработки и создания различных структур. Скорее всего, придется искать другие материалы вместо стали, сократить инвестиционные затраты. Необходимо всестороннее тестирование, чтобы проверить наличие мест локализации и получить представление о техническом обслуживании и эксплуатационных расходах. Можно предположить, что использование энергии волн снизит затраты, соответствующие генерирующей, в том числе и оффшорной, ветроэнергетике, что позволит последней стать конкурентоспособной. Когда это произойдет, сказать трудно. На сегодняшний день стоимость использования энергии волн в несколько раз выше разумной.

Налоги, сборы и субсидии. Государства и международные организации влияют на инвестиционный климат в энергетическом секторе, покрывая производство электроэнергии с различными формами налогов (сборов) или введением системы поддержки. Это усложняет расчет базовых затрат. Как правило, такого рода действия благоприятствуют возобновляемым источникам энергии, в то время как ископаемое топливо страдает, например, в результате квот на выброс двуокиси углерода. Для использования возобновляемых источников в Швеции создана система сертификатов, а многие другие



страны применяют feed-in-тарифы. Это означает, что производителю гарантируется фиксированная цена на электроэнергию, подаваемую в сеть. Шведские электростанции выплачивают также налоги на недвижимость, которые особенно велики для гидроэнергетики. Атомные электростанции платят налог на рассчитанную мощность реакторов. Схемы платы и субсидий меняются во времени и по месту, и всегда есть неопределенность будущих изменений.

Как отмечалось выше, никогда не исключается возможность появления новых возобновляемых или каких-либо иных источников энергии, но что же делать с «сопутствующими» человеческой жизнедеятельности продуктами? Шламовыми водами? В настоящее время подавляющее количество биореакторов, производящих биометан (синтетический метан), направлено на производство «облагороженного» метана для автоиндустрии. Однако стоимость производства такого газа составляет 120-130 % от стоимости бензина! Неужели есть кто-то, покупающий горючее по этой цене без государственных субсидий лишь потому, что этот газ считается экологическим?

В таблице представлены три стадии получения синтетического биометана. Несложно заметить, что «сырой» метан после первой фазы процесса стоит 25 % от стоимости (в кронах на кубический метр при нормальных температуре и давлении) полного производственного цикла синтетического метана. Надо ли его дальше облагораживать и почему его нельзя использовать?

Стадии получения синтетического биометана

Стадии	Процесс, кроны / м ³		
	Первая фаза	Вторая фаза	Третья фаза
Биореактор сбраживания исходной массы	1,6	2,4	4,0
Сушильные аппараты	0,01	0,15	0,16
Вентиляторы	0,06	0,02	0,08
Суммарная стоимость	1,67	2,57	6,81

Сырой газ содержит 60-76 % метана CH₄, 25-30 % двуокиси углерода CO₂, и воду H₂O [8, 22, 24-27]. Метан как газ абсолютно неактивен и с ним надо что-то делать...

Теперь к вопросу получения электричества. Какой эффект можно получить при сжигании газового горючего в дизельном моторе или в обычном, нагруженном на генератор? Неужели 45-50; 60; 80 %? Нет, лишь жалких 15-20 %, если грамотно рассчитать КПД. А вот значения 45-50; 60; 80 % и даже выше получить можно в топливной ячейке.

Принцип работы топливной ячейки (ТЯ – Fuel Cell) был изобретен еще в 1836 г. и продолжает относиться к водородной энергетике. Почти 200 лет! И для топливной ячейки, как считается, лучше всего использовать водород... А если не только? В настоящее время известно множество углеводородов, которые можно использовать в ТЯ [1, 3-7, 9-12, 14-21, 24-27]. В чем же проблема?

Производство электроэнергии в Европе обычно осуществляется государственными, а не частными компаниями, производящими не только электроэнергию, но и газ [2]. Так решили правительства многих стран. Но стоимость синтетического биометана настолько высока, что зачастую заводы предпочитают сжигать сырой газ, называя это «экологическим способом переработки отходов». В Швеции существует даже термин «факел» – сжигать на факеле сырой газ.

Если мы производим сырой газ – метан, то для ТЯ необходимо и достаточно производить риформинг (конвертирование), а это затратное предприятие, если у вас нет собственного производящего газ заводика. За счет снижения КПД часть электроэнергии отбирается для риформинга. Нет необходимости работать ночью, когда тарифы на электричество ниже.

Содержание метана в сыром газе ниже, но эффективность ТЯ оправдывает затраты, и еще немаловажный фактор – вы ничего не сжигаете и, проводя пароуглеродный риформинг, используете двуокись углерода для получения электроэнергии в этой же ТЯ и не платите налог на двуокись углерода.

Эта ситуация наблюдается в Европе, но в странах Африки, Юго-Восточной Азии положение просто катастрофическое, и хотелось бы, чтобы наше исследование заинтересовало компании этих стран.

В таблице приведена относительная стоимость метана от «сырого» до «облагороженного» – синтетического биометана, цены – в шведских кронах за 1000 л за 1 м³ – в форме газа при нормальных температуре и давлении.

Цена на газ зависит от множества нелинейных переменных. Например, разница в стоимости сушки после первого сбраживания и заключительной обработки составляет 16 раз. Такие показатели примерно одинаковы для многих стран.



Отметили важный момент – увеличение объема газа, как и увеличение скорости его производства, вполне достижимо даже сегодня в 8-10 раз в тех же самых реакторах без существенных капиталовложений, что пропорционально снижает его себестоимость и стоимость.

Следует отметить особо – для того, чтобы предприятие было рентабельным, сырье должно быть дешевым. Некоторые из современных единиц измерений можно назвать псевдоистинными и вводящими в заблуждение – такие, как киловатт-час на кубический метр относятся лишь к бензину. Один кубический метр метана содержит теоретически идеальное количество энергии – 9,7 кВт, которое можно было бы использовать с КПД 100 %. Это соответствует энергии, содержащейся в 1,11 л бензина. Спекуляции продолжаются десятилетия. Мы должны измерять объем газа в кубических метрах, но не в киловатт-часах на кубический метр!

Заключение. Новая технология использования метана в сыром газе и топливной ячейки оправдывает затраты: позволяет, ничего не сжигая и проводя пароглеродный риформинг, использовать двуокись углерода для получения электроэнергии. Показатели экономической целесообразности: цены на сырье – только оплата транспорта; налоги на двуокись углерода близки к нулю; капиталовложения – уже сделаны; транспортировка газа – отсутствует; необходим сервис и обслуживание топливных ячеек, который упрощен из-за модульности конструкции; излишки тепла возвращаются в виде обогрева и применяются в производстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маслов И.В. Высокотемпературные топливные ячейки – когенерационные источники энергии будущего // Турбины и дизели. 2006, январь-февраль. С.4-6.
2. Министерство экономического развития: 2015 г. о текущей ситуации в экономике Российской Федерации после первой половины июля 2015 года [Электронный ресурс]. URL:<http://do.gendocs.ru/docs/index-65809.html#2145316>
3. Achten W.M.J. Jatropa bio diesel production and use / W.M.J.Achten, L.Verchot, Y.J.Franken, E.Mathijs, V.P.Singh, R.Aerts and B.Muys // Biomass and Bioenergy. 2005. № 32(12). P.1063-1084.
4. Ahmed M. Methanol and formic acid electrooxidation on nafion modified Pd/Pt{1 1 1}: The role of anion specific adsorption in electrocatalytic activity: Electrocatalysis / M.Ahmed, G.A.Attard, E.Wright, J.Sharman // Catalysis Today. 2013. Vol. 202. P.128-134.
5. Almazán-Sánchez P.T. Wastewater treatment of methyl methacrylate (MMA) by Fenton's reagent and adsorption: International Symposium on Advances in Hydroprocessing of Oil Fractions (ISAHOF 2013) / P.T.Almazán-Sánchez, I.Linares-Hernández, V.Martínez-Miranda, V.Lugo-Lugo R.M., G.Fonseca-Montes de Oca // Catalysis Today. 2014. Vol.220-222. P.39-48.
6. Amin Roohul Hydrogen and syn gas production via CO₂ dry reforming of methane over Mg/La promoted Co-Ni/MSU-S catalyst / Roohul Amin, Bingsi Liu, Zhao Biao Huang, Yin Chuan Zhao // International Journal of Hydrogen Energy Available, online 12 December, 2015.
7. Bandarenka A. Electrocatalysis for sustainable energy conversion or electrocatalysis today: Electrocatalysis / A.Bandarenka, Karl J.J.Mayrhofer // Catalysis Today. 2016. Vol.262. P.1-10.
8. Benjaminsson J. Portable power sources / J.Benjaminsson, B.Goldschmidt, R.Uddgren. 2010. P.3-10. www.energiaskor.se/pdf-dokument/Rapport%201109.pdf
9. Bournay L. New heterogeneous process for biodiesel production: A way to improve the quality and the value of the crude glycerine produced by biodiesel plants / L.Bournay, D.Casanave, B.Delfort, G.Hillion, J.A.Chodorge // Catalysis Today. 2005. № 106 P.190-192.
10. Braunschweig B. Electrocatalysis: A direct alcohol fuel cell and surface science perspective: Electrocatalysis / B.Braunschweig, D.Hibbits, M.Neurock, A.Wieckowski // Catalysis Today. 2013. Vol.202. P.197-209.
11. Chen W. Manganese oxide catalyzed methane partial oxidation in trifluoroacetic acid: Catalysis and kinetic analysis / W.Chen, J.A.Koccal, T.A.Brandvold, M.L.Bricker, S.R.Bare, R.W.Broach, N.Greenlay, K.Popp, J.T.Walenga, S.S.Yang, J.J.Low // Catalysis Today. 2009. Vol.140. Iss.3-4. 2009. P.157-161
12. Camacho B.R. Enhancing oxygen reduction reaction activity and stability of platinum via oxide-carbon composites: Electrocatalysis / B.R.Camacho, C.Morais, M.A.Valenzuela, N.Alonso-Vante // Catalysis Today. 2013. Vol.202. P.36-43.
13. Electricity Research. Electricity from new plants (Sweden) 2007. 40 p. http://www.elforsk.se/varme/Slutrapport%202383%20Final%20rev_080114_inkl%20Bilagor.pdf
14. Fang Ya-Hui. Theoretical modeling of electrode/electrolyte interface from first-principles periodic continuum solvation method: Electrocatalysis / Ya-Hui Fang, Guang-Feng Wei, Zhi-Pan Liu // Catalysis Today. 2013. Vol.202. P.98-104.
15. González A.V. Full-scale autothermal reforming for transport applications: The effect of diesel fuel quality: Selected Contributions of the International Symposium of Catalysis for Clean Energy and Sustainable Chemistry (CCESC2012) / A.V.González, L.J.Pettersson // Catalysis Today. 2013. Vol.210. P.19-25.
16. Hernández-Hipólito P. Biodiesel production with nanotubular sodium titanate as a catalyst: International Symposium on Advances in Hydroprocessing of Oil Fractions (ISAHOF 2013) / P.Hernández-Hipólito, M.García-Castillejos, E.Martínez-Klimova, N.Juárez-Flores, A.Gómez-Cortés, Tatiana E.Klimova // Catalysis Today. 2014. Vol.220-222. P.4-11.
17. Holladay J.D. An overview of hydrogen production technologies / J.D.Holladay, J.Hu, D.L.King, Y.Wang // Catalysis Today. 2009. Vol.139. Iss.4. P.244-260.
18. Hydrogen Production: Selected papers from the Hydrogen Production Symposium at the American Chemical / Society 234-th National Meeting & Exposition, August 19-23, 2007, Boston.
19. Hye Won Jeong, Hyunwoong Park. Carbon-catalyzed dye-sensitization for solar hydrogen production: Selected contributions of the 4th International Conference on Semiconductor Photochemistry (SP4) / Hye Won Jeong, Hyunwoong Park // Catalysis Today. 2014. Vol.230. P.15-19.



20. Liu X. Hydrogen and methane production by co-digestion of waste activated sludge and food waste in the two-stage fermentation process: Substrate conversion and energy yield // X.Liu, R.Li, Min Ji, Li Han // *Bioresource Technology*. 2013. Vol.146. P.317-323.
21. Massanet-Nicolau J. Use of real time gas production data for more accurate comparison of continuous single-stage and two-stage fermentation / J. Massanet-Nicolau, R. Dinsdale, A. Guwy, G. Shipley // *Bioresource Technology*. 2013. Vol.129. P.561-567.
22. Optimal integration of energy at the Combined Energy Plant in Norrkoping (Sweden) -Integration of steam, hot water and district heat to biogas plants 2010. 168 p. www.oecd
23. Projected costs of generating electricity. Organization for Economic Cooperation and Development (OECD). 8 February, Paris, 2010. 104 p. www.oecd
24. Kucernak A. R.J. Facile synthesis of palladium phosphide electrocatalysts and their activity for the hydrogen oxidation, hydrogen evolutions, oxygen reduction and formic acid oxidation reactions: Electrocatalysis / A.R.J.Kucernak, K.F.Fahy, V.N.Naranammalpuram Sundaram // *Catalysis Today*. 2015. Vol.262. P.48-56.
25. van Spronsen M.A. High-pressure operando STM studies giving insight in CO oxidation and NO reduction over Pt(1 1 0): Heterogeneous Catalysis and Surface Science / M.A. van Spronsen, G.J.C. van Baarle, C.T.Herbschleb, J.W.M.Frenken, I.M.N.Groot // *Catalysis Today*. 2015. Vol.244. P.85-95.
26. Wang Ming-Xi. Catalytically oxidation of NO into NO₂ at room temperature by graphitized porous nanofibers: Catalysis for Low-carbon Energy Development and Environment Quality Control / Ming-Xi Wang, Zheng-Hong Huang, Ke Shen, Feiyu Kang, Kaiming Liang // *Catalysis Today*. 2013. Vol.201. P.109-114.
27. Wang Jingbo. Catalytic steam gasification of pig compost for hydrogen-rich gas production in a fixed bed reactor / Jingbo Wang, Bo Xiao, Shiming Liu, Zhiquan Hu, Piwen He, Dabin Guo, Mian Hu, Fangjie Qi, Siyi Luo // *Bioresource Technology*. 2013. Vol.133. P. 127-133.

Авторы: И.В.Иванова, д-р техн. наук, профессор, rilala_spb@mail.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Россия), В.М.Шабер, канд. техн. наук, руководитель проекта, viktor.schaber@bioecopower.se (Bio Eco Power, www.bioecopower.se, Швеция).

Статья принята к публикации 18.01.2016.

MODERN METHOD FOR GAS PRODUCTION

I.V.IVANOVA¹, V.M.SCHABER²

¹Saint-Petersburg Mining University, Russia

²Bio Eco Power, www.bioecopower.se, Stokgol'm, Sweden

It is usually very difficult for any company to being an energy related project to completion. Not only is the endeavor associated with great financial risks, but it is also very difficult to decide which technological solution is the best longterm investment. Furthermore, government bodies shape the investment climate in the energy sector by imposing taxes and fees, which also increases expenditures. Fortunately these market conditions act favorably on energy production based on renewable sources.

The purpose of this investigation is to establish the conditions that enable production of biogas by processing waste products of human consumption: food waste, plants, common household trash and even excrement.

There is compelling evidence that the production of fuel cells by utilizing raw methane is at the very least economically justifiable. The design of the power plant itself makes it an ideal independent source of electricity and heat, which can be located in close proximity to the consumers.

Key words: biomethane, fuel cell, waste.

How to cite this article: Ivanova I.V., Schaber V.M. Modern method for gas production. *Zapiski Gornogo instituta*. 2016. Vol.219, p.403-411. DOI 10.18454/PMI.2016.3.403

REFERENCES

1. Maslov I.V. Vysokotemperaturnye toplivnye jachejki – kogeneracionnye istochniki jenergii budushhego (*High-temperature fuel cell – cogeneration energy sources of the future*). Turbiny i dizeli. 2006, janvar'-fevral', p.4-6.
2. Ministerstvo jekonomicheskogo razvitija: 2015 g. o tekushhej situacii v jekonomike Ros-sijskoj Federacii posle pervoj poloviny ijulja 2015 goda (*Ministry of Economic Development: About the current situation in the economy of the Russian Federation after the first half 2015 of July*). [Jelektronnyj resurs]. Available at: <http://do.gendocs.ru/docs/index-65809.html#2145316>
3. Achten W.M.J., Verchot L., Franken Y.J., Mathijs E., Singh V.P., Aerts R., Muys B. Jatropha bio diesel production and use. *Biomass and Bioenergy*. 2005. № 32(12), p.1063-1084.
4. Ahmed M., Attard G.A., Wright E., Sharman J. Methanol and formic acid electrooxidation on nafion modified Pd/Pt{1 1 1}: The role of anion specific adsorption in electrocatalytic activity: Electrocatalysis. *Catalysis Today*. 2013. Vol. 202, p.128134.
5. Almazán-Sánchez P.T., Almazán-Sánchez P.T., Linares-Hernández I., Martínez-Miranda V., Lugo-Lugo V.R.M., Fonseca-Montes de Oca G. Wastewater treatment of methyl methacrylate (MMA) by Fenton's reagent and adsorption: International Symposium on Advances in Hydroprocessing of Oil Fractions (ISAHOF 2013). *Catalysis Today*. 2014. Vol.220-222, p.39-48.
6. Roohul Amin, Bingsi Liu, Zhao Biao Huang, Yin Chuan Zhao. Amin Roohul Hydrogen and syn gas production via CO₂ dry reforming of methane over Mg/La promoted Co-Ni/MSU-S catalyst. *International Journal of Hydrogen Energy* Available online 12 December, 2015.



7. *Bandarenka A., Mayrhofer Karl J.J.* Electrocatalysis for sustainable energy conversion or electrocatalysis today: Electrocatalysis. *Catalysis Today*. Vol.262. 2016, p.1-10.
8. *Benjaminsson J. Goldschmidt B., Uddgren R.* Portable power sources. 2010, p.3-10. www.energiaskor.se/pdf-dokument/Rapport%201109.pdf
9. *Bournay L., Casanave D., Delfort B., Hillion G., Chodorge J.A.* New heterogeneous process for biodiesel production: A way to improve the quality and the value of the crude glycerine produced by biodiesel plants. *Catalysis Today*. 2005. N 106, p.190-192.
10. *Braunschweig B., Hibbits D., Neurock M., Wieckowski A.* Electrocatalysis: A direct alcohol fuel cell and surface science perspective: Electrocatalysis. *Catalysis Today*. 2013. Vol.202, p.197-209.
11. *Chen W., Kocal J.A., Brandvold T.A., Bricker M.L., Bare S.R., Broach R.W., Greenlay N., Popp K., Walenga J.T., Yang S.S., Low J.J.* Manganese oxide catalyzed methane partial oxidation in trifluoroacetic acid: Catalysis and kinetic analysis. *Catalysis Today*. 2009. Vol.140. Iss.3-4. 2009, p.157-161.
12. *Camacho B.R., Morais C., Valenzuela M.A., Alonso-Vante N.* Enhancing oxygen reduction reaction activity and stability of platinum via oxide-carbon composites: Electrocatalysis. *Catalysis Today*. 2013. Vol.202, p.36-43.
13. Electricity Research. Electricity from new plants (Sweden) 2007. 40 p. http://www.elforsk.se/varme/Slutrapport%202383%20Final%20rev_080114_inkl%20Bilagor.pdf
14. *Fang Ya-Hui., Wei Guang-Feng, Liu Zhi-Pan.* Theoretical modeling of electrode/electrolyte interface from first-principles periodic continuum solvation method: Electrocatalysis. *Catalysis Today*. 2013. Vol.202, p.98-104.
15. *González A.V., Petersson L.J.* Full-scale autothermal reforming for transport applications: The effect of diesel fuel quality: Selected Contributions of the International Symposium of Catalysis for Clean Energy and Sustainable Chemistry (CCESC2012). *Catalysis Today*. 2013. Vol.210, p.19-25.
16. *Hernández-Hipólito P., García-Castillejos M., Martínez-Klimova E., Juárez-Flores N., Gómez-Cortés A., Klimova Tatiana E.* Biodiesel production with nanotubular sodium titanate as a catalyst: International Symposium on Advances in Hydroprocessing of Oil Fractions (ISAHOF 2013). *Catalysis Today*. 2014. Vol.220-222, p.4-11.
17. *Holladay J.D., Hu J., King D.L., Wan Y., Herbschleb C.T.* An overview of hydrogen production technologies. *Catalysis Today*. 2009. Vol.139. Iss.4, p.244-260.
18. Hydrogen Production: Selected papers from the Hydrogen Production Symposium at the American Chemical Society 234th National Meeting & Exposition, August 19-23, 2007, Boston.
19. *Hye Won Jeong, Hyunwoong Park.* Carbon-catalyzed dye-sensitization for solar hydrogen production: Selected contributions of the 4th International Conference on Semiconductor Photochemistry (SP4). *Catalysis Today*. 2014. Vol.230, July 2014, p.15-19.
20. *Liu X., Li R., Ji Min, Han Li.* Hydrogen and methane production by co-digestion of waste activated sludge and food waste in the two-stage fermentation process: Substrate conversion and energy yield. *Bioresource Technology*. 2013. Vol.146, p.317-323.
21. *Massanet-Nicolau J., Dinsdale R., Guwy A., Shipley G.* Use of real time gas production data for more accurate comparison of continuous single-stage and two-stage fermentation. *Bioresource Technology*. 2013. Vol.129, February 2013, p.561-567.
22. Optimal integration of energy at the Combined Energy Plant in Norrköping (Sweden) – Integration of steam, hot water and district heat to biogas plants 2010, p.168 www.oecd.org
23. Projected costs of generating electricity. Organization for Economic Cooperation and Development (OECD). 8 February, Paris, 2010, 104 p. www.oecd.org
24. *Kucernak A. R.J., Fahy K.F., Naranammalpuram Sundaram V.N.* Facile synthesis of palladium phosphide electrocatalysts and their activity for the hydrogen oxidation, hydrogen evolutions, oxygen reduction and formic acid oxidation reactions: Electrocatalysis. *Catalysis Today*. 2015. Vol.262, p.48-56.
25. *M.A.van Spronsen, G.J.C. van Baarle, Herbschleb C.T., Frenken J.W.M., Groot I.M.N.* High-pressure operando STM studies giving insight in CO oxidation and NO reduction over Pt(110): Heterogeneous Catalysis and Surface Science. *Catalysis Today*. 2015. Vol.244, p.85-95.
26. *Wang Ming-Xi., Zheng-Hong Huang, Ke Shen, Feiyu Kang, Kaiming Liang.* Catalytically oxidation of NO into NO₂ at room temperature by graphitized porous nanofibers: Catalysis for Low-carbon Energy Development and Environment Quality Control. *Catalysis Today*. 2013. Vol.201, p.109-114.
27. *Wang Jingbo, Bo Xiao, Shiming Liu, Zhiquan Hu, Piwen He, Dabin Guo, Mian Hu, Fangjie Qi, Siyi Luo.* Catalytic steam gasification of pig compost for hydrogen-rich gas production in a fixed bed reactor. *Bioresource Technology*. 2013. Vol.133, p.127-133.

Authors: *I.V.Ivanova, Dr. of Engineering Sciences, Professor, rilala_spb@mail.ru (Saint-Petersburg Mining University, Russia), V.M.Schaber, PhD in Engineering Sciences, project director, viktor.schaber@bioecopower.se (Bio Eco Power, www.bioecopower.se, Sweden)*

Manuscript Accepted 18.01.2016.



УДК 622.244.49

РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ ПРОМЫВОЧНЫХ ЖИДКОСТЕЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ БУРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Н.И.НИКОЛАЕВ, Е.Л.ЛЕУШЕВА

Санкт-Петербургский горный университет, Россия

Представлены способы ослабления пород для повышения эффективности бурения твердых горных пород, а также сделана попытка разработки состава промывочной жидкости. Цель работы – создание композиций промывочных жидкостей, повышающих эффективность разрушения твердых горных пород.

Авторами статьи проведены экспериментальные исследования составов промывочных жидкостей и их основных структурно-реологических и фильтрационных характеристик. Также на созданном стенде оценено влияние различных растворов, в том числе и разработанного, на процесс разрушения твердой породы.

Результаты исследований показывают, что состав и характеристики разработанной промывочной жидкости положительно влияют на процесс разрушения твердых горных пород. Применение безглинистых буровых растворов с добавками композиций анионоактивных ПАВ позволяет увеличить производительность буровых работ за счет повышения механической скорости бурения и проходки на долото.

Ключевые слова: горная порода, ослабление пород, микротрещины, скважина, деформация, реагенты-детергенты, поверхностно-активные вещества, буровой раствор, адсорбция, разрушение породы, безглинистый раствор.

Как цитировать эту статью: Николаев Н.И. Разработка составов промывочных жидкостей для повышения эффективности бурения твердых горных пород / Н.И.Николаев, Е.Л.Леушева // Записки Горного института. 2016. Т.219. С.412-420. DOI 10.18454/PMI.2016.3.412

Как известно, процесс бурения скважины сложный и преследующий много задач. Технические и экономические показатели бурения горных пород во многом зависят от совершенства технологии промывки скважин, состава и свойств промывочных жидкостей, их физико-химической обработки и соответствия буримым породам. Особенно остро вопрос выбора оптимального состава бурового раствора стоит при бурении в твердых горных породах, так как помимо основных функций, таких как создание гидростатического давления, очистка забоя, вынос шлама и т.д., необходимо регулировать поверхностные силы, которые позволяют применить эффект адсорбционного понижения твердости (предварительное ослабление породы).

Предварительное ослабление горных пород представляет собой процесс, при котором массив изменяет свои физико-механические свойства с понижением показателей прочности [7, 8]. В работах [1, 2] способы ослабления горных пород с жесткими связями разделены на пять классов: механические, термические, химические, биологические и технологические. Внутри каждого класса выделены подклассы по виду энергии с учетом способа ее подвода к забоям:

Класс	Подкласс
Механическое ослабление	Нарезание или бурение щелей. Нагнетание воды в пласт под высоким давлением. Гидровзрывание. Рыхление поверхности массива
Термическое ослабление	Односторонний нагрев с использованием пламени газовой горелки, горячей воды, перегретого воздушного пара. Использование знакопеременных температурных воздействий. Нагрев по всему объему с помощью электромагнитных полей. Облучение лазером, радиоволнами, ультразвуком
Химическое ослабление	Применение поверхностно-активных веществ в качестве понизителей твердости. Растворение цементирующего вещества кислотами
Биологическое ослабление	–
Технологическое ослабление ...	Использование отжима. Насыщение массива газом

Исследователями [13, 16] показано, что уменьшение поверхностной энергии твердого тела экспоненциально уменьшает его долговечность под нагрузкой, т.е. снижает прочность.

Для практического уменьшения поверхностного натяжения твердого тела можно использовать:

- внутренний адсорбционный эффект, т.е. адсорбцию поверхностно-активных веществ (ПАВ) на внутренних поверхностях раздела зародышевых микротрещин разрушения;
- эффект снижения поверхностного натяжения твердого тела при поляризации его в сильных электрических полях; возможность практического использования этого эффекта требует исследований по его влиянию на прочностные свойства горных пород.

Важным фактором интенсификации процесса бурения горных пород является воздействие на них поверхностно-активных веществ [5, 11, 14, 15]. Поверхностно-активная среда влияет на характер деформации и разрушения твердых тел, главным образом, в окрестностях острых (тупиковых) концов



развивающихся трещин. Таким образом, в областях деформации твердого тела адсорбционное влияние среды приводит к изменению эффективной поверхностной энергии, приходящейся на единицу поверхности, что и обуславливает изменение прочностных свойств твердого тела.

Наибольшие адсорбционные эффекты имеют место тогда, когда возникающие в процессе разрушения новые поверхности успевают покрыться адсорбционными слоями. С этой точки зрения эффективность действия ПАВ при ударно-вращательном бурении и при бурении шарошечными долотами выше, чем при вращательном – коронками и режущими долотами [10-12].

Основное положение о том, что влияние внешней среды и адсорбирующихся веществ на деформацию и разрушение твердого тела обусловлено их проникновением в микротрещины на довольно значительную глубину в зоне предразрушения, развивающейся в твердом теле в процессе его деформации, было подтверждено рядом работ лабораторий Коллоидо-электрохимического института Академии наук СССР [5]. Здесь необходимо отметить работы, в которых исследовались «элементарные акты» деформирования или разрушения отдельных кристаллов. Были исследованы: раскалывание кристалликов кальцита по спайности, изгиб и другие деформации листочков слюды.

Было показано, что добавки адсорбирующих веществ в малых концентрациях, достаточных для насыщения адсорбционного слоя, почти в 2 раза понижают усилие раскалывания кристалликов кальцита толщиной 1-2 мм (Н.Е.Маркова) по сравнению с усилием раскалывания в чистой воде. Такое действие понизителей твердости значительно увеличивается при длительном вылеживании кристаллика в данной жидкости, особенно в нагруженном состоянии, близкому к пределу прочности. Влияние времени пребывания в данной среде значительно возрастает при достижении наибольшей активности жидкости по отношению к твердому телу, т.е. при оптимальной концентрации понизителя твердости, что убедительно доказывает основную роль проникновения среды в зону предразрушения. В присутствии добавок понизителя твердости зона предразрушения развивается, а трещиноватость в ней возрастает – микротрещины становятся глубже и их число в единице объема увеличивается. Это и вызывает наибольшее (в зависимости от концентрации) облегчение раскалывания кристалла, причем наибольший эффект достигается через более продолжительное время [5].

Результаты исследований [10] показали, что наиболее эффективными понизителями прочности являются анионоактивные ПАВ в щелочной среде, что хорошо согласуется с данными, полученными при изучении влияния ПАВ на контактную прочность песчаников.

В связи с этим создание композиций промывочных жидкостей с добавками реагентов – понизителей твердости (детергентов) горных пород представляется весьма актуальной задачей, особенно при бурении скважин в твердых горных породах.

Следует отметить, что порода высокой твердости мало изменяет свои механические свойства под влиянием высоких значений давления и температуры, имеющих место на больших глубинах. Наоборот, осадочные породы невысокой твердости и плотности на больших глубинах под влиянием высоких давлений и температуры уплотняются и твердость их может увеличиться в 3-4 раза, в соответствии с чем изменится и показатель буримости.

Известно, что с уменьшением плотности промывочной жидкости повышается механическая скорость проходки. Если заменить глинистый раствор водой, скорость бурения увеличивается на 20-30 %. Еще большее увеличение (в 2-5 раз) скорости бурения дает замена промывочной жидкости газом [2, 3]. Это указывает на необходимость исследований в области применения буровых растворов пониженной плотности на основе различных полимеров.

Анализ проведенных ранее исследований позволяет сделать следующие выводы:

- при разрушении горных пород целесообразнее применять такие поверхностно-активные вещества, которые будут лучше растекаться по поверхности, т.е. иметь наименьший краевой угол смачивания и низкие значения поверхностного натяжения, это позволит буровому раствору с добавкой в него ПАВ глубже проникать в образовавшиеся микротрещины, создавая расклинивающее давление на их внутреннюю поверхность;
- для повышения эффективности разрушения породы на забое необходимо стремиться к понижению удельного электрического сопротивления буровых растворов;
- при выборе бурового раствора необходимо проводить исследования по замеру основных прочностных свойств горных пород (например, предела прочности, микротвердости, динамической прочности).

В процессе экспериментальных исследований краевого угла смачивания (при помощи системы анализа формы капли «Easy Drop») на поверхности образца твердой горной породы использовались водные растворы ПАВ концентрацией 0,05 и 0,1 %:

- анионоактивные – линейный алкилбензолсульфонат натрия (ЛАБС натрия);
- катионоактивный – катамин-АБ;
- неионогенный – ОП-7.

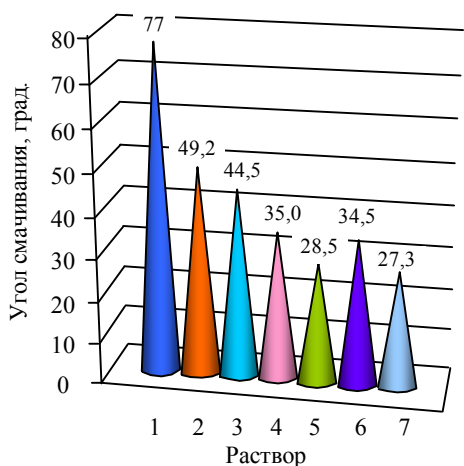


Рис.1. Значение краевого угла смачивания на поверхности образца для водных растворов ПАВ 1 – вода; 2 – 0,05 %-ный раствор катамина-АБ; 3 – 0,1 %-ный раствор катамина-АБ; 4 – 0,05 %-ный раствор ОП-7; 5 – 0,1 %-ный раствор ОП-7; 6 – 0,05 %-ный раствор ЛАБС натрия; 7 – 0,1 %-ный раствор ЛАБС натрия

упругости. Результаты соответствующих расчетов удельной работы представлены на рис.3, а. Из графиков видно, что при малых концентрациях (0,05 %) все виды ПАВ уменьшают работу деформации породы примерно на 40 %. С увеличением концентрации до 0,1 % аниоактивные ПАВ снижают работу упругих сил почти в 3 раза, а увеличение концентрации неионогенных и катиоактивных ПАВ на этот показатель практически не влияют.

Аналогичная зависимость наблюдается при анализе влияния ПАВ на твердость горных пород (рис.3, б). Так, для всех исследуемых ПАВ при их концентрации 0,05 % снижение твердости составляет в среднем 25 %, а с увеличением концентрации до 0,1 % понижение твердости наблюдается при воздействии на породу только аниоактивными ПАВ и этот показатель уменьшается более чем на 40 %.

Таким образом, результаты исследований свидетельствуют о перспективности использования аниоактивных ПАВ в составах разрабатываемых буровых растворов в качестве детергентов.

Известно [4, 5], что буровые растворы оказывают наибольшее положительное влияние на эффективность разрушения пород на забое скважины через их способность препятствовать смыканию микротрещин, образовавшихся при ударе элементов вооружения долота. Это достигается уменьшением поверхностной энергии на поверхности трещины и снижением угнетающего гидравлического давления на забой скважины.

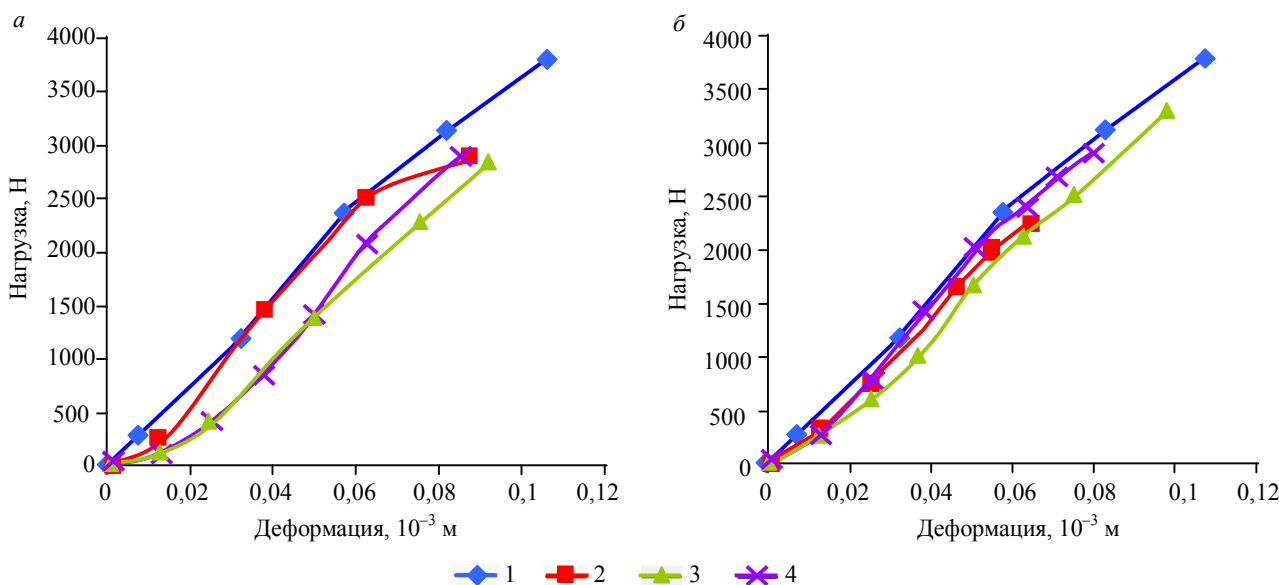


Рис.2. Диаграммы деформации образца горной породы в среде ПАВ с концентрацией 0,05 % (а) и 0,1 % (б) 1 – сухой образец; 2-4 – водные растворы (2 – ЛАБС натрия, 3 – катамина-АБ, 4 – ОП-7)

Одни исследователи считают, что на буримость твердых горных пород существенно влияет перепад между гидростатическим и пластовым давлениями на забое. При этом отмечается, что перепад давления зависит от физических свойств буримых пород, состава и свойств бурового раствора, его химической обработки, содержания твердой фазы и т.д. Другие утверждают, что основными факторами увеличения буримости горных пород являются водоотдача бурового раствора, состав фильтрата, его вязкость, а также структурно-механические свойства промывочной среды [2, 6].

Снижения угнетающего давления на забой можно добиться уменьшением плотности бурового раствора, а для уменьшения поверхностной энергии – добавкой в раствор поверхностно-активных веществ.

Для получения наглядных результатов эффективности ПАВ были проведены эксперименты по внедрению металлического индентора в стеклянный образец в водной среде и растворе ПАВ при различном количестве ударов.

Принцип действия пружинного механизма (рис.4) основан на сжатии и мгновенном освобождении пружины. Он имеет свинченный из трех частей (4, 5, 10) корпус, в который помещаются пружины 6, 11, стержень 2 с индентором 12, ударник 7 со смещающимся сухарем 9 и плоская пружина 3. При нажатии острием индентора внутренний конец стержня 2 упирается в сухарь, в результате чего ударник перемещается вверх и сжимает пружину 6. Упершись в ребро заплечника 8, сухарь сдвигается в сторону и кромка его сходит со стержня 2. В этот момент ударник под действием силы сжатой пружины 6 наносит по концу стержня с индентором удар. Сразу после этого пружиной 11 восстанавливается начальное положение индентора. Силу удара (10-15 Н) регулируют, ввинчивая или вывинчивая упорный колпачок 5. В зону контакта с образцом 1 подается исследуемый раствор.

Стекло выбрано в качестве объекта исследований, поскольку является изотропным материалом. Были проведены экспериментальные исследования при различном количестве ударов индентора. Полученные результаты показывают, что при единичном ударе индентора увеличение зоны разрушения в среде 0,1 % водного раствора анионоактивного ПАВ достигает 50 % в сравнении с водой. При большем количестве ударов эта разница увеличивается более чем в 2 раза.

Следующий этап исследований направлен на разработку состава безглинистого бурового раствора, в качестве основных компонентов которого предлагается использовать ксантановый биополимер «КК-Робус», реагент на основе акриловых полимеров и композицию из анионоактивных ПАВ. Были измерены основные параметры растворов с различными концентрациями биополимера (табл.1). Установлено, что безглинистые буровые растворы обладают меньшей плотностью, чем глинистые, что благоприятно сказывается на повышении эффективности разрушения твердых горных пород [6, 9].

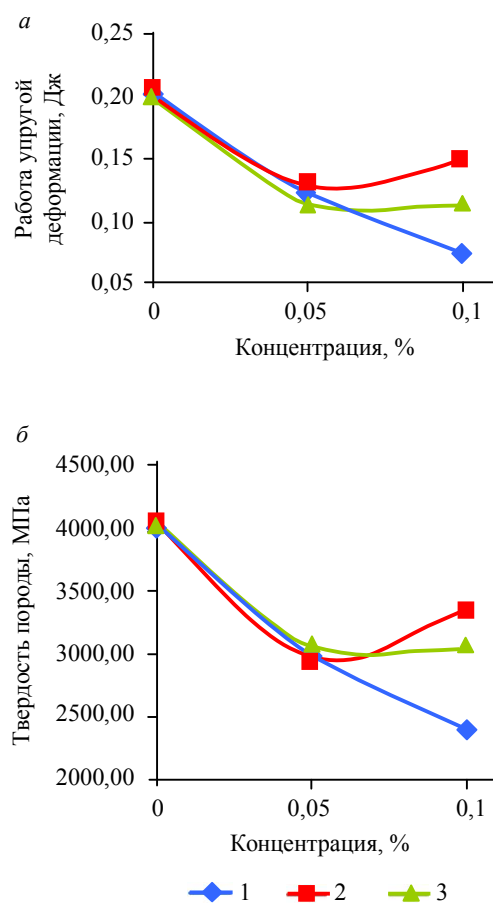


Рис.3. Зависимость работы упругой деформации (а) и твердости породы (б) от концентрации ПАВ
1 – ЛАБС натрия; 2 – катамин-АБ; 3 – ОП-7

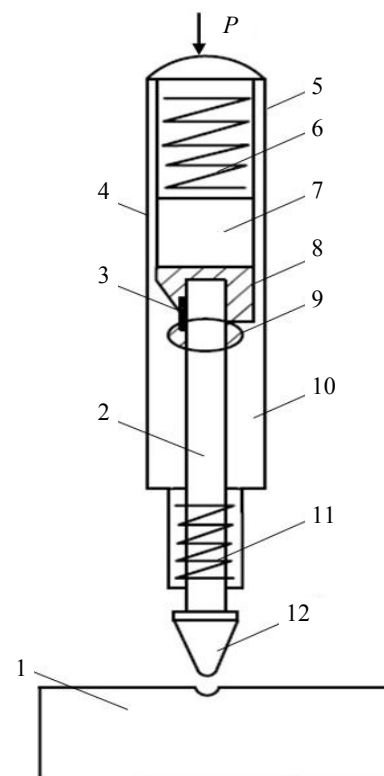


Рис.4. Схема пружинного механизма

Таблица 1

Технологические параметры растворов

Концентрация реагента «КК-Робус» по массе, %	Плотность, кг/м ³	Условная вязкость, с	Статистическое напряжение сдвига через 10 мин, дПа	Водоотдача за 30 мин, см ³	Пластическая вязкость, мПа·с	Динамическое напряжение сдвига, Па
0,1	1005	17	1	31	1,5	2
0,2	1005	18	1	27	2	2,5
0,3	1005	19	1,5	20	3	4,5
0,5	1010	43	10	9	5	5,6
0,7	1015	85	14	6	10	12,7

Для глинистых буровых растворов вязкость всегда стараются минимизировать, так как с ее снижением падают энергетические затраты на циркуляцию бурового раствора, улучшается очистка забоя, появляется возможность реализации большей гидравлической мощности на долоте, уменьшаются потери давления в кольцевом пространстве скважины. Для безглинистых буровых растворов требование снижения вязкости может быть не так категорично, так как они обладают свойством разжижения при высоких скоростях сдвига. Условная вязкость исследованных растворов (рис.5) колеблется от 17 до 85 с.

Следующим параметром, характеризующим качество раствора, является водоотдача. Водоотдача растворов с содержанием биополимера от 0,1 до 0,3 % много выше, чем у растворов с концентрациями 0,5 и 0,7 % (рис.5).

Статическое напряжение сдвига (СНС) должно быть минимальным, но достаточным для удержания во взвешенном состоянии в покое буровом растворе частиц выбуренных пород и утяжелителя. Установлено, что показатель СНС безглинистых растворов меняется от 1 до 14 дПа (рис.6). Значение СНС растворов очень низкое. Как известно, динамическое напряжение сдвига (ДНС) – усилие, которое необходимо приложить к раствору, чтобы вызвать ламинарное течение последнего, поэтому нецелесообразно повышать его значение. Из рис.6 следует, что при увеличении концентрации биополимера до 0,7 % значение ДНС достигает 12,7 Па.

Исходя из полученных результатов, логично сделать вывод, что для дальнейших исследований необходимо использовать кантановый биополимер «КК-Робус», концентрация которого должна быть не менее 0,3 % и не более 0,6 %.

Если исходить из общих рассуждений, то для очистки ствола скважины и снижения возможных потерь давления лучше всего подходит буровой раствор с преимущественно структурной вязкостью, т.е. с высоким отношением предельного динамического напряжения сдвига к пластической вязкости или с низким показателем нелинейности [8, 10].

В связи с этим на ротационном вискозиметре «Rheotest» были проведены исследования по замеру показателя нелинейности буровых растворов различных составов (табл.2).

Как видно из табл.2 составы растворов 1, 2 и 3 имеют высокие показатели нелинейности, что приводит к повышению потерь давления в скважине и уменьшению эффективности очистки забоя, что, в свою очередь, понижает эффективность бурения в целом. Растворы 4 и 5 имеют приемлемые

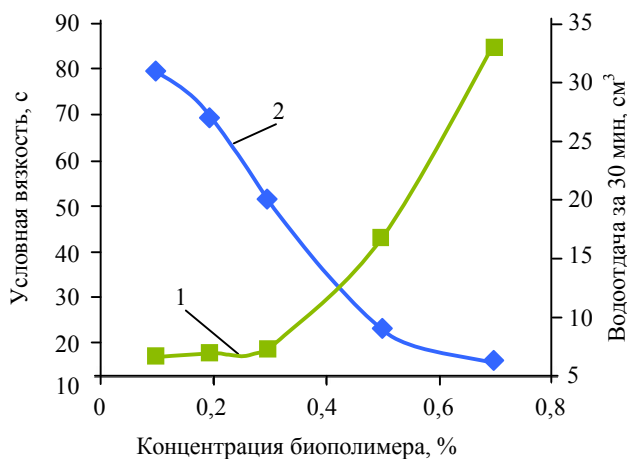


Рис.5. Зависимость условной вязкости (1) и водоотдачи (2) от концентрации биополимера «КК-Робус»

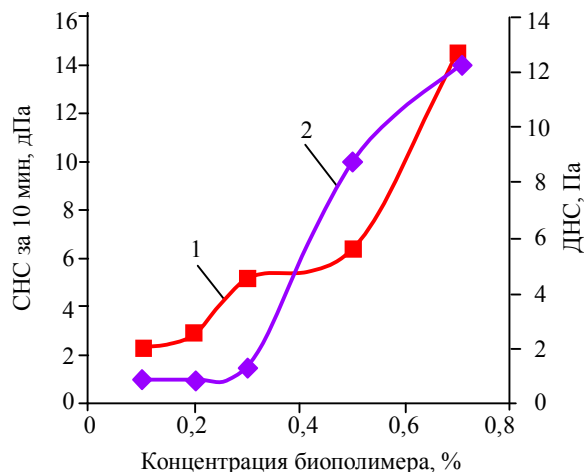


Рис.6. Зависимость СНС (1) и ДНС (2) от концентрации биополимера «КК-Робус»

значения показателя нелинейности, однако при добавке в раствор 4 полимера «Конкрепол-В» реологические параметры превысили допустимые значения (так, например, условная вязкость составила 90 с).

Таблица 2

Показатели нелинейности и составы исследуемых безглинистых буровых растворов

Номер раствора	Состав раствора	Показатель нелинейности
1	0,3 % «КК-Робус» + 2 % «КМ-017» + 0,1 % композиции ПАВ + 0,1 % NaOH	0,5318
2	0,3 % «КК-Робус» + 1,5 % «КМ-017» + 1,5 % полимера «Конкрепол-В» + 0,1 % композиции ПАВ + 0,1 % NaOH	0,5208
3	0,4 % «КК-Робус» + 3,5 % «КМ-017» + 0,1 % композиции ПАВ + 0,1 % NaOH	0,4492
4	0,3 % «КК-Робус» + 2 % «КМ-017» + 3 % полимера «Конкрепол-В» + 0,1 % композиции ПАВ + 0,1 % NaOH	0,3706
5	0,4 % «КК-Робус» + 5 % «КМ-017» + 0,1 % композиции ПАВ + 0,1 % NaOH	0,3984

Концентрация анионоактивных ПАВ в разрабатываемом растворе 0,1 % была выбрана по результатам ранее проведенных экспериментов. Для снижения жесткости воды в раствор добавляется 0,1 % гидроксида натрия (каустической соды).

Таким образом, оптимальный состав безглинистого бурового раствора может быть представлен следующими компонентами: 0,4 % биополимера «КК-Робус»; 5 % акрилового полимера «КМ-017»; 0,1 % анионоактивного ПАВ (0,05 % лаурилсульфата натрия и 0,05 % ацетата калия); 0,1 % гидроксида натрия.

Основные структурно-реологические параметры раствора: плотность 1010-1015 кг/м³, вязкость 19-21 с, показатель фильтрации 5,5-6,5 см³/30 мин, ДНС 5-6 Па, СНС через 1 мин составляет 2-3 Па, а через 10 мин 7-9 Па, pH 8-9.

Поток бурового раствора на протяжении своего движения получает тепло от восходящего потока бурового раствора и поэтому постепенно нагревается, при прочих равных условиях эта температура повышается по мере увеличения глубины скважины.

В этой связи определены структурно-реологические показатели разработанного безглинистого бурового раствора при различных значениях температуры окружающей среды. Были проведены исследования изменения пластической вязкости и динамического напряжения сдвига при температуре от 30 до 120 °С. Полученные зависимости пластической вязкости и динамического напряжения сдвига от скорости сдвига при различных значениях температуры показывают, что при повышении температуры происходит снижение как пластической вязкости, так и динамического напряжения сдвига. Так, при скорости сдвига 6700 с⁻¹ и увеличении температуры до 90 °С снижение пластической вязкости составляет порядка 20 % (8,2 мПа·с) от показаний при 30 °С (6,5 мПа·с), а при нагреве окружающей среды до 120 °С – 40 % (до 4,9 мПа·с). Подобные зависимости наблюдаются при анализе данных по динамическому напряжению сдвига: при 30 °С – 53 Па, снижение на 23 % (41 Па) при нагреве до 90 °С и на 43 % (30 Па) при дальнейшем увеличении температуры до 120 °С. Это можно объяснить тем, что при повышенных значениях температуры происходит термоокислительная деструкция полимеров, входящих в состав раствора, при этом высоковязкие марки переходят в средневязкие, а средневязкие – в низковязкие.

Результаты исследования показывают, что при повышенной температуре окружающей среды структурно-реологические показатели разработанного безглинистого бурового раствора остаются в пределах допустимых значений и, следовательно, растворы могут применяться для бурения глубоких скважин.

Для оценки эффективности бурения твердых горных пород разработан стенд (рис.7) и методика проведения стендовых

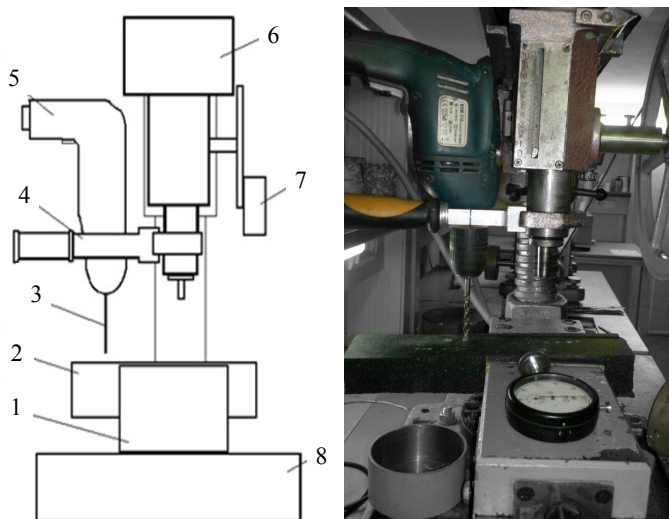


Рис.7. Схема и общий вид стенда

- 1 – винтовой зажим; 2 – образец породы; 3 – породоразрушающий инструмент ударно-вращательного действия; 4 – зажим; 5 – вращатель ударного действия; 6 – подвижное нагружающее устройство; 7 – груз; 8 – станина



исследований. При проведении экспериментальных исследований изучалось влияние анионоактивных ПАВ и разработанного состава безглинистого бурового раствора на эффективность бурения твердых горных пород.

Методика проведения стендовых исследований предусматривала:

- подготовку образца мелкозернистой горной породы, имеющего форму прямоугольного параллелепипеда и шлифованные поверхности;
- горизонтирование и последующее закрепление образца в зажимном устройстве;
- установку и фиксацию осевой нагрузки, частоты ударов и частоты вращения породоразрушающего инструмента (ПРИ);
- подвод исследуемых жидкостей непосредственно к месту контакта ПРИ с образцом породы;
- разрушение образца ударно-вращательным способом;
- измерение глубины погружения ПРИ в образец за фиксированное время.

Условия исследований: размеры образца породы – $30 \times 8 \times 6$ см; горная порода – диабаз; осевая нагрузка 180 Н; частота вращения 100 об/мин; частота ударов 200 мин^{-1} ; вооружение ПРИ – твердый сплав ВК-8; диаметр ПРИ 8 мм; время воздействия 10 мин.

В качестве основного приводного узла станда использовалась электродрель ударно-поворотного действия, обеспечивающая возможность имитировать дробяще-скалывающий режим работы ПРИ.

Нагрузка, действующая на ударное сверло 3, создается подвижным нагружающим устройством 6, вращателем ударного действия 5, находящимся в зажиме 4 и грузом 7. Масса подвижного нагружающего устройства 6 и вращателя ударного действия 5 постоянны, изменять нагрузку можно только путем увеличения или уменьшения массы груза 7.

На разработанном станде были проведены опыты с использованием следующих растворов: 1) вода; 2) 0,1 %-ный водный раствор ЛАБС натрия; 3) 0,1 %-ный водный раствор лаурилсульфата натрия; 4) разработанный биополимерный буровой раствор. Получены следующие результаты:

Исследуемый раствор	Вода	ЛАБС натрия	Лаурилсульфат натрия	Безглинистый раствор
Глубина погружения ПРИ, мм	9,0	9,6	11,05	10,65

Из представленных данных видно, что применение ЛАБС натрия увеличивает эффективность разрушения на 7 %, а лаурилсульфат натрия на 23 %. Безглинистый раствор, содержащий композицию ПАВ, увеличивает исследуемый параметр на 18 %.

Результаты проведенных исследований (экспериментальных и стендовых) показывают, что состав и свойства разработанного бурового раствора положительно влияют на процесс разрушения твердых горных пород. Применение безглинистых буровых растворов с добавками композиций анионоактивных ПАВ позволяет увеличить производительность буровых работ за счет повышения механической скорости бурения и проходки на долото.

Благодарность. Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых № МК-4410.2015.5

ЛИТЕРАТУРА

1. Дихтяр А.А. Разрушение крепких горных пород с применением поверхностно-активных веществ / А.А.Дихтяр, А.М.Криворучко, Ю.М.Синоков // Механика и разрушение горных пород. Киев: Наукова думка, 1972. Вып.2. С.283-288.
2. Калинин А.Г. Бурение нефтяных и газовых скважин: Курс лекций. М.: Изд-во ЦентрЛитНефтеГаз, 2008. 848 с.
3. Лебедев В.А. Комплексное энергоснабжение при бурении скважин в осложненных климатических условиях / В.А.Лебедев, Е.Л.Леушева, В.А.Моренов // Записки Горного института. 2015. Т.213. С.47-53.
4. Николаев Н.И. Теоретические и экспериментальные исследования эффективности бурения твердых горных пород / Н.И.Николаев, Е.Л.Леушева // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2015. № 15. С.38-47. DOI: 10.15593/2224-9923/2015.15.5
5. Ребиндер П.А. Понижители твердости в бурении (физико-химический метод облегчения механического разрушения твердых горных пород при бурении) / П.А.Ребиндер, Л.А.Шрейнер, К.Ф.Жигач. М.: Изд-во АН СССР, 1944. 199 с.
6. Рязанов Я.А. Энциклопедия по буровым растворам. Оренбург: Летопись, 2005. 664 с.
7. Спивак А.И. Разрушение горных пород при бурении скважин: Учебник для вузов / А.И.Спивак, А.Н.Попов. М.: Недра, 1994. 264 с.
8. Теоретические предпосылки и возможные направления интенсификации процесса разрушения крепких горных пород / Ю.М.Синоков, А.А.Дихтяр, А.М.Криворучко, Л.Д.Шматовский // Механика и разрушение горных пород. Киев: Наукова думка, 1972. Вып.2. С.288-296.
9. Уляшева Н.М. Технология буровых жидкостей: Учебное пособие: В 2 ч. Ч.1. Ухта: Ухтинский гос. техн. ун-т, 2008. 164 с.
10. Шоболова Л.П. К оценке эффективности воздействия поверхностно-активных веществ на породу // Физико-технические проблемы добычи и обогащения полезных ископаемых. М.: АН СССР. 1980. С.137-141.



11. Шоболова Л.П. Методические указания по выбору поверхностно-активных веществ и исследованию их влияния на ослабление горных пород применительно к работе проходческих комбайнов. М.: ИГД им. А.А.Скочинского, 1983. 11 с.
12. Шрейнер Л.А. Бурение шпуров с промывкой и добавками понизителей твердости / Л.А.Шрейнер, К.Ф.Жигач. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1943. 64 с.
13. Gao H. Concept Design for Drilling Fluid Cooling System [J] / Gao H., Liu H. // Oil Field Equipment. 2007. № 36(6). P.31-32.
14. Kawale D. Influence of dynamic surface tension on foams: Application in gas well deliquification: MSc. Thesis / Delft University of Technology of Applied Sciences Department of Multi-Scale Physics, 2012. 97 p.
15. Lummus J.L. Low-solids mud scores four ways / J.L.Lummus, J.L.Ray // Oil and gas J. 1963. Vol.61. N 6. P.117-120.
16. Qayyum R.A. Effects of bit geometry in multiple bit-rock interaction. Morgantown: West Virginia University, 2003. 64 p.

Авторы: Н.И.Николаев, д-р техн. наук, профессор, nikinik@mail.ru, Е.Л.Леушева, канд. техн. наук, ассистент, leusheva.ekaterina@mail.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Россия)
Статья принята к публикации 15.01.2016.

DEVELOPMENT OF DRILLING FLUIDS COMPOSITION FOR EFFICIENCY INCREASE OF HARD ROCKS DRILLING

N.I.NIKOLAEV, E.L.LEUSHEVA
Saint-Petersburg Mining University, Russia

The article deals with ways of rock weakening for efficiency increase of hard rocks drilling, also development of drilling fluid composition is considered. Aim of the project is to develop drilling fluid composition which increases efficiency of hard rocks destruction.

Authors conducted experimental investigation of drilling fluid composition development and their main structural rheological and filter characteristics. Influence of various solutions, including developed one, on hard rocks destruction process is evaluated on introduced testing bench.

Investigation results indicate that composition and characteristics of developed drilling fluid positively influence hard rocks destruction process. Implementation of clayless drilling fluid with anion-active surfactant composition additives allows boost of drilling operations performance by increase in mechanical velocity of drilling and drill meterage per bit.

Key words: rock, rock weakening, microcracks, well, deformation, reagents-detergents, surfactants, drilling fluid, adsorption, rock destruction, clayless solution.

How to cite this article: Nikolaev N.I., Leusheva E.L. Development of drilling fluids composition for efficiency increase of hard rocks drilling. Zapiski Gornogo instituta. 2016. Vol.219, p.412-420. DOI 10.18454/PMI.2016.3.412

REFERENCES

1. Dikhtyar A.A., Krivoruchko A.M., Sinykov Yu.M. Razrushenie krepkikh gornyx porod s primeneniem poverkhnostno-aktivnykh veshchestv (*The destruction of hard rocks using surfactants*). Kiev: Naukova dumka, 1972. Iss.2, p.283-288.
2. Kalinin A.G. Burenie neftyanykh i gazovykh skvazhin (*Oil and gas well drilling*). Moscow: Izd-vo TsentrLitNefteGaz, 2008, p.848.
3. Lebedev V.A., Leusheva E.L., Morenov V.A. Kompleksnoe energosnabzhenie pri burenii skvazhin v oslozhnennich klimaticeskikh usloviakh (*Complex power supply at well drilling in complicated climate conditions*). Zapiski Gornogo instituta. 2015. Vol.213, p.47-53.
4. Nikolaev N.I., Leusheva E.L. Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya effektivnosti bureniya tverdykh gornyx porod (*Theoretical and experimental investigation of hard rock drilling efficiency*). Vestnik PNIPU. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo, 2015. N 15, p.38-47. DOI: 10.15593/2224-9923/2015.15.5
5. Rebinder P.A., Shreiner L.A., Zhigach K.F. Poniziteli tverdsti v burenii (fiziko-khimicheskii metod oblegcheniya mekhanicheskogo razrusheniya tverdykh gornyx porod pri burenii) (*Rock hardness reducers in drilling (physical-chemical method of facilitating mechanical breaking of hard rock in drilling)*). Moscow: Izd-vo Akademii nauk SSSR, 1944, p.199.
6. Riazanov Ia.A. Entsiklopediya po burovym rastvoram (*Encyclopedia of drilling fluid*). Orenburg: Letopis'. 2005, p.664.
7. Spivak A.I., Popov A.N. Razrushenie gornyx porod pri burenii skvazhin (*Rock breaking in well drilling*). Moscow: Nedra, 1994, p.264.
8. Siniukov Iu.M., Dikhtiar A.A., Krivoruchko A.M., Shmatovskii L.D. Teoreticheskie predposylki i vozmozhnye napravleniya intensivatsii protsessa razrusheniya krepkikh gornyx porod (*Theoretical background and possible avenues of intensification of hard rock breaking*). Mekhanika i razrushenie gornyx porod. Kiev: Naukova dumka, 1972. Iss.2, p.288-296.
9. Uliasheva N.M. Tekhnologiya burovnykh zhidkostei (*Technology of drilling fluid*). V 2 ch. Ch.1. Ukhta: UGTU, 2008, p.164.
10. Shobolova L.P. K otsenke effektivnosti vozdeistviya poverkhnostno-aktivnykh veshchestv na porodu (*On efficiency of rock stimulation by surfactants*). Fiziko-tekhnicheskie problemy dobychi i obogashcheniya poleznykh iskopaemykh. Moscow: Akademiia nauk SSSR, 1980, p.137-141.
11. Shobolova L.P. Metodicheskie ukazaniya po vyboru poverkhnostno-aktivnykh veshchestv i issledovaniyu ikh vliyaniya na oslablenie gornyx porod primenitel'no k rabote prokhodcheskikh kombainov (*Guidelines for selection of surfactants and research of their effects on rock loosening for boring machine operations*). Moscow: Institut gornogo dela imeni A.A.Skochinskogo, 1983, p.11.



12. Shreiner L.A., Zhigach K.F. Burenie shpurov s promyvkoj i dobavkami ponizitelei tverdsti (*Bore hole drilling with flushing and hardness reducers*). Moscow, Leningrad: Izd-vo Akademiia nauk SSSR, 1943, p.64.
13. Gao H., Liu H. Concept Design for Drilling Fluid Cooling System [J]. Oil Field Equipment. 2007. N 36(6), p.31-32.
14. Kawale D. Influence of dynamic surface tension on foams: Application in gas well deliquification: MSc. Thesis. Delft University of Technology of Applied Sciences Department of Multi-Scale Physics, 2012, p.97.
15. Lummus J.L., Ray J.L. Low-solids mud scores four ways. Oil and gas J. 1963. Vol.61. N 6, p.117-120.
16. Qayyum R.A. Effects of bit geometry in multiple bit-rock interaction. Morgantown: West Virginia University, 2003, p.64.

Authors: **N.I.Nikolaev**, Dr. of Engineering Sciences, Professor, nikinik@mail.ru, **E.L.Leusheva**, PhD in Engineering Sciences, Assistant Lecturer, leusheva.ekaterina@mail.ru (Saint-Petersburg Mining University, Russia)
Manuscript Accepted 15.01.2016.



УДК 621.396.967

РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ЗАГРЯЗНЕНИЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ НЕФТЕПРОДУКТАМИ С БУРОВЫХ ПЛАТФОРМ И ТРАНСПОРТНЫХ СУДОВ

И.Е.УШАКОВ

Санкт-Петербургский горный университет, Россия

На основании анализа закономерностей рассеяния радиоволн морской поверхностью при различных углах облучения рассмотрены особенности радиолокационного обнаружения нефтяных разливов. Показана перспективность использования радиолокационных средств для обнаружения разливов нефтепродуктов при наклонном облучении морской поверхности. Рассмотрены особенности мониторинга загрязнений морской поверхности нефтепродуктами с использованием радиолокаторов, установленных на морских нефтяных платформах и транспортных судах. Предложены варианты повышения контраста участков морской поверхности, покрытых нефтяной пленкой, на радиолокационных изображениях. Определены основные требования к радиолокационным средствам мониторинга нефтяных загрязнений.

Ключевые слова: разлив нефтепродуктов, слик, нефтяное пятно, радиолокационное зондирование, радиолокационный контраст.

Как цитировать эту статью: Ушаков И.Е. Радиолокационный мониторинг загрязнений морской поверхности нефтепродуктами с буровых платформ и транспортных судов // Записки Горного института. 2016. Т.219. С.421-427. DOI 10.18454/PMI.2016.3.421

Введение. Площадь континентального шельфа Российской Федерации составляет около 6,2 млн км². Более 4 млн км² являются перспективными для добычи нефти и газа [9].

Около 85 % потенциальных запасов углеводородов находятся на шельфе российских арктических морей. По имеющимся оценкам, масштабное освоение месторождений арктического шельфа будет возможным при устойчивых ценах на нефть – более 80 долларов США за баррель [13]. В современных условиях это маловероятно. Более перспективным представляется развитие морской добычи нефти в России на шельфе морей Дальнего Востока, а также на Балтийском море и в северной части Каспийского моря [1, 9].

Ежегодно увеличиваются объемы перевозок нефти танкерным флотом. Например, объемы морской транспортировки российской нефти через Баренцево море вдоль побережья Норвегии с 2003 г. увеличились более чем в 2 раза. Другое направление перевозки нефти из арктического региона России – на восток по Северному морскому пути. По оценкам специалистов, при прохождении судна по Севморпути экономится примерно 45 % времени в сравнении с альтернативным маршрутом через Суэцкий канал. По имеющимся сведениям [5], около 35 % объема нефтяных загрязнений морей связано с транспортными перевозками.

Мониторинг состояния окружающей среды является неременным условием развития морской добычи и транспортировки нефти.

Аварийный разлив нефтепродуктов должен быть обнаружен в кратчайшие сроки непосредственно после возникновения аварийной ситуации. Оперативное обнаружение нефтяных пятен при любых погодных условиях и в любое время суток – одно из основных требований контроля за антропогенными нефтяными загрязнениями морской поверхности. Для выполнения этого требования наиболее перспективным является использование радиолокационных средств [12].

В последние годы большое внимание уделяется развитию методов обнаружения нефтяных пятен на водной поверхности с использованием радиолокаторов с синтезированной апертурой, установленных на космических аппаратах [1, 4, 9, 15, 16]. Космические средства позволяют получать информацию с интересующего района не чаще, чем 1-2 раза в сутки, что не обеспечивает необходимой оперативности обнаружения нефтяных загрязнений морской поверхности.

Одним из перспективных направлений оперативного получения информации о нефтяных разливах является использование радиолокаторов, установленных на морских нефтяных платформах и транспортных судах [6, 10].

Согласно мировым расценкам, загрязнителю морской воды каждый литр вылитых в воду нефтепродуктов обходится в 300 американских долларов. Экологическая чистота операций по морской добыче нефти, загрузке и разгрузке танкерного флота, отсутствию нарушений на судовых трассах может быть документирована на основании информации, получаемой с использованием радиолокаторов, установленных на нефтяных платформах, танкерах, а также в портах. Для практической реализации этого положения необходимы:



- научно обоснованные методики использования радиолокационной информации для обнаружения загрязнений моря нефтепродуктами;
- юридически обоснованные процедуры сбора и формы представления материалов радиолокационного мониторинга морской поверхности, пригодные для использования в качестве доказательной базы с целью принятия судебных решений в рамках международного морского права.

В данной работе на основании анализа закономерностей рассеяния радиоволн морской поверхностью рассмотрены особенности радиолокационного обнаружения нефтяных разливов при различных углах скольжения (угол между направлением облучения и горизонтальной плоскостью). Оценены перспективы организации мониторинга загрязнений морской поверхности нефтепродуктами с использованием радиолокационных средств, установленных на нефтяных платформах и транспортных судах.

Общие закономерности рассеяния радиоволн поверхностью моря. Сложность задачи определения поля радиоволн, рассеянных взволнованной морской поверхностью, обусловлена невозможностью точного математического описания этой поверхности. В связи с этим необходимо построение моделей поверхности моря, в различной степени отражающих те или иные стороны реального процесса.

Общепризнанной и широко используемой в настоящее время является двухмасштабная модель морской поверхности [2, 12, 14]. Поверхность моря в соответствии с этой моделью представляется в виде суперпозиции поверхностей двух размеров: крупные пологие волны и накладываемые на них мелкоструктурные образования (рябь). Крупные неровности должны удовлетворять условиям применимости метода Кирхгофа (площадки, размеры которых существенно превышают длину радиоволны, не должны заметно отклоняться от плоскости), а мелкомасштабные составляющие – условиям применения метода малых возмущений. Поле над суммарной поверхностью находят в виде суперпозиции двух полей: поля, рассеянного крупномасштабной поверхностью, и возмущенного поля, вызванного мелкими неровностями.

Такая модель достаточно хорошо описывает закономерности рассеяния радиоволн в широком диапазоне (от миллиметровых до метровых волн) и большом интервале углов облучения: от вертикального до углов скольжения в несколько градусов.

В качестве характеристики отражательных свойств морской поверхности используют удельную эффективную площадь рассеяния (УЭПР) – ЭПР 1 м^2 облучаемого участка моря. В угловой зависимости УЭПР морской поверхности можно выделить три характерных области: квазизеркальную, область «плато» и интерференционную.

Появление на поверхности воды пленки нефтепродуктов приводит к изменению формы мелких волн и гашению высокочастотных составляющих в спектре поверхностного волнения [12, 17], что вызывает изменение уровня отраженных радиолокационных сигналов. Область выглаживания ряби на поверхности моря называют сликом (от англ. *slick* – гладкий, блестящий).

Уменьшение коэффициента поверхностного натяжения в слике по сравнению с чистой поверхностью приводит к уменьшению фазовой скорости мелких (капиллярных) поверхностных волн. Это, в свою очередь, вызывает уменьшение сдвига центральной частоты спектра рассеянного радиоизлучения относительно частоты облучающего поля [12].

Отражение радиоволн от морской поверхности при облучении, близком к вертикальному. При углах скольжения от 90 (вертикальное облучение) до 70-60 град. поле в обратном направлении формируется за счет квазизеркальных отражений от крупных волн. В этой области углов УЭПР не зависит от поляризации радиоизлучения. При усилении волнения УЭПР морской поверхности при вертикальном облучении уменьшается, а область зеркальных отражений увеличивается.

В этой области углов влияние мелкоструктурных составляющих поверхностного волнения на интенсивность отраженных сигналов незначительное. Гашение этих составляющих при появлении на поверхности моря пленки нефтепродуктов не вызывает заметного изменения уровня обратного отражения.

Исследования [12], выполненные в штормовом бассейне при скорости ветра до 12 м/с, показали, что при вертикальном облучении отражения от слика несколько больше, чем от чистого волнения. Значения радиолокационного контраста сликов не превышает единиц децибел. При уменьшении угла скольжения контраст уменьшается, при углах скольжения 80-75 град. интенсивность отражений от слика становится меньше, чем от чистой поверхности. На границе области квазизеркальных отражений контраст сликов также не превышает единиц децибел (при скорости ветра 5-12 м/с).

Область квазизеркальных отражений от морской поверхности из-за низкой контрастности сликов в настоящее время практически не используется для радиолокационного обнаружения нефтяных разливов.



Следует отметить привлекательность этого диапазона углов облучения ввиду благоприятных энергетических соотношений (УЭПР морской поверхности на несколько десятков децибел выше, чем при наклонном облучении). Задача заключается в разработке методов и алгоритмов обработки отраженных сигналов, обеспечивающих повышение контраста нефтяных пятен на радиолокационных изображениях морской поверхности.

Обнаружение нефтяных разливов при наклонном облучении поверхности моря. При углах скольжения менее 70-60 град. рассеяние радиоволн морской поверхностью носит избирательный характер [2, 12]. Согласно теории избирательного рассеяния поле в обратном направлении формируется за счет рассеяния радиоизлучения на составляющих сравнительно небольшого участка спектра поверхностных волн, длина которых соизмерима с длиной облучающей радиоволны. Влияние крупных волн связано с пространственно-временной модуляцией обратного рассеяния. Интенсивность обратного рассеяния в этом случае пропорциональна квадрату высоты резонансной составляющей поверхностного волнения.

В этой области углов скольжения наблюдается существенная зависимость УЭПР морской поверхности от поляризации радиоизлучения: при углах скольжения 70-60 град. УЭПР поверхности моря для вертикальной и горизонтальной поляризаций радиоизлучения приблизительно совпадает.

При уменьшении угла скольжения УЭПР морской поверхности для обеих поляризаций уменьшается, при этом отличие УЭПР для разных поляризаций увеличивается. Изменение угла скольжения от 70 до 10 град. приводит к уменьшению УЭПР морской поверхности приблизительно на 50-60 дБ для горизонтальной поляризации радиоизлучения, в то время как для вертикальной поляризации уменьшение УЭПР не превышает 20-30 дБ. Эту область углов скольжения, для которой характерно сравнительно медленное изменение УЭПР морской поверхности, называют областью «плато».

Наблюдаемость нефтяных разливов на морской поверхности характеризуется контрастом зон со сглаженным волнением по отношению к фону (чистой поверхности) – отношением средней мощности отражений от фона к средней мощности при рассеянии от слика. Исходя из условия, что энергия поверхностных волн до гашения равна сумме энергии волн после гашения и энергии, поглощаемой пленкой при ее растяжении и сжатии, получено соотношение для расчета отношения высоты поверхностных волн после гашения к высоте волн при чистой воде [12, 17]. Поскольку при гашении поверхностного волнения энергия, передаваемая от ветра поверхностным волнам уменьшается, указанные соотношения определяют минимальный контраст радиолокационных отражений участков водной поверхности, покрытых пленкой нефтепродуктов. Степень гашения поверхностных волн увеличивается при уменьшении их длины.

Радиолокационный контраст нефтяной пленки увеличивается при уменьшении длины волны радиолокатора, а следовательно, и длины поверхностных волн, участвующих в резонансном рассеянии. Например, расчеты, выполненные с учетом указанного выше соотношения, показывают: при длине волны РЛС более 15 см контраст не превышает единиц децибел, при длине волны 5 см составляет 10-16 дБ, а при длине волны 1 см увеличивается до 34-40 дБ. Результаты расчета хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными в натуральных условиях при длине радиоволны 3,2 см [8].

Следовательно, наиболее перспективным для обнаружения нефтяных разливов являются радиолокаторы миллиметрового диапазона.

Появление пленки нефтепродуктов на поверхности моря приводит к уменьшению не только интенсивности обратного рассеяния, а также его дисперсии и спектральной плотности флуктуаций. Результаты исследований показывают, что контрасты дисперсий и спектральных плотностей флуктуаций приблизительно соответствуют контрасту средних мощностей [8].

Особенности обнаружения нефтяных разливов при малых углах скольжения. При уменьшении угла скольжения менее нескольких градусов УЭПР быстро убывает. Причем переход от области «плато» к интерференционной области происходит при некотором критическом угле скольжения, значение которого зависит от длины волны и состояния морской поверхности [3, 12]. В этой области углов скольжения существенное влияние приобретают нерезонансные механизмы рассеяния радиоволн. В качестве основных нерезонансных механизмов рассматриваются: дифракция электромагнитных волн на заостренных гребнях поверхностных волн в начальной стадии их обрушения, зеркальные отражения радиоволн от гребней поверхностных волн, рассеяние радиоволн на брызгах и пене, образующихся при обрушении поверхностных волн.



Поскольку уровень резонансного рассеяния для горизонтальной поляризации меньше, влияние нерезонансных механизмов на данной поляризации больше, чем для вертикальной поляризации радиоизлучения, и оно увеличивается при уменьшении угла скольжения. При углах скольжения около 1-3 град. средние уровни обратного рассеяния приблизительно одинаковы для вертикальной и горизонтальной поляризаций. Однако для вертикальной поляризации радиоизлучения в этой области еще существенен вклад резонансного рассеяния, а для горизонтальной поляризации преобладающими являются нерезонансные механизмы, о чем свидетельствуют пики (выбросы) сигналов, связанных с обрушением волн.

При углах скольжения около 0,5 град. нерезонансные механизмы рассеяния становятся основными для обеих поляризаций радиоизлучения, а характеристики рассеяния – приблизительно одинаковыми.

В области малых углов скольжения, когда преобладающими являются нерезонансные механизмы обратного рассеяния радиоволн, к настоящему времени нет аналитически полученных соотношений, позволяющих однозначно описать характеристики обратного радиоизлучения. Это обусловлено сильным влиянием условий наблюдений (состояния моря, направления облучения по отношению к генеральному направлению распространения поверхностных волн и т.п.) на перераспределение вклада различных составляющих этого механизма в суммарную интенсивность обратного рассеяния, а также большим разнообразием самих условий наблюдения.

В этом случае можно воспользоваться эмпирической моделью [3], предложенной на основании экспериментальных исследований закономерностей рассеяния радиоволн сантиметрового и миллиметрового диапазонов (частота радиоволн 10-100 ГГц) при скорости ветра до 15 м/с.

В соответствии с этой моделью УЭПР морской поверхности можно рассчитать по формуле

$$\sigma_o = 7 \cdot 10^4 \left(\frac{f}{f_0} \right)^{0,5} A_\psi A_u A_\alpha + 1,36 \cdot 10^{-18} f^4 \exp(1,4u),$$

где f – частота радиосигнала, ГГц; $f_0 = 10$ ГГц; A_ψ, A_u, A_α – безразмерные множители, учитывающие зависимость УЭПР от угла скольжения ψ , скорости ветра u и угла α между направлениями облучения и генерального распространения волн. Формулы для расчета безразмерных коэффициентов приведены в [3].

В приведенном выражении первое слагаемое определяет вклад в УЭПР обратного рассеяния от морской поверхности, а второе – вклад отражений от брызг, образующихся при обрушении морских волн. Анализ формулы показывает, что УЭПР морской поверхности возрастает при увеличении рабочей частоты РЛС, по крайней мере, пропорционально корню квадратному из частоты. Кроме того, из анализа формул для безразмерных коэффициентов, входящих в приведенную формулу, следует, что они также возрастают при увеличении рабочей частоты РЛС.

Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности использования для обнаружения разливов нефтепродуктов РЛС миллиметрового диапазона волн, обеспечивающих большую дальность видимости отражений от поверхностного волнения.

Вероятность образования в районе разлива нефти на морской поверхности крутых заостренных волн и их обрушение практически равна нулю. Следовательно, при появлении на морской поверхности нефтяной пленки формирование в области слика элементов, ответственных за нерезонансный механизм рассеяния, маловероятно. Соответственно и в этой области углов скольжения загрязнение поверхности моря нефтепродуктами приводит к уменьшению уровня обратного рассеяния. В этом случае интенсивность обратного излучения от слика будет определяться высотой погашенных резонансных составляющих поверхностного волнения, следовательно, радиолокационный контраст слика будет не меньше контраста для данных составляющих поверхностных волн в области «плато».

Таким образом, радиолокационный контраст при малых углах скольжения, когда преобладает нерезонансный механизм рассеяния, не менее радиолокационного контраста в области резонансного рассеяния для соответствующих резонансных составляющих поверхностного волнения.

Перспективы использования радиолокаторов, установленных на нефтяных платформах, транспортных судах и в портах для контроля загрязнений водной поверхности нефтепродуктами. В [10] для обнаружения нефтяных пленок на расстоянии от 100 м до нескольких километров от нефтяной платформы предложено использовать специализированный радиолокатор для обнаружения слабоконтрастных неоднородностей поверхностного волнения, имеющий когерентный приемопередатчик. В настоящее время такие радиолокаторы отсутствуют, создание их требует значительных материальных затрат. Кроме того, при использовании радиолокаторов сантиметрового и миллиметрового диапазонов нефтяные разливы могут быть отнесены к неоднородностям морского волнения,



имеющим на радиолокационных изображениях сравнительно высокий контраст. Для повышения контрастности нефтяных разливов на радиолокационных изображениях могут быть использованы накопление информации [6] за несколько оборотов антенны, контрастный прием [12], функциональное преобразование характеристик отраженных радиолокационных сигналов [7, 11].

Наиболее перспективным представляется использование для обнаружения нефтяных разливов навигационных РЛС [6], серийное производство которых осуществляется многие десятилетия и которые установлены на всех транспортных судах.

При работе навигационных РЛС в штатном режиме, обеспечивающем отображение надводной обстановки, отражения от поверхностного волнения рассматриваются как помехи, для уменьшения влияния которых предпринимаются соответствующие меры (временная автоматическая регулировка усиления и др.). Для использования информации, получаемой от навигационного радиолокатора, при обнаружении нефтяных разливов необходимо обеспечить адаптивный режим его работы, соответствующий наблюдению на радиолокационных изображениях отражений от поверхностного волнения. В этом случае для обнаружения нефтяных разливов не требуется создание специализированных радиолокаторов – достаточно разработать специальное программное обеспечение для обработки информации навигационных радиолокаторов с целью выявления нефтяной пленки на морской поверхности.

Важным является выбор рабочей длины волны радиолокатора. Как уже отмечалось, при уменьшении длины радиоволн контраст нефтяной пленки и УЭПР морской поверхности увеличиваются. Следовательно, целесообразно использовать для обнаружения нефтяных разливов навигационные РЛС миллиметрового диапазона (рабочая длина волны около 8,2 мм). Однако радиолокаторы этого диапазона наиболее подвержены влиянию туманов и осадков. Таким образом, наиболее перспективным является совместное использования навигационных радиолокаторов миллиметрового и сантиметрового (рабочая длина волны около 3,2 см) диапазонов.

Дальность обнаружения нефтяной пленки на морской поверхности зависит от высоты установки антенны РЛС и скорости ветра. При расположении антенны на высоте 15-40 м и скорости ветра 2-12 м/с дальность составляет 2-8 км.

Выводы

1. При облучении морской поверхности, близком к вертикальному, контраст сликов не превышает единиц децибел. Для практического использования данной области необходимо разработать методы и алгоритмы обработки отраженных сигналов, обеспечивающих повышение контраста нефтяных пятен на радиолокационных изображениях морской поверхности.

2. Контраст на радиолокационном изображении и дальность обнаружения нефтяных разливов увеличиваются при уменьшении рабочей длины радиолокатора.

3. Радиолокационный контраст при малых углах скольжения, когда преобладает нерезонансный механизм рассеяния радиоволн морской поверхностью, не менее радиолокационного контраста в области резонансного рассеяния (в области «плато»).

4. Наиболее перспективным для радиолокационного мониторинга загрязнений морской поверхности с морских нефтяных платформ и транспортных судов представляется совместное использование навигационных радиолокаторов миллиметрового и сантиметрового диапазонов.

Результаты исследования могут быть использованы для постоянных систематических наблюдений состояния окружающей среды, оперативного обнаружения разливов нефти в районах морских нефтяных платформ, местах загрузки и разгрузки танкеров, а также на морских трассах их следования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса / Под ред. В.Г.Бондура. М.: Научный мир, 2012. 558 с.
2. Басс Ф.Г. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности / Ф.Г.Басс, И.М.Фукс. М.: Наука, 1972. 424 с.
3. Гутник В.Г. Особенности обратного рассеяния радиоволн сантиметрового и миллиметрового диапазонов морской поверхностью при малых углах скольжения / В.Г.Гутник, Г.П.Кулемин, Л.И.Шарапов // Успехи современной радиоэлектроники. 2005. № 1. С.3-19.
4. Иванов А.Ю. Стики и пленочные образования на космических радиолокационных изображениях // Исследование Земли из космоса. 2007. № 3. С.73-96.



5. Источники загрязнения гидросферы нефтью [Электронный ресурс]. URL: <http://biofile.ru/geo/23616.html> (дата обращения 07.07.2015).
6. Обнаружение разливов нефтепродуктов с использованием навигационной РЛС / Н.Т.Ничипоренко, И.Е.Маренич, А.В.Петров, И.Мисюченко, Б.С.Трофимов, И.Е.Ушаков // Судостроение. 2010. № 2. С.39-41.
7. Патент № 2483323 РФ. Способ создания локационного изображения повышенной яркости и контрастности и устройство для его реализации / А.А.Булатов, И.Е.Маренич, И.Л.Мисюченко, Н.Т.Ничипоренко, И.Е.Ушаков, Б.С.Трофимов, В.Г.Яковлев. Опубл. 27.05.2013. Бюл. № 15.
8. Радиолокационные исследования неоднородностей поверхности океана / А.М.Волков, В.Б.Ефимов, А.С.Курекин, А.П.Пичугин, А.А.Прозоровский // Успехи современной радиоэлектроники. 2003. № 10. С.41-53.
9. Спутниковый радарный мониторинг морей [Электронный ресурс]. URL: <http://живая карта.рф/ru/environment/monitoring/radar/> (дата обращения 07.08.2014).
10. Технология многоуровневого экологического мониторинга в целях информационного обеспечения безопасности морской добычи нефти и газа [Электронный ресурс]. <http://neftegas.ru/scince/view/181> (дата обращения 15.05.2015).
11. Ушаков И.Е. Формирование радиолокационных изображений с использованием функциональных преобразований характеристик отраженных сигналов // Инновации на транспорте и в машиностроении: Сб. тр. III Международной науч.-практич. конференции / Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». СПб, 2015. С.103-106.
12. Ушаков И.Е. Радиолокационное зондирование морской поверхности / И.Е.Ушаков, И.Ф.Шишкин. М.: РИЦ «Татьянин день», 1997. 264 с.
13. Череповицын А.Е. Социально-экономический потенциал крупномасштабных проектов освоения нефтегазового шельфа: риски и ожидания заинтересованных сторон // Записки Горного института. 2015. Т.215. С.140-149.
14. Chen Z. A new modulation transfer function for ocean wave spectra retrieval from X-band marine radar imagery / Z.Chen, B.Zhang, Y.He, Z.Qiu, W.Perric // Chinese of Oceanology and Limnology. 2015. Vol. 33. N 5. P.1132-1141.
15. Salberg A.-B. Oil spill detection in hybrid-polarimetric SAR images / A.-B.Salberg, O.Rudjord, A.H.S.Solberg // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2014. Vol.52. N 10. P.6521-6533.
16. Satellites oceanography and society / Ed. by D. Halpern. Elsvier, 2000. 368 p.
17. Shishkin I.F. Radar method of the measuring the degree of the ocean oil product pollution / I.F.Shishkin, I.E.Ushakov // Proc. of the First Symposium of the IMEKO – TC8, 9-1 september, 1981. P.354-367.

Автор И.Е.Ушаков, д-р техн. наук, профессор, kaf_metro@spmi.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Россия).
Статья принята к публикации 2.02.2016.

DETECTION OF FLOODS OF OIL PRODUCTS IN THE SEA RADAR-TRACKING MEANS

I.E.USHAKOV

Saint-Petersburg Mining University, Russia

Based on the analysis of patterns of microwave scattering from the sea surface at different angles of irradiation the features of radar detection of oil spills. The prospects of using radar to detect oil spills at oblique irradiation of the sea surface. The features of monitoring oil pollution of the sea surface using a radar located on offshore oil platforms and transport vessels. Variants of contrast enhancement areas of the sea surface covered with oil film on the radar screen. The basic requirements for the radar monitoring of oil pollution.

Key words: flood of oil products, slick, an oil spillage, radar-tracking sounding, radar-tracking contrast.

How to cite this article: Ushakov I.E. Detection of floods of oil products in the sea radar-tracking means. Zapiski Gornogo instituta. 2016. Vol.219, p. 421-427. DOI 10.18454/PMI.2016.3.421

REFERENCES

1. Aerokosmicheskii monitoring ob'ektov neftegazovogo kompleksa (*Aerospace monitoring of oil and gas complex*). Ed. by V.G.Bondura. Moscow: Nauchnyi mir, 2012, p.558.
2. Bass F.G., Fuks I.M. Rasseyanie voln na statisticheski nerovnoi poverkhnosti (*Wave scattering from statistically rough surfaces*). Moscow: Nauka, 1972, p.424.
3. Gutnik V.G., Kulemin G.P., Sharapov L.I. Osobnosti obratnogo rasseyaniya radiovoln santimetrovogo i millimetrovogo diapazonov morskoi poverkhnost'yu pri malykh uglakh skol'zheniya (*Features backscattering of radio waves in the centimeter and millimeter sea surface at small grazing angles*). Uspekhi sovremennoi radioelektroniki. 2005. N 1, p.3-19.
4. Ivanov A.Yu. Sliki i plenochnye obrazovaniya na kosmicheskikh radiolokatsionnykh izobrazheniyakh (*Slicks Film and education in space radar images*). Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2007. N 3, p.73-96.
5. Istochniki zagryazneniya gidrosfery nef't'yu (*Sources of pollution of the hydrosphere oil*) [Electronic resource]. Available at: <http://biofile.ru/geo/23616.html> (date of access 07.07.2015).
6. Nichiporenko N.T., Marenich I.E., Misyuchenko I.L., Petrov A.V., Trofimov B.S., Ushakov I.E. Obnaruzhenie razlivov nefteproduktov s ispol'zovaniem navi-gatsionnoi RLS (*Detection of oil spills using radar navigation*). Sudostroenie. 2010. N 2, p.39-41.
7. Patent N 2483323 RF. Bulatov A.A., Marenich I.E., Misyuchenko I.L., Nichiporenko N.T., Ushakov I.E., Trofimov B.S., Yakovlev V.G. Sposob sozdaniya lokatsionnogo izobrazheniya povyshennoi yarkosti i kontrastnosti i ustroystvo dlya ego realizatsii (*A method of creating rfdar images enhanced brightness and contrast, and device for its realization*). Opubl. 27.05.2013. Byul. № 15.



8. Volkov A.M., Efimov V.B., Kurekin A.S., Pichugin A.P., Prozorovskii A.A. Radiolokatsionnye issledovaniya neodnorodnosti poverkhnosti okeana (*Radar studies of ocean surface inhomogeneities*). Uspekhi sovremennoi radioelektroniki. 2003. N 10, p.41-53.
9. Sputnikovyi radarnyi monitoring morei (*The satellite radar monitoring of the seas*) [Electronic resource]. Available at: <http://zhivaya.karta.rf/ru/environment/monitoring/radar/> (date of access 07.08.2014).
10. Tekhnologiya mnogourovnevnogo ekologicheskogo monitoringa v tselyakh informatsion-nogo obespecheniya bezopasnosti morskoi dobychi nefiti i gaza (*The technology of multi-level environmental monitoring in order to ensure information security of offshore oil and gas*) [Electronic resource]. Available at: <http://neftegas.ru/science/view/181> (date of access 15.05.2015).
11. Ushakov I.E. Formirovanie radiolokatsionnykh izobrazhenii s ispol'zovaniem funktsional'nykh preobrazovaniy kharakteristik otrazhennykh signalov (*Radar imaging using transformations using functional characteristics of the reflected signal*). Innovatsii na transporte i v mashinostroenii: Sb. tr. III mezhdunarodnoi nauchn.-praktich. Konferentsii. Natsional'nyi mineral'no-syr'evoi universitet «Gornyi». St. Petersburg, 2015, p.103-106.
12. Ushakov I.E., Shishkin I.F. Radiolokatsionnoe zondirovanie morskoi poverkhnosti (*Radar sensing of the sea surface*). Moscow: RITs «Tat'yandin den'», 1997, p.264.
13. Cherepovitsyn A.E. Sotsial'no-ekonomicheskii potentsial krupnomasshtabnykh proektov osvoeniya neftegazovogo shel'fa: riski i ozhidaniya zainteresovannykh storon (*Socio-economic potential of large-scale projects to develop offshore oil and gas: risks and stakeholder expectations*). Zapiski Gornogo instituta. 2015. Vol.215, p.140-149.
14. Chen Z., Zhang B., He Y., Qiu Z., Perrie W. A new modulation transfer function for ocean wave spectra retrieval from X-band marine radar imagery. Chinese of Oceanology and Limnology. 2015. Vol.33. N 5, p.1132-1141.
15. Salberg A.-B., Rudjord O., Solberg A.H.S. Oil spill detection in hybrid-polarimetric SAR images. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2014. Vol.52. N 10, p.6521-6533.
16. Satellites oceanography and society / Ed. by D.Halpern. Elsevier, 2000. 368 p.
17. Shishkin I.F., Ushakov I.E. Radar method of the measuring the degree of the ocean oil product pollution. Proc. of the First Symposium of the IMEKO – TC8, 9-1 september, 1981, p.354-367.

Author I.E.Ushakov, Dr. of Engineering Sciences, Professor, kaf_metro@spmi.ru (Saint-Petersburg Mining University, Russia).
Manuscript Accepted 2.02.2016.



Металлургия и обогащение

УДК 615.035.4

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ПЕРЕРАБОТКИ АЛЮМИНИЙСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ

А.И.АЛЕКСЕЕВ

Санкт-Петербургский горный университет, Россия

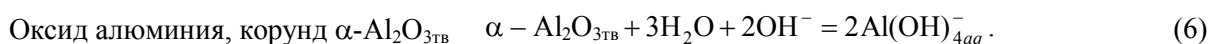
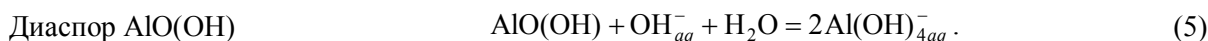
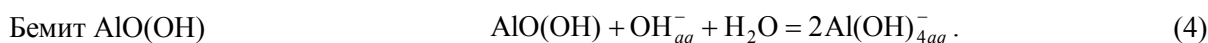
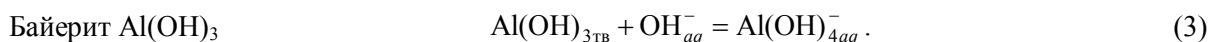
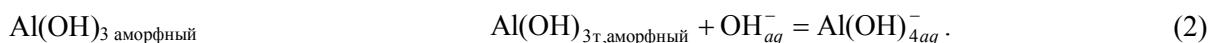
Изменение сырьевой базы для получения алюминия и появление огромного количества вторичных глиноземсодержащих отходов (литейные шлаки, шламы, отработанные катализаторы, минеральная часть углей и др.), образующихся на различных промышленных предприятиях, потребовало создание научных и теоретических основ для их переработки. В работе в качестве алюминийсодержащего сырьевого компонента использованы алюминиевые сплавы, содержащие алюминиевый компонент, получаемый в качестве стружки на машиностроительных предприятиях. Алюминиевые отходы представляют собой целую гамму металлических сплавов алюминия с включением различных элементов: магния, меди, кремнезема, цинка, железа. Анализ алюминиевых отходов Al – Zn – Cu – Si – Fe показывает, что в зависимости от содержания того или иного металла, процесс растворения алюминиевого сплава следует рассматривать как результат химического взаимодействия металла, с щелочным раствором. Рассмотрено поведение основных компонентов сплавов в щелочном растворе применительно к системе $\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}$. Поскольку конечное содержание компонентов в щелочном растворе определяется его растворимостью, выполнена экспериментальная оценка возможности растворения железа и других элементов алюминиевого сплава в щелочном растворе различных концентраций при температуре 80-90 °С. Для щелочных растворов, содержащих 100-300 г/л $\text{Na}_2\text{O}_{\text{к}}$, растворимость гидроксида железа составляет 0,003-0,05 г/л.

Ключевые слова: алюминиевые отходы Al – Zn – Cu – Si – Fe, щелочной раствор, термодинамические расчеты.

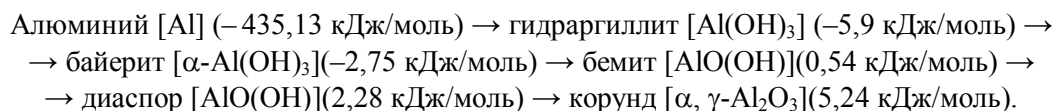
Как цитировать эту статью: Алексеев А.И. Научные основы переработки алюминийсодержащих отходов // Записки Горного института. 2016. Т.219. С.428-434. DOI 10.18454/PMI.2016.3.428

Проблема утилизации отходов является весьма актуальной, однако методы переработки многих видов алюминиевых отходов пока не разработаны или проработаны недостаточно эффективно [1,2]. По данным Росприроднадзора, ежегодно в России образуется порядка 35-40 млн т твердых промышленных отходов и практически весь этот объем размещается на полигонах ТБО, санкционированных и несанкционированных свалках, и только 4-5 % вовлекается в переработку [8].

В работах [3, 10-12] изложены теоретические и термодинамические основы получения щелочно-алюминатных растворов с использованием системы $\text{Na}_2\text{O} - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$, получаемых на промышленных предприятиях России, перерабатывающих Кольский нефелиновый концентрат и другие виды алюмосиликатного сырья. Процесс взаимодействия алюминия или его оксида α -, γ - $\text{Al}_2\text{O}_{3\text{ТВ}}$ и гидроксида: гидраргиллит γ - $\text{Al}(\text{OH})_3$, байерит α - $\text{Al}(\text{OH})_3$, бемит γ - $\text{AlO}(\text{OH})$, диаспор α - $\text{AlO}(\text{OH})$ с преобразованием группы OH^- щелочного раствора в комплексный ион $\text{Al}(\text{OH})_{4\text{aq}}^-$ – осуществляется по следующим химическим реакциям [4, 5, 15]:



На основании термодинамических расчетов по значению энергии Гиббса ΔG_T^0 определен ряд активностей соединений металлический алюминий – гидроксиды алюминия по отношению к 1 М раствора NaOH:





Полученные значения энергии Гиббса свидетельствуют о высокой вероятности взаимодействия алюминия, аморфного гидроксида, байерита с щелочным раствором при температуре 298 К. Химические реакции (3)-(6) также возможны, но с меньшей вероятностью, поскольку они могут протекать только с повышением температуры, о чем свидетельствуют расчетные значения теплового эффекта:

Номер реакции	1	2	3	4	5	6
Тепловой эффект, кДж/моль	-409,2	15,79	33,52	12,57	3,21	6,16

В настоящее время очень актуальна переработка вторичного алюминийсодержащего сырья (алюминиевые сплавы), так как в нем содержится значительное количество очень ценных элементов: Al – Mg – Ca – Sc – Zn – Cu – Sc – Cr – Zr – Fe – Hf.

Производство вторичного алюминия требует меньших энергетических затрат и существенно меньших, чем при производстве первичного алюминия (выбросы токсичных веществ в окружающую природную среду). По прогнозам, доля вторичного алюминия в общем потреблении к 2030 г. может возрасти до 22-24 млн т в год [13].

Исследование проблемы утилизации алюминиевых отходов различных предприятий показывает, что алюминиевые отходы классифицируют по их свойствам: деформируемые и литейные [2, 9, 14].

Алюминиевые отходы представляют собой целую гамму металлических сплавов алюминия с включением значительного количества элементов периодической системы Д.И.Менделеева: кальция, магния, меди, марганца, кремнезема, цинка, железа (ГОСТ 1639-2009).

Изменение технологических свойств в сопоставлении с диаграммой состояния (рис.1) показывает, что сплавы с содержанием легирующего компонента меньше предела растворимости обладают наибольшей пластичностью и наименьшей прочностью при высокой температуре. Анализ химического состава алюминиевых отходов, содержащих Al – Zn – Cu – Si – Fe, показывает, что в зависимости от содержания того или иного металла процесс растворения алюминиевого сплава следует рассматривать как результат химического взаимодействия металла с щелочным раствором, содержащим ионы OH^- . Алюминиевые сплавы следует рассматривать как равномерное распределение элементов в кристаллической решетке алюминиевого сплава. С точки зрения химической активности алюминиевые сплавы представляют собой локальные гальванические элементы, которые возникают при их контакте с водой и щелочью [7].

В таблице приведены реакции взаимодействия компонентов алюминиевого сплава в воде и щелочным раствором молярной концентрации (NaOH), используемых для получения алюминатного раствора.

Для оценки растворения компонентов алюминиевых отходов в щелочном растворе в качестве критерия выбрана свободная энергия Гиббса ΔG_{298}^0 , которая связана с электродвижущей силой элемента уравнением $\Delta G_{298}^0 = nFE^0$, где n – зарядность ионов; F – постоянная Фарадея, равная 96485 Кл/моль; E^0 – ЭДС элемента, В.

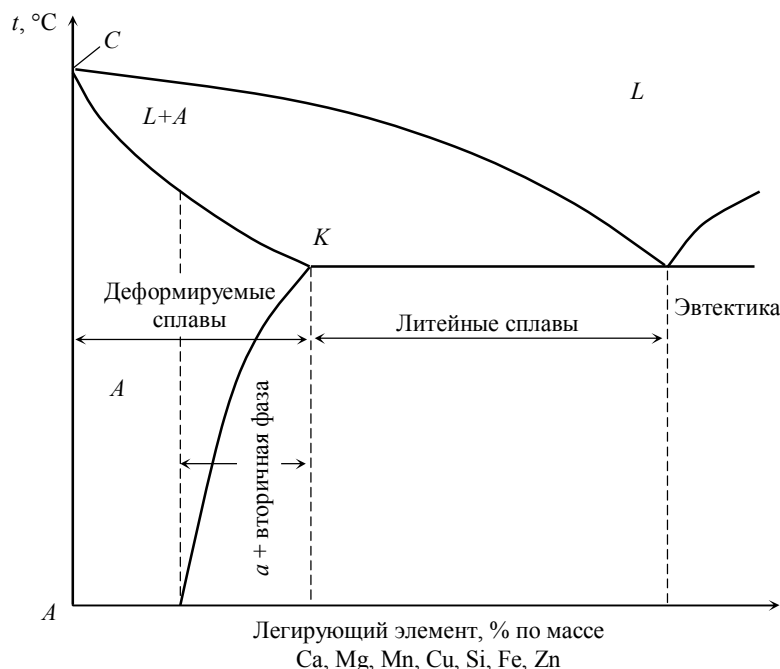


Рис. 1. Типовая диаграмма алюминий – легирующий элемент

L – область жидкого алюминия; L + A – жидкий алюминий + кристаллы алюминия; K – точка предельной растворимости легирующего элемента в алюминии при эвтектической температуре; C – температура плавления Al; A – область кристалла с легирующим компонентом

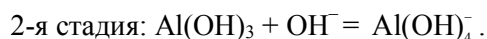
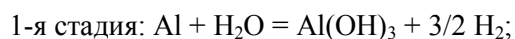


Энергия Гиббса и потенциалы реакций растворения компонентов алюминиевых отходов в щелочном растворе

Элемент сплава	Химическая реакция	ΔG_{298}^0 , кДж/моль	Стандартные потенциалы металлов, В
Бериллий	$\text{Be}_{\text{ТВ}} + 2\text{OH}^- + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Be}(\text{OH})_4^{2-} + \text{H}_2$	-309,38	-1,847
Алюминий	$\text{Al}_{\text{ТВ}} + \text{OH}^- + 3\text{H}_2\text{O} = \text{Al}(\text{OH})_4^- + 1,5\text{H}_2$	-337,77	-1,66
Марганец	$\text{Mn}_{\text{ТВ}} + \text{OH}^- + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Mn}(\text{OH})_3^- + \text{H}_2$	-97,32	-1,18
Хром	$\text{Cr}_{\text{ТВ}} + \text{OH}^- + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Cr}(\text{OH})_3^- + \text{H}_2$	49,27	-0,852
Цинк	$\text{Zn}_{\text{ТВ}} + 2\text{OH}^- + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Zn}(\text{OH})_4^{2-} + \text{H}_2$	-74,05	-0,763
Кадмий	$\text{Cd}_{\text{ТВ}} + 2\text{OH}^- + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Cd}(\text{OH})_4^{2-} + \text{H}_2$	46,76	-0,403
Железо	$\text{Fe}_{\text{ТВ}} + 2\text{OH}^- + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Fe}(\text{OH})_4^{2-} + \text{H}_2$	35,64	-0,037
Кремний	$\text{Si}_{\text{ТВ}} + 2\text{OH}^- + 2\text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{SiO}_4^{2-} + 2\text{H}_2$	-398,63	-
Медь	$\text{Cu}_{\text{ТВ}} + 2\text{OH}^- + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Cu}(\text{OH})_4^{2-} + \text{H}_2$	152,09	+0,337

Расчетные значения ΔG_{298}^0 показывают, что только пять элементов сплава (алюминий, кремнезем и др.) растворяются при химической щелочной обработке алюминиевого сплава. Стандартные потенциалы металлов служат для ориентировочных оценок электрохимической коррозии в щелочных растворах при обычных температурах, а также для выбора контактных пар разнородных металлов.

Таким образом, анализируя химическую активность элементов алюминиевого сплава, необходимо иметь в виду, что эти соединения в результате химической реакции выделяют водород из молекулы воды, а роль щелочи сводится к растворению соответствующего гидроксида. Например, для алюминия химизм процесса осуществляется следующим образом:



Поэтому с водой алюминий реагирует с образованием гидроксида, который, являясь амфотерным соединением, в дальнейшем проявляет кислотные свойства и достаточно легко нейтрализуется щелочью (NaOH) с образованием комплексного алюминатного аниона.

Аналогичными свойствами обладает кремнезем. Остальные элементы: Mg, Ti, Mn, Ni, Fe и Cu – проявляют основные свойства, и даже при их растворении будут представлены только гидроксидами. Оценить возможность их растворения в щелочном растворе можно с помощью данных по растворимости соответствующих гидроксильных соединений. Например, если в алюминиевом сплаве есть железо и медь, то возможно образование локального гальванического элемента медь – железо (раствор NaOH).

В этом случае элементы железа становятся ионами Fe^{2+} , а затем переходят в раствор, поскольку образование на поверхности $\text{Fe}(\text{OH})_2$ отбирает у меди свободные электроны $2\text{Fe} \rightarrow 2\text{Fe}^{2+} + 4\text{e}^-$; $2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 4\text{e}^- = 4\text{OH}^-$. Наличие кислорода способствует образованию различных модификаций, например $\text{FeO}(\text{OH})$.

Таким образом, многообразие различных элементов в алюминиевом сплаве приводит к необходимости термодинамического подхода к анализу поведения всех компонентов при их растворении в щелочном растворе.

Сущность термодинамического расчета применительно к процессу растворения алюминиевого сплава в щелочном растворе позволяет определить, в какой форме могут существовать те или иные частицы в растворе и каковы границы рН их существования.

Для экспериментальной оценки возможности использования алюминиевого сплава (приготовления алюминатного раствора) и балансового расчета применяли алюминиевые отходы следующего химического состава, % по массе: Al 93,35; Cu 3,8; Mg 1,2; Mn 0,3; Fe 0,5; Ti 0,5; Ni 0,1; прочие примеси 0,15; всего 100.

Скорость растворения алюминиевого отхода определяли используя образцы алюминиевого сплава 40×40 мм, которые помещались в щелочной раствор различной концентрации (10-160 г/л) и температур (60-90 °С) для достижения одинакового результата (съем 4 мкм на сторону поверхности).

На основании экспериментальных данных получено уравнение травления: $\alpha = k C_{\text{NaOH}}^{2.7-4.0} \tau$, где α – величина, по которой можно определить количество перешедшего в щелочной раствор металлического алюминия, г/л Al_2O_3 ; k – константа скорости, $1,5 \cdot 10^{-4}$ г/(л·с); C_{NaOH} – концентрация NaOH, моль; τ – время травления, с. Например, для температуры 70 °С, концентрации 120 г/л NaOH (3 моля) и времени 5 с, $\alpha = 1,5 \cdot 10^{-4} 32^{4.0-7.0} 5$; концентрация $\alpha = 0,018$ г/л Al_2O_3 .

Для разработки технологического процесса переработки алюминиевых сплавов необходимо определить, какое количество оксида алюминия можно перевести в щелочно-алюминатный раствор, поэтому растворение алюминиевого сплава следует рассматривать в гетерогенной системе $\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ (рис.2).

Процесс растворения алюминиевого сплава и его компонентов щелочным раствором по реакциям (1)-(6) может осуществляться только тогда, когда в растворе присутствует свободная каустическая щелочь.

В качестве примера можно рассмотреть взаимодействие алюминия $\text{Al}_{\text{тв}} + \text{OH}^- + 3\text{H}_2\text{O} = \text{Al}(\text{OH})_4^- + 1,5\text{H}_2$ и кремния $\text{Si}_{\text{тв}} + 2\text{OH}^- + 2\text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{SiO}_4^{2-} + 2\text{H}_2$ с щелочным раствором и определить области щелочно-алюминатных растворов, которые влияют на его растворение.

Комплексная диаграмма разработана нами на основании литературных и экспериментальных данных [4, 5] с учетом частных разрезов $\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O} : \text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{H}_2\text{O}$ (кристаллизуется $\text{Al}(\text{OH})_3$; $\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ (кристаллизуется $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, гидроалюмосиликат натрия); $\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ (накопление CO_2 в щелочных растворах, кристаллизуется водный карбонат натрия в виде $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$).

Из приведенных данных (рис.2) видно, что при концентрации 125 г/л $\text{Na}_2\text{O}_{\text{ку}}$ предельная концентрация Al_2O_3 составляет 110 г/л, а равновесная $\text{SiO}_2 - 0,5$ г/л.

Процесс растворения сплава осуществляется в реакторах с открытой поверхностью, поэтому каустическая щелочь способна поглощать CO_2 из воздуха. В этом случае протекает реакция нейтрализации $2\text{NaOH} + \text{CO}_2 = \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ и, следовательно, происходит уменьшение свободной щелочи.

Из этих данных следует, что количество свободной щелочи для процесса следует рассчитывать по формуле

$$\text{Na}_2\text{O}_{\text{ку}} = \text{Na}_2\text{O}_{\text{об}} - \text{Na}_2\text{O}(\text{NaOH}) - \text{Na}_2\text{O}(\text{Na}_2\text{CO}_3) - \text{Na}_2\text{O}_{\text{примесь}}$$

где $\text{Na}_2\text{O}_{\text{об}}$ – общая каустическая щелочь; $\text{Na}_2\text{O}_{\text{ку}}$ – щелочь, связанная в NaOH ; $\text{Na}_2\text{O}(\text{Na}_2\text{CO}_3)$ – щелочь, связанная в карбонат Na_2CO_3 ; $\text{Na}_2\text{O}_{\text{примесь}}$ – щелочь, связанная в другие неорганические соединения.

Поскольку конечное содержание компонентов в щелочном растворе определяется его растворимостью, нами выполнена экспериментальная оценка возможности растворения железа и других элементов алюминиевого сплава в щелочном растворе различных концентраций при температуре 80-90 °С.

Экспериментальные данные по растворимости гидроксида железа (рис.3) показывают, что для щелочных растворов, содержащих 100-300 г/л $\text{Na}_2\text{O}_{\text{ку}}$, растворимость гидроксида железа составляет 0,003-0,05 г/л. Следует учесть, что растворимость Fe_2O_3 в щелочном растворе при $\text{pH} = 10$ равна $2,5 \cdot 10^{-26}$ г/л.

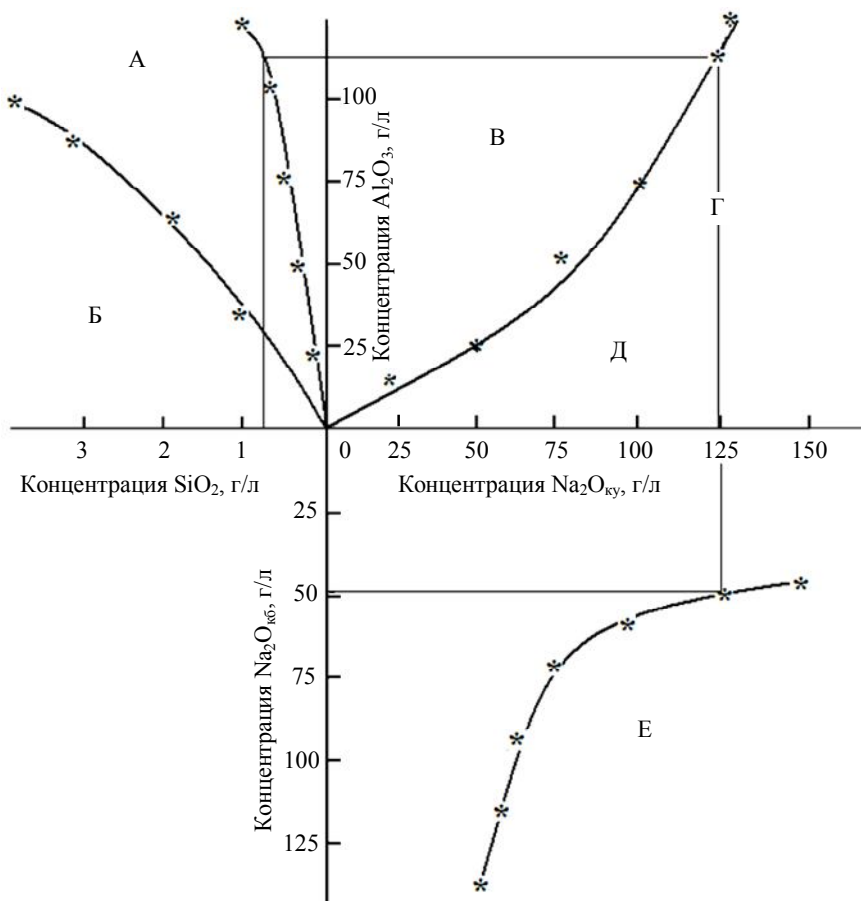


Рис.2. Равновесная диаграмма системы $\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}$, температура 80-90 °С

А – метастабильная область кристаллизации алюмосиликата натрия $\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - 2\text{SiO}_2 - 2\text{H}_2\text{O}$; Б – область кристаллизации алюмосиликата натрия $\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - 2\text{SiO}_2 - 2\text{H}_2\text{O}$; В – область пересыщенных алюминатных растворов; Г – область ненасыщенных алюминатных растворов; Д – область растворения алюминиевых сплавов; Е – область кристаллизации моногидрата карбоната натрия

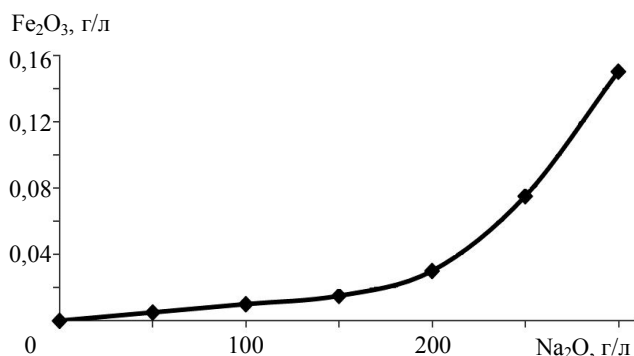


Рис.3. Растворимость гидроксида железа в щелочном растворе при различной концентрации, $t = 80-90\text{ }^{\circ}\text{C}$

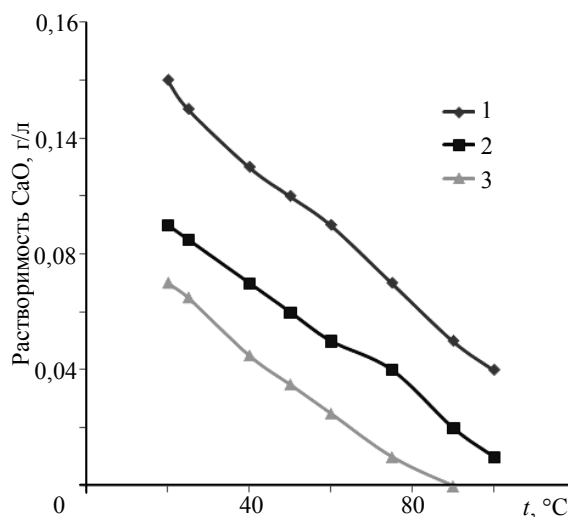


Рис.4. Влияние температуры и концентрации каустической щелочи на растворимость гидроксида кальция
Концентрация NaOH, г/л: 1 – 6,45; 2 – 12,91; 3 – 25,8

Кальций как легирующий элемент алюминия существенно изменяет свойства и придает ему новые специфические особенности – пластичность. При содержании кальция 5 % сплав обладает эффектом сверхпластичности [6, 12]. Известно, что растворимость гидроокисей щелочно-земельных металлов зависит от избыточного количества гидроксильных ионов в виде раствора NaOH, а также повышения температуры, которое вызывает снижение растворимости гидроокиси кальция.

На рис.4 приведены экспериментальные данные влияния температуры и концентрации щелочи на растворимость гидроксида кальция, которые подтверждают данное научное положение.

При обработке экспериментальных данных растворимости гидроксида кальция в щелочном растворе были получены следующие результаты:

Концентрация щелочного раствора, г/л	Коэффициенты уравнения растворимости (S) Ca(OH) ₂ , выраженные через CaO, г/л, $S = kx + b$		Величина достоверности аппроксимации R ²
	k	b	
6,45	-0,001x	0,161	0,997
12,9	-0,001x	0,109	0,996
25,8	-0,001x	0,088	0,99

При высоких температурах очень хорошая прочность характерна для алюминиевых сплавов, которые содержат медь, никель и магний, а иногда железо 0,5-5 %. Эти сплавы являются термически упрочняемыми и могут достигать довольно высокой прочности и пластичности [6, 7, 10, 12]. Исходя из термодинамических расчетов (см. таблицу) и анализа литературы по растворимости литейных сплавов меди щелочным раствором 100-130 г/л Na₂O_{ку}, комплексные анионы состава Cu(OH)₄²⁻ в растворах не образуются и, следовательно, можно предположить образование каких-либо щелочных соединений ($\text{Cu}_{\text{тв}} + 2\text{OH}^- + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Cu}(\text{OH})_4^{2-} + \text{H}_2$, поскольку значение энергии Гиббса ΔG_{298}^0 положительное: 152,09 кДж/моль).

Для подтверждения научных положений выполнены экспериментальные исследования, где использовали следующие компоненты: алюминиевый сплав, процент по массе; щелочной раствор: 120 г/л Na₂O_{ку} (154,8 г/л NaOH); плотность 1,15 г/см³.

Данные материального баланса:

Компонента	Al	Cu	Mg	Mn	Fe	Ti	Ni	Прочие примеси	NaOH
Шлам	–	3,8	1,2	0,3	0,5	0,5	0,1	0,15	0,45
Раствор	93,50	–	–	–	–	–	–	0,05	204,7

В результате обработки алюминиевого сплава при температуре 80-90 °C получен раствор, содержащий 100 г/л Al₂O₃, 120 г/л Na₂O_{ку} (154,8 г/л NaOH), плотность 1,2 г/см³(см.рис.2).

Таким образом, приведенные экспериментальные данные подтверждают термодинамические и кинетические расчеты, а также разработанные научные положения.



Выводы

1. На основании термодинамических расчетов по значению энергии Гиббса ΔG_T^0 определен ряд активностей соединений металлический алюминий – гидроксиды алюминия по отношению к 1 М раствора NaOH.
2. Расчетные значения ΔG_{298}^0 показывают, что только пять элементов сплава (алюминий, кремнезем и др.) растворяются при химической щелочной обработке алюминиевого сплава. Стандартные потенциалы металлов служат для ориентировочных оценок электрохимической коррозии в щелочных растворах при обычных температурах, а также для выбора контактных пар разнородных металлов.
3. Выполнены эксперименты с образцами алюминиевого сплава 40×40 мм, которые помещались в щелочной раствор различной концентрации (10-160 г/л) и температур (60-90 °С) для достижения одинакового результата.
4. На основании экспериментальных данных получено уравнение травления.
5. На основании литературных и экспериментальных данных с учетом частных разрезов $\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ разработана комплексная диаграмма с частными разрезами $\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{H}_2\text{O}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев А.И. Комплексная переработка апатит-нефелиновых руд на основе создания замкнутых технологических схем // Записки Горного института. Т.215. С.75-83.
2. Алексеев А.И. Передовые химические технологии переработки алюминиевых отходов / А.И.Алексеев, Н.В.Николаева, О.О.Конончук // Высокие технологии: потенциал и перспективы: Сб. докладов круглого стола. СПб: Изд-во СПбГЭУ, 2014. С.20-23.
3. Абрамов В.Я. Комплексная переработка нефелин-apatитового сырья / В.Я.Абрамов, А.И.Алексеев, Х.А.Бадалянц. М.: Металлургия, 1990. 392 с.
4. Алексеев А.И. Гидроалюминаты и гидрогранаты кальция (синтез, свойства, применение). Л.: Изд-во ЛГУ, 1985. 184 с.
5. Бричкин В.Н. Явление изотермического перехода метастабильных алюминатных растворов в лабильную область и перспективы его промышленного использования / В.Н.Бричкин, А.Краславский // Записки Горного института. 2016. Т.217. С.80-87.
6. Белов Н.А. Влияние кальция на структуру и упрочнение алюминиевых сплавов, легированных цинком и магнием / Н.А.Белов, В.И.Титов // Цветные металлы. 2008. № 12. С.64-67.
7. Золоторевский С.В. Металловедение литейных алюминиевых сплавов / В.С.Золоторевский, Н.А.Белов / МиСиС. М., 2005. 376 с.
8. Кулинич О.В. Физико-химические основы гидрохимической переработки отходов, содержащих алюминий: Автореф. дис... канд. техн. наук / Санкт-Петербургский технологический институт. СПб, 1998. 21 с.
9. Луц А.Р. Алюминий и его сплавы / А.Р.Луц, А.А.Суслина / Самар. гос. техн. ун-т. Самара, 2013. 81 с.
10. Сизяков В.М. Химико-технологические закономерности процессов спекания щелочных алюмосиликатов и гидрохимической переработки спеков // Записки Горного института. 2016. Т.217. С.102-112.
11. Сизяков В.М. Проблемы развития производства глинозема в России // I Международный конгресс «Цветные металлы Сибири-2009»: Сб. докладов. Красноярск, 2009. С.120-134.
12. Сизяков В.М. Модернизация технологии комплексной переработки нефелиновых концентратов на Пикалевском глиноземе комбинате // II Международный конгресс «Цветные металлы-2010»: Сб. докладов. Красноярск, 2010. С.219-230.
13. Сизяков В.М. Технологические и методологические основы получения алюминия на мощных электролизерах / В.М.Сизяков, В.Ю.Бажин / Санкт-Петербургский горный университет. 2011. 130 с.
14. Фёдоров В. Вторичный алюминий – важное сырье XXI века! // Вторичные ресурсы. 2001. № 4-5. С.58-59.
15. Экспериментальные данные по растворимости многокомпонентных водно-солевых систем: Справочник. В 2 т., 4 кн. СПб: Химиздат, 2003. Т.1, кн.2. С.609-1152.

*Автор А.И.Алексеев, д-р техн. наук, профессор, alexeev@mail.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Россия).
Статья принята к публикации 23.12.2015.*

SCIENTIFIC BASIS OF PROCESSING ALUMINUM-CONTAINING WASTE

A.I.ALEKSEEV

Saint-Petersburg Mining University, Russia

Changing raw material base for the production of aluminium and the emergence of a huge number of secondary glistozemservice waste (foundry slag, sludge, spent catalysts, mineral part of coals and other are formed in various industrial enterprises) demanded the creation of a scientific and theoretical basis for their processing. In this work, as aluminium-containing component used aluminum alloys (GOST 4784-97), aluminum containing



component is obtained as a chip on Mashinostroitel-governmental enterprises. Aluminum waste is a whole range of metal alloys of aluminum with cumtion of the elements: magnesium, copper, silica, zinc, iron. Analysis of waste aluminum Al – Zn – Cu – Si – Fe shows that, depending on the content of a particular metal and the dissolution process of aluminum alloy should be viewed as the result of chemical interaction of the metal with an alkaline solution. It is necessary to consider the behavior of the main components of the alloy in alkaline solution, with respect to the system $\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \rightarrow \text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}$. Since the final contents of the components in an alkaline solution is determined by its soluble Pro-vide experimental evaluation of the possibility of dissolution of iron and other elements of aluminum alloy-VA in alkaline solution of different concentrations at temperature 80-90 °C., that show that for pH alkaltion of solutions containing 100-300 g/l $\text{Na}_2\text{O}_{\text{кв}}$ the solubility of ferric hydroxide is (0,003-0.05) g/l Fe_2O_3 .

Key words: waste aluminum Al – Zn – Cu – Si – Fe, alkaline solution, thermodynamic calculations.

How to cite this article: Alekseev A.I. Scientific basis of processing aluminum-containing waste. Zapiski Gornogo instituta. 2016. Vol.219, p.428-434. DOI 10.18454/PMI.2016.3.428

REFERENSEC

1. Alekseev A.I. Kompleksnaya pererabotka apatit-nefelinovykh rud na osnove sozdaniya zamknutykh tekhnologicheskikh skhem (*Complex processing of Apatite-nepheline ores based on the creation of closed technological schemes*). Zapiski Gornogo instituta. Vol.215, p.75-83.
2. Alekseev A.I., Nikolaeva N.V., Kononchuk O.O. Peredovye khimicheskie tekhnologii pererabotki alyuminievykh otkhodov (*Advanced chemical processing technology, aluminum waste*). Vysokie tekhnologii: potentsial i perspektivy: Sb. dokladov kruglogo stola. St. Petersburg: Izd-vo SPbGEU, 2014, p.20-23.
3. Abramov V.Ya., Alekseev A.I., Badal'yants Kh.A. Kompleksnaya pererabotka nefelin-apatitovogo syr'ya (*Complex processing of nepheline-Apatite raw materials*). Moscow: Metallurgiya, 1990, p.392.
4. Alekseev A.I. Gidroalyuminaty i gidrogranaty kal'tsiya (sintez, svoistva, primeneniye) (*Hydroaluminate and hydrogenate calcium (synthesis, properties, application)*). Leningrad: Izd-vo LGU, 1985, p.184.
5. Brichkin V.N., Kraslavskii A. Yavlenie izotermicheskogo perekhoda metastabil'nykh alyuminatnykh rastvorov v labil'nyy oblast' i perspektivy ego promyshlennogo ispol'zovaniya (*Phenomenon of isothermal transition of metastable aluminate races-tworow in labile region and the prospects for its industrial use*). Zapiski Gornogo instituta. 2016. Vol.217, p.80-87.
6. Belov N.A., Titov V.I. Vliyaniye kal'tsiya na strukturu i uprochneniye alyuminievykh splavov, legirovannykh tsinkom i mag-niem (*The influence of calcium on the structure and hardening of aluminum alloys doped with zinc and magnesium*). Tsvetnye metally. 2008. N 12, p.64-67.
7. Zolotarevskii S.V., Belov N.A. Metallovedeniye liteinykh alyuminievykh cplavov (*Physical Metallurgy of cast aluminum alloys*). MiSiS. Moscow, 2005, p.376.
8. Kulinich O.V. Fiziko-khimicheskie osnovy gidrokhimicheskoi pererabotki otkhodov, sodержashchikh alyuminiy (*Physico-chemical fundamentals of hydro-chemical processing of waste containing aluminum*). Avtoref. dis... kand. tekhn. nauk. Sankt-Peterburgskii tekhnologicheskii institut. St. Petersburg, 1998, p.21.
9. Luts A.R., Suslina A.A. Alyuminiy i ego splavy (*Aluminium and its alloys*). Samar. gos. tekhn. un-t. Samara, 2013, p.81.
10. Sizyakov V.M. Khimiko-tekhnologicheskije zakonomernosti protsessov spekaniya shchelochnykh alyumosilikatov i gid-rokhimicheskoi pererabotki spekov (*Chemical and technological regularities of the processes of sintering alkaline Alu-Basilicata and hydrochemical processing of cakes*). Zapiski Gornogo instituta. 2016. Vol.217, p.102-112.
11. Sizyakov V.M. Problemy razvitiya proizvodstva glinozema v Rossii (*Problems of development of alumina production in Russia*). I Mezhdunarodnyi kongress «Tsvetnye metally Sibiri-2009»: Sb. dokladov. Krasnoyarsk, 2009, p.120-134.
12. Sizyakov V.M. Modernizatsiya tekhnologii kompleksnoi pererabotki nefelinovykh kontsentratov na Pikalevskom gli-nozemom kombinatе (*Modernization of technology of complex processing of nepheline concentrates on Peak-Levski alumina plant*). II Mezhdunarodnyi kongress «Tsvetnye metally-2010»: Sb. dokladov. Krasnoyarsk, 2010, p.219-230.
13. Sizyakov V.M., Bazhin V.Yu. Tekhnologicheskije i metodologicheskije osnovy polucheniya alyuminiya na moshchnykh elek-trolizerakh (*Technological and methodological basis for the production of aluminium and on the powerful electrolysis-RAH*). Sankt-Peterburgskii gorniy universitet. 2011, p.130.
14. Fedorov V. Vtorichnyi alyuminiy – vazhnoe syr'e XXI veka! (*Recycled aluminium an important raw material of the XXI century!*). Vtorichnye resursy. 2001. N 4-5, p.58-59.
15. Eksperimental'nye dannye po rastvorimosti mnogokomponentnykh vodno-solevykh sistemchnik (*Experimental data on the solubility of multicomponent water-salt systems*). In 2 vols., 4 books. St. Petersburg: Khimizdat, 2003. Vol.1, book 2, p.609-1152.

Author A.I.Alekseev, Dr. of Engineering Sciences, Professor, alexeev@mail.ru (Saint-Petersburg Mining University, Russia). Manuscript Accepted 23.12.2015.



Электромеханика и машиностроение

УДК 662.6

ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОГО КОМПЛЕКСА

В.А.ЛЕБЕДЕВ

Санкт-Петербургский горный университет, Россия

В статье рассматриваются возможности повышения энергоэффективности систем энергообеспечения предприятий минерально-сырьевого комплекса.

В настоящее время в системах энергообеспечения предприятий минерально-сырьевого комплекса применяются различные типы энергетических установок малой и средней мощности. Основными типами установок являются газотурбинные, газопоршневые, дизельные, парогазовые, паротурбинные и др. Их основное назначение – обеспечение электроэнергией и теплом промышленных предприятий, технологических процессов и объектов социальной структуры. При выборе типа установки используются различные критерии – технические, экономические, надежностные и др. Часто приходится принимать во внимание климатические и географические факторы, например, при решении проблем с доставкой топлива [7]. В последнее время все чаще при выборе типа энергоустановки используется критерий энергоэффективности. Основным показателем при этом является эффективный КПД, рассчитываемый классическим методом тепловых балансов. В статье предлагается использовать эксергетический метод определения энергоэффективности, позволяющий выполнить как относительную (эксергетический КПД), так и абсолютную оценку степени термодинамического совершенства системы. В качестве примера рассмотрен эксергетический анализ паротурбинной энергоустановки как альтернативный вариант системы энергообеспечения предприятия.

Ключевые слова: энергоэффективность, теплосиловая установка, паротурбинная установка, методы термодинамического анализа, эксергия, эксергетический анализ, тепловой баланс, эксергетический баланс, коэффициент полезного действия.

Как цитировать эту статью: Лебедев В.А. Эксергетический метод оценки энергоэффективности оборудования систем энергообеспечения предприятий минерально-сырьевого комплекса // Записки Горного института. 2016. Т.219. С.435-443. DOI 10.18454/PMI.2016.3.435

Введение. Проблема повышения энергоэффективности и обеспечения сбережения энергоресурсов является приоритетной как для экономики страны в целом, так и для минерально-сырьевого комплекса в частности. В настоящее время развивается новое научное направление, в котором разрабатываются теоретические основы энергосбережения и энергоэффективности, а также накапливается опыт их практического внедрения [3, 4, 9, 10]. Основу научного направления составляет термодинамический анализ существующих или проектируемых систем, разработка тепловых схем на его основе, оптимизация параметров, интенсификация процессов теплопередачи и разработка новых энергоэффективных типов теплоэнергетического оборудования. При этом одним из основных вопросов является сравнительный анализ проектных и технических решений, проводимый по определенным термодинамическим показателям. Поэтому правильный и рациональный выбор метода анализа энергетических потерь в системах теплоэнергетики является залогом успешного решения поставленной задачи.

В настоящее время наиболее распространенным методом анализа является метод тепловых балансов, основанный на применении первого закона термодинамики. При расчете по этому методу составляются энергетические (тепловые) балансы, на основании которых определяются термодинамические показатели работы тепловых систем. Вместе с тем, являясь частным случаем закона сохранения массы и энергии, первый закон термодинамики не может дать ответа о степени термодинамического совершенства как отдельного элемента, так и всей теплоэнергетической системы [2]. Причиной этого является свойство энергии оставаться постоянной величиной в замкнутой системе, т.е. она не может создаваться или уничтожаться. В силу этого метод тепловых балансов может выявлять лишь потери энергии через границы замкнутой системы. При таком подходе уже возникают некоторые неудобства по определению критериев энергоэффективности. Например, для теплового двигателя мерой термодинамических потерь можно считать термический КПД, определяемый из соотношения

$$\eta_t = (Q_1 - Q_2) / Q_1, \quad (1)$$

где Q_1 – теплота, подведенная к рабочему телу от горячего источника; Q_2 – теплота, отведенная от рабочего тела к холодному источнику.

По определению КПД всегда меньше единицы. Однако, например, для холодильной установки таким критерием является холодильный коэффициент, для теплового насоса – коэффициент трансформации. Оба коэффициента больше единицы и не могут служить критерием термодинамического совершенства теплоэнергетического оборудования. Такой подход приводит к появлению большого количества различных по физическому смыслу коэффициентов и «к 35 КПД со слабой логической взаимосвязью» [6].

Дальнейшим развитием методов анализа эффективности теплоэнергетических систем явилось введение понятия «потеря работоспособности», впервые использованное еще в 1889 г. французским физиком М.Гюи. На этой идее основан энтропийный метод расчета потери работоспособности системы из-за необратимости рабочих процессов цикла. Гюи установил, что потеря работоспособности системы между источником работы и окружающей средой может быть определена из соотношения

$$\Delta L = T_0 \Delta S, \quad (2)$$

где T_0 – температура окружающей среды; ΔS – изменение энтропии рассматриваемой системы.

Это уравнение позже использовалось словацким теплотехником А. Стодолой в практических расчетах потери работоспособности в элементах энергетического оборудования. С тех пор уравнение (2) носит название уравнения Гюи – Стодолы.

В середине XX в. югославским ученым З.Рантом развит эксергетический метод расчета потери работоспособности системы и меры необратимости.

Эксергия – максимальная работа, которая может быть совершена при обратимом переходе какой-либо термодинамической системы из состояния с заданными параметрами в состояние равновесия с окружающей средой [2]. Кроме того, эксергия является мерой, учитывающей качество энергии.

Эксергетический метод позволяет учитывать различную ценность источников энергии или энергетических процессов в зависимости от параметров окружающей среды, составлять приходно-расходные балансы различных по своей физической природе видов энергии, количественно и качественно их сравнивать, определять необратимые потери в рабочих процессах, принимать режимные и конструктивные меры для снижения необратимых потерь или их недопущения.

В настоящее время идеи эксергетического подхода получили определенное развитие в отечественного и зарубежной инжиниринговой практике. На базе теплового (энтальпийного) и эксергетического анализа разработаны методики, основанные на определении энергии или эксергии потоков в исследуемой тепловой системе [12, 13]. Они используются также для построения энергетического или эксергетического баланса объектов, соединяемых этими потоками и позволяющих производить мониторинг этих объектов с точки зрения энергоэффективности, выявлять участки технологических процессов, где имеется потенциал энергосбережения. За рубежом, например, в Нидерландах, этот подход используется инженерными подразделениями таких крупных компаний, как «Shell», «Dow Chemical», «Unilever», «DSM», «AKZO NOBEL» и др., а также некоторыми крупными инженерными компаниями [14]. По отзывам специалистов, эксергетический анализ позволяет компаниям получить ценную информацию, но требует много времени. Кроме того, существует немного доступных данных, с которыми можно было бы сравнивать полученные результаты. Например, недостаток данных затрудняет сравнительный анализ эксергетических КПД. Разработано специализированное коммерческое программное обеспечение для расчета эксергии, использующее данные о технологических потоках из программного пакета для описания схем технологических процессов и позволяющее значительно ускорить соответствующий анализ. Однако стоимость указанного пакета высока, и его приобретение в настоящее время является оправданным лишь для немногих компаний.

Оценка эффективности энергетических процессов осуществляется на основе эксергетических балансов, отражающих равенство подведенной к системе эксергии и отведенной от нее эксергии и потерь.

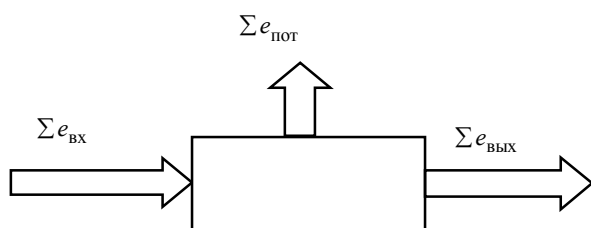


Рис. 1. Схема эксергетических балансов системы

Для составления эксергетического баланса необходимо знать технологическую схему установки или системы со всеми входящими и выходящими потоками вещества и энергии и их термодинамические параметры (рис. 1).

Для системы эксергетический баланс можно записать в виде

$$\Sigma e_{вх} = \Sigma e_{вых} + \Sigma e_{пот}, \quad (3)$$

где $\Sigma e_{вх}$ – суммарная эксергия на входе, вклю-



чающая эксергии вещества, энергетических потоков, теплоты, топлива и т.д.; $\sum e_{\text{вых}}$ – суммарная эксергия на выходе; $\sum e_{\text{пот}}$ – суммарная эксергия потерь.

Важнейшим показателем энергоэффективности системы является эксергетический КПД – отношение полезно усвоенной эксергии к затраченной:

$$\eta_e = \frac{\sum e_{\text{полезн}}}{\sum e_{\text{затр}}} = \frac{\sum e_{\text{затр}} - \sum e_{\text{пот}}}{\sum e_{\text{затр}}}. \quad (4)$$

Основные этапы эксергетического анализа и принятия решений:

- анализ всех энергоресурсов и энергоносителей, в том числе вторичных, в пределах одного технологического процесса и определение их термодинамических параметров;
- определение потерь эксергии на всех этапах преобразования и использования энергии во всех элементах технологических схем;
- определение эксергетических показателей технологических процессов и степени термодинамического совершенства технических систем, установок, аппаратов по проектным и эксплуатационным данным;
- оптимизация схемных решений и термодинамических параметров технологических процессов, агрегатов и систем.

Основные зависимости для расчета эксергии:

– Удельная эксергия вещества в объеме

$$e_v = (U - U_0) - T_0(S - S_0) + p_0(V - V_0), \quad (5)$$

где U , S и V – внутренняя энергия, энтропия и удельный объем рабочего тела соответственно; U_0 , S_0 , p_0 , V_0 – внутренняя энергия, энтропия, давление и удельный объем при температуре окружающей среды T_0 соответственно.

– Эксергия вещества в потоке

$$e_t = q - T_0(S - S_0)$$

или

$$(h - h_0) - T_0(S - S_0), \quad (6)$$

где q – удельный тепловой поток, переносимый рабочим телом.

– Эксергия химического источника энергии

$$e_x = KQ_B^{\text{cr}}, \quad (7)$$

где Q_B^{cr} – высшая теплота сгорания топлива; K – коэффициент, зависящий от вида топлива.

Например, для генераторного газа $K = 0,97$, для коксового газа $K = 1,0$, для природного газа $K = 1,04$ [11].

Для твердых топлив эксергия определяется по формуле

$$e_x = (1 - w)KQ_B^{\text{cr}}, \quad (8)$$

где w – влагосодержание.

– Эксергия теплового потока

$$e = q \left(1 - \frac{T_0}{T} \right). \quad (9)$$

Выражение $1 - \frac{T_0}{T}$ иногда называется эксергетической температурой.

Рассмотрим особенности, достоинства и недостатки эксергетического метода определения энергоэффективности конкретной теплоэнергетической системы по сравнению с традиционным (энтальпийным) методом тепловых балансов на примере тепловой конденсационной электростанции (ТЭС), работающей по циклу Ренкина [2, 8]. Схема паротурбинной установки (ПТУ) приведена на рис.2.

Тепловая ($T-S$) диаграмма процессов, происходящих в ПТУ, приведена на рис.3.

Основные процессы, происходящие в ПТУ:

- 1-2 – снижение параметров перегретого пара (потери) в паропроводе на участке котлоагрегат – турбина;
- 2-3 – расширение пара в турбине (полезная работа);



Рис.2. Схема РТУ

КА – котлоагрегат; Т – паровая турбина; Г – электрогенератор; К – конденсатор;
 ПН – питательный насос; ЭК – экономайзерный участок КА;
 ИСП – испарительный участок КА; ПЕ – перегревательный участок КА

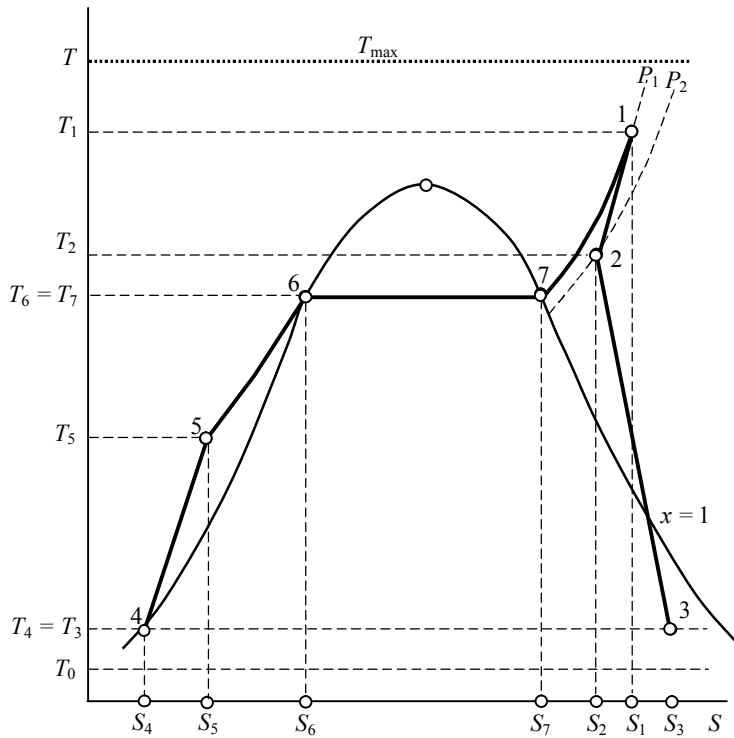


Рис.3. Тепловая диаграмма «условно-реального» цикла РТУ

- 3-4 – конденсация пара (отвод тепла в цикле) в конденсаторе;
- 4-5 – сжатие рабочего тела питательным насосом;
- 5-6 – нагревание рабочего тела (подвод тепла) в экономайзере котлоагрегата до температуры насыщения;
- 6-7 – испарение рабочего тела (подвод тепла) на испарительном участке котлоагрегата;
- 7-1 – перегрев пара (подвод тепла) на пароперегревательном участке котлоагрегата.

Исходные данные для термодинамических расчетов:

– давление перегретого пара на выходе из котельного агрегата $P_1 = 14$ МПа;

– температура перегретого пара на выходе из котельного агрегата $t_1 = 540$ °С;

– давление перегретого пара на входе в турбину $P_2 = 13,5$ МПа;

– температура перегретого пара на входе в турбину $t_2 = 525,7$ °С;

– расход пара $D = 220$ т/ч;

– давление в конденсаторе

$P_3 = 3,5$ кПа;

– топливо – природный газ с нижней теплотой сгорания

$Q_n^p = 35,5$ МДж/кг;

– расход топлива $B = 6,25$ кг/с;

– максимальная температура продуктов горения $t^{\max} = 2000$ °С;

– температура окружающей среды $t_0 = 10$ °С;

– давление окружающей среды $P_0 = 0,1$ МПа;

– параметры и функции состояния рабочего тела в характерных точках цикла с учетом необратимости процессов определены по [1] и приведены в таблице.

Термодинамические параметры состояния и свойства рабочего тела в характерных точках цикла Ренкина

Номер точки на диаграмме цикла	Параметры					
	p , МПа	t , °С	T , К	Состояние рабочего тела	h , кДж/кг	S , кДж/(кг·К)
Точка 1	14	540	813,15	Перегретый пар	3434,16	6,532
Точка 2	13,5	525,7	798,85	Перегретый пар	3401,13	6,5063
Точка 3	0,0035	26,67	299,82	$x = 0,84535$	2172,53	7,2647
Точка 4, $x = 0$	0,0035	26,67	299,82	Конденсат на левой пограничной кривой, $x = 0$	111,82	0,391
Точка 5	16,2	27,7	300,85	Недогретая до насыщения вода	130,88	0,400
Точка 6	15,2	343,2	616,37	Кипящая вода на левой пограничной кривой, $x = 0$	1618,06	3,698
Точка 7	15,2	343,2	616,37	Сухой насыщенный пар на правой пограничной кривой, $x = 1$	2604,95	5,298
Точка 0	0,1	10	283,15	Вода	42,12	0,151



Энергоэффективность паротурбинной установки может быть оценена с помощью уравнения теплового баланса

$$q_{\text{топл}} = l_3 + q_{\text{конд}} + \Delta q_{\Gamma} + \Delta q_{\text{м}} + \Delta q_{\text{п.п}} + \Delta q_{\text{к}}, \quad (10)$$

где $q_{\text{топл}}$ – теплота, выделяемая при сжигании топлива; l_3 – полезная работа (электроэнергия), отданная во внешнюю сеть; $q_{\text{конд}}$ – теплота, отдаваемая холодному источнику (в конденсаторе); Δq_{Γ} – механические и электрические потери в электрогенераторе; $\Delta q_{\text{м}}$ – механические потери в турбине; $\Delta q_{\text{п.п}}$ – потери теплоты в паропроводе; $\Delta q_{\text{к}}$ – потери в котлоагрегате.

В такой постановке КПД всей ПТУ определяется по формуле

$$\eta_{\text{ПТУ}} = \frac{l_3}{q_{\text{топл}}}. \quad (11)$$

Вместе с тем КПД всей паротурбинной установки равно произведению КПД составляющих ее элементов:

$$\eta_{\text{ПТУ}} = \eta_{\text{к}} \eta_{\text{п.п}} \eta_{\Gamma} \eta_{\text{м}} \eta_{\text{ц}}, \quad (12)$$

где $\eta_{\text{к}}$ – КПД котлоагрегата; $\eta_{\text{п.п}}$ – КПД паропровода, η_{Γ} – КПД электрогенератора, $\eta_{\text{м}}$ – механический КПД турбины, $\eta_{\text{ц}}$ – КПД цикла ПТУ с учетом необратимых потерь.

Потери теплоты в элементах ПТУ определим с помощью метода коэффициентов полезного действия [6] на основании (12).

КПД цикла с учетом необратимости

$$\eta_{\text{ц}} = \frac{(h_2 - h_3) - (h_5 - h_4)}{h_2 - h_5}, \quad (13)$$

где $\eta_{\text{ц}} = 0,37$ или 37 %.

Механические потери в турбине учитываются $\eta_{\text{м}}$. Примем $\eta_{\text{м}} = 0,98$.

Тогда эффективный КПД турбины $\eta_{\Gamma} = \eta_{\text{ц}} \eta_{\text{м}}$, $\eta_{\Gamma} = 0,36$.

Механические и электрические потери в электрогенераторе учитываются η_{Γ} . Примем $\eta_{\Gamma} = 0,98$.

Электрический КПД турбогенераторной установки $\eta_{\text{тг}} = \eta_{\Gamma} \eta_{\Gamma}$; $\eta_{\text{тг}} = 0,35$.

По определению $\eta_{\text{тг}} = \frac{l_3}{q_1}$, где $q_1 = h_2 - h_5$ – теплота, подведенная к циклу.

Таким образом, $l_3 = (h_2 - h_5) \eta_{\text{тг}}$; $l_3 = 1144,9$ кДж/кг.

КПД паропровода

$$\eta_{\text{п.п}} = \frac{h_2 - h_5}{h_1 - h_5}; \quad \eta_{\text{п.п}} = 0,99.$$

КПД котлоагрегата

$$\eta_{\text{к}} = \frac{h_1 - h_5}{q_{\text{топл}}}.$$

Теплота, выделяемая при сжигании топлива в котле, приведенная к 1 кг рабочего тела

$$q_{\text{топл}} = \frac{BQ_{\text{h}}^{\text{p}}}{D}; \quad q_{\text{топл}} = 3629,9 \text{ кДж/кг}.$$

Тогда КПД котлоагрегата будет $\eta_{\text{к}} = 0,91$ или 91 %.

Определим составляющие уравнения теплового баланса ПТУ:

- потери теплоты в котле $\Delta q_{\text{к}} = (1 - \eta_{\text{к}}) q_{\text{топл}}$; $\Delta q_{\text{к}} = 326,7$ кДж/кг;

- потери теплоты в паропроводе $\Delta q_{\text{п.п}} = \eta_{\text{к}} (1 - \eta_{\text{п.п}}) q_{\text{топл}}$; $\Delta q_{\text{п.п}} = 33,03$ кДж/кг;

- механические потери в турбине $\Delta q_{\text{м}} = \eta_{\text{к}} \eta_{\text{п.п}} \eta_{\text{ц}} (1 - \eta_{\text{м}}) q_{\text{топл}}$; $\Delta q_{\text{м}} = 24,2$ кДж/кг;

- механические и электрические потери в электрогенераторе: $\Delta q_{\Gamma} = \eta_{\text{к}} \eta_{\text{п.п}} \eta_{\text{м}} \eta_{\text{ц}} (1 - \eta_{\Gamma}) q_{\text{топл}}$; $\Delta q_{\Gamma} = 23,7$ кДж/кг;

- теплота, отданная в конденсаторе $\Delta q_{\text{конд}} = \eta_{\text{к}} \eta_{\text{п.п}} (1 - \eta_{\Gamma}) q_{\text{топл}}$; $\Delta q_{\text{конд}} = 2060,2$ кДж/кг.

Если принять $\Delta q_{\text{топл}}$ за 100 %, то соотношение потерь теплоты в элементах составит: $\Delta q_{\text{к}} = 9$ %; $\Delta q_{\text{п.п}} = 0,91$ %; $\Delta q_{\text{м}} = 0,67$ %; $\Delta q_{\Gamma} = 0,65$ %; $q_{\text{конд}} = 56,8$ %.

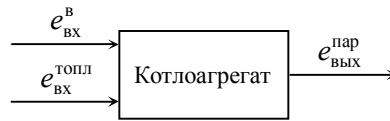
Таким образом, в полезную работу (электроэнергию) превращено 32 % затраченной теплоты сгоревшего топлива.



Определим эксергетический баланс ПТУ.

Эксергии потоков рабочих сред определяются по уравнению (6), а эксергии потоков теплоты – по (9)

Котлоагрегат. На входе – питательная вода, имеющая эксергию $e_{\text{ВХ}}^{\text{В}}$ и топливо с эксергией $e_{\text{ВХ}}^{\text{ТОПЛ}}$. На выходе – перегретый пар с эксергией $e_{\text{ВЫХ}}^{\text{ПАР}}$:



Здесь $e_{\text{ВХ}}^{\text{В}} = (h_5 - h_0) - T_0(S_5 - S_0)$, $e_{\text{ВХ}}^{\text{В}} = 18,26$ кДж/кг; $e_{\text{ВХ}}^{\text{ТОПЛ}} = q_{\text{ТОПЛ}}(1 - \frac{T_0}{T})$, $e_{\text{ВХ}}^{\text{ТОПЛ}} = 3184,23$ кДж/кг;

$e_{\text{ВЫХ}}^{\text{ПАР}} = (h_1 - h_0) - T_0(S_1 - S_0)$; $e_{\text{ВЫХ}}^{\text{ПАР}} = 1585,26$ кДж/кг.

Потери эксергии в котлоагрегате составляют $e_{\text{К}} = e_{\text{ВХ}}^{\text{В}} + e_{\text{ВХ}}^{\text{ТОПЛ}} - e_{\text{ВЫХ}}^{\text{ПАР}}$, $\Delta e_{\text{К}} = 1617,23$ кДж/кг.

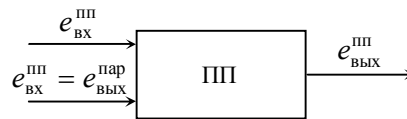
Наблюдаются два вида потерь эксергии в котле – потери в окружающую среду $\Delta e_{\text{К}}^{\text{ОКР}}$ (несовершенство термоизоляции конструкций и т.д.) и потери за счет необратимостей тепловых процессов

$e_{\text{К}}^{\text{НЕОБР}}$ (химический и механический недожог топлива и др.): $\Delta e_{\text{К}}^{\text{ОКР}} = (1 - \eta_{\text{К}})q_{\text{ТОПЛ}}(1 - \frac{T_0}{T})$,

$\Delta e_{\text{К}}^{\text{ОКР}} = 286,58$ кДж/кг; $\Delta e_{\text{К}}^{\text{НЕОБР}} = \Delta e_{\text{К}} - \Delta e_{\text{К}}^{\text{ОКР}}$, $\Delta e_{\text{К}}^{\text{НЕОБР}} = 1330,65$ кДж/кг.

Эксергетический КПД котлоагрегата $\eta_{\text{е}}^{\text{К}} = \frac{e_{\text{ВЫХ}}^{\text{ПАР}}}{e_{\text{ВХ}}^{\text{В}} + e_{\text{ВХ}}^{\text{ТОПЛ}}}$, $\eta_{\text{е}}^{\text{К}} = 0,495$.

Паропровод. На входе – пар с эксергией $e_{\text{ВХ}}^{\text{ПАР}} = e_{\text{ВЫХ}}^{\text{ПАР}}$, на выходе – пар с эксергией $e_{\text{ВЫХ}}^{\text{ПП}}$:

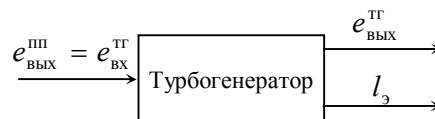


Здесь $e_{\text{ВЫХ}}^{\text{ПП}} = (h_2 - h_0) - T_0(S_2 - S_0)$; $e_{\text{ВЫХ}}^{\text{ПП}} = 1558,46$ кДж/кг.

Потери эксергии в паропроводе $e_{\text{П}} = e_{\text{ВЫХ}}^{\text{ПАР}} - e_{\text{ВЫХ}}^{\text{ПП}}$, $e_{\text{П}} = 26,8$ кДж/кг.

Эксергетический КПД паропровода $\eta_{\text{е}}^{\text{П}} = \frac{e_{\text{ВЫХ}}^{\text{ПП}}}{e_{\text{ВХ}}^{\text{ПАР}}}$; $\eta_{\text{е}}^{\text{П}} = 0,98$.

Турбогенераторная установка. На входе – перегретый пар из паропровода с эксергией $e_{\text{ВЫХ}}^{\text{ПП}} = e_{\text{ВХ}}^{\text{ТГ}}$. На выходе – полезная работа l_3 и отработанный пар с эксергией $e_{\text{ВЫХ}}^{\text{ТГ}}$:



Здесь $e_{\text{ВЫХ}}^{\text{ТГ}} = (h_3 - h_0) - T_0(S_3 - S_0)$, $e_{\text{ВЫХ}}^{\text{ТГ}} = 116,17$ кДж/кг.

Потери эксергии в турбогенераторной установке $\Delta e^{\text{ТГ}} = \Delta e_{\text{ВЫХ}}^{\text{ТГ}} - \Delta e_{\text{ВЫХ}}^{\text{ТГ}} - l_3$, $\Delta e^{\text{ТГ}} = 278,39$ кДж/кг.

Потери эксергии в турбогенераторной установке обусловлены тремя факторами:

1. Потери эксергии за счет механических потерь в турбине $\Delta e_{\text{М}}^{\text{ТГ}} = (h_2 - h_3)(1 - \eta_{\text{М}})$, $\Delta e_{\text{М}}^{\text{ТГ}} = 24,57$ кДж/кг.

2. Потери эксергии за счет механических и электрических потерь в электрогенераторе $\Delta e_{\text{Г}}^{\text{ТГ}} = (h_2 - h_3)\eta_{\text{М}}(1 - \eta_{\text{Г}})$, $\Delta e_{\text{Г}}^{\text{ТГ}} = 24,08$ кДж/кг.

3. Потери, связанные с необратимостью расширения пара в турбине $\Delta e_{\text{ПАР}}^{\text{ТГ}} = \Delta e^{\text{ТГ}} - \Delta e_{\text{Г}}^{\text{ТГ}}$, $\Delta e_{\text{ПАР}}^{\text{ТГ}} = 229,74$ кДж/кг.

Таким образом, основные потери эксергии в турбогенераторной установке связаны с необратимостью процесса расширения пара в турбине.

Эксергетический КПД турбогенераторной установки $\eta_e^{ТГ} = \frac{l_3}{e_{ВХ}^{ТГ} - e_{ВЫХ}^{ТГ}}$, $\eta_e^{ТГ} = 0,81$.

Конденсатор. На входе – пар от турбогенераторной установки с эксергией $e_{ВЫХ}^{ТГ} = e_{ВХ}^{КОНД}$, на выходе – конденсат с эксергией $e_{ВЫХ}^{КОНД}$:



Здесь $e_{ВЫХ}^{КОНД} = (h_4 - h_0) - T_0(S_4 - S_0)$, $e_{ВЫХ}^{КОНД} = 1,74$ кДж/кг.

Потери эксергии в конденсаторе $\Delta e^{КОНД} = e_{ВХ}^{КОНД} - e_{ВЫХ}^{КОНД}$, $\Delta e^{КОНД} = 114,43$ кДж/кг.

Питательный насос. На входе – конденсат с эксергией $e_{ВЫХ}^{КОНД} - e_{ВХ}^{ПН}$. Кроме того, для работы насоса извне подводится энергия в виде работы l_H . На выходе – питательная вода с эксергией, равной эксергии воды на входе в котлоагрегат $e_{ВЫХ}^{ПН} = e_{ВХ}^B$:



Здесь $l_H = h_5 - h_4$, $l_H = 19,06$ кДж/кг.

Потери эксергии в питательном насосе $\Delta e^{ПН} = e_{ВХ}^{ПН} + l_H - e_{ВЫХ}^{ПН}$, $\Delta e^{ПН} = 2,54$ кДж/кг.

Эксергетический КПД питательного насоса $\eta_e^{ПН} = \frac{e_{ВЫХ}^{ПН} - e_{ВХ}^{ПН}}{l_H}$, $\eta_e^{ПН} = 0,87$.

По аналогии с потерями теплоты определим вклад каждого элемента ПТУ в потери эксергии всей установки.

Примем за 100% эксергию сжигаемого в котле топлива $e_{ВХ}^{ТОПЛ}$. Тогда потери эксергии в отдельных элементах ПТУ составят: $\Delta e_K - 51\%$; $\Delta e_{ВЫХ}^{ПН} - 0,84\%$; $\Delta e^{ТГ} - 8,74\%$; $\Delta e^{КОНД} - 3,59\%$; $\Delta e^{ПН} - 0,079\%$.

Таким образом, в полезную работу превращено 35,9% затраченной эксергии топлива.

Сравнительный анализ результатов теплового баланса и баланса эксергии в ПТУ показывает, что основными элементами, влияющими на энергоэффективность установки, являются котлоагрегат и

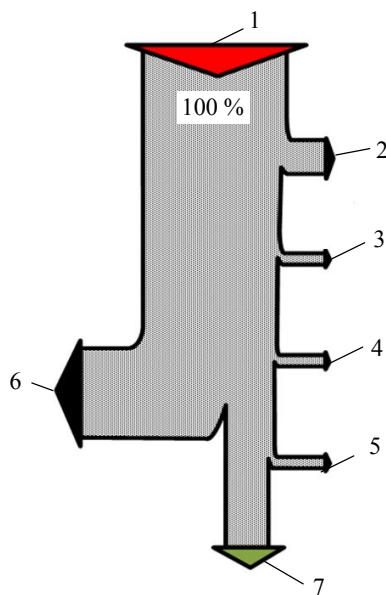


Рис.4. Диаграмма тепловых потерь в ПТУ

1 – теплота топлива; 2 – потери в котле (9%); 3 – потери в паропроводе (0,91%); 4 – механические потери в турбине (0,67%); 5 – потери в генераторе (0,65%); 6 – теплота, отданная в конденсаторе (56,8%); 7 – превращение в электроэнергию (32%)

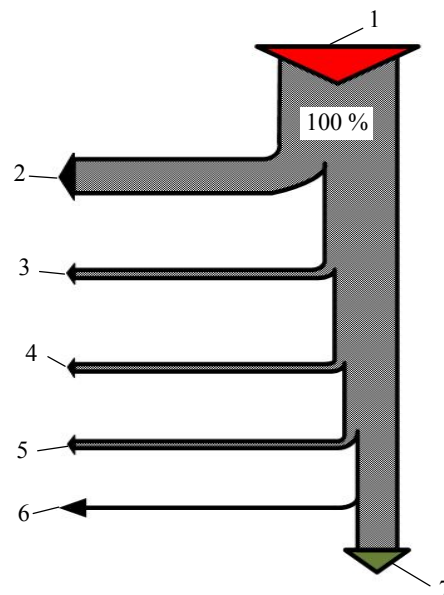


Рис.5. Диаграмма потоков эксергии в ПТУ

1 – эксергия теплоты, выделившейся при сгорании топлива; 2 – потери в котле (51%); 3 – потери в паропроводе (0,84%); 4 – потери в турбоэлектрогенераторе (8,74%); 5 – потери в конденсаторе (3,59%); 6 – потери в насосе (0,079%); 7 – полезная работа (35,8%)



конденсатор (рис.4, 5). С точки зрения потерь теплоты (что соответствует первому закону термодинамики), котлоагрегат является весьма совершенным агрегатом с термическим КПД, равным 91%. Кажущееся благополучие не вскрывает существо энергетических превращений в рассматриваемой системе и не позволяет правильно обосновать основные направления совершенствования как системы в целом, так и отдельных ее элементов. Вместе с тем с точки зрения потерь эксергии (что обусловлено вторым законом термодинамики) именно в котле теряется 51 % всей эксергии, отдаваемой топливом при его сжигании. А ведь именно эксергия характеризует возможность источника энергии к совершению работы. Такой низкий эксергетический КПД котла ($\eta_e^k = 0,495$) связан, в основном, с необратимыми потерями при сгорании топлива и теплопередачей от высокотемпературных продуктов сгорания к воде и водяному пару. Таким образом, эксергетический анализ котла показывает пути повышения его термодинамической эффективности за счет схемных и конструктивных решений. Решающим фактором будет уменьшение перепада температур между источником тепла и рабочим телом. Это можно сделать путем увеличения параметров пара, вырабатываемого в паровом котле, схемных решений (регенеративный подогрев конденсата, промежуточный перегрев пара и др.) и применением комбинированных циклов теплосиловых установок (бинарные ПТУ, парогазовые установки, установки с МГД-генераторами и т.д.).

Вторым элементом ПТУ, в котором проявляется противоречие двух подходов к анализу энергоэффективности теплосиловой установки, является конденсатор. Действительно, в конденсаторе отводится большое количество теплоты (56,8%). Однако рабочее тело в конденсаторе отдает низкопотенциальное тепло и, как показывает эксергетический анализ, обладает низкой эксергией (потери эксергии в конденсаторе составляют лишь 3, 59%), что делает его малоприспособленным к дальнейшему производству работы. Вместе с тем большое количество отдаваемого низкопотенциального тепла позволяет перспективно использовать его в системах теплоснабжения, теплонасосных системах и др.

Выводы. Эксергетический анализ позволяет выявить наиболее слабые элементы теплосиловой установки с точки зрения энергоэффективности и определить меры и конструкторские решения по повышению их термодинамического совершенства.

Вместе с тем эксергетический метод анализа имеет и недостатки. В частности, с его помощью достаточно сложно определять связи между эксергетическим КПД сложной системы и эксергетическими КПД ее элементов. Определение КПД системы, как произведение КПД входящих в нее элементов, будет истинно только для достаточно простых систем без промежуточных отводов и подводов эксергии в отдельных элементах теплосиловой установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров А.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: Справочник / А.А.Александров, Б.А.Григорьев / МЭИ. М., 2006. 165 с.
2. Александров А.А. Термодинамические основы циклов теплоэнергетических установок / МЭИ. М., 2004. 158 с.
3. Бехрендт Ц. Термодинамический анализ использования тепла в комбинированных энергетических установках / Ц.Бехрендт, А.В.Моторный // Повышение эффективности работы энергетических установок: Междунар. сб. науч. тр. / КГТУ. Калининград, 2002. С.38-47.
4. Данилов Н.И. Основы энергосбережения / Н.И.Данилов, Я.М.Щелоков. Екатеринбург: Издательский дом «Автограф», 2010. 528 с.
5. Казаков В.Г. Эксергетические методы оценки эффективности теплотехнологических установок / В.Г.Казаков, П.В.Луканин, О.С.Смирнова / СПб ГТУРП. СПб, 2013. 93 с.
6. Кириллин В.А. Техническая термодинамика / В.А.Кириллин, В.В.Сычев, А.Е.Шейндлин / МЭИ. М., 2008. 495 с.
7. Лебедев В.А. Комплексное энергоснабжение при бурении скважин в осложненных климатических условиях / В.А.Лебедев, Е.Л.Леушева, В.А.Моренов // Записки Горного института. 2015. Т. 213. С.47-54.
8. Лебедев В.А. Оценка эффективности основных элементов оборудования паросилового цикла тепловой электростанции эксергетическим методом / В.А.Лебедев, В.С.Дресвянкин, В.С.Карабута // Молодой ученый. 2016. № 1 (105). Ч.II. С.179-183.
9. Меркер Э.Э. Энергосбережение в промышленности и эксергетический анализ технологических процессов / Э.Э.Меркер, Г.А.Карпенко, И.М.Тынников / ООО «ТНТ», Старый Оскол, 2007. 316 с.
10. Морозюк Т.В. Углубленный эксергетический анализ – современная потребность оптимизации энергопреобразующих систем / Т.В.Морозюк, Д.Тсатсаронис // Промышленная теплотехника. 2005. Т.27. N 2. С.88-92.
11. Сажин Б.С. Метод термодинамического анализа промышленных систем, рассматриваемых во взаимодействии с окружающей средой / Б.С.Сажин, А.П.Булеков [Электронный ресурс]. URL: http://www.chemport.ru/data/chemipedia/article_6513.html (дата обращения 08.11.2015).
12. Черноусов П.И. Рециклинг. Технологии переработки и утилизации техногенных образований и отходов в черной металлургии. М.: Изд. дом «МИСиС», 2011. 428 с.
13. Энтальпийный и эксергетический анализ. Экспертный портал по вопросам энергосбережения [Электронный ресурс]. URL: <http://gisee.ru/articles/sub-methods/779/> (дата обращения 18.12.2015).
14. Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency [Электронный ресурс]. URL: <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/> (дата обращения 22.12.2015).



Автор В.А.Лебедев, канд. техн. наук, профессор, lebedev_va@spmi.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Россия)

Статья принята к публикации 9.02.2016.

EXERGY METHOD TO EVALUATE THE EFFICIENCY OF THE EQUIPMENT OF POWER SUPPLY SYSTEMS OF ENTERPRISES OF MINERAL-RAW COMPLEX

V.A.LEBEDEV

Saint-Petersburg Mining University, Russia

The article considers the question of increase of efficiency of systems of energy enterprises of the mineral complex. Currently, the systems of energy enterprises of the mineral complex uses various types of power installations of low and medium power. The main types are gas turbine, gas, diesel, combined cycle, steam turbine and others. Their main purpose is to provide electricity and heat to industrial enterprises, technological processes and social structures. When choosing the type of installation uses a variety of criteria – technical, economic, reliability and other. Often it is necessary to take into account the climatic and geographical factors, for example, problems with fuel delivery [7]. In recent times when selecting the type of plants used criterion of energy efficiency. The main indicator is the effective efficiency calculated by the classical method of heat balances. The article proposes the use of exergy method of determining energy efficiency, allowing to perform relative (exergetic efficiency) and absolute evaluation of the degree of thermodynamic perfection of the system. As an example, considered exergy analysis of steam turbine power as an alternative energy supply systems of enterprises.

Key words: energy efficiency, thermal power plant, steam turbine, methods of thermodynamic analysis, exergy, exergy analysis, heat balance, exergy balance, efficiency.

How to cite this article: V.A.Lebedev. Exergy method to evaluate the efficiency of the equipment of power supply systems of enterprises of mineral-raw complex. Zapiski Gornogo instituta. 2016. Vol.219, p.435-443. DOI 10.18454/PMI.2016.3.435

REFERENCES

1. Aleksandrov A.A., Grigor'ev B.A. Tablicy teplofizicheskikh svoystv vody i vodjanogo para: spravochnik (*Tables of thermo-physical properties of water and steam: the manual*). MJeI. Moscow, 2006, p.165.
2. Aleksandrov A.A. Termodinamicheskie osnovy ciklov teplojenergeticheskikh ustanovok (*Fundamentals of Thermodynamic cycles of thermal power plants*). MJeI. Moscow, 2004, p.158.
3. Behrendt C., Motornyj A.V. Termodinamicheskij analiz ispol'zovaniya tepla v kombinirovannykh jenergeticheskikh ustanovkakh (*Thermodynamic analysis of the use of heat in combined power plants*). Povyshenie jeffektivnosti raboty jenergeticheskikh ustanovok: Mezhdunar. sb. nauch. tr. KGTU. Kaliningrad, 2002, p.38-47.
4. Danilov N.I., Shhelokov Ja.M. Osnovy jenergosberezhenija (*Basis of energy conservation*). Ekaterinburg: Izdatel'skij dom «Avtograf», 2010, p.528.
5. Kazakov V.G., Lukanin P.V., Smirnova O.S. Jeksergeticheskie metody ocenki jeffektivnosti teplotehnologicheskikh ustanovok (*Exergy methods for assessing the effectiveness of thermal technology installations*). SPb GTURP. St. Petersburg, 2013, p.93.
6. Kirillin V.A., Sychev V.V., Shejndlin A.E. Tehnicheskaja termodinamika (*Engineering thermodynamics*). MJeI. Moscow, 2008, p.495.
7. Lebedev V.A., Leusheva E.L., Morenov V.A. Kompleksnoe jenergosnabzhenie pri burenii skvazhin v oslozhnennykh klimaticeskikh uslovijah (*Integrated energy supply for drilling wells in complicated climatic conditions*). Zapiski Gornogo instituta. 2015. Vol.213, p.47-54.
8. Lebedev V.A., Dresvjankin V.S., Karabuta V.S. Ocenka jeffektivnosti osnovnykh jelementov oborudovaniya parosilovogo cikla teplovoj jelektrostantsii jeksergeticheskim metodom (*Evaluation of the effectiveness of key elements of equipment of the steam cycle of a thermal power plant exergy method*). Molodoj uchenyj. 2016. N 1 (105). Part II, p.179-183.
9. Merker Je.Je., Karpenko G.A., Tynnikov I.M. Jenergosberezhenie v promyshlennosti i jeksergeticheskij analiz tehnologicheskikh processov (*Energy efficiency in industry and exergy analysis of technological processes*). OOO «TNT», Staryj Oskol, 2007, p.316.
10. Morozjuk T.V., Tsatsaronis D. Uglublennyj jeksergeticheskij analiz – sovremennaja potrebnost' optimizacii jenergopreobrazujushchih sistem (*Advanced exergy analysis is the modern need of optimization of energy conversion systems*). Promyshlennaja teplotehnika. 2005. Vol.27. N 2, p.88-92.
11. Sazhin B.S., Bulekov A.P. Metod termodinamicheskogo analiza promyshlennykh sistem, rassmatrivaemykh vo vzaimodejstvii s okruzhajushhej sredoj (*Method of thermodynamic analysis of industrial systems under consideration in interaction with the environment*) [Elektronnyj resurs]. Available at: http://www.chemport.ru/data/chemipedia/article_6513.html (data obrashhenija 08.11.2015).
12. Chernousov P.I. Recikling. Tehnologii pererabotki i utilizacii tehnogennykh obrazovaniy i othodov v chernoj metallurgii (*Recycling. Technologies of processing and recycling of technogenic formations and wastes in ferrous metallurgy*). Moscow: Izd. dom «MISI», 2011, p.428.
13. Jental'p'ijnyj i jeksergeticheskij analiz. Jekspertnyj portal po voprosam jenergosberezhenija (*Enthalpy and exergy analysis. The expert portal on energy conservation*) [Elektronnyj resurs]. Available at: <http://gisee.ru/articles/sub-methods/779/> (data obrashhenija 18.12.2015).
14. Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency (*Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency*) [Elektronnyj resurs]. Available at: <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/> (data obrashhenija 22.12.2015).

Author V.A.Lebedev, PhD in Engineering Sciences, Professor, lebedev_va@spmi.ru (Saint-Petersburg Mining University, Russia). Manuscript Accepted 9.02.2016.



УДК 656.13:338.47; 656.13:658

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЯ

Т.А.МЕНУХОВА¹, А.И.СОЛОДКИЙ²

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Россия

² Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Россия

В статье представлен алгоритм определения рационального срока эксплуатации автомобиля через взаимосвязь показателей качества автомобиля и показателей экономической эффективности. В качестве комплексного показателя качества автомобиля рассматривается коэффициент технического использования, затраты на эксплуатацию определяют эффективность его использования.

Методика оперативного анализа затрат содержит ряд особенностей и позволяет достичь сопоставимости результатов определения пробега эффективной эксплуатации автотранспортных средств в процессе планирования, корректирования и конкретизации для анализа состояния автотранспортных средств и организации управляющих воздействий в системе управления жизненным циклом автомобиля на этапе его эксплуатации.

Ключевые слова: экономическая эффективность, коэффициент технического использования, система управления, жизненный цикл, автомобиль.

Как цитировать эту статью: Менухова Т.А. Экономическая эффективность эксплуатации автомобиля / Т.А.Менухова, А.И.Солодкий // Записки Горного института. 2016. Т.219. С.444-448. DOI 10.18454/PMI.2016.3.444

Введение. Сохранение (обеспечение) необходимого уровня эффективности эксплуатации автомобиля требует определенных технических воздействий. Изменение объемов этих воздействий отражается зависимостью коэффициента технического использования автомобиля от времени эксплуатации автомобиля. В свою очередь эффективность автомобиля аналитически связана с затратами на поддержание автомобиля на требуемом уровне качества [1-4]. Тогда возникает необходимость сформировать аппарат взаимосвязи комплексных показателей качества автомобиля и экономических показателей эффективности. В качестве комплексного показателя качества автомобиля рассматривается коэффициент технического использования, а затраты на эксплуатацию определяют эффективность его использования.

Методика исследований. Многочисленные теоретические исследования показали, что коэффициент технического использования автомобиля изменяется во времени эксплуатации по экспоненциальному закону:

$$k_{\text{ти}}(t) = k_{\text{ти}}(0)e^{-\beta t},$$
$$k_{\text{ти}}(0) = 1,$$

где $k_{\text{ти}}(0)$ – значение коэффициента технического использования в начале эксплуатации.

Коэффициент технического использования автомобиля связан с его пробегом линейной функцией [5-7]

$$k_{\text{ти}}(L) = 1 - \alpha L,$$

где α – параметр, характеризующий изменение коэффициента технического использования в зависимости от пробега автомобиля L .

Рассмотрим динамику затрат на техническое обслуживание и текущий ремонт (ТО и ТР) в зависимости от времени эксплуатации. Затраты на ТО и ТР экспоненциально возрастают, существует аналитическая связь между затратами суммарными, связанными с технической эксплуатацией автомобиля в момент списания, и коэффициентом технического использования, соответственно,

$$R(t) = R_0 e^{\beta t},$$
$$R_c = \frac{R_0 l_c}{k_{\text{ти}_{\min}}},$$

где R_0 – затраты на ТО и ТР нового автомобиля, руб./1000 км; R_c – затраты на ТО и ТР, которые будут к моменту списания l_c , руб./1000 км.

Пробег до списания автомобиля будет определяться выражением

$$k_{\text{ти}_{\min}}(L) = 1 - \alpha L_c,$$

где L_c – предполагаемый пробег до списания автомобиля, км.

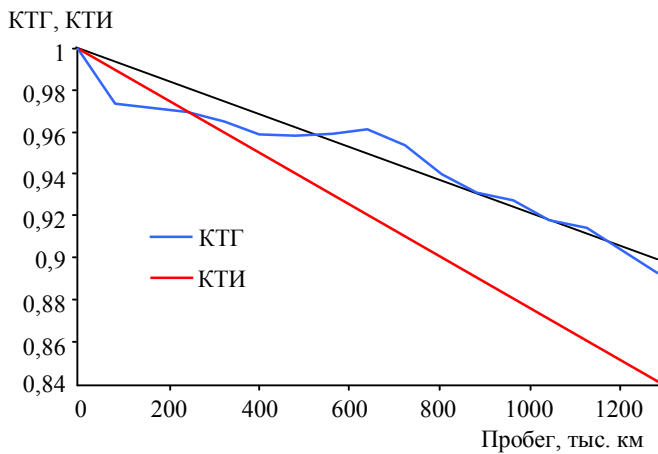


Рис.1. Изменение значений КТГ и КТИ в зависимости от пробега автомобиля

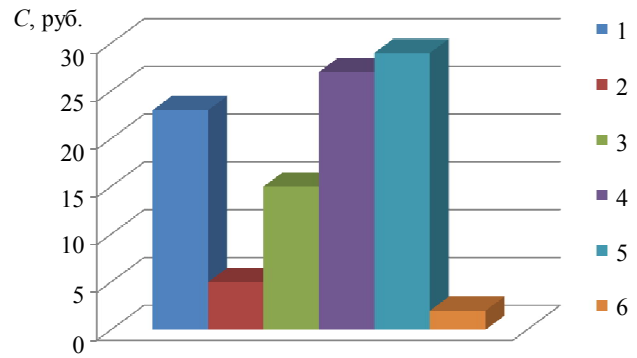


Рис.2. Распределение эксплуатационных затрат
1 – затраты на ТО и ТР; 2 – амортизация основных фондов;
3 – накладные расходы; 4 – затраты на топливо;
5 – зарплата основная; 6 – износ и ремонт шин

Были проведены экспериментальные исследования для группы автомобилей Scania. Изменение значения коэффициента технической готовности (КТГ) происходит по линейному закону:

$$k_{тг}(L) = 1 - 0,000079L.$$

С учетом аналитической связи КТГ с коэффициентом технического использования автомобиля (КТИ) и данных исследуемого предприятия определим зависимость между КТИ и пробегом автомобиля (рис.1):

$$k_{ти} = k_{тг}k_{пп},$$

где $k_{пп}$ – коэффициент планируемого применения автомобиля

$$k_{пп}(L) = 1 - 0,000125L.$$

Определим затраты на эксплуатацию автомобиля на соответствующих интервалах (рис.1) пробега.

На рис.2 представлено распределение эксплуатационных затрат, по данным предприятия связанных с эксплуатацией подвижного состава, что говорит о высоком удельном весе затрат на топливо, ТО и на заработную плату водителей.

В себестоимости перевозок доля затрат по переменным статьям составляет, как правило, более 75 %.

В данном исследовании решаются задачи, связанные с затратами на обеспечение надежной работы автомобилей. В этом случае за критерий эффективности можно принять суммарные удельные затраты на 1000 км пробега автомобиля, т.е.

$$C_{уд} = \frac{C_{ш} + C_{т} + C_{ТО} + C_{ТР} + C_{ам}}{L},$$

где $C_{ш}$ – затраты на шины, руб.; $C_{т}$ – затраты на топливо и эксплуатационные материалы, руб.; $C_{ТО}$ – затраты на ТО, руб.; $C_{ТР}$ – затраты на ТР, руб.; $C_{ам}$ – амортизационные отчисления, руб.; L – пробег автомобиля, 1000 км.

На рис.3 представлены затраты на эксплуатацию автомобиля без учета стоимости запасных частей и агрегатов, заменяемых на автомобиле при проведении ремонтных работ:

- затраты ТР1, определяемые при реализации метода оперативного анализа удельной трудоемкости ТО и ТР;
- затраты ТР2, определяемые в случае применения в качестве расчетного цикла пробега автомобиля с начала эксплуатации до момента фиксации значения удельной трудоемкости ТО и ТР.

Следует отметить два обстоятельства:

- Речь идет об одной группе автомобилей, но рассматриваются два различных метода определения удельной трудоемкости работ по ТР, поэтому принимается следующее допущение: затраты на ТО, шины, топливо, эксплуатационные материалы и амортизационные отчисления принимаются равными для первого и второго случая.

- Текущий ремонт автомобилей на предприятии осуществляется агрегатным способом, поэтому трудоемкость работ по ТР автомобилей относительно невелика. При этом затраты на запасные части

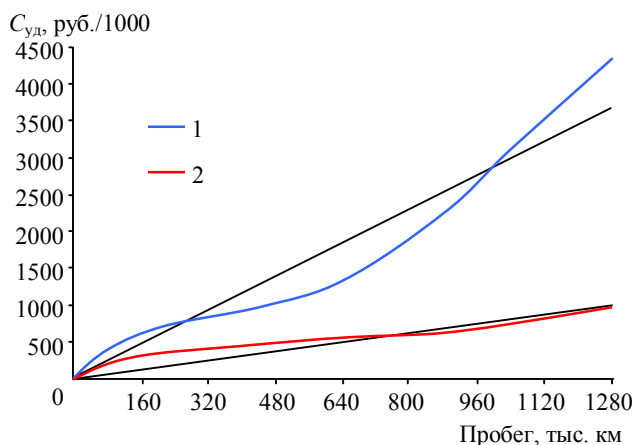


Рис.3. Затраты на эксплуатацию автомобиля
1 – затраты TP1; 2 – затраты TP2

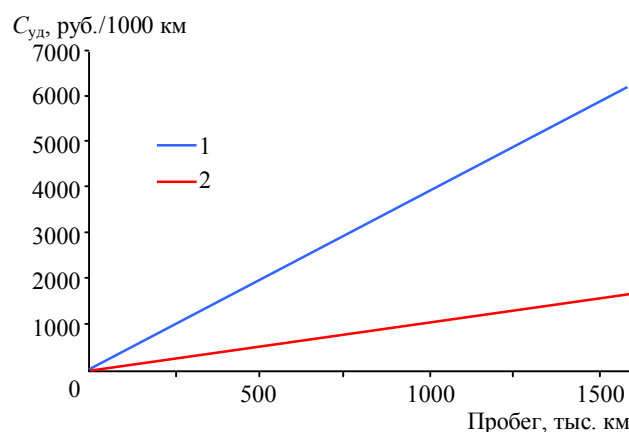


Рис.4. Затраты на эксплуатацию автомобиля с учетом стоимости запчастей
1 – затраты TP1; 2 – затраты TP2

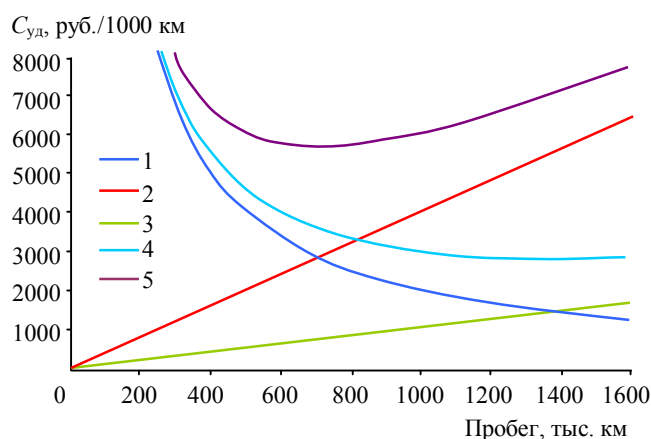


Рис.5. Минимальные затраты на ТО и TP с учетом стоимости автомобиля

1 – приведенная стоимость автомобиля, руб./1000 км; 2 – затраты на эксплуатацию автомобиля TP1, руб./1000 км; 3 – затраты на эксплуатацию автомобиля TP2, руб./1000 км; 4 – сумма TP1; 5 – сумма TP2

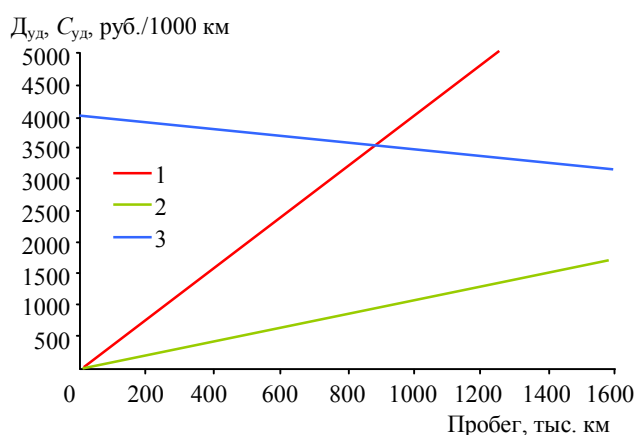


Рис.6. Удельные доходы и удельные затраты
1 – затраты на эксплуатацию автомобиля TP1; 2 – затраты на эксплуатацию автомобиля TP2; 3 – доходы от эксплуатации автомобиля, руб./1000 км

и агрегаты высоки и выделяются на предприятии в отдельную статью затрат. Удельный вес затрат на запасные части и агрегаты составляет 37,4 % от переменных затрат на эксплуатацию автомобиля. Отметим, что данная информация хорошо коррелируется с данными различных источников по эксплуатации грузовых автомобилей иностранного производства.

На рис.4 представлены затраты на эксплуатацию автомобиля с учетом стоимости запасных частей и агрегатов, заменяемых на автомобиле при проведении ремонтных работ.

Определим минимальные затраты на ТО и TP с учетом стоимости автомобиля, приведенной к пробегу,

$$\bar{C} = \frac{C_a}{L},$$

где C_a – стоимость нового автомобиля, руб.

Для определения оптимального значения пробега автомобиля (коэффициента технического использования) при его списании, обеспечивающего минимум затрат на техническую эксплуатацию, необходимо определить функцию (рис.5)

$$d(L_c) = \frac{C_a}{L} + C_{уд}(L_c).$$

Эта функция является выпуклой вниз [$d''(L_c) > 0$]. Найдем первую производную и приравняем ее к нулю. Определим значения экстремума функции в первом и во втором случае: $L_c^1 = 710$ км; $L_c^2 = 1380$ км [8].



Экономия удельных затрат на эксплуатацию автомобиля можно определить по формуле:

$$\Theta_{уд} = C_{уд}^1 (L_c^2 - L_c^1) = 3,965 \cdot (1380 - 710) = 2656 \text{ руб./1000 км.}$$

Определим значения дохода от эксплуатации автомобиля с учетом коэффициента технического использования автомобиля (рис.6):

$$D_{уд} = \frac{T_{100км} k_{ти} 1000}{100},$$

где $T_{100км}$ – тариф за 100 км пробега автомобиля, руб./100км.

Значение рентабельности эксплуатации автомобиля

$$R = \frac{D_{уд} - C_{уд}}{C_{уд}} \cdot 100.$$

Зависимость рентабельности от пробега подвижного состава представлена в таблице. Выделен нормальный уровень рентабельности.

Зависимость рентабельности от пробега подвижного состава

Пробег, 1000 км	КТИ	C	C _{уд} ¹	C _{уд} ²	D _{уд}	R
80	0,99	25000	317,22	83,94	3960	1148,00
160	0,98	12500	634,45	167,89	3920	517,84
240	0,97	8333	951,68	251,83	3880	307,69
320	0,96	6250	1268,91	335,78	3840	202,62
400	0,95	5000	1586,14	419,72	3800	139,57
480	0,94	4166	1903,37	503,67	3760	97,54
560	0,93	3571	2220,60	587,62	3720	67,52
640	0,92	3125	2537,83	671,56	3680	45,00
720	0,91	2777	2855,06	755,51	3640	27,49
800	0,9	2500	3172,29	839,45	3600	13,48
880	0,89	2272	3489,52	923,40	3560	2,01

Выводы

Для определения пробега срока рациональной службы автомобиля необходимо оперативно учитывать затраты на эксплуатацию автотранспортных средств. Полученные значения не являются усредненными данными для всего срока эксплуатации автотранспортных средств, а учитывают затраты по отдельным интервалам технического обслуживания.

Методика оперативного анализа затрат также содержит ряд особенностей и позволит достичь сопоставимости результатов определения пробега эффективной эксплуатации автотранспортных средств в процессе планирования, корректирования и конкретизации для анализа состояния автотранспортных средств и организации управляющих воздействий в системе жизненного цикла автомобиля. Для расчета производственной программы по ТО и ТР за расчетный цикл принимается пробег за полный цикл ТО, поэтому методика определения затрат на ТО и ТР адаптирована к этому условию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авдонькин Ф.Н. Оптимизация изменения технического состояния автомобиля в процессе эксплуатации. М.: Транспорт, 1993. 350 с.
2. Бондаренко В.А. Концепция и технологические основы ремонта транспортных средств в условиях постиндустриальной экономики. Автореф. дис... д-ра экон. наук / Оренбургский государственный университет. 1996. 84 с.
3. Денисов И.В. Разработка методики оценки технического состояния систем автомобиля, влияющих на безопасность движения / И.В.Денисов, Ю.В.Баженов // Транспорт, экология – устойчивое развитие: Материалы XVI Междунар. науч.-техн. конф. Варна: Изд-во Технического ун-та. 2010. С.401-406.
4. Дьяченко И.И. Методические основы управления автотранспортными отходами в регионе на этапе эксплуатации автомобильного транспорта: Автореф. дис... канд. техн. наук. М.: Изд-во МАДИ, 2002. 19 с.
5. Кудряшов Ю.А. Автоматизированные методы управления технической эксплуатацией автомобилей / Ю.А.Кудряшов, Б.Д.Прудовский, В.В.Ухарский // Л.: ЛДНТП, 1989. 63 с.
6. Терентьев А.В. Метод оперативного анализа технического состояния автомобиля. / А.В.Терентьев, Б.Д.Прудовский // Записки Горного института. 2014. Том 209. С.197-199.
7. Терентьев А.В. Управление жизненным циклом автомобиля на стадии эксплуатации // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 3(50). С.228-231.
8. Terentiev A.V., Menukhova T.A. The Methodology of the Operating Cost Accounting in Identifying Mileage of Efficient Motor Vehicle Operation // International Journal Of Economics And Financial Issues. 2015. Vol.5. N 3S. <http://www.econjournals.com/index.php/ijefi/article/view/1709/pdf>.

Авторы: Т.А.Менухова, канд. техн. наук, доцент, men-ta@yandex.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Россия), А.И.Солодкий, д-р экономических наук, профессор, asolodkiy@mail.ru (Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Россия).

Статья принята к публикации 25.02.2016.



ECONOMIC EFFICIENCY OF CAR

T.A.MENUKHOVA¹, A.I.SOLODKIY²

¹ Saint-Petersburg Mining University, Russia

² Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

The paper presents an algorithm for determining the rational life of the vehicle through relationship quality indicators of the car and cost efficiency. As an integrated indicator of the car is considered a technical factor of use and operating costs determine the efficiency of its use.

Methods of operational cost analysis includes a number of features and allows you to achieve comparability of results of the determination run efficient operation of motor vehicles in the process of planning, adjusting and specificity for the analysis of vehicles and organization of control actions in the lifecycle of a vehicle during its operation.

Key words: economic efficiency, the use of the technical factor, the control system, the life cycle of the car.

How to cite this article: Menukhova T.A., Solodkiy A.I. Economic efficiency of car. Zapiski Gornogo instituta. 2016. Vol.219, p.444-448. DOI 10.18454/PMI.2016.3.444

REFERENCES

1. Avdon'kin F.N. Optimizatsiya izmeneniya tekhnicheskogo sostoyaniya avtomobilya v protsesse ekspluatatsii (*Optimization of change of technical condition of the vehicle during operation*). Moscow: Transport, 1993, p.350.
2. Bondarenko V.A. Kontseptsiya i tekhnologicheskie osnovy remonta transportnykh sredstv v usloviyakh postindustrial'noi ekonomiki (*The concept and technological bases of repair vehicles in a post-industrial economy*). Avtoref. dis...d-ra ekon. nauk. Orenburgskii gosudarstvennyi universitet. 1996. 84 p.
3. Denisov I.V., Bazhenov Y.V. Razrabotka metodiki otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya sistem avtomobilya, vliyayushchikh na bezopasnost' dvizheniya (*The Development of methods of estimation of technical condition of the car's systems, affecting safety*). Transport, ekologiya – ustoychivoe razvitiye: Materialy XVI Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. Varna: Izd-vo Tekhnicheskogo un-ta. 2010, p.401-406.
4. D'yachenko I.I. Metodicheskie osnovy upravleniya avtotransportnymi otkhodami v regione na etape ekspluatatsii avtomobil'nogo transporta (*Methodical bases of management of waste transport in the region during operation of motor transport*): Avtoref. dis...kand. tekhn. nauk. Moscow: Izd-vo MADI, 2002. 19 p.
5. Kudryashov Y.A., Prudovsky B.D., Ukharskiy V.V. Avtomatizirovannyye metody upravleniya tekhnicheskoi ekspluatatsiei avtomobiley (*Automated methods of management of technical maintenance of cars*). Leningrad: LDNTP, 1989. 63 p.
6. Terentiev A.V., Prudovsky B.D. Metod operativnogo analiza tekhnicheskogo sostoyaniya avtomobilya (*Method operational analysis of technical condition of the car*). Zapiski Gornogo instituta. 2014. Vol.209, p.197-199.
7. Terentiev A.V. Upravlenie zhiznennym tsiklom avtomobilya na stadii ekspluatatsii (*Lifecycle management of the car during the operational phase*). Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2015. N 3(50), p.228-231.
8. Terentiev A.V., Menukhova T.A. The Methodology of the Operating Cost Accounting in Identifying Mileage of Efficient Motor Vehicle Operation. International Journal of Economics and Financial Issues, Vol.5, N.3S, 2015. <http://www.econjournals.com/index.php/ijefi/article/view/1709/pdf>.

Authors: T.A. Menukhova, PhD in Engineering Sciences, associate professor, men-ta@yandex.ru (Saint-Petersburg Mining University, Russia), A.I. Solodkiy, Dr. of Economic Sciences, professor, asolodkiy@mail.ru (Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Russia).

Manuscript Accepted 25.02.2016.



УДК 656.13:338.47; 658

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА АВТОМОБИЛЯ

А.В.Терентьев¹, А.А.Капустин²

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Россия

² Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Россия

Интенсивность свойств автомобиля определяется проектируемыми параметрами при производстве, а также в немалой степени состоянием среды эксплуатации автомобилей или состоянием внешней среды. Состояние внешней среды эксплуатации автомобилей влияет на интенсивность изменения показателей качества посредством многочисленных факторов, определяемых методами технического обслуживания и ремонта, качеством ТО и ремонта, применяемых эксплуатационных материалов и т.д. В конструкцию современного автомобиля все чаще включаются узлы и агрегаты, которые непосредственно не влияют на надежность, а отвечают за экологическую или дорожную безопасность.

Выход из строя узлов и агрегатов не приводит к снижению работоспособного состояния автомобиля, но требует дополнительных затрат на их восстановление, поэтому современные требования к отдельным группам показателей должны учитывать не только различную интенсивность их изменения, но и возможность вывода из эксплуатации еще работоспособного автомобиля.

Ключевые слова: качество, автомобиль, эксплуатация, техническое обслуживание, ремонт, система управления, жизненный цикл.

Как цитировать эту статью: Терентьев А.В. Оценка качества автомобиля / А.В.Терентьев, А.А.Капустин // Записки Горного института. 2016. Т.219. С.449-454. DOI 10.18454/PMI.2016.3.449

Введение. Исходные значения показателей качества автомобилей закладываются при производстве автомобилей с учетом требований и условий эксплуатации. Интенсивность их изменения определяется проектируемыми параметрами при производстве, а также в немалой степени состоянием среды эксплуатации автомобилей или состоянием внешней среды (СВС). СВС эксплуатации автомобилей влияет на интенсивность изменения показателей качества посредством многочисленных факторов, определяемых: методами технического обслуживания (ТО) и ремонта, качеством ТО и ремонта, применяемых эксплуатационных материалов, стилем вождения автомобилей и т.д.

Общая оценка изменения параметров автомобиля неоднократно рассматривалась в научных исследованиях [3, 5, 6]. В основе модели логистической или *s*-образной кривой изменения конкретных параметров автомобиля [1] лежит изменение состояния в начальный период по экспоненте, а затем замедление темпов по мере приближения к пределу

$$\Pi = \frac{\Pi_n}{1 + \alpha e^{-\beta t}},$$

где Π – значение параметра в момент времени t ; Π_n – предельное значение параметра; α и β – коэффициенты.

Многочисленные теоретические исследования [4, 8, 11 и др.] показали, что отдельные важнейшие свойства автомобиля, например, экономичность, производительность, надежность изменяются во времени эксплуатации по экспоненциальному закону:

$$\Pi(t) = \Pi_0 e^{-\beta t},$$

где Π_0 – значение показателя в начале эксплуатации; β – коэффициент, характеризующий изменение Π по времени эксплуатации автомобиля (интенсивность старения автомобиля).

Методика исследования. Действие большинства ресурсных и технологических факторов подчиняется экспоненциальному закону. Достаточно строгое математическое обоснование «затухания эффекта» было получено с использованием «марковских» процессов и их свойств. Характер нестабильности во времени основных свойства автомобиля определяется не только разнородностью групп показателей технико-эксплуатационных свойств автомобиля, но различной интенсивностью их изменения в зависимости от пробега или срока эксплуатации автомобиля. Сегодня, как правило, усредняется темп изменения отдельных групп показателей качества, как для отдельного автомобиля, так и для их совокупности.

По интенсивности изменения комплексные и единичные показатели делятся на три основные группы [4]:

1. Имеющие незначительный темп изменения (от 0,9 до 1,1): затраты на эксплуатационные материалы; коэффициент впуска; удельные простои в ТО и ремонте.



2. Имеющие значительный темп изменения (от 1,5 до 5,0): показатели надежности, показатели, характеризующие производительность автомобиля.

3. Имеющие темп, приводящий к изменению показателя в пределах, близких или превосходящих порядок по отношению к начальному значению (от 7 до 20 и более): удельная трудоемкость и расход запасных частей и заменяемых деталей и их общая стоимость.

К первой группе относятся показатели, обеспечивающие параметры эффективности эксплуатации автомобиля: коэффициент технической готовности, коэффициент выпуска, удельный простой в ТО и ремонте.

Ко второй группе относятся показатели, характеризующие надежность узлов и агрегатов автомобиля и, таким образом, обеспечивающие производительность и техническую безопасность эксплуатации автомобиля.

Третья группа характеризует в основном существо качественных изменений, происходящих при старении изделия (стоимость заменяемых деталей, расход запасных частей). Она в большей степени отвечает за экологическую безопасность и дорожную безопасность автомобиля при ужесточении требований состояния внешней среды.

Интенсивность изменения различных свойств автомобиля закладывается изначально в его конструкцию, а среда эксплуатации влияет на параметры интенсивности процесса изменения этих свойств. Для различных свойств автомобиля характерна различная интенсивность изменения [2]. Тем не менее, сегодня, рассматривается и принимается к расчетам средний темп изменения реализуемого показателя качества автомобиля.

Реализуемый показатель качества автомобиля на i -м интервале пробега или срока эксплуатации определяется, как [8]

$$\bar{P}_{ki} = \frac{P_{k1}(1 + \sum_{i=1}^n K_{cp}^{i-1})}{i},$$

где P_{k1} – начальное значение показателя качества; K_{cp}^{i-1} – средний темп изменения показателя качества автомобиля; i – год отсчета или номер интервала пробега.

Приведенный подход позволяет не только сравнивать стабильность различных показателей одного автомобиля, но и одноименные параметры разных моделей и классов автомобилей. Вместе с тем у данного подхода есть существенный недостаток – усредненность при учете трех основных групп показателей автомобиля (по интенсивности изменений), отвечающих за его качество на различных сроках эксплуатации.

В качестве показателя качества автомобиля предложен [4] обобщенный показатель надежности, представляющий собой отношение удельной трудоемкости устранения отказов и неисправностей к ресурсу автомобиля до капитального ремонта (КР):

$$Q = \frac{k_{\Sigma} \bar{t}}{L_k x} = k_{\Sigma} \frac{b_{тр}}{L_k},$$

где k_{Σ} – общий коэффициент корректирования [2], учитывающий тип автомобиля и условия эксплуатации; L_k – ресурс до капитального ремонта; \bar{t} – средняя трудоемкость устранения отказа или неисправности; \bar{x} – средняя наработка на отказ или неисправность; $b_{тр}$ – удельная трудоемкость текущего ремонта.

Сложность применения данного обобщенного показателя качества для оценки качества автомобиля в целях управления сроком рациональной эксплуатации объясняется следующим:

- В настоящее время практически отсутствует возможность производить полнокомплектный капитальный ремонт. Напомним, что пробег до КР принимается в качестве цикла технического обслуживания для отечественных автомобилей как наименьший повторяющийся интервал времени или наработка изделия, в течение которых выполняются в определенной последовательности в соответствии с требованиями нормативно-технической или эксплуатационной документации все установленные виды периодического технического обслуживания [12]. В регламентах автомобилей зарубежного производства пробег до КР как показатель не предусматривается.

- Необходимо учитывать все элементарные временные периоды нахождения автомобиля в эксплуатации, включая следующие промежутки времени: когда автомобиль в исправном состоянии, но не эксплуатируется; периоды времени, когда автомобиль находится в неплановом и плановом ТО и ремонте и т.д., представленные в виде удельных показателей.

При рассмотрении вопросов качества автомобилей, как правило, опираются на комплексные показатели надежности, отражающие достаточно большую совокупность факторов, действующих при производстве и эксплуатации автомобиля [10]:

- Коэффициент технической готовности – вероятность того, что автомобиль окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение автомобиля по назначению не предусматривается.
- Коэффициент технического использования – отношение математического ожидания суммарного времени пребывания автомобиля в работоспособном состоянии за период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания автомобиля в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных ТО и ремонтом за тот же период [12].

Коэффициент готовности, если оценивать надежность автомобиля на определенном интервале эксплуатации, является средней величиной, поэтому при нормировании этого показателя необходимо указывать интервал эксплуатации автомобиля

$$K_r = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{\sum_{i=1}^N t_i + \sum_{i=1}^N \tau_i},$$

где t_i – суммарная наработка i -го отказа в заданном интервале эксплуатации; τ_i – суммарная оперативная продолжительность восстановления работоспособности автомобиля в том же интервале эксплуатации; N – число наблюдаемых автомобилей на заданном интервале эксплуатации.

Как правило, в качестве интервала эксплуатации автомобиля принимается величина пробега до КР, тогда коэффициент готовности определяется по формуле

$$K_r = \frac{T_{кр}}{T_{кр} + \tau_{\Sigma}},$$

где $T_{кр}$ – средний ресурс до капитального ремонта; τ_{Σ} – средняя суммарная продолжительность восстановления работоспособности автомобиля после отказа за период до капитального ремонта.

Таким образом, более обоснованным для достижения цели исследования можно признать применение в качестве комплексного показателя надежности показатель, базирующийся на коэффициенте технического использования автомобиля. Коэффициент технического использования на определенном интервале эксплуатации определяется как

$$K_{ти} = \frac{T_{кр}}{T_{кр} + \tau_{\Sigma}^{то} + \tau_{\Sigma}^p + \tau_{\Sigma}^{\Sigma}},$$

где $\tau_{\Sigma}^{то}(\tau_p^{\Sigma})$ – средняя оперативная продолжительность ТО (ремонта).

Коэффициент технического использования автомобиля можно трактовать как коэффициент технической готовности, развернутый во времени. При этом период оценки $K_{ти}$ может не соответствовать периоду наработки автомобиля до КР. Коэффициент технического использования за календарный период времени с учетом дерева всех возможных состояний автомобиля в процессе его эксплуатации (рис.1) приведен в [8].

В соответствии с данным подходом коэффициент технического использования за календарный период времени определяется по формуле

$$K_{ти} = \frac{t^{pi} + t^{ni}}{t^p + t^h}.$$

Характер изменения коэффициента технического использования в процессе эксплуатации автомобиля достаточно хорошо описывается выражением:

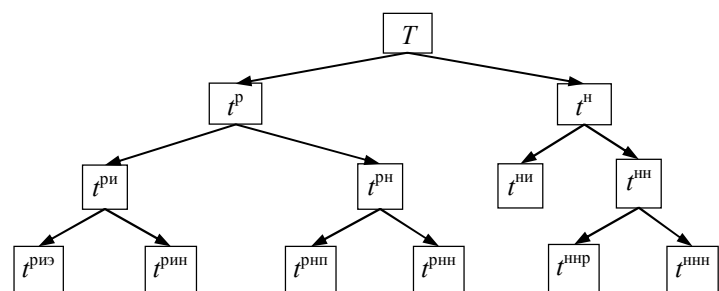


Рис.1. Дерево возможных периодов состояний автомобиля в процессе эксплуатации

T – календарная продолжительность планируемой технической эксплуатации АТС; t^p – рабочее время (планируемое время пребывания на линии); t^h – нерабочее время (планируемое межсменное время); t^{pi} – исправное состояние автомобиля в рабочее время; t^{pn} – неисправное состояние в рабочее время; t^{ni} – исправное состояние в нерабочее время; t^{nn} – неисправное состояние в нерабочее время; t^{pih} – рабочее время, автомобиль в исправном состоянии и эксплуатируется; t^{pin} – рабочее время, автомобиль в исправном состоянии, но не эксплуатируется; t^{pnh} – рабочее время, автомобиль в плановом ТО и ремонте; t^{pnn} – рабочее время, автомобиль в unplanned ТО и ремонте; t^{hnh} – нерабочее время, автомобиль в плановом ТО и ремонте; t^{hnn} – нерабочее время, автомобиль в unplanned ТО и ремонте

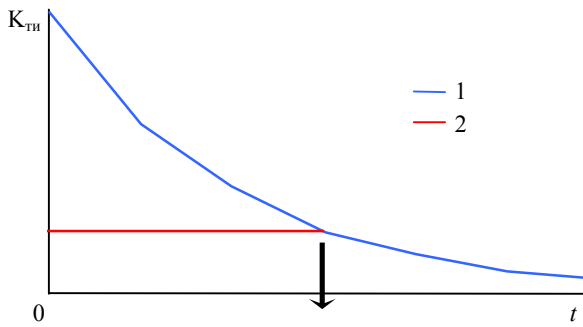


Рис.2. Изменение коэффициента технического использования (1) в процессе эксплуатации автомобиля; 2 – $K_{ти}^{min}$

$$K_{ти}(t) = K_{ти}(0)e^{-\beta t},$$

где $K_{ти}(0)$ – значение коэффициента технического использования в начале эксплуатации.

В этом случае значение реализуемого (среднего) коэффициента технического использования (рис.1) для автомобиля определяется следующим образом:

$$\overline{K_{ти}}(t) = \frac{K_{ти}^{\Sigma}}{t_c},$$

где $K_{ти}^{\Sigma}$ – сумма коэффициентов технического использования автомобиля за весь период эксплуатации; t_c – период эксплуатации.

На рис.2 минимальное значение коэффициента технического использования $K_{ти}^{min}$ соответствует моменту времени его списания t^c [9]. Сумма коэффициентов технического использования автомобиля за весь период эксплуатации

$$K_{ти}^{\Sigma} = \int_0^{t^c} e^{-\beta t} dt = \frac{1 - e^{-\beta t^c}}{\beta} \quad \text{или} \quad K_{ти}^{\Sigma} = \frac{1 - K_{ти}^{min}}{\beta}.$$

Реализуемый коэффициент технического использования автомобиля может определяться как

$$\overline{K_{ти}} = \frac{1 - K_{ти}^{min}}{\beta t^c}.$$

Для парка автомобилей в момент времени i и с учетом возрастной структуры реализуемый показатель качества

$$\overline{\Pi}_i = \sum_{i=1}^m \overline{K_{ти}^i} \alpha_i,$$

где $\overline{K_{ти}^i}$ – реализуемый коэффициент технического использования автомобилей i -й возрастной группы; m – количество возрастных групп; α_i – доля (или процент) автомобилей данной возрастной группы в парке в момент времени i ,

$$\alpha_i = a_i / A,$$

a_i – число автомобилей j -й возрастной группы в момент i ; A – размер парка автомобилей.

Следовательно, реализуемый коэффициент технического использования для парка подвижного состава определяется

$$\overline{K_{ти}^{АТП}} = \frac{\sum_{i=1}^m \overline{K_{ти}^i} \alpha_i}{A}.$$

Выводы

При разработке теоретического аппарата определения рационального срока службы автомобилей целесообразно использовать аналитическую связь между пробегом безопасной и эффективной эксплуатации автомобиля и коэффициентом технического использования, в основе которого находятся развернутые во времени единичные показатели ТО и ремонта.

В конструкцию современного автомобиля включены узлы и агрегаты, отвечающие только за экологическую или дорожную безопасность, выход из строя которых не приводит к снижению работоспособного состояния автомобиля, но приводит к дополнительным затратам на их восстановление. Интенсивность изменений единичных показателей по отдельным критериям в этих случаях превосходит порядок по отношению к начальному значению от 7 до 20 и более раз (затраты на запасные части и др.). Современные требования к отдельным группам показателей должны учитывать не только различную интенсивность их изменения, но и возможность вывода из эксплуатации еще работоспособного автомобиля. Эти обстоятельства снижают достоверность прогнозирования значений по-



казателей качества автомобиля, если они базируются на одном комплексном показателе надежности. В данных условиях целесообразно выделение отдельных групп показателей качества в самостоятельные критерии, а при оценке качества автомобиля закономерно использовать значения пробега автомобиля в качестве измерителя рационального срока службы [9].

ЛИТЕРАТУРА

1. Корогодский М.В. Методологические основы оптимизации надежности автомобиля. Киев: Вища школа, 1976. 139 с.
2. Коротков М.В. Оценка влияния пробега на экологическую безопасность автомобиля ВАЗ-21102 / М.В.Коротков, В.В.Коротков, Ю.И.Ямоллов // Вестник Оренбургского государственного университета. 2003. № 1. С.70-73.
3. Крахмалова А.В. Методика оценки качества автомобилей / А.В.Крахмалова, Ф.А.Фасхийев // Маркетинг в России и за рубежом. 2005. № 4.
4. Кузнецов Е.С. Управление технической эксплуатацией автомобилей. М.: Транспорт, 1982. 224 с.
5. Логинова Н.А. Методология управления взаимодействиями на рынке транспортных услуг / СПбГИЭУ. СПб, 2011. 260 с.
6. Мигачев В.А. Повышение эффективности использования грузовых автомобилей на основе выбора наиболее рационального парка подвижного состава: Автореф. дис... канд. техн. наук / Ульяновский гос. техн. ун-т. 2012. 16 с.
7. Оценка эксплуатационной надежности / Е.С.Кузнецов, П.И.Гринберг, Г.А.Кривошенин и др. // Автомобильный транспорт, 1980. № 2. С.49-51.
8. Прудовский Б.Д. Управление технической эксплуатацией автомобилей по нормативным показателям / Б.Д.Прудовский, В.Б.Ухарский. М.: Транспорт, 1990. 239 с.
9. Терентьев А.В. Метод оперативного анализа технического состояния автомобиля / А.В.Терентьев, Б.Д.Прудовский // Записки Горного института. 2014. Том 209. С.197-199.
10. Терентьев А.В. Управление жизненным циклом автомобиля на стадии эксплуатации // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 3(50). С.228-231.
11. Техническая эксплуатация автомобилей / В.Г.Крамаренко, Е.С.Кузнецов, Л.В.Мирошников и др. М.: Транспорт, 1983. 488 с.
12. Хасанов Р.Х. Основы технической эксплуатации автомобилей. Оренбургский гос. ун-т. 2003. 193 с.
13. Terentiev A.V., Menukhova T.A. The Methodology of the Operating Cost Accounting in Identifying Mileage of Efficient Motor Vehicle Operation // International Journal of Economics and Financial Issues. 2015. Vol.5, N.3S. <http://www.econjournals.com/index.php/ijefi/article/view/1709/pdf>

Авторы: А.В.Терентьев, канд. техн. наук, доцент, terentich1@rambler.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Россия), А.А.Капустин, д-р техн. наук, профессор, professor-gas@mail.ru (Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Россия).

Статья принята к публикации 25.02.2016.

QUALITY ASSESSMENT OF THE CAR

A.V.TERENTIEV¹, A.A.KAPUSTIN²

¹ Saint-Petersburg Mining University, Russia

² Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

The intensity is determined by the properties of the car projected parameters in the production, as well as to a large extent the state of the environment or the state of operation of cars outside. State of the environment of operation of cars affects the intensity changes of quality indicators through multiple factors determined: the methods of service and repair, quality and repair of used consumables, etc. The design of the modern car more often included components and assemblies that do not directly affect the reliability of, and responsible for the environmental or road safety.

Their failure does not lead to a reduction of the working condition of the car, but leads to additional expenses for their recovery, so the modern requirements for certain groups of indicators should take into account not only the different intensity of change, but also the opportunity of decommissioning more workable vehicle.

Key words: quality, vehicle operation, maintenance, repair, system management life cycle.

How to cite this article: Terentiev A.V., Kapustin A.A. Quality assessment of the car. Zapiski Gornogo instituta. 2016. Vol.219, p.449-454. DOI 10.18454/PMI.2016.3.449

REFERENCES

1. Korogodskii M.V. Metodologicheskie osnovy optimizatsii nadezhnosti avtomobilya (*Methodological bases of optimizing the reliability of the car*). Kiev: Vishcha shkola, 1976. 139 p.
2. Korotkov M.V., Korotkov V.V., Yamolov Y.I. Otsenka vliyaniya probega na ekologicheskuyu bezopasnost' avtomobilya VAZ-21102 (*Assessing the impact of run on the ecological safety of the car VAZ-21102*). Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta. 2003. N 1, p.70-73.
3. Krakhmalova A.V., Faskhiyev F.A. Metodika otsenki kachestva avtomobilei (*Methods of assessing the quality of cars*). Marketing v Rossii i za rubezhom. N 4. 2004.



4. *Kuznetsov E.S.* Upravlenie tekhnicheskoi ekspluatatsiei avtomobilei (*Management of technical maintenance of cars*). Moscow: Transport, 1982. 224 p.
5. *Loginova N.A.* Metodologiya upravleniya vzaimodeistviyami na rynke transportnykh uslug (*Management Methodology interactions on the transport market: monograph*). SPbGIEU. St. Petersburg, 2011. 260 p.
6. *Migachev V.A.* Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya gruzovykh avtomobilei na osnove vybora naibolee ratsio-nal'nogo parka podvizhnogo sostava (*More efficient use of trucks on the basis of selecting the most efficient rolling stock*): Avtoref. dis...kand. tekhn. nauk. Ul'yanovskii gos. tekhn. un-t. 2012. 16 p.
7. *Kuznetsov E.S., Greenberg P.I., Krivoshein G.A. et al.* Otsenka ekspluatatsionnoi nadezhnosti (*Evaluation of operational reliability*). Avtomobil'nyi transport. 1980. N 2, p.49-51.
8. *Prudovskiy B.D., Ukharskiy V.B.* Upravlenie tekhnicheskoi ekspluatatsiei avtomobilei po normativnym pokazatelyam (*Management of technical maintenance of cars on the regulatory indicators*). Moscow: Transport, 1990. 239 p.
9. *Terentiev A.V., Prudovsky B.D.* Metod operativnogo analiza tekhnicheskogo sostoyaniya avtomobilya (*Method operational analysis of technical condition of the car*). Zapiski Gornogo instituta. 2014. Vol.209, p.197-199.
10. *Terentiev A.V.* Upravlenie zhiznennym tsiklom avtomobilya na stadii ekspluatatsii (*Lifecycle management of the car during the operational phase*). Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2015. N.3(50), p.228-231.
11. *Kramarenko V.G., Kuznetsov E.S., Miroshnikov L.V. et al.* Tekhnicheskaya ekspluatatsiya avtomobilei (*Technical operation of cars*). Moscow: Transport. 1983. 488 p.
12. *Hasanov A.D.* Osnovy tekhnicheskoi ekspluatatsii avtomobilei (*Bases of technical operation of automobiles*). Orenburgskiy gos. un-t. 2003. 193 p.
13. *Terentiev A.V., Menukhova T.A.* The Methodology of the Operating Cost Accounting in Identifying Mileage of Efficient Motor Vehicle Operation. International Journal of Economics and Financial Issues. 2015. Vol.5, N 3S. <http://www.econjournals.com/index.php/ijefi/article/view/1709/pdf>

Authors: **A.V.Terentiev**, PhD in Engineering Sciences, Associate professor, terentich1@rambler.ru (Saint-Petersburg Mining University, Russia), **A.A.Kapustin**, Dr. of Engineering Sciences, Professor, professor-gas@mail.ru (Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Russia).

Manuscript Accepted 25.02.2016.



УДК 622.33

PROPERTIES THAT DETERMINE THE EFFICIENCY AND SAFETY OF FORM FITTING SAFETY COUPLINGS*

STEFAN VÖTH¹, M.A. VASILYEVA²

¹ Technische Hochschule Georg Agricola, Center for Drive and Hoisting Technology, Bochum, Germany

² Saint-Petersburg Mining University, Russia

Torque controlled safety couplings are used as safety elements in drive trains. Their function consists in separating input side and output side when the limit for the transferrable torque is exceeded. Main property of these couplings is the switching torque, the maximum transferrable torque before initiating the separation of the drive train.

Target of the project is to examine the characteristics of the switching torque of form fitting safety couplings. Doing so three couplings of well known manufacturers are examined. Main result of the test is that the switching torque of form fitting safety couplings is underlying parameter dependencies and scatter. Safety and exploitation of the drive train are in cases considerably depended on the given point of operation and the coupling adjustment.

In this respect it is of importance, to choose, to adjust and to operate the covered couplings systematically.

Key words: form fitting safety couplings, torque, moment of separation, security, efficiency.

How to cite this article: Stefan Vöth, Vasilyeva M.A. Properties that determine the efficiency and safety of form fitting safety couplings. Zapiski Gornogo instituta. 2016. Vol.219, p.455-458. DOI 10.18454/PMI.2016.3.455

Introduction

Currently, all the mechanical problems require the use of more drives, which allow high precision positioning characteristics, stiffness and lack of oscillations. And now the designs of the drive developers are increasingly using various couplings, the correct choice of which depends strongly on the characteristics of machines and mechanisms.

To ensure maximum accuracy and rigidity of the drive you want to use coupling, specially designed for the servos. Absence of gaps in the sleeve allows you to make the drive smooth and soft. An important characteristic of coupling is its rigidity – the ability to maintain shape under the influence of external forces, but the goal is not only to convey coupling point, but pay off shocks and vibrations, to compensate for misalignment. At present, the servos are used where accuracy is not enough regulation of conventional general-purpose inverters. The use of high-quality servos needs high-efficiency equipment, where the main criterion is the performance [1].

Target

Torque controlled safety couplings are used as safety elements in drive trains. Their function consists in separating input side and output side when the limit for the transferrable torque is exceeded. Hereby considerable damages in drive trains in case of overload may be prevented. Examples for such safety couplings are those in drive trains of powerful mining equipment or fast moving hoisting equipment of ship-to-shore container cranes (Fig.1).

Main property of these couplings is the switching torque, the maximum transferrable torque before initiating the spontaneous separation of the drive train [2].

Target of the project is to examine the characteristics of the switching torque of form fitting safety couplings. Doing so three couplings of well known manufacturers are examined at clockwise rotation / anti clockwise rotation and four different rotational speeds.

Tests

For the examination of the switching torque a drive train was built up. The drive train consists of a frequency inverter driven squirrel cage motor, the coupling to be examined as well as a magnetic powder brake (Fig.2).



Fig.1. Ship-to-shore cranes

* An article published in authors edition
Статья публикуется в авторской редакции

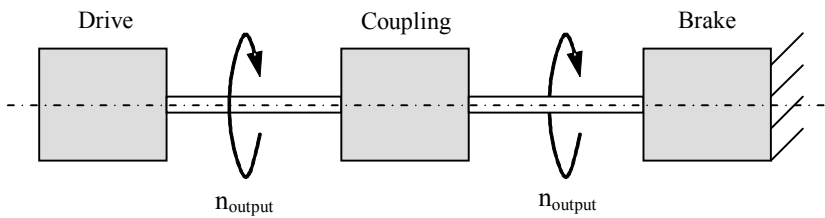


Fig.2. Schematic testing arrangement

All components are situated on one axis. Close to the brake the speed of the drive train and the torque in the drive train can be measured. The setup facilitates the exchange of the couplings to be examined. The examination is executed for four speeds ($n = 5 \text{ min}^{-1}$, 50 min^{-1} ,

400 min^{-1} , 700 min^{-1}) at clockwise rotation and anti clockwise rotation. In the beginning the drive train is running with closed coupling against the relative low friction torque. Then the braking torque is elevated dynamically in a manner, that the coupling is opened unavoidable. These tests were executed seven times for every measuring point and statistically evaluated under the assumption of a normal distribution of the switching torque.

Results

Regarding the mean values of the switching torques coupling 1 shows a relatively constant behaviour over speed. Maximum deviation of the switching torque from the adjusted switching torque is 3 %. The prefix of the deviations depends on the direction of rotation, maybe caused by deviations in the symmetry of setup (Fig.3).

Coupling 2 shows a distinct dependence of the mean values of the switching torque on the rotational speed. At the lower speed of 5 min^{-1} the switching torque is deviating $\pm 2 \%$ from the adjusted switching torque. With increasing speed the switching torque is decreasing 37-39 % at 700 min^{-1} . The directional variation of the switching torque is comparable to coupling 1 (Fig.3).

Coupling 3 shows, as well as coupling 2, a distinct dependence of the mean value of the switching torque of the speed. At the lower speed of 5 min^{-1} the switching torque is deviating $+5-8 \%$ from the adjusted switching torque. With increasing speed the switching torque is decreasing 32-36 % at 700 min^{-1} . The distinct directional variation of the switching torque lies within a width of up to 34 % (Fig.3).

Regarding the standard deviations of the switching torques shows coupling 1 a relative smaller scatter. The maximum standard deviation of the adjusted switching torque is 2 % (Fig.4).

Coupling 2 shows a greater scatter of the switching torque. A standard deviation of the switching torque of up to 4 % is occurring (Fig.4).

Coupling 3 shows a considerable scatter of the switching torque. A standard deviation of the switching torque of up to 19 % is occurring. Apparently a dependence of the standard deviation of the rotational direction is given (Fig.4).

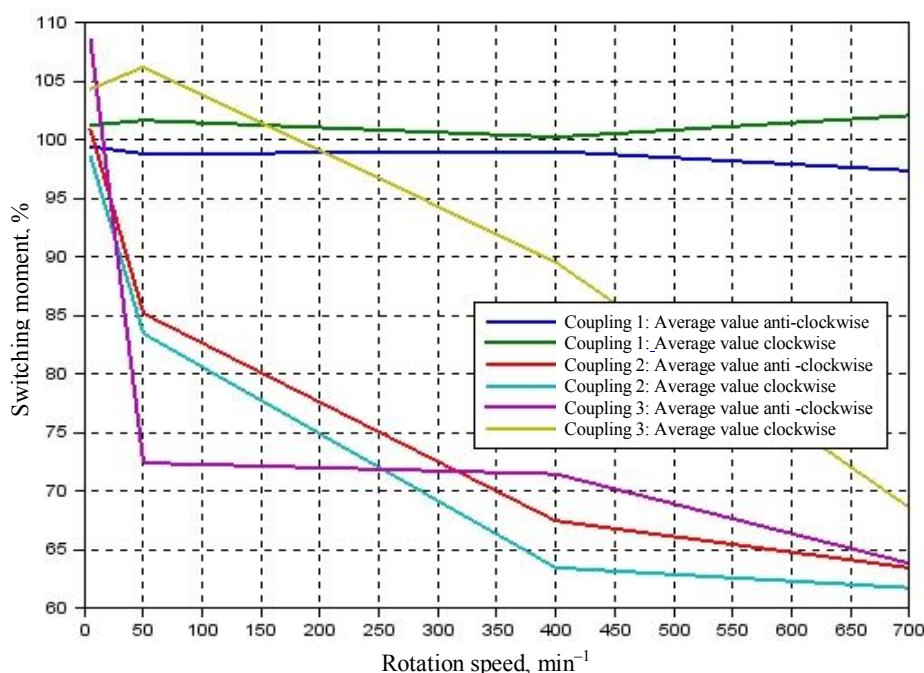


Fig.3. Normed switching torques (Mean value)

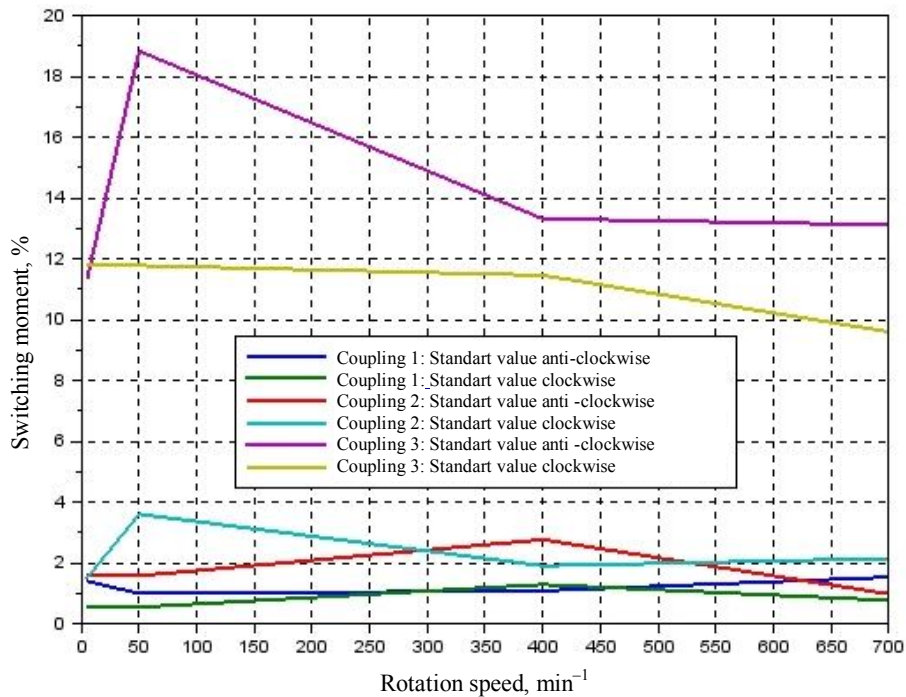


Fig.4. Normed switching torques (Standard deviation)

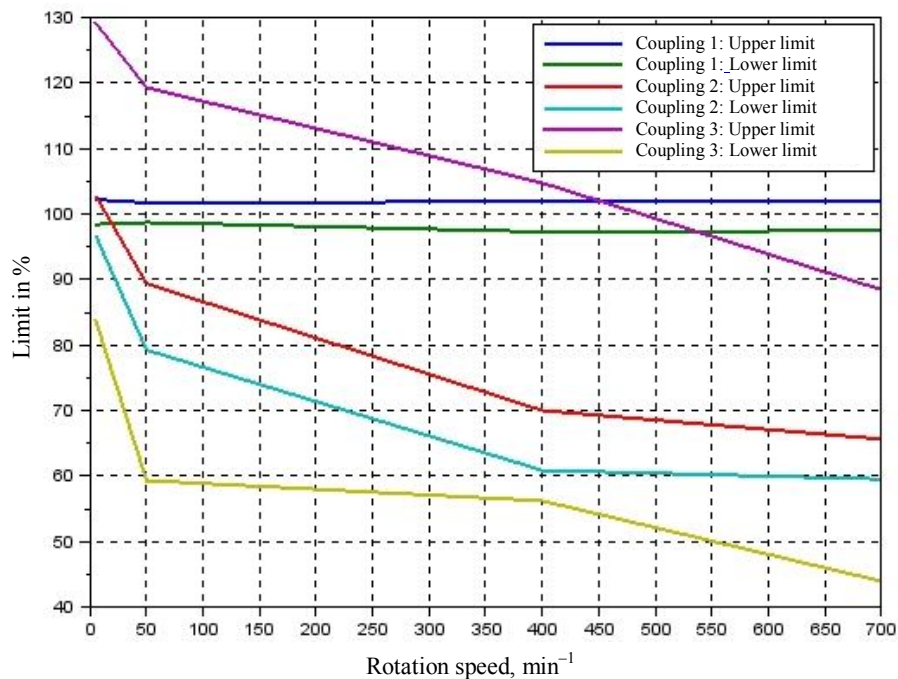


Fig.5. Confidence intervals for 95 % switching probability

Following confidence intervals for 95 % switching probability on basis of a normal distribution of switching torques are considered.

It is recognised, that for all coupling switching torques above the adjusted switching torque may occur, especially for lower speeds. The maximum switching torques for couplings 1 and 2 are 103 %, for coupling 3 129 % (Fig.5). Basing on this the realised safety function has to be evaluated.

Furthermore it can be seen, that for all couplings switching torques well below the adjusted switching torque occur, especially at higher speeds. Following minimal switching torques within the tested spectrum are registered: coupling 1: 97 %, coupling 2: 59 %, coupling 3: 44 % (Fig.5). Basing on this the realised exploitation of the drive train may be evaluated. Is a drive train operated at a certain speed, the adjustment of the coupling according to this operating point may be regarded. Doing this, the outcome of lower operating speed has to be considered [3].



Conclusions

Main result of the test is that the switching torque of form fitting safety couplings is underlying parameter dependencies and scatter. Are the safety level and the exploitation of the drive train to reach a high level, are couplings with properties suitable for the given application to be used.

Safety and exploitation of the drive train are in cases considerably depended on the given point of operation and the coupling adjustment. In this respect it is of importance, to choose, to adjust and to operate the covered couplings systematically.

REFERENCES

1. *Strelkov A.G.* Design of fast tracked vehicles. Moscow: MSTU «MAMI», 2005, p.616.
2. *Dennig H.-J.* Entwicklung einer schnell schaltenden Bremse und Kupplung für Linearbewegungen zum Überlastschutz in Werkzeugmaschinen. Stuttgart, Universität, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Dissertation, 2009, 184.
3. *Vöth Stefan.* Safety Concepts for Container Crane Hoists. Presentation materials. ITI-Symposium. Dresden, 2014.

Authors: *Stefan Vöth, Dr. of Engineering Sciences, Professor (Technische Fachhochschule Georg Agricola, Head of Center for Drive and Hoisting Technology, Bochum, Germany), M.A. Vasilyeva, Ph.D in Engineering Sciences, Associate Professor, saturn.sun@mail.ru (Saint-Petersburg Mining University, Russia).*

Manuscript Accepted 15.02.2016.



Геозкология и безопасность жизнедеятельности

УДК 699.15:539.56; 669.788

АНАЛИЗ ПРИЧИН КОРРОЗИОННЫХ РАЗРУШЕНИЙ ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ И НОВЫЕ РЕШЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ СТАЛИ К КОРРОЗИИ

Л.А.ГОЛДОБИНА¹, П.С.ОРЛОВ²

¹Санкт-Петербургский горный университет, Россия

²Ярославская государственная сельскохозяйственная академия, Россия

В статье рассматриваются проблемы аварийности, связанные с эксплуатацией, прежде всего, подземных трубопроводов, транспортирующих газ, нефть и ее производные. Приводятся результаты статистического анализа аварийности на подземных трубопроводах, эксплуатируемых в России, а также анализ причин взрывов на подземных трубопроводах, и, прежде всего, газифицированных объектах. Показано, что для газопроводов больших диаметров наиболее опасна стресс-коррозия, возникающая вследствие явления наводороживания. Предлагаются к рассмотрению обоснованные и защищенные патентами РФ новые инженерно-технические решения, направленные на повышение стойкости стальных конструкций к коррозии, а именно: способ повышения твердости, прочности и износостойкости поверхностей стальных деталей путем ускоренной цементации за счет насыщения стальных поверхностей углеродом; способ легирования стали алюминием с получением диффузионных покрытий; способ нанесения на стальную поверхность устойчивого к коррозии и действию кислот и щелочей покрытия. Предлагаемые новые технологии сопровождаются объяснением физическо-химических процессов, происходящих в стали. Результаты экспериментальных исследований подтвердили правомерность этих решений.

Ключевые слова: подземные трубопроводы, газопроводы, стойкость металла, коррозия, межкристаллитная коррозия.

Как цитировать эту статью: Голдобина Л.А. Анализ причин коррозионных разрушений подземных трубопроводов и новые решения повышения стойкости стали к коррозии / Л.А.Голдобина, П.С.Орлов // Записки Горного института. 2016. Т.219. С.459-464. DOI 10.18454/PMI.2016.3.459

Актуальность вопроса защиты подземных трубопроводов от коррозии. Наиболее уязвимыми среди всех инженерных сооружений считаются подземные трубопроводы. По существующим оценкам, в России ежегодно происходит порядка 80 тыс. аварий, связанных с эксплуатацией трубопроводов. Основная задача, стоящая в настоящее время перед предприятиями, эксплуатирующими опасные производственные объекты коммунального хозяйства, – снижение аварийности подземных трубопроводов, так как эксплуатируемые подземные водоводы, газопроводы, теплотрассы подземной прокладки в большинстве своем давно выработали ресурс, а замена их требует значительных капитальных вложений.

Протяженность подземных трубопроводов для транспортировки нефти, газа, воды и сточных вод в России составляет около 17 млн км – это второе место в мире после США. Однако нет другой страны, где эти трубопроводные магистрали были бы так изношены. По оценкам специалистов МЧС России, аварийность на трубопроводах с каждым годом возрастает и в XXI в. эти системы жизнеобеспечения вошли изношенными на 50-70 %.

Утечки перекачиваемых продуктов в значительной степени связаны с коррозионными процессами, разрушающими стенки стальных труб. Разрывы труб на водоводах и теплотрассах приводят к подтоплению территории, подвалов, затоплению подземных коммуникаций связи, разрушению транспортных коммуникаций, обрушению зданий и сооружений.

Весьма актуален вопрос защиты от коррозии трубопроводов, эксплуатируемых в нефтяной и нефтегазодобывающей отраслях. Потери нефти и нефтепродуктов зависят от размеров повреждения и времени его обнаружения и сроков устранения. Объем утечки может оказаться существенным даже при незначительных дефектах, если последние остаются незамеченными в течение длительного периода времени. Утечки транспортируемого газа из газопроводов часто сопровождаются взрывами и пожарами [14, 15].

Основными опасными факторами, способствующими возникновению аварийных ситуаций, являются: наличие горючих газов; физический износ металла из-за подвижек газопровода вследствие сезонных изменений уровня грунтовых вод и изменяющегося геологического строения грунта по длине газопровода; нарушение сплошности гидроизоляционного покрытия; коррозионные и механические повреждения металла газопроводов; несовершенство системы электрохимической защиты; пересечение газопроводами водных преград и искусственных сооружений.



Диагностика состояния металла трубопроводного транспорта в процессе эксплуатации – приоритетная задача, поскольку безаварийная и надежная работа предприятий топливно-энергетического комплекса России, в том числе объектов магистрального трубопроводного транспорта природного газа, в значительной степени определяет энергетическую безопасность и социально-экономическое развитие страны [2].

Анализ причин коррозионных разрушений подземных трубопроводов. Для газопроводов больших диаметров наиболее опасна стресс-коррозия, возникающая вследствие явления наводороживания. Проблема обнаружения и идентификации участков магистральных газопроводов, пораженных стресс-коррозией, в настоящее время весьма актуальна. Аварийность магистральных газопроводов из-за коррозионного разрушения металла достигает местами 50 % от общего числа аварий. Длина стресс-коррозионных трещин 5-10 мм, простираются они вдоль оси трубы. Эти трещины формируют магистральные продольные трещины, приводящие к разрушению газопровода, и, как следствие, к взрывам газа и пожарам [4].

Статистика показывает, что причиной каждой третьей аварии на проложенном в грунте трубопроводе является электрохимическая коррозия. Последствием аварии может быть не только экономический ущерб, связанный с потерей транспортируемого продукта, но и значительный вред, наносимый экологии и инфраструктуре населенного пункта. Научно установлено, что скорость коррозии незащищенного подземного трубопровода может достигать одного или даже нескольких миллиметров в год, а при поддержании на трубопроводе стабильного защитного потенциала снижается до 0,01-0,001 мм.

От 5 до 10 % аварий на трубопроводах происходит вследствие межкристаллитной коррозии. И если причины и методики идентификации стресс-коррозионных и коррозионных повреждений в настоящее время отработаны и защищены патентами, то проблема межкристаллитной коррозии нелегированных сталей до сих пор полностью не разрешена [1, 4-8].

В настоящее время ведутся многоуровневые исследования по предупреждению взрывов и пожаров в газифицированных подразделениях по всем направлениям, одним из таких направлений является повышение стойкости металла к коррозии.

В целях предупреждения коррозии металла трубопроводов авторами предложены способы, рассмотренные в данной статье [9-11].

Способ ускоренной цементации стали. Этот способ включает проведение более трех циклов нагрева – охлаждение нагрева пучками импульсов электромагнитного излучения до температуры выше точки A_{c3} со скоростью 1 К/с и охлаждения до температуры ниже A_{r1} со скоростью 1 К/с. Он отличается от известных [14-15] тем, что нагрев проводят до температуры не выше 1220 ± 10 К и охлаждение – до температуры не ниже 950 ± 10 К, при этом продолжительность выдержки при нагреве и охлаждении определяется необходимой толщиной цементитного слоя и равномерностью распределения углерода в нем [9].

Способ ускоренной цементации стальных деталей относится к области химико-термической обработки стали, а именно к насыщению поверхностей стальных деталей углеродом с целью повышения твердости, прочности и износостойкости поверхностей стальных деталей.

Проникновение углерода в сталь в соответствии с предложенным способом цементации осуществляется со скоростью 0,11 мм/с, что значительно выше скорости проникновения углерода в металл (порядка 0,1 мм/ч) при традиционных способах цементации партии деталей в контейнере с твердым карбюризатором. Ускоренное проникновение углерода в металл облегчается тем, что при температуре 960 К, что ниже точки фазового перехода A_1 , количество образующегося атомарного углерода, адсорбированного поверхностью стали, увеличивается почти в 8 раз в сравнении с температурой 1230 К, при которой обычно ведется цементация в твердом карбюризаторе. При температуре 1230 К входные сечения в межкристаллитные, межблочные и межфрагментарные полости увеличиваются, что облегчает проникновение в них углерода и транспорт его в металл.

Нами была разработана методика проведения эксперимента по цементации импульсным методом.

Суть эксперимента заключалась в том, что стальные образцы из низкоуглеродистой стали в герметичных контейнерах с твердым карбюризатором подвергались импульсному воздействию электромагнитного поля с целью получения содержания углерода в поверхностном слое от 0,8 до 1,2 %.

В соответствии с диаграммой железо-цементит (рис.1) температура точки A_{c3} должна быть не ниже 1200 К, а A_{r3} – не выше 1000 К. Верхний предел температурного интервала 1220 К устанавливается по L -образной диаграмме (рис.2). В этом случае при выдержке порядка 100 с при экстремальной температуре произойдет гомогенизация аустенита. Нижний предел температурного интервала термоциклирования 950 К устанавливается по S -образной диаграмме. В этом случае при выдержке порядка 100 с происходит при экстремальной температуре изотермическое превращение аустенита. Для уверенного завершения процессов превращения выдержка при экстремальных температурах

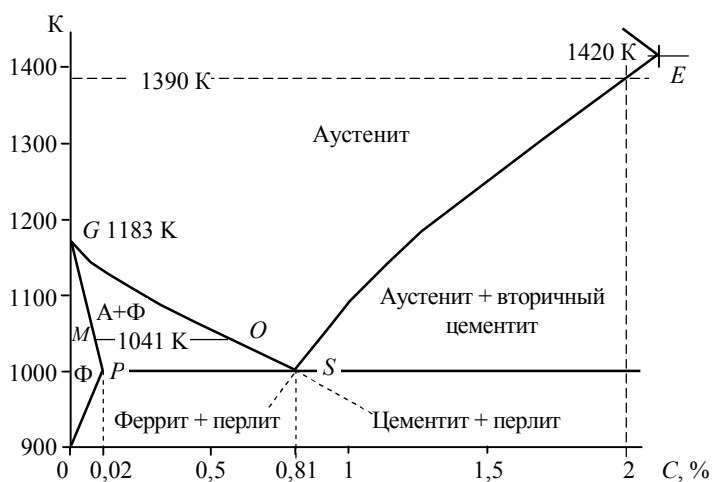


Рис. 1. Фрагмент диаграммы железо-цементит

GSE – верхняя граница изотермического аустенитного превращения;
 PS – нижняя граница изотермического феррит-перлитного превращения;
 $SK_{ц+п}$ – нижняя граница изотермического цементит-перлитного превращения

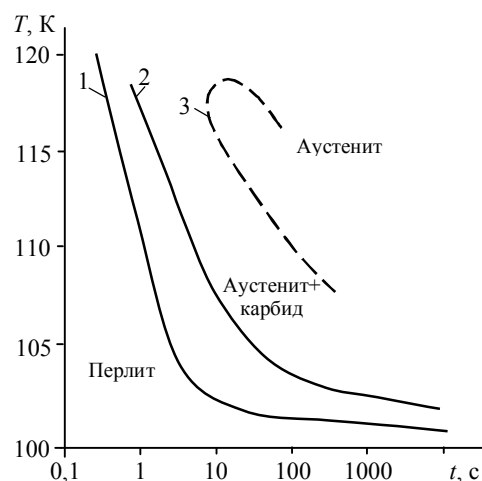


Рис. 2. Диаграмма изотермического образования аустенита из перлита для стали, 0,8 % С

1 – начало превращения перлита в аустенит;
2 – конец превращения перлита в аустенит;
3 – зона гомогенизации

принимается 5 мин. При выполнении эксперимента варьируется количество циклов и их длительность. Время цементации при любом из опытов не превышало 1,5 ч. Проникновение углерода в сталь осуществляется на всю глубину образца. Для получения содержания углерода в стали более 0,8 % необходимо провести более трех циклов нагрев-охлаждение. Оценка эффективности проведения эксперимента, осуществленная с помощью твердомера ТР 5006-02, показала увеличение твердости поверхности цементованных образцов не менее HRC 65. Структура образцов после цементации представлена зернистыми перлитами, сорбитами, верхними бейнитами с содержанием углерода от 0,8 до 1,2 %.

Способ легирования стали алюминием. Данный способ легирования стали алюминием относится к химико-термической обработке и получению диффузионных покрытий, и может быть использован для придания поверхности стали особых физико-химических свойств в целях увеличения жаростойкости и износостойкости деталей [10]. Способ легирования стали алюминием включает не менее трех циклов нагрева стальных деталей пучками импульсов электромагнитного излучения в насыщающей среде выше точки A_{c3} с последующим охлаждением ниже точки A_{r1} при скорости нагрева и охлаждения не менее 1 К/с. Нагрев в отличие от первого способа производят до температуры не выше 1220 ± 10 К и охлаждение до температуры не ниже 820 ± 10 К, продолжительность выдержки при нагреве и охлаждении при экстремальных температурах определяется необходимой глубиной проникновения алюминия и равномерностью распределения его в стали. Для увеличения скорости насыщения обработку ведут в расплаве алюминия, при этом для предотвращения окисления алюминия поверхность расплава засыпают тонким слоем кокса или древесного угля.

Способ повышения устойчивости катодно-защищенного трубопровода к эксплуатации в кислотной и щелочной среде. Еще один способ повышения стойкости металла трубопроводов к коррозии, предложенный авторами статьи [11], относится к способам повышения стойкости металла к коррозии и может быть использован в подземном трубопроводном транспорте.

Задачей изобретения является предотвращение коррозионных повреждений наружной поверхности подземного катодно-защищенного трубопровода путем нанесения на его поверхность устойчивого к коррозии и действию кислот и щелочей покрытия.

Поставленная задача достигается способом повышения стойкости металла трубопроводов к коррозии, включает нагрев в углеродсодержащей среде до температуры насыщения, выдержку и охлаждение. С целью упрощения процесса и сокращения длительности обработки нагрев и выдержку проводят в пламени дуги между графитовыми электродами при 1200-1400 °С, при этом в трубе поддерживается давление 50-75 % от рабочего, цементацию ведут методом сканирования, а нагретую поверхность охлаждают водой.

Новыми существенными признаками являются:

- для исключения растрескивания нанесенного защитного и упрочняющего слоя карбида железа на поверхности трубы в процессе ее эксплуатации цементацию ведут при давлении в трубе 50-75 % от рабочего, создаваемого в процессе ее эксплуатации;



- для обработки всей наружной (или внутренней) поверхности трубы цементацию ведут методом сканирования, строка за строкой, перемещая пламя дуги по поверхности трубы по винтовой линии;
- нагретую угольной электрической дугой поверхность трубы охлаждают водой в целях интенсификации процесса образования карбидов железа.

Технический результат изобретения достигается тем, что для осуществления способа нагрев пятна диаметром 20-40 мм на поверхности трубы до температуры 1200-1400 °С осуществляется высокотемпературным пламенем электродуговой горелки с двумя графитовыми электродами, установленными под углом 30° друг к другу в течение 5-25 с. Зазор между электродами 4-8 мм. Поверхность трубы находится на расстоянии 10 мм от концов электродов в зоне действия пламени угольной дуги. К электродам подводится электрический ток 50-250 А от сварочного трансформатора. Температура пламени электрической дуги составляет 3000-4000 °С. Электродинамическими силами в металл трубы на глубину до 2 мм внедряется атомарный и ионизированный углерод. Пламя дуги перемещается по поверхности трубы по винтовой линии виток к витку со скоростью 2-20 мм/с. В целях интенсификации процесса образования карбида железа нагретую электрической угольной дугой поверхность металла (на расстоянии 75-100 мм от пламени дуги) охлаждают водой температурой 20 °С. Образовавшийся на поверхности трубы плотный слой карбида железа устойчив к коррозии, действию кислот и щелочей и к стресс-коррозии, так как препятствует проникновению в сталь атомарного водорода и имеет прочность 2000 Н/мм² [2].

Выводы

1. В целях безопасной эксплуатации подземных трубопроводов рекомендовать к апробации запатентованные инженерно-технические решения, направленные на предупреждение коррозии металла трубопроводов и сохранение их прочностных свойств.
2. Наличие у железистых сплавов двух фаз и фазовых переходов первого рода, обеспечивающих при создании оптимальных температурных условий энергичный фазовый массоперенос атомов внедрения, позволяет использовать возможность насыщения поверхностных слоев стали различными легирующими компонентами, изменяющими физико-химические и потребительские свойства стали.
3. Для получения стали, легированной металлоидами, легирующие компоненты должны отвечать условиям температурного коридора термоциклирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бэкман В. Катодная защита от коррозии / В.Бэкман, В.Швенк. М.: Металлургия, 1984. 496 с.
2. Волохина А.Т. Снижение риска аварийности магистральных трубопроводов за счет совершенствования профессионально важных качеств рабочих основных профессий // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М.Губкина: Сб. научных статей по проблемам нефти и газа. 2010. № 3. С.124-129.
3. Голдобина Л.А. Предупреждение межкристаллитной и стресс-коррозии металла подземных трубопроводов / Л.А.Голдобина, П.С.Орлов, В.С.Шкрабак // Современные проблемы безопасности жизнедеятельности: настоящее и будущее: Материалы III Международной научно-практической конференции в рамках форума «Безопасность и связь» / ГБУ «Научный центр безопасности жизнедеятельности». Казань, 2014. С.496-506.
4. Голдобина Л.А. Пути снижения аварийности на подземных трубопроводах коммунального хозяйства / Л.А.Голдобина, П.С.Орлов // Инновационные процессы в сфере сервиса: проблемы и перспективы: Сборник научных трудов по результатам II Международной научно-практической конференции, 16 июня 2010 г. СПб: Изд-во СПбГУЭСЭ, 2010. Т.2. С.296-300.
5. Голдобина Л.А. Снижение последствий техногенных катастроф при эксплуатации подземных трубопроводов внедрением методики определения мест межкристаллитной коррозии / Л.А.Голдобина, П.С.Орлов // Научно-технический журнал НИИТТС «Технико-технологические проблемы сервиса». 2010. № 4 (14). С.18-25.
6. Голдобина Л.А. Обеспечение коррозионной стойкости стальных подземных трубопроводов путем управления фазовыми переходами при термообработке на базе теории электронной модели образования молекулы водорода / Л.А.Голдобина, В.П.Гусев, А.П.Орлов // Там же. 2013. № 1(23). С.36-43.
7. Голдобина Л.А. Предупреждение аварий и катастроф на катодно-защищенных подземных трубопроводах бесконтактными методами идентификации коррозионного разрушения / Л.А.Голдобина, В.С.Шкрабак, П.С.Орлов / Ярославская сельскохозяйственная академия. Ярославль, 2012. 202 с.
8. Обоснование прогрессивных технологий для предотвращения аварий на взрывоопасных объектах АПК / Л.А.Голдобина, В.П.Гусев, П.С.Орлов, Р.В.Шкрабак, В.С.Шкрабак // Естественные, технические и экономические науки: Вестник Саратовского аграрного университета. 2013. № 5. С.54-61.
9. Патент № 2355816 РФ. Способ ускоренной цементации стальных деталей / А.П.Орлов, В.С.Шкрабак, В.П.Гусев, Л.А.Голдобина, Г.Ф.Мокшанцев. Оpubл. 20.05.2009. Бюл. № 14.



10. Патент № 2431696 РФ. Способ легирования стали алюминием / Л.А.Голдобина, В.П.Гусев, А.П.Орлов, В.С.Шкрабак. Оpubл.20.10.2011. Бюл. № 29.
11. Патент № 2488649 РФ. Способ повышения стойкости стальных трубопроводов к коррозии цементацией / Л.А.Голдобина, В.П.Гусев, А.П.Орлов, В.С.Шкрабак. Оpubл.27.07.2013. Бюл. № 21.
12. Патент № 2283893 РФ. Способ ускоренной цементации стали / А.П.Орлов, В.П.Гусев, Л.А.Голдобина. Оpubл.20.09.2006. Бюл. № 26.
13. Патент № 2025509 РФ. Способ упрочнения поверхностей стальных изделий / В.К.Загорский, Я.В.Загорский, Б.В.Карпов. Заявл.03.02.1991. Оpubл.30.12.1994.
14. Причины аварий на подземном трубопроводном транспорте и современные методы их устранения / П.С.Орлов, В.С.Шкрабак, Л.А.Голдобина, Е.С.Попова // Аграрный научный журнал. 2015. № 6. С.59-64.
15. Предупреждение катастроф, аварий и травматизма при эксплуатации подземных трубопроводов / Л.А.Голдобина, П.С.Орлов, В.С.Шкрабак, Е.С.Попова // Известия СПбГАУ. Ежеквартальный научный журнал. 2011. № 24. С.367-373.

Авторы: Л.А.Голдобина, д-р техн. наук, профессор, kaf-sgp@mail.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Россия), П.С.Орлов, д-р техн. наук, профессор, p.orlov@yarsx.ru (Ярославская государственная сельскохозяйственная академия, Россия).

Статья принята к публикации 17.12.2015.

ANALYSIS OF THE CORROSION DESTRUCTION CAUSES IN UNDERGROUND PIPELINES AND NEW SOLUTIONS FOR INCREASING CORROSION STEEL'S RESISTANCE

L.A.GOLDOBINA¹, P.S.ORLOV²

¹Saint-Petersburg Mining University, Russia

²Yaroslavl State Agricultural Academy, Russia

This article deals with the issues concerning the accidents relevant to the underground pipelines operation. These pipelines transport gas, oil and its derivatives. The statistical analysis results of accidents in underground pipelines operated in Russia, as well as the analysis of the explosion causes in underground pipelines and primarily gasified objects are provided. It is shown that stress corrosion arising as a result of the phenomenon of hydrogenation is the most dangerous for large-diameter gas pipelines. The author proposes the justified and protected by RF patents new engineering solutions for consideration. They are aimed at improving resistance of steel structures against corrosion. Also a method of increasing the hardness, strength and wear resistance of steel parts surfaces by rapid cementation due to saturation of the carbon steel surfaces; a steel alloying method using aluminum to obtain diffusion coatings; and a method of applying a corrosion resistant and stable to acids and alkalis coating on the steel surface are presented. Proposed new technologies are accompanied by an explanation of the physical and chemical processes occurring in steel. The experimental results confirmed the validity of those decisions.

Key words: underground pipelines, gas pipelines, metal resistance, corrosion, intercrystalline corrosion.

How to cite this article: L.A.Goldobina, P.S.Orlov. Analysis of the corrosion destruction causes in underground pipelines and new solutions for increasing corrosion steel's resistance. Zapiski Gornogo instituta. 2016. Vol.218, p.459-464. DOI 10.18454/PML.2016.3.459

REFERENCES

1. Bekman V., Shvenk V. Katodnaya zashchita ot korrozii (*Cathodic protection*). Moscow: Metallurgiya, 1984, p.496.
2. Volokhina A.T. Snizhenie riska avariinosti magistral'nykh truboprovodov zaschet sovershenstvovaniya professional'no vaznykh kachestv rabochikh osnovnykh professii (*Reducing the risk of accidents of pipelines by sovershenstvova professionally important qualities of major workers*). Trudy Rossiiskogo gosudarstvennogo universiteta nefi i gaza imeni I.M.Gubkina: Sb. nauchnykh statei po problemam nefi i gaza. 2010. N 3, p.124-129.
3. Goldobina L.A., Orlov P.S., Shkrabak V.S. Preduprezhdenie mezhkristallitnoi i stress-korrozii metalla podzemnykh truboprovodov (*Warning and intergranular stress corrosion of underground metal pipelines*). Sovremennye problemy bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti: nastoyashchee i budushchee: Materialy III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii v ramkakh foruma «Bezopasnost' i svyaz'». GBU «Nauchnyi tsentr bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti». Kazan', 2014, p.496-506.
4. Goldobina L.A., Orlov P.S. Puti snizheniya avariinosti na podzemnykh truboprovodakh kommunal'nogo khozyaistva (*Ways to reduce accidents in underground pipelines Comunaletion facilities*). Innovatsionnye protsessy v sfere servisa: problemy i perspektivy: Sbornik nauchnykh trudov po rezul'tatam II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii 16 iyunya 2010 g. St. Petersburg: Izd-vo SPbGUSE, 2010. Vol.2, p.296-300.
5. Goldobina L.A., Orlov P.S. Snizhenie posledstviy tekhnogennykh katastrof pri ekspluatatsii podzemnykh truboprovodov vne-dreniem metodiki opredeleniya mest mezhkristallitnoi korrozii (*Reducing the effects of man-made disasters in the operation of a pipeline-earth implementation of methods for determining the locations of intergranular corrosion*). Nauchno-tekhnikeskii zhurnal NIITS «Tekhniko-tehnologicheskie problemy servisa». 2010. N 4 (14), p.18-25.
6. Goldobina L.A., Gusev V.P., Orlov A.P. Obespechenie korroziionnoi stoikosti stal'nykh podzemnykh truboprovodov putem upravleniya fazovymi perekhodami pri termoobrabotke na baze teorii elektronnoi modeli obrazovaniya molekuly vodoroda (*Ensuring the corrosion resistance of steel underground truboprovoing by controlling the phase transitions during the heat treatment on the basis of the theory of electronic model Obration of the hydrogen molecule*). Tam zhe. 2013. N 1(23), p.36-43.
7. Goldobina L.A., Shkrabak V.S., Orlov P.S. Preduprezhdenie avarii i katastrof na katodno-zashchishchennykh podzemnykh truboprovodakh beskon-taktnymi metodami identifikatsii korroziionogo razrusheniya (*Preventing accidents and disasters on a cath-*



ode-protected pipeline of underground-governmental contactless methods of identification of corrosion destruction). Yaroslavskaya sel'skokhozyaistvennaya akademiya. Yaroslavl', 2012, p.202.

8. Goldobina L.A., Gusev V.P., Orlov P.S., Shkrabak R.V., Shkrabak V.S. Obosnovanie progressivnykh tekhnologii dlya predotvrashcheniya avarii na vzyvoopasnykh ob'ektakh APK (Justification of advanced technologies to prevent accidents at hazardous facilities APC). Estestvennye, tekhnicheskie i ekonomicheskie nauki: Vestnik Saratovskogo agrarnogo universiteta. 2013. N 5, p.54-61.

9. Patent N 2355816 RF. Orlov A.P., Shkrabak V.S., Gusev V.P., Goldobina L.A., Mokshantsev G.F. Sposob uskorennoi tsementatsii stal'nykh detalei (The method of accelerated carburizing steel parts). Opubl. 20.05.2009. Byul. N 14.

10. Patent N 2431696 RF. Goldobina L.A., Gusev V.P., Orlov A.P., Shkrabak V.S. Sposob legirovaniya stali alyuminiem (A method of alloying of steel with aluminum). Opubl.20.10.2011. Byul. N 29.

11. Patent N 2488649 RF. Goldobina L.A., Gusev V.P., Orlov A.P., Shkrabak V.S. Sposob povysheniya stoikosti stal'nykh truboprovodov k korrozii tsementatsiei (A method of increasing the resistance to corrosion of steel pipe tsetation). Opubl.27.07.2013. Byul. N 21.

12. Patent N 2283893 RF. Orlov A.P., Gusev V.P., Goldobina L.A. Sposob uskorennoi tsementatsii stali (The method of accelerated carburizing steel). Opubl.20.09.2006. Byul. N 26.

13. Patent N 2025509 RF. Zagorskii V.K., Zagorskii Ya.V., Karpov B.V. Sposob uprochneniya poverkhnosti stal'nykh izdelii (A method of surface hardening steel products). Zayavl.03.02.1991. Opubl.30.12.1994.

14. Orlov P.S., Shkrabak V.S., Goldobina L.A., Popova E.S. Prichiny avarii na podzemnom truboprovodnom transporte i sovremennye metody ikh ustraneniya (Cause of the accident on the underground pipeline and modern methods of their elimination). Agrarnyi nauchnyi zhurnal. 2015. N 6, p.59-64.

15. Goldobina L.A., Orlov P.S., Shkrabak V.S., Popova E.S. Preduprezhdenie katastrof, avarii i travmatizma pri ekspluatatsii podzemnykh truboprovodov (Preventing disasters, accidents and injuries in the operation of underground pipelines). Izvestiya SPbGAU. Ezhekvertal'nyi nauchnyi zhurnal. 2011. N 24, p.367-373.

Authors: L.A.Goldobina, Dr. of Engineering Sciences, Professor, kaf-sgp@mail.ru (Saint-Petersburg Mining University, Russia), P.S.Orlov, Dr. of Engineering Sciences, Professor, p.orlov@yarcx.ru (Yaroslavl State Agricultural Academy, Russia).
Manuscript Accepted 17.12.2015.

УДК 331.452; 622.33

КОРПОРАТИВНЫЕ ПРОГРАММЫ «НОЛЬ НЕСЧАСТНЫХ СЛУЧАЕВ» КАК ЭЛЕМЕНТ СТРАТЕГИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ОХРАНЫ ТРУДА ДЛЯ УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

М.Л.РУДАКОВ

Санкт-Петербургский горный университет, Россия

Приведен аналитический обзор состояния условий и охраны труда в организациях угледобывающей промышленности в России, странах Европейского союза и Австралии. Проанализированы абсолютные и относительные показатели травматизма со смертельным исходом, а также их динамика по годам для угольных предприятий в контексте понимания факторов, способствующих успешному внедрению концепции «Ноль несчастных случаев» на предприятиях угольной отрасли.

Отмечена важность наличия на стадии проектирования информации о напряженно-деформированном состоянии массива и его изменениях в процессе отработки свит пластов. На основе лучших практик даны общие рекомендации по успешному применению концепции «ноль несчастных случаев» в стратегическом планировании в области охраны труда для организаций Российской Федерации. Приведен обобщенный перечень информационных источников, посвященных этой проблеме.

Ключевые слова: условия труда, производственный травматизм, промышленная безопасность, системы управления охраной труда и промышленной безопасностью, концепция «ноль несчастных случаев», угольный пласт, свита.

Как цитировать эту статью: Рудаков М.Л. Корпоративные программы «ноль несчастных случаев» как элемент стратегического планирования в области охраны труда для угледобывающих предприятий // Записки Горного института. 2016. Т.219. С.465-471. DOI 10.18454/PMI.2016.3.465

Как отмечалось в ряде публикаций последних лет [2, 4], основными стратегическими целями развития угольной промышленности России на период до 2030 г. являются:

- надежное и эффективное удовлетворение растущего внутреннего спроса на уголь нужного качества и продукты его переработки;
- дальнейшее укрепление позиций на внешних рынках с сохранением и, при возможности, увеличением на 20 % экспорта угля с переориентацией большего объема экспорта на азиатский рынок;
- обеспечение конкурентоспособности угольной продукции в условиях насыщенности внутреннего и внешнего рынка и наличия традиционных и альтернативных источников энергии;
- кардинальное повышение производительности труда при росте уровня безопасности добычи угля и снижении вредных воздействий на окружающую среду.

Вопросы промышленной безопасности угледобывающих предприятий и охраны труда работников этих предприятий в России всегда стояли достаточно остро. Несмотря на очевидную тенденцию снижения количества промышленных аварий и погибших на производстве работников, уровень безопасности в угольной промышленности России все еще вызывает серьезную тревогу.

В настоящей статье, носящей дискуссионный характер, делается обзор состояния условий и охраны труда в организациях угольной промышленности разных стран, а также рассматривается и анализируется возможность применения концепции «ноль несчастных случаев» для угледобывающих компаний. Следует отметить, что, в силу относительной «молодости» данной концепции, имеется значительный дефицит правовых и нормативных документов по этой тематике, поэтому в данной статье приводятся, в основном, результаты бенчмаркинг-исследований.

По данным Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор), в 2014 г. на предприятиях угольной промышленности произошло восемь аварий, из них две аварии с групповыми несчастными случаями, один групповой несчастный случай без аварии. При авариях и групповых несчастных случаях пострадали 10 чел., из них пять человек получили смертельные травмы. Общая численность смертельно травмированных работников составила 26 чел.¹

Неблагоприятные условия труда являются основной причиной профессиональных заболеваний работников угольной промышленности. Так, в России в 2014 г. наиболее высокий уровень профессиональной заболеваемости наблюдался в организациях, осуществляющих свою деятельность в сфере добычи полезных ископаемых (19,3 чел. на 10 тыс. работающих, в том числе в добыче каменного угля,

¹ Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2014 году / Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/ %D0 %93 %D0 %94 %202014.pdf](http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/%D0%93%D0%94%202014.pdf) (дата обращения 06.01.2016).



бурого угля и торфа – 79,7 чел., добыче угля подземным способом – 130,0 чел.). Среди причин, вызывающих профессиональную патологию, лидирующую роль играют неудовлетворительные условия труда: в организациях по добыче каменного угля, бурого угля и торфа 80,2 % работников заняты на рабочих местах с вредными и (или) опасными условиями труда². Именно на организации, занимающиеся экономической деятельностью «добыча каменного угля, бурого угля и торфа», в 2014 г. приходилась наибольшая доля работников, которым установлен хотя бы один вид компенсаций за работу во вредных или опасных условиях труда, – 84,3 %.

Экономические потери для предприятий, обусловленные неблагоприятными условиями труда, несчастными случаями на производстве и авариями, весьма негативно отражаются на себестоимости добычи угля и в конечном счете – на конкурентоспособности угольной продукции на внутреннем и внешнем рынках.

В современных условиях основным путем минимизации влияния неблагоприятных экономических тенденций на безопасность работы предприятий минерально-сырьевого комплекса следует считать концентрацию финансовых ресурсов на тех направлениях деятельности компании, которые характеризуются максимальным снижением риска травматизма и профзаболеваний на единицу затрат. К таким направлениям относятся: разработка научно обоснованных методов анализа последствий профзаболеваний и несчастных случаев; увеличение результативности системы контроля за состоянием охраны труда и промышленной безопасности; активное вовлечение персонала предприятий в функционирование системы управления охраной труда и промышленной безопасностью; организация оперативного сотрудничества работников низшего и среднего звена с руководителями компаний; повышение качества обучения методам обеспечения безопасности за счет внедрения инновационных технологий [1].

Решению отмеченных выше задач служило завершенное в 2015 г. исследование, проведенное под эгидой Европейского агентства по охране труда и посвященное бенчмаркинговым инициативам в сфере охраны труда для стран, входящих в Евросоюз [12].

Среди 11 основных инициатив, отмеченных в исследовании, три относятся к подходу, который в современных научных публикациях носит название концепция (или видение) «ноль несчастных случаев» (Zero Accident Vision):

- 1) форум «Ноль несчастных случаев», Финляндия;
- 2) сообщество «Ноль несчастных случаев», Нидерланды;
- 3) инициативы металлургической компании «АрселорМиттал», Люксембург, придерживающейся в своей стратегии принципа «путь к нулю несчастных случаев».

Подход «ноль несчастных случаев» предполагает, что в идеале все несчастные случаи на производстве рассматриваются как предотвратимые, и, соответственно, созданные на предприятиях современные системы управления охраной труда направлены на предотвращение несчастных случаев и инцидентов. Именно данный подход (Vision Zero) признается на международном уровне основой при формировании стратегии по охране труда в контексте развития культуры безопасности на производстве [8].

О важности применения данного подхода для предприятий на территории России говорит тот факт, что в мероприятиях типовой государственной программы субъекта Российской Федерации по улучшению условий и охраны труда на 2015-2017 годы³ предусмотрены разработка и внедрение в организациях субъекта Российской Федерации программ «нулевого травматизма», основанных на следующих принципах: ответственность руководителей и каждого работника за безопасность, соблюдение всех обязательных требований охраны труда, вовлечение работников в обеспечение безопасных условий и охрану труда, устранение выявленных опасностей, оценка и контроль за рисками на производстве, проведение регулярных аудитов безопасности, непрерывного обучения и информирования персонала по вопросам охраны труда.

Подход «ноль несчастных случаев» для организаций угольной промышленности (как в России, так и в зарубежных странах), конечно, может быть продекларирован, однако его практическую реализацию следует вести достаточно осторожно и последовательно, исходя из особенностей и

² Доклад о реализации государственной политики в области условий и охраны труда в Российской Федерации в 2014 году / Министерство труда и социальной защиты Российской Федерации [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.gosmintrud.ru/docs/mintrud/salary/24> (дата обращения 07.01.2016)

³ Письмо Минтруда России №15-3/10/П-4574 от 14 августа 2014 г. «О разработке проекта государственной программы субъекта Российской Федерации (подпрограммы государственной программы) по улучшению условий и охраны труда на 2015-2017 годы» / Министерство труда и социальной защиты Российской Федерации [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.gosmintrud.ru/docs/mintrud/salary/16> (дата обращения 13.01.2016)

Таблица 1

Динамика количества несчастных случаев в организациях по виду экономической деятельности «добыча каменного и бурого угля» в странах ЕС

Страна	Год				
	2009	2010	2011	2012	2013
Польша	2266 / 36	2201 / 15	1930 / 18	1766 / 16	1571 / 8
Испания	2624 / 2	2256 / 1	1798 / 6	1690 / 1	1372 / 6
Германия	558 / 0	520 / 0	430 / 1	272 / 2	297 / 1
Словакия	7 / 0	0 / 0	1 / 0	0 / 0	203 / 1
Великобритания	290 / 3	224 / 1	282 / 6	271 / 0	157 / 0
Румыния	281 / 4	241 / 1	182 / 7	159 / 3	111 / 0
Словения	117 / 0	115 / 0	78 / 0	110 / 0	89 / 0
Венгрия	2 / 0	3 / 0	2 / 0	1 / 0	84 / 0
Болгария	61 / 3	62 / 1	68 / 1	59 / 1	63 / 7
Италия	42 / 0	45 / 0	25 / 0	39 / 0	34 / 0
Финляндия	0 / 0	0 / 0	18 / 0	0 / 0	32 / 0
Норвегия	128 / 0	28 / 0	140 / 0	100 / 0	24 / 2
Чехия	543 / 1	449 / 2	516 / 7	17 / 5	0 / 0

Примечание. В числителе – общее количество несчастных случаев, в знаменателе – количество случаев со смертельным исходом.

опасностей производственного процесса угледобычи. Проиллюстрируем данный тезис несколькими примерами.

1. По данным статистических исследований компании BP, около половины мировой добычи угля – 46,9 % приходится на Китай. Остальные страны в данном рейтинге имеют существенно меньшую долю: США – 12,9 %, Индонезия – 7,2 %, Австралия – 7,1 %, страны Евросоюза – 6,6 %, Индия – 6,2 %, Россия – 4,3 %)⁴. Тем не менее, в настоящее время отсутствуют какие-либо сведения о результатах внедрения корпоративных программ «нулевого травматизма» на угледобывающих предприятиях Китая. Более того, имеются существенные трудности в получении объективных данных о количестве несчастных случаев на предприятиях угольной промышленности Китая (например, в базе данных Международной организации труда – LABORSTA эти данные отсутствуют).

2. В конце 2015 г. под эгидой Партнерства европейских исследований в области безопасности на производстве (PEROSH) был реализован проект по факторам, способствующим успешному внедрению программ «нулевого травматизма»⁵. В течение 2013-2015 годов был изучен опыт 27 европейских компаний, реализующих корпоративные программы «нулевого травматизма» и представляющих такие виды экономической деятельности, как строительство и обрабатывающие производства. Характерно, что среди исследованных организаций не было ни одной, производящей добычу полезных ископаемых.

3. О трудностях быстрого и успешного внедрения программ нулевого травматизма в организациях угольной промышленности косвенно могут свидетельствовать данные статистической службы Европейского союза (Eurostat) о несчастных случаях в организациях, осуществляющих добычу каменного и бурого угля (табл.1)⁶.

Отдельно были проанализированы показатели производственного травматизма со смертельным исходом в организациях по виду экономической деятельности «добыча каменного и бурого угля» в некоторых странах ЕС (табл.2)⁷,⁸.

Таблица 2

Абсолютные и относительные показатели производственного травматизма со смертельным исходом в организациях по виду экономической деятельности «добыча каменного и бурого угля» в некоторых странах ЕС за 2012 г. (в числителе) и 2013 г. (в знаменателе)

Страна	Показатель		
	Количество несчастных случаев со смертельным исходом	Объем добычи, млн т нефтяного эквивалента	Удельный показатель смертельного травматизма, чел./млн т нефтяного эквивалента
Польша	16/8	58,8/57,6	0,27 / 0,14
Испания	1/6	2,5/1,8	0,40 /3,33
Германия	2/1	47,8/44,7	0,04 /0,02
Болгария	1/7	5,5/4,7	0,18 /1,49

⁴ BP Statistical Review of World Energy. Coal. 2015. <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/coal-review-by-energy-type/coal-production.html> [accessed: January 6, 2016].

⁵ Success factors for the implementation of a zero-accident vision (ZAV) / TNO report 2015. <http://www.zeroaccidents.nl/publicatie-onderzoek-succes-factors-for-the-implementation-of-a-zero-accidents-vision-zav/> [accessed: January 9, 2016].

⁶ European Commission /Eurostat /Data /Database. <http://ec.europa.eu/eurostat/data/database> [accessed: January 2, 2016].

⁷ BP Statistical Review of World Energy. Coal. 2015. <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/coal-review-by-energy-type/coal-production.html> [accessed: January 6, 2016].

⁸ European Commission /Eurostat /Data /Database. <http://ec.europa.eu/eurostat/data/database> [accessed: January 2, 2016].



Как следует из приведенных таблиц, наряду с абсолютными показателями производственного травматизма достаточно информативными являются относительные показатели в расчете на 1 млн т добытого угля. Последний показатель характеризуется достаточной неравномерностью по странам ЕС, причем для Германии в 2012-2013 годах он имел минимальные значения среди стран ЕС.

4. Данные Австралийского государственного агентства Safe Work Australia также свидетельствуют о весьма постепенном и неравномерном характере снижения показателей производственного травматизма и профессиональной заболеваемости в организациях угольной промышленности (табл.3)^{9, 10}. Следует отметить, в Австралии за последнее десятилетие были приняты очень серьезные меры, направленные на профилактику производственного травматизма и повышение уровня безопасности на производстве. Например, достаточно успешно реализуется стратегия провинции Западная Австралия «Вперед, к нулю» («Towards Zero»), которая направлена на профилактику дорожно-транспортных происшествий, а также Программа лидерства «Ноль вреда на работе» в провинции Квинсленд.

Таблица 3

Показатели производственной безопасности для организаций угольной промышленности Австралии

Показатель	Годы*				
	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014
Количество производственных травм и профессиональных заболеваний в пересчете на 1 млн отработанных человеко-часов (без учета смертельных травм)	7,4	7,0	7,4	9,1	6,7
Количество производственных травм и профессиональных заболеваний в пересчете на 1000 работников (без учета смертельных травм)	16,2	15,6	16,4	20,1	14,3

* Период с 1 июля предыдущего года до 30 июня последующего года.

Рассматривая вопросы стратегического планирования на угольных предприятиях Российской Федерации, следует отметить, что в последнее время ряд ведущих организаций реализуют корпоративные программы, близкие по идее к программам «нулевого травматизма». Например, ОАО «Объединенная угольная компания «Южкузбассуголь», входящая в компанию «Евраз» ставит перед собой цель «Ноль смертельных несчастных случаев и случаев тяжелого травматизма». В 2014 г. в компании наблюдалось поквартальное снижение коэффициента количества происшествий с потерей рабочего времени (LTIFR). В результате на конец года было отмечено снижение на 18 % к показателям предыдущего 2013 г., что соответствует заявленной цели обеспечить долгосрочную тенденцию к снижению этого показателя.

В целом по Российской Федерации проводимые мероприятия (внедрение современных систем управления охраной труда и промышленной безопасностью, надзорные и контрольные мероприятия, повышение уровня культуры охраны труда, корпоративные программы «ноль несчастных случаев» и другие) позволяют снижать аварийность и смертельный травматизм в угольной промышленности (табл.4). Динамика травматизма со смертельным исходом как в абсолютных значениях, так и в расчете на 1 млн т добытого угля за период с 2005 по 2014 г.¹¹ показывает, что за 2014 г. удельный показатель смертельного травматизма в отрасли составил 0,07 чел/млн т (в 2005 г. этот показатель составлял 0,36 чел/млн т, в 2010 г. – 0,41 чел/млн т), т.е. сравним с показателями стран Европейского союза.

Таблица 4

Динамика аварийности и травматизма на объектах угольной промышленности России

Показатель	Год									
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Количество аварий	27	23	21	12	9	22	13	16	11	8
Количество смертельных несчастных случаев	107	68	232	53	48	135	46	36	63	26
Удельный показатель смертельного травматизма, чел./млн т	0,36	0,23	0,73	0,16	0,15	0,41	0,13	0,10	0,17	0,07

⁹ National Data Set for Compensation-Based Statistics (NDS). Safe Work Australia. <http://www.safeworkaustralia.gov.au/sites/swa/statistics/pages/statistics> [accessed: January 2, 2016].

¹⁰ Work-related traumatic injury fatalities. Safe Work Australia. 2014. <http://www.safeworkaustralia.gov.au/sites/swa/about/publications/pages/work-related-traumatic-injury-fatalities-australia-2014> [accessed: January 9, 2016].

¹¹ Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2014 году / Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/ %D0 %93 %D0 %94 %202014.pdf](http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/%D0%93%D0%94%202014.pdf) (дата обращения 06.01.2016).



Обобщая факторы успешного внедрения корпоративных программ «нулевого травматизма» на зарубежных предприятиях [5-7, 9, 10, 11, 13], можно сделать следующие предварительные выводы относительно применимости данных программ на угледобывающих предприятиях России.

1. Если говорить о взаимосвязи программ «нулевого травматизма» и системы управления охраной труда и промышленной безопасностью в организациях, то такие программы обычно являются частью системы управления, а мероприятия, направленные на решение этой задачи, включаются в долгосрочную программу действий по снижению или устранению рисков повреждения здоровья на производстве. В этой связи особенно важна роль высшего руководства организациями в продвижении самой идеологии (видения) потенциальной предотвратимости несчастных случаев на производстве. Вместе с тем существует явная опасность дискредитации самой идеи в среде работников, если она не будет подкреплена реальными (хоть и постепенными) результатами. Таким образом, в качестве первого этапа внедрения данной программы целесообразно ориентироваться на поэтапное снижение относительных показателей смертельного травматизма в расчете на 1 миллион отработанных часов (на 1 млн т добытого угля) либо на снижение показателя LTIFR. (Например, за последние пять лет показатель LTIFR на предприятиях компании «СУЭК-Кузбасс» снизился с 2,66 до 1,50.)

2. Особо следует подчеркнуть важность внедрения программы «ноль травм» в контексте влияния технологических схем отработки угольных пластов на безопасность горных работ. Например, факторами, осложняющими ведение работ в зонах повышенного горного давления, являются опасность формирования горных ударов (внезапных выбросов), нарушения устойчивости выработок и их сопряжений с лавой, вывалообразование и отжим угля в призабойном пространстве лав. Негативное влияние факторов может быть комплексным, причем наиболее сложные условия формируются при интенсивной отработке газоносных пластов, склонных к самовозгоранию. Обеспечение высоких нагрузок на очистные забои при требуемом уровне безопасности горных работ в таких условиях, особенно при реализации структуры «шахта – лава», предъявляет особые требования к качеству проектов отработки пластов.

Ряд отечественных исследований влияния параметров технологических схем отработки свит полных газоносных пластов на эффективность и безопасность горных работ позволили разработать комплекс рекомендаций по обеспечению эффективности и безопасности отработки пластов в условиях их взаимного влияния [3].

3. Другим достаточно важным моментом является взаимосвязь между информированием работников о программе «ноль несчастных случаев» и формой представления данной программы для работников низового звена (горнорабочий подземный, горнорабочий очистного забоя и др.), т.е. для тех групп работников, кто постоянно сталкивается с риском травмирования на производстве. Зачастую требования к обеспечению безопасности сопровождаются иллюстрациями (плакатами) правильного и неприемлемого поведения в тех или иных ситуациях, обучающими видеофильмами, деловыми играми и др. Немаловажным фактором успешности являются собственный корпоративный логотип программы и запоминающийся лозунг, под которым она реализуется.

4. Организация аудитов безопасного поведения работников, проводимых представителями службы совместно с представительными органами работников (профсоюзом). Основная цель данных аудитов заключается отнюдь не в наложении на нарушителей дисциплинарных взысканий, а в выявлении коренных причин, побуждающих работников игнорировать требования безопасности.

5. Пересмотр при необходимости политики организации в области охраны труда и промышленной безопасности с вовлечением работников в процесс управления, в том числе – через деятельность комитетов (комиссий по охране труда). Как показывает практика, работники, участвующие, например, в работе команд по оценке рисков, рассматривают вопросы безопасности на производстве уже не только как набор инструкций, за которые они должны расписаться, но как живой процесс, на который они могут влиять и нести ответственность за его результаты.

Предпринимая меры по активному вовлечению работников в процесс управления безопасностью, следует иметь в виду, что мероприятия не могут дать немедленного эффекта. Как правило, реальное снижение показателей производственного травматизма, включая микротравмы, происходит через 2-3 года после начала реального вовлечения работников.

6. В целях оперативного ознакомления с лучшими практиками в сфере охраны труда и промышленной безопасности рекомендуется регулярно использовать следующие информационные ресурсы:

– форум «Ноль несчастных случаев», Финляндия (Finnish Zero Accident Forum) (http://www.ttl.fi/en/safety/occupational_accidents/zero_accident_forum/pages/default.aspx);



- сообщество «Ноль несчастных случаев», Нидерланды (Zero Accidents Network in the Netherlands) (<http://www.zeroaccidents.nl/over-het-netwerk/about/>);
- форум «Ноль несчастных случаев», Германия (German Zero Accident Forum) (<http://www.dguv.de/webcode/d664972>);
- польский форум лидерства в области безопасности (Polish Safety Leadership Forum) (http://www.ciop.pl/CIOPPortalWAR/appmanager/ciop/pl?_nfpb=true&_pageLabel=P30002831335688236754);
- программа лидерства «Ноль вреда на работе», провинция Квинсленд, Австралия (The Zero Harm at Work Leadership Programme by the Workplace Health and Safety Queensland), (<http://www.safe-workaustralia.gov.au/sites/swa/australian-strategy/case-studies/pages/zero-harm-at-work>);
- кампания «Ноль несчастных случаев», Корейское агентство по охране труда (Zero Accident Campaign (ZAC) by the Korea Occupational Safety and Health Agency (KOSHA), (<http://english.kosha.or.kr/english/content.do?menuId=6150>).

ЛИТЕРАТУРА

1. Гендлер С.Г. Опыт и перспективы управления охраной труда и промышленной безопасностью на предприятиях минерально-сырьевого комплекса / С.Г.Гендлер, М.Л.Рудаков, Л.Ю.Самаров // Горный журнал. 2015. № 5. С.84-87.
2. Заседание Правительства Российской Федерации «О долгосрочной программе развития угольной промышленности России на период до 2030 года» // Уголь. 2014. № 5. С.6-11.
3. Казанин О.И. О проектировании подземной отработки свит пологих газоносных угольных пластов // Записки Горного института. 2015. Т.215. С.38-45.
4. Плакиткина Л.С. Анализ состояния и прогноз развития угольной промышленности России до 2035 г. // Горный журнал. 2015. № 7. С.59-65.
5. Cudworth A. The positive impact of communication on safety at Shell // Strategic communication management. 2009. Vol.14 (1). P.16-19.
6. Drupsteen L. Identifying critical steps in learning from incidents / L.Drupsteen, J.Groeneweg, G.Zwetsloot // Journal of Occupational Safety and Ergonomics. 2013. Vol.19 (1). P.63-77.
7. Fahlquist J. Responsibility ascriptions and Vision Zero // Accident Analysis & Prevention. 2006. Vol.38. N 6. P.1113-1118.
8. Five Pillars for a culture of prevention in business and society – Strategies on Safety and Health at Work 2nd International Strategy Conference on Occupational Safety and Health – 3-4 February 2011, DGUV Academy. Dresden. <http://www.dguv.de/iag/veranstaltungen/strategiekonferenz2011/index-2.jsp> [accessed: January 17, 2016].
9. Geller E.S. 10 leadership qualities for a total safety culture // Professional Safety. 2000. Vol.45. P.38-41.
10. Matysiak J. F. The pursuit of zero accidents at Weirton // New Steel. 2001. Vol.17. N 5. P.34.
11. Minter S.G. The Power of Zero // Occupational Hazards. 2003. Vol.65. N 7. P.15-17.
12. Review of successful Occupational Safety and Health benchmarking initiatives / European Agency for Safety and Health at Work, 2015. <https://osha.europa.eu/en/tools-and-publications/publications/report-eu-osha-review-successful-occupational-safety-and-health/view> [accessed: January 7, 2016].
13. The case for research into the zero accident vision / G.Zwetsloot, M.Aaltonen, J.Wybo, J.Saari, P.Kines, R.Op De Beeck // Safety Science. 2013. Vol.58. P.41-48.

*Автор М.Л.Рудаков, д-р техн. наук, профессор, br@spti.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Россия)
Статья принята к публикации 20.02.2016.*

«ZERO ACCIDENT» CORPORATE PROGRAMMES AS AN ELEMENT OF STRATEGIC PLANNING IN THE FIELD OF OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH AT COAL MINING ENTERPRISES

M.L.RUDAKOV

Saint-Petersburg Mining University, Russia

The paper deals with analytical survey on the status of working conditions and occupational safety and health (OSH) issues at coal mining enterprises of the Russian Federation, European Union and Australia. Absolute and relative figures of occupational fatal injury rate are analyzed, as well as dynamics of accident and injury rate at the coal mining enterprises is the context of a better understanding of the factors that contribute to successes with implementing a 'Zero Accident Vision' in coal companies. Importance to possess information about stress-strain condition of the rock mass (at a design stage) and its changes in process of multiple seam mining is shown. General recommendations on successful implementation of the very concept in Russian companies are elaborated on the grounds of good practices gained. The list of information resources on this topic is given.

Key words: coal mining, working conditions, occupational traumatism, occupational safety and health, «zero accident vision», coal seam.

How to cite this article: Rudakov M.L. «Zero accident» corporate programmes as an element of strategic planning in the field of occupational safety and health at coal mining enterprises. Zapiski Gornogo instituta. 2016. Vol.219, p.465-471. DOI 10.18454/PMI.2016.3.465



REFERENCES

1. Gendler S.G., Rudakov M.L., Samarov L.Yu. Opit i perspektivi upravleniya okhranoj truda i ghjmishlennoj bezopasnost'u na predpriyatiyah mineral'no sir'evogo kompleksa (*Experience and prospects of occupational and industrial safety control in mineral mining and processing*). Gornyi Zhurnal. 2015. Vol.5, p.84-87.
2. Zasedanie Pravitel'stva Rossiyskoy Federacii «O dolgosrochnoy programme razvitiya ugol'noy promishlennosti na period do 2030 goda» (*Session of the Government of the Russian Federation «On the Long-term Program of Development of the Coal Industry of Russia for the Period till 2030»*). Ugol'. 2014. N 5, p.6-11.
3. Kazanin O.I. O proektirovani podzemnoj otrabotki svit pologih gazonosnih ugol'nih plastov (*Underground multiple gassy coal seam mining design features*). Zapiski Gornogo Instituta. 2015. N 215, p.38-45.
4. Plakitkina L.S. Annaliz sostoyaniya i prognoz razvitiya ugol'noy promishlennosti Rossii do 2035 goda (*Coal industry in Russia: State-of-the-art and growth prediction through 2035*). Gornyi Zhurnal. 2015. Vol.7, p.59-65.
5. Cudworth A. The positive impact of communication on safety at Shell. Strategic communication management. 2009. Vol.14 (1), p.16-19.
6. Drupsteen L., Groeneweg J., Zwetsloot G. Identifying critical steps in learning from incidents. Journal of Occupational Safety and Ergonomics. 2013. Vol.19 (1), p.63-77.
7. Fahlquist J. Responsibility ascriptions and Vision Zero. Accident Analysis & Prevention. 2006. Vol.38. N 6, p.1113-1118.
8. Five Pillars for a culture of prevention in business and society – Strategies on Safety and Health at Work 2nd International Strategy Conference on Occupational Safety and Health – 3-4 February 2011, DGUV Academy. Dresden. <http://www.dguv.de/iag/veranstaltungen/strategiekonferenz/2011/index-2.jsp> [accessed: January 17, 2016].
9. Geller E.S. 10 leadership qualities for a total safety culture. Professional Safety. 2000. Vol.45, p.38-41.
10. Matysiak J.F. The pursuit of zero accidents at Weirton. New Steel. 2001. Vol.17. N 5, p.34.
11. Minter S.G. The Power of Zero. Occupational Hazards. 2003. Vol.65. N 7, p.15-17.
12. Review of successful Occupational Safety and Health benchmarking initiatives / European Agency for Safety and Health at Work, 2015. <https://osha.europa.eu/en/tools-and-publications/publications/report-eu-osha-review-successful-occupational-safety-and-health/view> [accessed: January 7, 2016].
13. Zwetsloot G., Aaltonen M., Wybo J., Saari J., Kines P., Op De Beeck R. The case for research into the zero accident vision. Safety Science. 2013. Vol.58, p.41-48.

Author M.L.Rudakov, Dr. of Engineering Sciences, Professor, bp@spmi.ru (Saint-Petersburg Mining University, Russia).
Manuscript Accepted 20.02.2016.



УДК 504.5, 669.21

К ВОПРОСУ О НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ЦИАНИСТЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ СРЕДОЗАЩИТНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ПРИ ИЗВЛЕЧЕНИИ ТОНКОВКРАПЛЕННОГО САМОРОДНОГО ЗОЛОТА ИЗ КОРЕННЫХ ПОРОД

И.В.ФЕДОСЕЕВ¹, М.Ш.БАРКАН²

¹Калужский филиал МГТУ им. Н.Э.Баумана, Россия

²Санкт-Петербургский горный университет, Россия

При эксплуатации золотообогатительных переделов производства с использованием цианистого натрия образуются значительные объемы высокотоксичных отходов производства: жидкие стоки, газообразные выбросы, твердые хвосты процессов цианирования.

Подобная негативная нагрузка как результат некорректной природоохранной деятельности на золотоперерабатывающих предприятиях приводит к распространению загрязняющих высокотоксичных веществ, что может стать причиной крупномасштабной деградации природной среды в зоне воздействия золотоизвлекающих фабрик.

Для проведения средозащитных мероприятий необходимо учитывать свойства и условия миграции загрязнителей в естественных условиях.

Ключевые слова: экологическая безопасность, производство золота, цианосодержащие соединения.

Как цитировать эту статью: Федосеев И.В. К вопросу о нейтрализации цианистых соединений при проведении средозащитных мероприятий при извлечении тонковкрапленного самородного золота из коренных пород / И.В.Федосеев, М.Ш.Баркан // Записки Горного института. 2016. Т.219. С.472-476. DOI 10.18454/PMI.2016.3.472

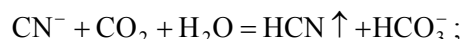
В основе технологических линий производства золота на золотоперерабатывающих предприятиях, помимо гравитации и флотации, лежат процессы выщелачивания золотосодержащих концентратов с использованием цианида натрия – сильнодействующего ядовитого вещества [1]. Общеизвестно, что цианистые соединения ядовиты. Токсичными свойствами обладают все цианистые соединения, способные выделять циан-ион CN^- , т.е. все обладающие значительной растворимостью [3].

Минералогический состав золотоносных руд отличается большим разнообразием. В руде всегда имеются как инертные к цианиду, так и активно реагирующие с цианидом вещества, породы и минералы. Сопутствующие цианированию побочные реакции с различными рудными компонентами, в том числе сульфидными минералами железа и меди, могут привести к образованию сточных вод, содержащих в своем составе широкий спектр различных токсичных цианосодержащих соединений: простые цианиды, роданиды, комплексные цианистые соединения меди и железа. Помимо этого, указанные вещества входят в состав жидкой фракции образующихся хвостов цианирования.

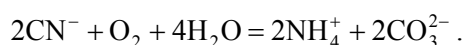
Простые цианиды представляют собой соли синильной кислоты. Ввиду растворимости легко отдадут в раствор цианид-ион CN^- , что приводит к их распространенности в составе сточных вод. Наиболее опасны для живых организмов, смертельная доза для человека 0,12 г. На золотоперерабатывающих предприятиях представлены основным реагентом – цианидом натрия $NaCN$. Сухой цианид натрия в виде высокодисперсного аэрозоля способен образовываться в отделениях приготовления реагентов и выступать в качестве вещества, загрязняющего атмосферный воздух.

В результате функционирования золотоперерабатывающих предприятий цианиды попадают в хвостохранилища и ближайшие водные объекты. Основные факторы, влияющие которых сказаться на поведении цианидов в водоемах, следующие: рН вод, показатели растворенного кислорода и углекислоты, содержание в воде различных неорганических соединений, свет, тепло, жизнедеятельность микроорганизмов. Известно, что в условиях водоемов простые растворимые цианиды разрушаются двумя путями:

- выделяются в атмосферу в виде цианистого водорода под действием углекислого газа



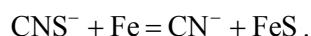
- окисляются кислородом в присутствии микроорганизмов с образованием ионов аммония и карбонат-ионов



В хвостохранилищах окисление, как правило, не происходит, так как в водах отсутствуют микроорганизмы. В присутствии микроорганизмов, всегда содержащихся в природных водах, этот процесс происходит с достаточной интенсивностью и при благоприятных условиях (летний период, хорошее освещение) достигает 30 %. Процесс удаления цианидов за счет углекислого газа всегда превалирует над процессом окисления [4].



Роданиды гораздо менее токсичны, чем простые цианиды. Так, ПДК NaCN в воздухе рабочей зоны составляет $0,3 \text{ мг/м}^3$, а соответствующая ПДК NaCNS равна 10 мг/м^3 . Роданиды обладают раздражительным действием, а при длительном воздействии угнетают функции щитовидной железы, поражают почки. При контакте с сильными окислителями и металлическим железом способны высвобождать цианид-ион:



Роданиды образуются в большом количестве на предприятиях по переработке сульфидных руд, входят в состав сточных вод.

Комплексные ядовитые растворимые цианиды – комплексные цианистые соединения меди, токсичные сами по себе. Самым устойчивым из них является двухвалентный цианистый комплекс трицианокупрата натрия $\text{Na}_2[\text{Cu}(\text{CN})_3]$, который обладает частичной растворимостью в воде.

Данное соединение является весьма ядовитым и опасным. Вместе с жидкой фазой пульпы оно попадает в хранилище твердых отходов цианирования и входит в состав образующихся сточных вод. Подобно простым нерастворимым цианидам способно мигрировать с инфильтрационными водами.

Комплексные неядовитые растворимые цианиды представлены комплексными цианистыми соединениями железа – ферроцианидами, в том числе гексацианоферратом натрия $\text{Na}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$, который не ядовит, однако способен выделять простые цианиды и синильную кислоту:

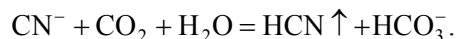


Как и прочие цианистые соединения, ферроцианид в тонкодисперсном виде способен мигрировать на различные расстояния и попав в среду повышенной кислотности, может распасться с выделением цианид-иона [5].

Стоит отметить, что при приготовлении реагентов и гидролизе рабочих цианистых растворов в атмосферный воздух могут выделяться возгоны, содержащие в своем составе пары синильной кислоты. Синильная кислота образуется при приготовлении и использовании растворов цианида натрия в процессе его гидролиза при недостатках концентраций «защитной щелочи». В результате синильная кислота, выделяясь из растворов и технологических аппаратов, способна попадать в окружающую среду через систему вентиляции золотоперерабатывающих фабрик.

Таким образом, синильная кислота ввиду своей летучести и сильных токсичных свойств является крайне опасным соединением, легко мигрирующим на далекие расстояния. Свойства, обуславливающие ее способность растворяться в воде, приводят к заражению водных объектов в зоне действия предприятия и загрязнению дождевых масс, что может привести к многофакторному негативному воздействию гидроцианида на компоненты окружающей среды.

Согласно принятой практике, сточные воды золотоперерабатывающих предприятий подлежат размещению в хвостохранилищах, изолированных от контакта с грунтовыми и поверхностными водами, а также с естественным почвенным покровом. С течением времени простые растворимые цианиды, входящие в состав сточных вод, под влиянием природных факторов разрушаются путем взаимодействия с углекислым газом, что приводит к выделению в атмосферный воздух цианистого водорода [4]



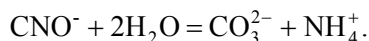
Таким образом, процесс самоочистки циансодержащих сточных вод под действием природных факторов сопровождается эмиссиями синильной кислоты в воздух. Становится ясным, что изоляции жидких отходов от контакта с природными водами и почвами недостаточно для предотвращения выделений высокотоксичных компонентов в окружающую среду.

Минимизация негативного воздействия золотоперерабатывающих производств требует реализации инженерных природоохранных решений, направленных на глубокое обезвреживание всех образующихся при производстве отходов – жидких, твердых, газообразных. Причем, из-за процессов разложения комплексных цианистых соединений и выделения летучей синильной кислоты недопустимо размещение необезвреженных жидких и твердых отходов в естественных условиях на продолжительные периоды.

Для обезвреживания циансодержащих сточных вод в мировой практике используют ряд методов, направленных на окисление цианистых соединений до менее опасных веществ: обработка кислотой Каро, щелочное хлорирование, автоклавное окисление кислородом и окисление озоновоздушной смесью [2].



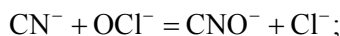
Широкое распространение в США и Канаде получил метод окисления кислотой Каро [3] – смесью диоксида серы и воздуха в присутствии медного катализатора. Этот метод может предусматривать использование в качестве окислителя SO_2 из различных источников (сжигание серы, сжиженный газ и пр.) и воздуха. Образующиеся при окислении цианат-ионы нестабильны и гидролизуются до углекислого газа и солей аммония:



Процесс очистки реализуют при перемешивании с использованием контактного чана, в нижнюю часть которого через диспергаторы подается смесь диоксида серы и воздуха под низким давлением. Подача кислоты Каро регулируется дозатором по остаточному содержанию цианид-иона в обезвреженном растворе.

Данный метод обеспечивает высокую очистку от свободного и связанного цианида, но практически не влияет на содержание роданид-иона. Это делает метод непригодным для обезвреживания стоков после извлечения тонковкрапленного золота из пирита.

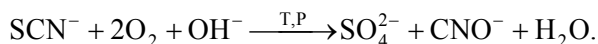
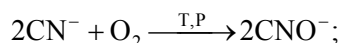
Обезвреживания роданид-ионов можно добиться при использовании процесса щелочного хлорирования [1]. Процесс хлорирования цианосодержащих стоков и хвостов основан на окислении токсичных соединений хлорсодержащим окислителем, в качестве которого обычно используют гипохлорит кальция. Метод позволяет обезвреживать практически весь комплекс токсичных веществ, за исключением нерастворимых цианистых комплексов железа. Метод обеспечивает окисление роданидов не более чем на 75 %:



Процесс хлорирования проводят в щелочной среде при $\text{pH} > 10$ для исключения образования сильно токсичного летучего соединения – хлорциана. Процесс щелочного хлорирования проводят в реакторах, оборудованных насосами-дозаторами гипохлорита кальция и механическими мешалками.

К минусам данного метода можно отнести необходимость поставки большого количества жидких реагентов, что может давать значительную материальную нагрузку при удаленном расположении золотоперерабатывающего предприятия.

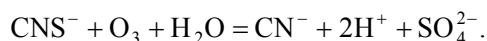
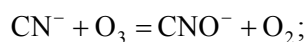
Метод автоклавного окисления кислородом [6] позволяет очищать сточные воды от цианидов, комплексных цианистых соединений и роданидов (до 80 %). Процесс ведется в автоклавах при температуре 250 °С, давлении около 4 МПа и длится около 5 ч. В этих условиях достигается ускорение реакций окисления и повышается эффективность очистки. Для достижения требуемой степени очистки процесс автоклавного окисления аппаратно реализуют в несколько ступеней:



Указанные параметры обуславливают высокую энергоемкость процесса очистки и возможность ее реализации лишь на производствах с низкими расходами сточных вод.

Очистка стоков методом озонирования предполагает наиболее полное обезвреживание широкого спектра цианосодержащих комплексных соединений, входящих в состав образующихся сточных вод, в том числе устойчивых роданидов [6]. Получение озона осуществляется непосредственно на месте потребления. Наиболее распространенным и эффективным способом получения озона является электросинтез в разряде, протекающий в озонаторе.

Благодаря высокому окисляющему потенциалу озон эффективно окисляет все цианосодержащие соединения, кроме комплексных соединений железа, осаждение которых возможно производить при дальнейшем использовании железного купороса:





Величина рН влияет на процессы окисления цианидов и роданидов. Так, при значениях рН < 7,0 озоном окисляются только роданиды. В щелочной среде окислению подвергаются как роданиды, так и цианиды. В кислой среде цианид-ионы начинают присоединять свободные ионы водорода, что ведет к образованию синильной кислоты.

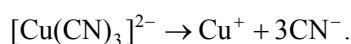
Ввиду изменения рН среды при озонировании, для реализации системы очистки сточных вод, содержащих простые и комплексные цианистые соединения, а также роданиды, необходимо использование двухстадийной технологии окисления озоном: на первой стадии основным процессом будет являться окисление роданидов, на второй стадии будут происходить процессы удаления оставшихся цианидов, окисления комплексных цианистых соединений меди озоном. Для осаждения ферроцианатов и арсенатов при реализации второй стадии очистки необходимо добавление раствора сернокислого железа.

Процесс озонирования проводят в реакторах озонирования колонного типа, оснащенных механическими перемешивающими устройствами. Для подачи озono-воздушной смеси в основании реактора по периметру устанавливается форсуночный пояс с горизонтальной ориентацией форсунок. Исходные стоки подаются насосом в верхнюю часть реактора. В днище установлен канал для опорожнения камеры реактора. В крышке реактора располагается канал отвода газовой смеси, оснащенный каплеуловителем и датчиками определения содержания синильной кислоты и озона.

На первом этапе при подаче озона в реактор первой ступени параллельно происходят процессы окисления роданидов и цианидов. Роданиды окисляются в две стадии, на первой стадии происходит образование цианид-ионов и ионов водорода, вследствие чего наблюдается подкисление раствора.

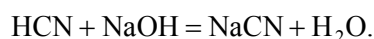
В реакторе второй ступени предполагается доочистка стоков с применением как озона, так и раствора сульфата железа. Процессы осаждения нерастворимых соединений, образующихся при очистке стоков, проходят параллельно с процессами доочистки стоков от цианид-ионов, комплексных цианистых солей меди и окисления цианатов. Основными процессами здесь будут являться процессы удаления из состава стоков остатков цианидов, в том числе выделившихся при окислении трицианокупратов, а также окисление цианатов. Стоит учитывать, что в результате гидролиза железного купороса будет происходить выделение ионов водорода, которые в дальнейшем будут связывать оставшиеся цианид-ионы в синильную кислоту.

После того как все цианид-ионы, содержащиеся в растворе, будут удалены, начнется взаимодействие озона с комплексными цианосодержащими ионами меди. Трицианокупраты под действием озона распадаются с образованием иона меди и цианид-иона:



В процессе обезвреживания стоков образуется синильная кислота. Часть синильной кислоты отводится непосредственно из реакторов-озонаторов вместе с отработанной газовой фазой, а другая часть остается в растворе. В современной промышленной практике для удаления остатков синильной кислоты из раствора после его очистки от цианистых соединений стоки барботируют в течение некоторого времени воздухом с целью возгона остатков синильной кислоты в газовую фазу.

Возгоны, полученные из барботажных баков и реакторов озонирования, по воздуховодам подаются в систему очистки отходящих газов, где синильная кислота нейтрализуется раствором гидроксида натрия с образованием цианида натрия, используемого на предприятии в качестве реагента:



Таким образом, использование технологии озонирования с добавлением раствора железного купороса позволяет обезвредить весь перечень опасных цианосодержащих соединений, содержащихся в стоках переделов по извлечению тонковкрапленного золота из коренных пород методом цианирования. Внедрение предложенной системы очистки приведет к значительному снижению негативной нагрузки, оказываемой золотоперерабатывающими предприятиями на компоненты окружающей природной среды.

На основании анализа существующей практики, для обеспечения экологической безопасности следует реализовывать процессы непрерывной очистки сточных вод с одновременным замкнутым водооборотом. Тогда обезвреженные сточные воды можно использовать для удовлетворения производственных потребностей, тем самым сократив объем водозабора чистых природных вод. Помимо этого, минимизируются опасности, связанные с размещением неочищенных цианосодержащих отходов в естественных условиях.

Хвосты цианирования представляют собой смесь пустой породы с отработанными цианистыми растворами. Для их обезвреживания целесообразно использовать процессы многократной фильтрации с промежуточной промывкой чистой водой. Промытые твердые отходы с минимальным содер-



жанием влаги и, соответственно, пониженными концентрациями токсичных компонентов, пригодны для длительного хранения в специализированных хранилищах в виде штабелей. Фильтрационные воды, образующиеся при очистке хвостов цианирования, целесообразно направлять на обезвреживание совместно со сточными цианосодержащими водами предприятия.

Несомненно, реализация подобных природоохранных мероприятий требует привлечения значительных материальных затрат. Однако опасность попадания высокотоксичных веществ в окружающую природную среду диктует необходимость принятия комплексных средозащитных мер.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барченков В.В. Технология гидрометаллургической переработки золотосодержащих флотоконцентратов с применением активных углей. Чита: Поиск, 2004. 242 с.
2. Милованов Л.В. Очистка и использование сточных вод предприятий цветной металлургии. М: Металлургия, 1971. 384 с.
3. Оксенгендлер Г.И. Яды и противоядия. Л.: Наука, 1982, 192 с.
4. Панова В.А. Определение простых и комплексных цианидов в природных и сточных водах, химические процессы их превращения в воде водоемов и методы очистки от них сточных вод: Автореф. дис...канд. хим. наук / АН СССР. Всесоюз. науч.-исслед. ин-т водоснабжения, канализации, гидротехн. сооружений и инж. гидрогеологии «ВОДГЕО». М., 1963. 22 с.
5. Тананаев И.В. Химия ферроцианидов / И.В.Тананаев, Г.Б.Сейфер, Ю.Я.Харитонов. М.: Наука, 1971, 285 с.
6. Укрупненное тестирование в лабораторных и производственных условиях проектного способа очистки избыточных стоков (обратный осмос) и разработка технологического регламента очистки сточных вод: Отчет о результатах укрупненно-го тестирования / ООО «Институт Гипроникель». СПб, 2013. 108 с.

Авторы: **И.В.Федосеев** д-р техн. наук, профессор, fn2-kf@bmstu-kaluga.ru (Калужский филиал МГТУ им. Н.Э.Баумана), **М.Ш.Баркан**, канд. техн. наук, доцент, barkan-msh@spmi.ru (Санкт-Петербургский горный университет).
Статья принята к публикации 28.01.2016.

THEME OF CYANIDE NEUTRALIZATION DURING ENVIRONMENT MEASURES IMPLEMENTING IN CASE OF NATIVE GOLD FINELY DISSEMINATED EXTRACTION FROM BEDROCKS

I.V.FEDOSEEV¹, M.Sh.BARKAN²

¹ Kaluga Branch of Bauman MSTU, Russia

² Saint-Petersburg Mining University, Russia

Exploitation of enrichment operating stages with sodium cyanide, leads to toxic waste production in large volumes: wastewaters, gas emissions, solid cyanidation waste.

As a result of incorrect environmental management on gold recovery plants, this negative impact leads to propagation of toxic pollutant substances. It could be the reason of nature widescale degradation in the gold factories affected area.

In turn, the environment protection measures realisation needs to accounting of the contaminants properties and their migration conditions in the natural environment.

Key words: environmental safety, gold production, cyanide compounds.

How to cite this article: Fedoseev I.V., Barkan M.Sh. Theme of cyanide neutralization during environment measures implementing in case of native gold finely disseminated extraction from bedrocks. Zapiski Gornogo instituta. 2016. Vol.219, p.472-476. DOI 10.18454/PMI.2016.3.472

REFERENCES

1. Barchenkov V.V. Tekhnologiya gidrometallurgicheskoi pererabotki zolotosoderzhashchikh flotokonsentratov s primeneniem aktivnykh uglei (*Technology of hydrometallurgical processing of gold-bearing flotation concentrate with active carbons*). Chita: Poisk, 2004. 242 p.
2. Milovanov L.V. Ochistka i ispol'zovanie stochnykh vod predpriyatii tsvetnoi metallurgii (*Cleaning and use of sewage-ferrous metallurgy*). Moscow: Metallurgiya, 1971, 384 p.
3. Oksegendler G.I. Yady i protivoyadiya (*Poisons and antidotes*). Leningrad: Nauka, 1982, 192 p.
4. Panova V.A. Opredelenie prostykh i kompleksnykh tsianidov v prirodnykh i stochnykh vodakh, khimicheskie protsessy ikh prevrashcheniya v vode vodoemov i metody ochistki ot nikh stochnykh vod (*Definition of simple and complex cyanides in natural and waste water, chemical processes of transformation in water reservoirs and purification methods of sewage from them*): Avtoref. dis...kand. khim. nauk. AN SSSR. Vsesoyuz. nauch.-issled. in-t vodosnabzheniya, kanalizatsii, gidrotekhn. sooruzhenii i inzh. gidrogeologii «VODGEO». Moscow, 1963. 22 p.
5. Tananaev I.V., Safer G.B., Kharitonov Y.Y. Khimiya ferrotsianidov (*Chemistry ferrocyanide*). Moscow: Nauka, 1971, 285 p.
6. Ukrupnennoe testirovanie v laboratornykh i proizvodstvennykh usloviyakh proektnogo sposoba ochistki izbytochnykh stokov (obratnyi osmos) i razrabotka tekhnologicheskogo reglamenta ochistki stochnykh vod: (*Enlargement testing laboratory and production conditions of the project of the purification process of excess runoff (RO) and the development of technological rules wastewater*): a report on the results of the test enlarged. ООО «Институт Гипроникель». St. Petersburg, 2013. 108 p.

Authors: **I.V.Fedoseev**, Dr. of Engineering Sciences, Professor, fn2-kf@bmstu-kaluga.ru (Kaluga Branch of Bauman MSTU, Russia), **M.Sh.Barkan**, PhD in Engineering, Associate Professor, barkan-msh@spmi.ru (Saint-Petersburg Mining University, Russia).
Manuscript Accepted 28.01.2016.



УДК 622:331.45

ЭКСПЕРТНАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ ЕДИНИЦАХ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОГО КОМПЛЕКСА РОССИИ

З.Н.ЧЕРКАЙ, С.В.КОВШОВ

Санкт-Петербургский горный университет, Россия

В статье рассмотрены методические подходы к экспертной оценке состояния охраны труда и производственной безопасности как на отдельных предприятиях, так и в отдельных территориальных единицах. Проанализированы преимущества и недостатки существующих методов анализа травматизма и профессиональной заболеваемости.

Предложен новый методический аппарат, базирующийся на учете отраслевого и пространственно-территориального факторов. Представлены результаты анализа отраслевого и регионального распределения производственного травматизма и профессиональной заболеваемости. Установлено наличие существенной диспропорции между исследуемыми параметрами в горно-добывающей отрасли, на ее долю приходится 5,9 % всех зарегистрированных несчастных случаев при 29 % случаев профессиональной заболеваемости.

Для более достоверной экспертной оценки состояния производственной безопасности предложено использовать коэффициенты производственного неблагополучия отрасли и отдельных территориальных единиц. Установлено, что наибольшие значения предлагаемых коэффициентов соответствуют горно-добывающей отрасли и Кемеровской области.

Ключевые слова: производственная безопасность, экспертная оценка, коэффициент производственного неблагополучия, территориальная единица.

Как цитировать эту статью: Черкай З.Н. Экспертная оценка состояния производственной безопасности в территориальных единицах минерально-сырьевого комплекса России / З.Н.Черкай, С.В.Ковшов // Записки Горного института. 2016. Т.219. С. 477-481. DOI 10.18454/PMI.2016.3.477

Введение. Состояние производственной безопасности в региональном или отраслевом разрезе принято оценивать комплексом параметров, описывающих производственный травматизм и профессиональную заболеваемость [8, 9]. На большинстве предприятий России, также как и в региональных центрах охраны труда, анализ производственного травматизма производится только на основе расчета так называемых стандартных показателей несчастных случаев (стандартных показателей, реперов опасности) – коэффициентов частоты, тяжести несчастного случая и некоторых других [5]. Расчет этих коэффициентов позволяет ориентировочно оценить степень опасности системы, но не дает информации о факторах, влияющих на травматизм, последствиях несчастного случая и т.д., а значит, практически не может быть использован при решении проблемы активного управления безопасностью [3].

Теоретические подходы к решению проблемы. На сегодняшний день четкая система экспертной оценки состояния производственной безопасности в рамках законодательства о техническом регулировании отсутствует в целом и, в частности, нет четких методик определения базовых параметров безопасности для горно-добывающей промышленности, за исключением ряда предложений по отдельным производственным процессам для конкретных предприятий [2].

Все существующие методы анализа травматизма и профессиональной заболеваемости можно разделить на четыре основные группы (рис.1).

В основе технических методов анализа лежит использование законов технических наук, связанных с обстоятельствами расследуемого несчастного случая. Технический метод анализа травматизма находит широкое применение при расследовании отдельных несчастных случаев и разработке мероприятий по их предупреждению в конкретных условиях. Основными техническими методами оценки безопасности являются монографический и топографический [4].

Задачей монографического анализа является установление опасностей, связанных с использованием в трудовом процессе данного объекта, выяснение их причин и разработка мероприятий по их устранению [1]. Целью анализа является обеспечение безопасных условий труда при использовании данной машины, применении данного технологического процесса, системы разработки и т.п. Результатом реализации выводов монографического анализа в производстве является создание максимально безопасных объектов, а также разработка инструкций и рекомендаций по безопасности их эксплуатации [7].

Основная цель топографического метода – всесторонний качественный анализ и оценка мест проявления производственной опасности, вызвавшей травму [8]. Метод позволяет в наглядной форме (на плане, схеме участка рабочего места) выявить места, где произошла травма. Достоинство топографического анализа – его наглядность. Однако аналитические возможности этого метода ограничены, поэтому он обычно используется как наглядное дополнение к другим методам анализа.

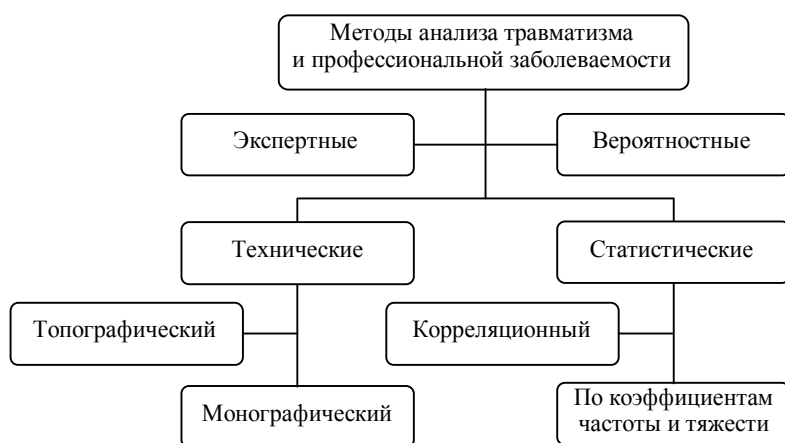


Рис.1. Базовые методы анализа травматизма и профессиональной заболеваемости

Статистические методы анализа базируются на статистическом материале о несчастных случаях, прежде всего на актах и результатах расследований. Целью статистических методов анализа является обобщенная оценка степени безопасности существующих условий труда на участке, шахте и в отрасли. Как и всякий статистический анализ, этот метод позволяет получить некоторую усредненную характеристику условий труда.

Однако весь этот методологический комплекс анализа травматизма и профессиональной заболеваемости зачастую оказывается несостоятельным

в отношении определения всего перечня причин социальных явлений. Территориальные аспекты производственного травматизма и профессиональной заболеваемости на микроуровне (уровне отдельно взятого предприятия) рассматриваются с помощью топографического метода. Однако на мезо- и макроуровне травматизм и заболеваемость как социальное явление практически не исследуются.

Методика исследований. На базе кафедры безопасности производств Горного университета начаты исследования пространственно-территориальных аспектов производственного травматизма и профессиональной заболеваемости. Первым анализируемым аспектом был выбран отраслевой. На основе статистических данных Росстата за 2013-2014 гг. [6] проанализировано распределение производственного травматизма и профессиональной заболеваемости по видам экономической деятельности.

На основе имеющихся данных представляется возможным введение в методику экспертной оценки состояния производственной безопасности коэффициента отраслевого неблагополучия отрасли:

$$K_{\text{отр}} = \frac{T_{\text{отр}}}{N_{\text{отр}}} + \frac{З_{\text{отр}}}{N_{\text{отр}}},$$

где $T_{\text{отр}}$ – доля числа несчастных случаев в отрасли в суммарном количестве несчастных случаев по всем видам экономической деятельности РФ в целом; $З_{\text{отр}}$ – доля числа лиц с впервые установленным профессиональным заболеванием в отрасли в суммарном количестве лиц с впервые установленным профессиональным заболеванием по всем видам экономической деятельности РФ в целом; $N_{\text{отр}}$ – доля лиц, занятых в конкретной отрасли, в суммарной среднесписочной численности работающих по всем видам экономической деятельности РФ.

Вторым анализируемым стал пространственно-территориальный аспект производственного травматизма и профессиональной заболеваемости на мезо- и макроуровне. Макроуровень представлен анализом в масштабах федеральных округов РФ. Мезоуровень представлен анализом в масштабах отдельных субъектов РФ.

По аналогии с отраслевым анализом на основе имеющихся данных представляется возможным определение коэффициента производственного неблагополучия территориальной единицы (например федерального округа):

$$K_{\text{тер}} = \frac{T_{\text{тер}}}{N_{\text{тер}}} + \frac{З_{\text{тер}}}{N_{\text{тер}}},$$

где $T_{\text{тер}}$ – доля числа несчастных случаев в территориальной единице (район, субъект, федеральный округ) в суммарном количестве несчастных случаев по всем аналогичным территориальным единицам в целом; $З_{\text{тер}}$ – доля числа лиц с впервые установленным профессиональным заболеванием в территориальной единице в суммарном количестве лиц с впервые установленным профессиональным заболеванием по всем аналогичным территориальным единицам в целом; $N_{\text{тер}}$ – доля лиц, занятых в конкретной территориальной единице, в суммарной среднесписочной численности работающих по всем аналогичным территориальным единицам.

Результаты исследований. Анализируя статистические данные по производственному травматизму, можно отметить, что наибольшее количество несчастных случаев приходится на обрабатывающие производства, транспорт и связь, а также социальную сферу и сферу услуг. Эти показатели легко объяснить тем, что общее количество рабочих, занятых в этих сферах, является максимальным. На долю горно-добывающей отрасли приходится 5,9 % несчастных случаев, при этом доля занятых в этой сфере составляет 2,25 %, что свидетельствует об определенном отраслевом неблагополучии сферы добычи полезных ископаемых, определяемом низким уровнем культуры безопасности занятых в этой сфере, большим количеством потенциально опасных технических элементов деятельности и дополнительным наличием геологических опасных явлений [4].

Ситуация с профессиональной заболеваемостью существенно отличается. Так, в 2014 г. на первое место по численности лиц с впервые установленным профессиональным заболеванием по видам экономической деятельности в РФ вышла добыча полезных ископаемых (29 %), что с учетом доли занятых в этой сфере лиц заставляет говорить о серьезной проблеме [6]. Причины такого явления схожи с причинами травматизма, однако столь значительный крен объясняется тем, что именно при добыче полезных ископаемых имеется наибольшее количество всевозможных вредностей производства (пыль, шум, вибрация и т.д.), а их фактические показатели зачастую значительно превышают предельные допустимые нормы.

Анализ статистических данных показал, что наибольшее количество несчастных случаев, приведших к возникновению травм, приходится на Центральный ФО и Приволжский ФО, наименьшее количество – на Северо-Кавказский ФО и Дальневосточный ФО (рис.2). Во многом, это объясняется распределением среднесписочной численности работающих. При этом в случае с профессиональной заболеваемостью картина существенно меняется. Наибольшее количество случаев профессиональных заболеваний приходится на Сибирский ФО и Приволжский ФО, наименьшее количество – на Северо-Кавказский ФО и Дальневосточный ФО.

Изменение ситуации с распределением объясняется территориальным расположением наиболее «вредных» производств. Именно на Сибирский ФО приходится самая значительная доля добываемых полезных ископаемых (каменный уголь Кузбасса, нефть Западной Сибири, цветные металлы Восточной Сибири и др.), здесь сконцентрировано значительное количество центров переработки ресурсов (при этом не только минеральных) [6].

Расчетным способом установлено, что наибольший коэффициент производственного неблагополучия отрасли $K_{отр} = 15,5$ приходится на добычу полезных ископаемых, наименьший коэффициент неблагополучия $K_{отр} = 0,75$ имеет сфера торговли.

Установлено, что наибольший коэффициент территориального неблагополучия $K_{тер} = 3,7$ приходится на Сибирский ФО, наименьший коэффициент территориального неблагополучия $K_{тер} = 0,67$ приходится на Северо-Кавказский ФО.

В региональном разрезе анализ статистических данных по травматизму и профессиональной заболеваемости показал следующие тройки лидеров:

- по общему числу страховых несчастных случаев – Кемеровская обл., Москва, Московская обл.;
- по коэффициенту частоты травматизма: Калининградская обл. (1,9), Вологодская обл. (1,7), Республика Карелия (1,62);
- по общему числу профессиональных заболеваний: Кемеровская обл., Челябинская обл., Республика Коми;
- по коэффициенту частоты профессиональных заболеваний: Кемеровская обл. (9,8), Республика Коми (7,9), Республика Хакасия (5,8).

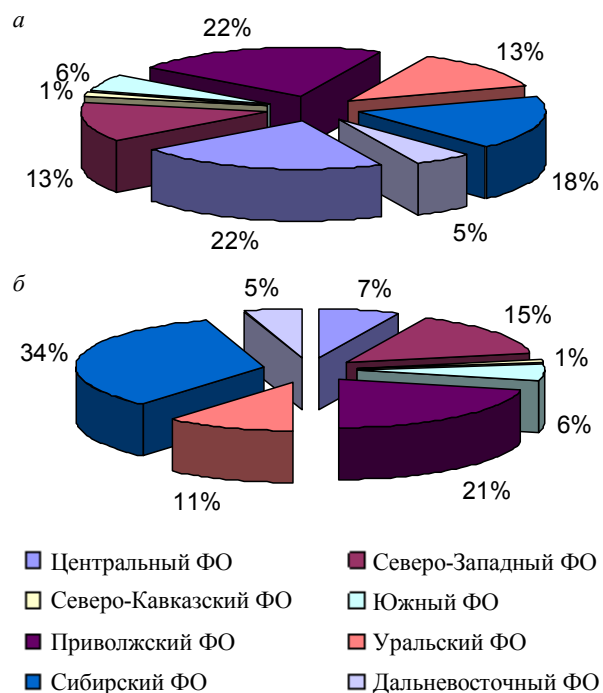


Рис.2. Распределение случаев производственного травматизма (а) и профессиональных заболеваний (б) по федеральным округам РФ [4]



Выводы

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- подтверждается тезис о том, что параметры производственного травматизма во многом коррелируются с общей численностью населения или среднесписочным составом работающих;
- в случае с профессиональной заболеваемостью такой прямой взаимосвязи нет, а параметры определяются спецификой отрасли или отдельной территориальной единицы;
- для более достоверной экспертной оценки состояния системы охраны труда и производственной безопасности предлагается использование коэффициентов производственного неблагополучия отрасли и отдельных территориальных единиц;
- наибольший коэффициент производственного неблагополучия отрасли $K_{отр} = 15,5$ приходится на добычу полезных ископаемых, наименьший коэффициент неблагополучия $K_{отр} = 0,75$ имеет сфера торговли;
- наибольший коэффициент территориального неблагополучия $K_{тер} = 3,7$ приходится на Сибирский ФО, наименьший коэффициент территориального неблагополучия $K_{тер} = 0,67$ приходится на Северо-Кавказский ФО.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бобров И.А. Необходимое изменение стратегии обеспечения безопасности труда – переход к управлению риском // Безопасность труда в промышленности. 1998. № 1. С.46.
2. Воробьев М.М. Методика оценки и анализа уровня организации производства и труда на угольных шахтах. М.: ЦНИЭИУголь, 1980. 41 с.
3. Гражданкин А.И. Использование вероятностных оценок при анализе безопасности опасных производственных объектов / А.И.Гражданкин, М.В.Лисанов, А.С.Печеркин // Безопасность труда в промышленности. 2001. № 5. С.33-39.
4. Ковшов С.В. Управление риском производственного травматизма на шахтах ОАО «СУЭК-Кузбасс» на основе комплексного статистического анализа факторов производственной среды / С.В.Ковшов, Е.Г.Булдакова, Р.С.Истомин // Безопасность жизнедеятельности. 2012. № 10. С.47-51.
5. Рациональная организация добычи полезных ископаемых в карьерах со сложными условиями труда горнорабочих / А.П.Бульбашев, Н.А.Гаспарьян, С.В.Ковшов, А.Н.Никулин, Ю.Д.Смирнов, Ю.В.Шувалов. СПб: МАНЭБ, 2009. 464 с.
6. Российский статистический ежегодник. М.: Росстат, 2015. 275 с.
7. Снижение производственного травматизма как следствие повышения культуры промышленной безопасности (на примере ОАО «СУЭК») / И.В.Курта, Г.И.Коршунов, С.М.Скударнов, С.В.Ковшов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. Отдельный выпуск. Промышленная безопасность в угольной отрасли. С.48-53.
8. Felliciano D. Trauma. Chicago: McGraw-Hill Companies, 2008. 512 p.
9. Raise D., Rassel C. Traumatic Brain Injury: Rehabilitation, Treatment and Case Management. New Orleans: Centre for Brain Injury Rehabilitation, 2010. 1050 p.

Авторы: **З.Н.Черкай**, *д-р ветеринар. наук, профессор, cherkay@sptmi.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Россия)*, **С.В.Ковшов**, *канд. техн. наук, доцент, kovshovsv@sptmi.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Россия)*.
Статья принята к публикации 08.02.2016.

EXPERT ASSESSMENT OF INDUSTRIAL SAFETY IN RUSSIAN MINERAL-RESOURCES COMPLEX TERRITORIAL UNITS

Z.N.CHERKAY, S.V.KOVSHOV
Saint-Petersburg Mining University, Russia

The article describes the methodological approaches to the expert assessment of the occupational health and safety both in individual enterprises and in the individual territorial units. The advantages and disadvantages of the existing methods of injuries and occupational diseases analysis are represented.

In the article a new methodological apparatus, based on the account of sectoral and spatial and territorial factors is offered. The results of the analysis of sectoral and regional distribution of industrial accidents and occupational diseases are represented. The presence of a significant imbalance between the studied parameters in the mining industry: it accounts for 5,9 % of all reported accidents, with 29 % of cases of occupational diseases.

For a more accurate assessment of industrial safety expert status provided the use of factors of production troubles the industry and the individual territorial units. It was found that the greatest value of the proposed coefficients correspond to the mining industry and the Kemerovo region.

Key words: industrial safety, expert assessment, production troubles coefficient, territorial unit.

How to cite this article: Cherkay Z.N., Kovshov S.V. Expert assessment of industrial safety in russian mineral-resources complex territorial units. Zapiski Gornogo instituta. 2016. Vol.219, p.477-481. DOI 10.18454/PMI.2016.3.477



REFERENCES

1. Bobrov I.A. Neobходимoe izmenenie strategii obespechenija bezopasnosti truda – perehod k upravleniju riskom (*Necessary change strategies to ensure safety – the transition to risk management*). Bezopasnost' truda v promyshlennosti. 1998. N 1, p.46.
2. Vorobiev M.M. Metodika ocenki i analiza urovnja organizacii proizvodstva i truda na ugol'nyh shahtah (*Methodology of evaluation and analysis of the organization level of production and labor in the coal mines*). CNIElugol', 1980, p.41.
3. Grazhdankin A.I., Lisanov M.V., Pecherkin A.S. Ispol'zovanie verojatnostnyh ocenok pri analize bezopasnosti opasnyh proizvodstvennyh objektov (*Using a probabilistic assessment in the safety analysis of hazardous production facilities*). Bezopasnost' truda v promyshlennosti. 2001. N 5, p.33-39.
4. Kovshov S.V., Buldakova E.G., Istomin R.S. Upravlenie riskom proizvodstvennogo travmatizma na shahtah OAO «SUJeK-Kuzbass» na osnove kompleksnogo statisticheskogo analiza faktorov proizvodstvennoj sredy (*Risk management in the mines of JSC «SUEK-Kuzbass» based on a comprehensive statistical analysis of production environment factors*). Bezopasnost' zhiznedejatel'nosti. 2012. N 10, p.47-51.
5. Bulbashev A.P., Gasparyan N.A., Kovshov S.V., Nikulin A.N., Smirnov Y.D., Shuvalov Y.V. Racional'naja organizacija dobychi poleznyh iskopaemyh v kar'erah so slozhnymi uslovijami truda gornorabochih (*Rational organization of open cast mine with complex working conditions of miners*). St Petersburg: MANEB, 2009, p.464.
6. Rossijskij statisticheskij ezhegodnik. (Statistical Yearbook). Moscow: Rosstat, 2015, p.275.
7. Kurta I.V., Korshunov G.I., Skudarnov S.M., Kovshov S.V. Snizhenie proizvodstvennogo travmatizma kak sledstvie povyshenija kultury promyshlennoj bezopasnosti (na primere OAO «SUJeK») (*Reduction of occupational injuries as a result improve the culture of industrial safety (for example JSC «SUEK»*). Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'. 2012. Special issue. Industrial safety in the coal industry, p.48-53.
8. Felliciano D. Trauma. Chicago: McGraw-Hill Companies, 2008, p.512.
9. Raise D., Rassel C. Traumatic Brain Injury: Rehabilitation, Treatment and Case Management. New Orleans: Centre for Brain Injury: Rehabilitation. 2010, p.1050.

Authors: **Z.N.Cherkay**, Dr. of Veterinary Sciences, Professor, cherkay@spmi.ru (Saint-Petersburg Mining University, Russia), **S.V.Kovshov**, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, kovshovsv@spmi.ru (Saint-Petersburg Mining University, Russia).

Manuscript Accepted 08.02.2016.



Геоэкономика и менеджмент

УДК 336.47 + 338.32

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ МЕТОДЫ ИНВЕСТИРОВАНИЯ БАЗОВЫХ ОТРАСЛЕЙ ЭКОНОМИКИ РФ

А.О.НЕДОСЕКИН

Санкт-Петербургский горный университет, Россия

В условиях мирового экономического кризиса и секторальных санкций, наложенных на Россию со стороны западных стран, обостряется проблема поиска и структурирования инвестиционных ресурсов для базовых отраслей экономики РФ. Предлагается дорожная карта формирования и распределения вновь создаваемых источников альтернативной неденежной ликвидности (АНЛ) и научно обоснованный механизм управления АНЛ применительно к специфическим условиям базовых отраслей. В работе в ходе финансового анализа предприятий базовых отраслей применяется классическая формула Дюпона. Для целей распознавания сырьевых рынков используется концепция «голубого океана» Ким – Моборн.

Центральной проблемой выживания и развития минерально-сырьевого комплекса (МСК) в современных условиях является противоречие между низким уровнем маржинальной рентабельности (МР) и низким уровнем оборачиваемости всех активов. Необходимо поднимать уровень обоих факторов, чтобы они приняли инвестиционно-приемлемые значения. Нельзя решить эту проблему кардинально, но можно пойти «в обход»: дополняя основной бизнес базовых отраслей высокомаржинальным бизнесом в примыкающих рыночных нишах; перевода производственные фонды предприятий в альтернативный режим хозяйствования (в том числе, посредством ограниченной возмездной национализации).

Ключевые слова: альтернативная неденежная ликвидность, минерально-сырьевой комплекс, электронные долговые расписки, инвестиционный рубль, векселя MEFO, рентная марка, рентабельность операций, оборачиваемость активов, финансовый рычаг, средневзвешенная стоимость капитала, отдача на собственный капитал.

Как цитировать эту статью: Недосекин А.О. Альтернативные методы инвестирования базовых отраслей экономики РФ // Записки Горного института. 2016. Т.219. С.482-489. DOI 10.18454/PMI.2016.3.482

Экономические предпосылки для инвестирования базовых отраслей экономики РФ.

В настоящее время наблюдается снижение тенденции инвестиционной привлекательности базовых отраслей РФ. Это обусловлено рядом причин. Во-первых, современный глобальный экономический кризис вызывает рецессию, сопровождающуюся падением мировых цен на сырьевые биржевые и внебиржевые товары (нефть, золото, серебро, уголь и др.), а также на продукцию первого передела (в частности, на металлопрокат). Отмеченное падение цен автоматически влечет падение операционной рентабельности компаний минерально-сырьевого комплекса (МСК) и других базовых отраслей промышленности (в частности, в металлургии). Падение рентабельности может быть столь значительным, что даже может привести к убыточности (к отрицательной чистой рентабельности). Во-вторых, компании МСК вследствие своей высокой насыщенности производственными фондами обладают весьма низкой оборачиваемостью всех активов (в среднем, на уровне 0,3-0,5 раз в год). В-третьих, закредитованность компаний, низкий уровень их финансовой автономии. Так, соотношение заемных и собственных средств в компании МСК (финансовый рычаг) часто может даже превышать критический уровень 3.

В целом, инвестиционную привлекательность компании МСК можно оценивать по уровню отдачи на собственный капитал ROE (Return on Equity). Чем выше ROE, тем выше инвестиционная привлекательность компании и тем потенциально выше ее рыночная стоимость, связанная с ROE линейным соотношением [8]:

$$\text{Value} = \text{СК} \cdot \text{ROE} \cdot \text{PE}, \quad (1)$$

где Value – справедливая стоимость бизнеса, руб., СК – собственный капитал, руб.; ROE – отдача на собственный капитал, % годовых; PE (Price-to-Earnings ratio) – рациональное соотношение между стоимостью бизнеса и годовой чистой прибылью компании, годы. Соотношение PE обуславливается макроэкономическими характеристиками страны, в которой осуществляется инвестирование. Так, справедливое значение PE для инвестиционных условий США, полученное за 150 лет наблюдений, составляет, по данным нобелевского лауреата Р.Шиллера, 13 лет и более [8, 15]. В России, где риски хозяйственной деятельности намного превышают, так же как для условий США и Европы, а практика предпринимательской деятельности еще не устоялась, рациональное значение PE для измерения стоимости бизнеса не превышает 5 лет.

Инвестиционно-привлекательной компания становится, если уровень ROE в 2,5-3 раза превышает ставку по рублевому депозиту в надежном банке. Соответственно, инвестиционный уровень ROE должен составлять 25-30 % годовых в рублях и выше. Анализ показывает, что сегодня компании МСК весьма далеко отстоят от данного инвестиционного требования. Причины такого положения дел хорошо иллюстрируются хорошо известной формулой Дюпона:

$$ROE = ЧР \cdot ОбП(1 + ФР), \quad (2)$$

где ЧР – чистая рентабельность, %; ОбП – оборачиваемость пассивов, оборотов в год; ФР – финансовый рычаг.

В таблице приведены данные финансового анализа за 2014 г. по шести компаниям МСК, из которой видно, какой вклад в ROE дают отдельные факторы [см. формулу (2)].

Показатели финансовой отчетности по ряду компаний МСК за 2014 г.

Показатель	Компании					
	Еврохим	Полиметалл	Газпром	Мечел	ФосАгро	Роснефть
Выручка без НДС (ВД), млн долл.	5 087	1 690	100 359	6 406	2 208	97 666
Операционная прибыль (ОП), млн долл.	1 260	436	23 519	126	539	10 646
Процентные расходы (ПР), млн долл.	-152	-137	-25 817	-793	-197	-3 932
Курсовые разницы (КР), млн долл.	-1 067	-559	10 233	-2 396	-592	1 149
Чистая прибыль (ЧП), млн долл.	-575	-210	2 819	-4 360	-233	6 284
Внеоборотные активы (ВнА), млн долл.	4 757	2 230	210 341	5 182	2 011	118 582
Оборотные активы (ОА), млн долл.	1 564	767	62 136	1 532	1 203	38 259
Все активы (А), млн долл.	6 321	2 997	272 478	6 714	3 214	156 840
Собственный капитал (СК), млн долл.	2 197	869	181 688	-2 645	646	51 724
Заемный капитал (ЗК), млн долл.	4 124	2 128	90 790	9 359	2 567	105 117
Операционная рентабельность (ОР = ОП/ВД), %	25	26	23	2	24	11
Чистая рентабельность (ЧР = ЧП/ВД), %	-11	-12	3	-68	-11	6
Соотношение ВнА и ОА	3,04	2,91	3,39	3,38	1,67	3,10
Оборачиваемость пассивов (ОбП = ВД / А), раз в год	0,80	0,56	0,37	0,95	0,69	0,62
Финансовый рычаг (ФР = ЗК / СК)	1,88	2,45	0,50	Не определен	3,97	2,03
Стоимость заемного капитала (WACC ₃ = (ПР + КР) / ЗК), % годовых	30	33	17	34	31	3
Отдача на собственный капитал (ROE = ЧП / СК), % годовых	-26	-24	2	Не определен	-36	12

Из таблицы (отчетность компаний за 2014 г.) видно, что соотношение рентабельности и оборачиваемости в компаниях МСК неудовлетворительное. Четыре компании из рассматриваемых шести в 2014 г. были убыточными. В двух оставшихся компаниях (ПАО «Газпром» и «Роснефть») значение ROE и близко не подошло к нормативному. «Масла в огонь» подливает и параметр средневзвешенной стоимости капитала (WACC), который оценивается вне связи с формулой Дюпона. Если учитывать только стоимость заемных ресурсов, то ее оценка составляет:

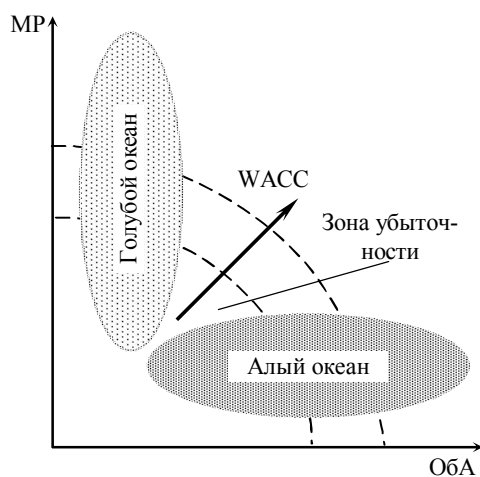
$$WACC_3 = (ФЗ + КР) / ЗК, \quad (3)$$

где WACC₃ – средневзвешенная стоимость заемного капитала, % годовых; ФЗ – годовые финансовые затраты (предполагающие, прежде всего, начисление и выплату процентов по привлеченным кредитным ресурсам и собственным облигациям); КР – курсовая разница, ЗК – заемный капитал по балансу компании. Например, в случае ПАО «Мечел» за счет отрицательных курсовых разниц на уровне 2,3 млрд долларов США стоимость заемного капитала возросла до 34 % годовых. Такое негативное положение сложилось в результате девальвации рубля во второй половине 2014 г.

Чтобы повысить ROE до приемлемого уровня, компаниям МСК в ходе проведения организационных преобразований следует спозиционировать себя в одной из рыночных ниш [4] (см. рисунок):

1. «Алый океан» – высококонкурентная среда, низкая маржинальность продаж, высокая оборачиваемость всех активов. Характерный пример – ритейл.

2. «Голубой океан» – инновационные эксклюзивные рыночные ниши, временная монополия, высокая маржинальность, нечувствительны к оборачиваемости активов (они могут быть любыми по размеру). Характерный пример – свежие оборонные разработки.



«Алый» и «Голубой» рыночные океаны

MP – маргинальная реальность;

ОбА – оборачиваемость всех активов;

WASS – средневзвешенная стоимость капитала

Бизнес, который одновременно обладает низкими уровнями как рентабельности, так и оборачиваемости, не имеет шансов выжить в своем современном периметре, так как финансовые издержки в этом случае перекроют операционную прибыль и спровоцируют чистый убыток. Поэтому, поскольку бизнес предприятий МСК попадает в рынок по типу «алый океан», причем на долгосрочную перспективу, нужно научиться жить по правилам этого рынка, резко повышая оборачиваемость всех групп активов. Соответственно, необходимо выводить производственные фонды МСК за периметр операционного бизнеса. Применительно к современным экономическим условиям РФ это означает только одно – полномасштабную национализацию производственных фондов в базовых отраслях. Что касается лозунга «приватизации» в базовых отраслях РФ, то такая политика сегодня выглядит не только недальновидной, но и преступной [3].

Финансовые предпосылки для инвестирования базовых отраслей экономики РФ. За последние 25 лет Россия с помощью своих заокеанских и европейских «партнеров» закрепила за собой статус неокolonии, депрессивного

сырьевого придатка стран первого мира, в том числе на уровне собственной конституции и международных соглашений. В контексте финансов это отразилось в трех сферах:

1. Диктат «вашингтонского консенсуса», навязанного РФ по рекомендации Международного валютного фонда. Правило «вашингтонского консенсуса» предусматривает возможность дополнительной рублевой эмиссии только с поступлением в страну дополнительных объемов экспортной валютной выручки.

2. Де-факто – Центральный банк РФ при всей своей декларативной независимости сделался филиалом Федеральной резервной системы США. Это подтверждается тем, что американский доллар и российский рубль находятся в режиме согласованной эмиссии [5].

3. Практика формирования золотовалютных резервов (ЗВР) РФ состоит в перенаправлении их в ценные бумаги стран первого мира. В случае же внешних заимствований, те же самые средства возвращаются в РФ, но уже на 5-7 % годовых дороже.

Таким образом, ограбление экономики РФ «фешенебельными странами» осуществляется как минимум дважды. Сначала ничем не обеспеченный фиатный доллар США обменивается на обеспеченные трудом и производственной полезностью сырьевые ресурсы. Затем полученная выручка, через механизм формирования ЗВР, возвращается в РФ, но уже как внешний кредит, с ненулевой стоимостью капитала.

Неоколониальная политика в отношении РФ проявляется и в том, что ЦБ РФ под видом таргетирования инфляции де-факто осуществляет перманентное сжатие рублевой денежной массы. Такое сжатие, с одновременным удорожанием стоимости кредитных ресурсов и сокращением срока кредитования, погружает страну в условия инвестиционно-финансового ледникового периода, вызывает замирание всей инвестиционной деятельности в промышленности. Все это усугубляется экономическими санкциями и отсечением РФ от рынков внешних заимствований: новые внешние кредиты не выдаются, ранее полученные кредиты – не реструктурируются, новые эмиссии корпоративных акций – практически не размещаются на международных биржах. В результате, мы наблюдаем сдерживание экономического роста в РФ, закрепление страны в сырьевом статусе, блокировку ее выхода в пространство шестого технологического уклада [2]. Кроме того, как показывает все предшествующее рассмотрение, в своем современном состоянии базовые отрасли промышленности РФ обладают пониженной инвестиционной привлекательностью. Соответственно, на приток традиционных инвестиций этим отраслям в ближайшее время рассчитывать не приходится.

Чтобы преодолеть сложившийся негатив, руководству РФ необходимо выработать принципиально новую инвестиционно-финансовую стратегию. Применительно к базовым отраслям промышленности РФ, это, в частности, означает:

- санацию предприятий МСК с проведением широкомасштабной добровольной национализации производственных фондов;
- внедрение в финансовую систему РФ альтернативного (параллельного) эмиссионного механизма с переходом на обеспеченную активами ликвидность;



- настройку параллельного контура инвестирования создания и оборота товаров промежуточного инвестиционного спроса;
- реализацию функции накопления в рамках альтернативной ликвидности.

Санация предприятий МСК. Убыточное положение предприятий МСК может быть продиктовано как внешними причинами, так и напрямую ошибками первых лиц компаний. Например, использование заемного краткосрочного капитала для агрессивного поглощения компаний приводит к тому, что срок предоставления кредитов и займов оказывается ниже сроков окупаемости соответствующих инвестиционных проектов. В результате, возникает кассовый разрыв, который предприятия перекрывают за счет заимствований на заведомо ухудшенных условиях, как по сроку, так и по стоимости займов; точка окупаемости в инвестиционных проектах поглощения отодвигается еще дальше по времени, окупаемость таких проектов становится проблематичной.

К числу ошибок менеджмента также следует отнести отсутствие навыков страхования валютных и ценовых рисков. Как показал опыт девальвации 2014 г., предприятия были не готовы к скачкообразному росту доллара относительно рубля. Несмотря на смягчение девальвационного шока за счет роста экспортной выручки в рублях, предприятия МСК понесли потери за счет удорожания стоимости обслуживания валютных кредитов. Равным образом компании оказались не готовы и к снижению мировых цен на сырьевые товары. В этом отношении красноречив мексиканский опыт: проинвестировав порядка 1 млрд долларов бюджетных средств во внебиржевые опционы, мексиканское правительство по итогам 2015 г. получило возмещение по этим опционам 600-700 % годовых отдачи на инвестиции в страховые мероприятия [10].

Соответственно, чтобы предприятия базовых отраслей смогли перейти на новый качественный уровень развития своего бизнеса, они должны пройти всесторонний аудит с выявлением своих проблемных сфер и с выработкой основ стратегического развития в новых условиях. Должны быть сделаны оргвыводы в отношении отдельных персоналий (ключевых топов) на предмет их соответствия занимаемым должностям. Такое государственное вмешательство возможно, если владельцам бизнеса будет предложена новая парадигма государственно-частного партнерства: санация, национализация долгов и фондов в обмен на концессию и государственную поддержку.

Необходимо преодолевать «зашоренность» первых лиц на производственных факторах деятельности компаний в ущерб факторам менеджмента, маркетинга, финансов и человеческих отношений. В рамках мероприятий санации требуется проводить специализированный коучинг первых лиц с расширением границ сознания и мышления, с приобретением дополнительных навыков рыночного и коммуникационного мышления, а также навыков формирования управленческих команд и заключения взаимовыгодных партнерств. Тем самым государство формирует кадровый потенциал для проведения будущих реформ в базовых отраслях.

Национализация производственных фондов – новый тренд государственной экономической политики. Советский опыт национализации – это безвозмездный отъем собственности у «помещиков и капиталистов». В современных реалиях такая национализация неприемлема. Она должна проводиться на условиях добровольности и справедливого выкупа активов по их текущей рыночной цене, с последующим возвращением этих активов в бизнес МСК, но уже на условиях долгосрочной аренды (концессии) [7]. Рациональным уровнем арендной платы можно считать 2 % годовых от цены национализации. Разумеется, все обслуживание национализированных активов, включая текущие и капитальные ремонты, проводится средствами самих компаний.

С точки зрения бизнеса предприятий базовых отраслей такая мера вызовет резкое снижение стоимости привлеченного капитала WACC, открывает возможность рассчитаться по неэффективным кредитам, минимизировав или вообще обнулив процентные выплаты по ним, избавиться от налога на имущество. Это же резко повышает ROE компаний за счет очистки баланса от токсичных внеоборотных активов и соответствующего роста оборачиваемости остальных активов, сохранившихся в периметре бизнеса. Тем самым уровень ROE снова станет инвестиционно-привлекательным, открывая возможность для использования финансового рычага в рамках альтернативных (небанковских) вариантов фондирования (например, с использованием механизма облигаций или товарных векселей). Таким образом государство создает новый платежеспособный спрос на фонды, который в условиях глобального кризиса резко сжался.

В свою очередь, с точки зрения государства, здесь открываются более широкие возможности по обеспечению экономической безопасности страны. Во-первых, создается плацдарм для национализации корпоративного внешнего долга с переводом всех внешних долгов предприятий МСК на государство в обмен на национализацию активов. Это исключит варианты, подобные «делу ЮКОС», с попыткой нелегитимного вывода собственности в зарубежную юрисдикцию. Также это позволит конвертировать валютные долги в рублевые и избежать курсовых потерь от деваль-



вации рубля. Во-вторых, национализация создаст предпосылки деофшоризации для возвращения активов и прав на них в российское правовое пространство. В-третьих, у государства появляется эффективный инструмент стратегического планирования в базовых отраслях [1]. И в-четвертых, национализация фондов создает базу для ускоренной монетизации экономики с доведением показателя М2/ВВП до уровня развитых стран (100 % и выше; сегодня монетизация российской экономики составляет порядка 30-40 % [7]). Сопряженное с этим эмиссионное финансирование может быть успешно абсорбировано экономикой с развитием инвестиционных программ при соответствующей докапитализации российских банков, а также при развитии рынка госдолга самой России.

Создание альтернативного эмиссионного центра. По своему замыслу вновь выпускаемые эмиссионные деньги должны обслужить инвестиционные процессы в экономике, обладая низкой стоимостью и длительным сроком существования соответствующих источников финансирования. Идея формирования такого центра излагается в докладе акад. С.Ю.Глазьева [2]. Принципиально важно, чтобы эти новые деньги не перемешивались в обороте с традиционными рублями, чтобы не вызвать всплеска рублевой инфляции. В идеале, вновь выпускаемая ликвидность должна обладать свойствами инвестиционного рубля (ИР) [6, 7, 9], который обращается исключительно в контуре создания товаров промежуточного инвестиционного спроса как средство расчетов между предприятиями, без права его конвертации на традиционный наличный рубль. В этом построении нет ничего принципиально нового: аналогичной двухконтурной конфигурацией обладала финансовая система бывшего СССР, с выделением контуров оборота безналичного и наличного рублей. Однако выпуск такого параллельного рубля в современных условиях наталкивается на законодательные ограничения, связанные со статусом ЦБ РФ, включая конституционный статус ЦБ РФ (статья 75) и действующий закон о ЦБ РФ. Существует прямой законодательный запрет на выпуск параллельных валют и так называемых денежных суррогатов. Преодоление этой блокировки займет многие годы и будет наталкиваться на активнейшее сопротивление ЦБ РФ, как свидетельствует провальный опыт реформирования финансовых систем в Аргентине, Венгрии и Сербии [12]. Поэтому в условиях переходного периода к финансовой системе принципиально нового типа альтернативный эмиссионный центр должен быть ориентирован не на выпуск параллельного рубля, а на создание альтернативной неденежной ликвидности (АНЛ). Эта АНЛ не должна законодательно распознаваться в качестве традиционных денег, но при этом обладать функциями платежности и накопления. К числу таких законодательно разрешенных финансовых активов, которые можно порождать в альтернативном эмиссионном центре, можно отнести:

- Инфраструктурные облигации.
- Товарные и финансовые дисконтные векселя.
- Электронные долговые расписки (ЭДР).

Перечисленные категории АНЛ не подпадают под ограничения банковского законодательства, поскольку регулируются либо законодательством фондового рынка, либо напрямую Гражданским кодексом РФ. Соответственно, оборот АНЛ также должен быть внебанковским. Характерным примером зарубежного опыта в этой сфере является выпуск гитлеровской Германией корпоративных товарных МЕФО-векселей [14]. Данные долговые бумаги, обращаясь за пределами банковского сектора, в рамках расчетов между отдельными предприятиями, на условиях их акцепта Рейхсбанком, послужили развитию германской программы создания вооружений, выступив в качестве безинфляционных промышленных денег.

Следующим важным условием выпуска и обращения АНЛ должен быть уход от фиатности (необеспеченности) соответствующих групп финансовых активов. Чтобы участвовать в инвестиционных программах, АНЛ должны обладать свойством низкой стоимости капитала и длительного срока обращения. Это возможно лишь в том случае, когда АНЛ не подвержены инфляции и не попадают в контур оборота товаров конечного спроса, обладают функцией накопления (сбережения). Накопительная функция АНЛ поддерживается за счет принудительного индексирования рублевых котировок АНЛ в сторону роста (темпом, например, порядка 5-7 % годовых), с одновременным включением в условие эмиссии функции обеспеченности АНЛ внеоборотными активами (теми же национализированными производственными фондами, запасами месторождений сырья, земельными участками). Подобное уже делалось в рамках выпуска германской рентной марки образца 1923 г., что положило конец гиперинфляции в Германии [13].

Еще одно важное условие – создание инфраструктуры оборота АНЛ. Целесообразно заново создать эту инфраструктуру на базе одного из государственных банков (например, ВЭБ) или государственного казначейства с открытием обособленных инвестиционных счетов на стороне предприятий,



введение которых также является прерогативой эмиссионного центра. По всем операциям с АНЛ на стороне предприятий должен вестись обособленный аналитический учет. Фактически, посредством АНЛ можно заменить львиную долю внутриотраслевых и межотраслевых финансовых расчетов в рамках промежуточного спроса межотраслевого баланса [9].

И последнее, что необходимо отметить: в связи с эмиссией и оборотом АНЛ – это исключение фактора суррогатности, когда АНЛ не будут восприняты экономикой, будут активно вытесняться из расчетов, замещаясь традиционным рублем. В РФ накоплен богатый опыт выпуска суррогатных платежных средств в условиях острого дефицита традиционного рублевого финансирования (казначейские обязательства, уральские франки, «катановки» Республики Хакасия и др.). Просуществовав пару лет, эти суррогаты были законодательно запрещены (изъяты из обращения). Но они могли бы существовать и дольше, если бы по ним был введен режим ограниченной ликвидности, с обменом части суррогатов на традиционные рубли по справедливому паритетному курсу. Частичный обмен АНЛ на традиционные рубли необходим, поскольку в структуре платежей предприятий 35-40 % – это выплата заработной платы с выводом соответствующих средств за периметр финансовой системы предприятия. Соответствующее покрытие зарплатных начислений должно быть предусмотрено в рамках инвестиционного проекта. Поддержание ограниченной ликвидности АНЛ может взять на себя кэптивная финансовая компания, встроенная в структуру оборота АНЛ [6].

В свою очередь, чтобы поддержать собственную ликвидность, кэптивная финансовая компания должна спозиционировать себя на рынке высокодоходных финансовых операций с конвертацией привлеченных внешних займов в потоки обслуживания ликвидности АНЛ. Такие операции возможны с применением инструментов алгоритмической торговли производными финансовыми инструментами [6, 9].

В рамках мер по созданию ограниченной ликвидности АНЛ также может выступить мера по допущению выплат по налогам и сборам организаций средствами АНЛ. Это позволит резко повысить востребованность АНЛ со стороны предприятий МСК, где существенную долю в платежах занимает налог на добычу полезных ископаемых (НДПИ) и экспортный таможенный тариф. Аналогичным образом, в рамках экспериментальной меры, выступает использование АНЛ в ходе безналичных расчетов сотрудников предприятия за товары и услуги с применением ЭДР, нанесенных на специализированные пластиковые карты. Особенно эффективно эта мера может быть применена в условиях моногородов, где предприятия МСК являются градообразующими, когда моногородам хронически недостает рублевой ликвидности для осуществления расчетов между своими субъектами, локализованными внутри моногорода (обычно по причинам задержки платежей со стороны контрагентов или по условиям сезонности производства и реализации продукции).

Оборот товаров промежуточного инвестиционного спроса. К товарам этой группы относятся производственные фонды базовых отраслей, земля, собственно сырьевые товары, электроэнергия, металлопрокат, продукция машиностроительной отрасли. Необходимо создать режим, когда в качестве эксклюзивного платежного средства за товары промежуточного спроса выступает АНЛ с прямым запретом на приобретение этих товаров юридическими лицами за безналичные традиционные рубли в ходе расчетов между предприятиями МСК. Такая мера повысит спрос на АНЛ со стороны предприятий МСК и приведет к выходу оборота АНЛ за периметр собственно МСК, повысит уровень платежности и востребованности АНЛ всеми субъектами экономики РФ, с которыми базовые отрасли взаимодействуют в рамках производственно-сбытовой кооперации.

АНЛ как средство накопления. Чтобы привлечь в инвестиционный оборот предприятий средства частных лиц, помимо традиционных способов выпуска акций и облигаций, государство может рекомендовать пенсионным и страховым компаниям включить АНЛ в перечень инвестируемых активов в рамках формирования своих резервов. Аналогичным образом АНЛ может быть рекомендовано к приобретению и розничным клиентам при посредничестве фондовых брокеров. Целесообразно наложить запрет на приобретение АНЛ нерезидентами, а также запрет на биржевую торговлю АНЛ.

Заключение. Все меры по созданию альтернативного инвестиционного контура, изложенные в настоящей статье, вписываются, с одной стороны, в концепт мобилизационной экономики, раскрываемый нами в [9], а, с другой стороны, наследуют традиции фрайбергской экономической школы, в частности, теории ордолиберализма В. Ойкена [11]. Эти предложения описывают новую парадигму государственно-частного партнерства в процессе инвестирования базовых отраслей, дают возможность предприятиям этих отраслей выйти на качественно иной уровень хозяйственной деятельности.



Проведение рекомендованных мер возможно лишь в контексте глобальных реформ в финансовой сфере РФ, а именно: отзыв ЗВР из иностранных юрисдикций; отказ от формата вашингтонского консенсуса; выход России из состава учредителей Международного валютного фонда; переход на новый принцип рублевой и альтернативной финансовой эмиссии; резкий рост монетизации экономики с включением в состав национального агрегата М2 средств АНЛ. Только при условии проведения обозначенных реформ возможно возрождение экономики РФ на новых инвестиционно-финансовых основаниях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глазьев С.Ю. Нас «раскатали». И это будут делать, пока мы не возродим планирование [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nakanune.ru/articles/110195/> (дата обращения 16.03.2015).
2. Глазьев С.Ю. О неотложных мерах по укреплению экономической безопасности России и выводу российской экономики на траекторию опережающего развития. Доклад на Совете Безопасности РФ 15 сентября 2015 г. [Электронный ресурс]. 59 с. URL: <http://www.glazev.ru> (дата обращения 04.12.2015).
3. Катасонов В.Ю. Предложение иностранцам скупить российские активы за бесценнок – госизмена [Электронный ресурс]. URL: <http://od-novorossia.livejournal.com/1390490.html> (дата обращения 04.12.2015).
4. Ким Ч. Стратегия «голубого океана». Как найти или создать рынок, свободный от других игроков / Ч.Ким, Р.Моборн. М.: Изд-во Манн, Иванов и Фербер, 2012. 272 с.
5. Московский экономический форум // Обеспечение финансового суверенитета России: Материалы 14-го круглого стола [Электронный ресурс]. 164 с. URL: http://www.ifel.ru/mef2015/MEF_2015_14_Reports_1.pdf (дата обращения 04.12.2015).
6. Недосекин А.О. Альтернативная недежная ликвидность: механизмы эмиссии и обращения / А.О.Недосекин, Е.И.Рейшахрит // Там же.
7. Недосекин А.О. Два очерка о грядущей России. СПб: Изд-во СПбГПУ, 2012. 151 с.
8. Недосекин А.О. Финансовая математика / А.О.Недосекин З.И.Абдуллаева. СПб: СПбГПУ, 2013. 219 с.
9. Недосекин А.О. Мобилизационная экономика по-русски. СПб: Изд-во СПбГПУ, 2015. 124 с.
10. Недосекин А.О. Управление ценовыми рисками в нефтегазовой отрасли России / А.О.Недосекин, В.Ю.Калюта, Я.О.Терновая. СПб: СПбГПУ, 2015. 167 с.
11. Ойкен В. Основы национальной экономики. М.: Экономика, 1996. 351 с.
12. Центробанки против правительств [Электронный ресурс]. URL: <http://voprosik.net/centrobanki-protiv-pravitelstv/> (дата обращения 04.12.2015).
13. German Rentenmark [Electronic resource]. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/German_Rentenmark (date of access 2015.12.04).
14. MEFO [Electronic resource]. Available at: <http://en.wikipedia.org/wiki/MEFO> (date of access 2015.12.04).
15. Online PE data on Robert Shiller personal website [Electronic resource]. Available at: <http://www.econ.yale.edu/~shiller/data.htm> (date of access 2015.12.04).

*Автор А.О.Недосекин, д-р экон. наук, профессор, sedok@mail.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Россия)
Статья принята к публикации 2.02.2016.*

ALTERNATIVE INVESTMENT ON BASIC MATERIALS INDUSTRY IN THE RUSSIAN ECONOMY

A.O.NEDOSEKIN

Saint-Petersburg Mining University, Russia

Amid the global economic crisis and sectoral sanctions imposed on Russia by Western countries, exacerbated the problem of finding and structuring of investment resources for basic industries of the Russian economy. The article provides a roadmap of formation and distribution of newly created alternative sources of non-cash liquidity (ANL), and scientific management mechanism justifies ANL, with reference to the specific conditions of basic industries. The article uses classical DuPont formula for financial analyses of basic industries enterprises. For the purposes of recognition of commodity markets Kim – Moborn «blue oceans» concept is applied.

The main problem of survival and development of the mining industry in modern conditions is a contradiction between the low profitability margin and low turnover of all assets. It is necessary to raise the level of both factors, so they took investment-acceptable values. It is impossible to solve the problem finally, but it is possible to «bypass»: to complement the core business of basic industries of high-margin business in the adjacent market niches; to transfer production assets of the enterprises into an alternative mode of ownership (including by means of limited compensatory nationalization).

Key words: alternative non-cash liquidity, mineral resource complex, electronic receipts, investment ruble, MEFO bills, the Rentenmark, the profitability of operations, asset turnover, leverage, weighted average cost of capital, the return on equity.

How to cite this article: Nedosekin A.O. Alternative investment on basic materials industry in the Russian economy. Zapiski Gornogo instituta. 2016. Vol.219, p.482-489. DOI 10.18454/PMI.2016.3.482

**REFERENCES**

1. Glaz'ev S.Yu. Nas «raskatali». I eto budut delat', poka my ne vozrodim planirovanie (*They win with us until we reborn strategic planning*) [Elektronnyi resurs]. Available at: <http://www.nakanune.ru/articles/110195/> (data obrashcheniya: 16.03.2015).
2. Glaz'ev S.Yu. O neotlozhnykh merakh po ukrepleniyu ekonomicheskoi bezopasnosti Rossii i vyvodu rossiiskoi ekonomiki na traektoriyu operezhayushchego razvitiya (*On urgent measures to strengthen the economic security of Russia and the withdrawal of the Russian economy on the path of advancing development*). Doklad na Sovete Bezopasnosti RF 15 sentyabrya 2015 g. [Elektronnyi resurs], p.59. Available at: <http://www.glazev.ru> (data obrashcheniya 04.12.2015).
3. Katasonov V.Yu. Predlozhenie inostrantsam skupit' rossiiskie aktivy za bestsenok – gosizmena (*The invitation to foreigners to buy Russian assets for a pittance is treason*) [Elektronnyi resurs]. Available at: <http://od-novorossia.livejournal.com/1390490.html> (data obrashcheniya 04.12.2015).
4. Kim Ch., Moborn R. Strategiya golubogo okeana. Kak naiti ili sozdat' rynek, svobodnyi ot drugikh igrokov (*Blue Ocean Strategy*. Harvard Business School Press). Moscow: Izd-vo Mann, Ivanov i Ferber, 2012, p.272.
5. Moskovskii ekonomicheskii forum. Obespechenie finansovogo suvereniteta Rossii (*Moscow Economical Forum (MEF). Ensuring financial sovereignty of Russia*). Materialy 14-go kruglogo stola [Elektronnyi resurs], p.164. Available at: http://www.ifel.ru/mef2015/MEF_2015_14_Reports_1.pdf (data obrashcheniya 04.12.2015).
6. Nedosekin A.O., Reishakhrit E.I. Al'ternativnaya nedenezhnaya likvidnost': mekhanizmy emissii i obrashcheniya (*Alternative Non-Cash Liquidity: mechanisms for issuance and circulation*). Tam zhe.
7. Nedosekin A.O. Dva ocherka o gryadushchei Rossii (*Two essays on the upcoming Russia*). St. Petersburg: Izd-vo SPbGPU, 2012, p.151.
8. Nedosekin A.O., Abdullaeva Z.I. Finansovaya matematika (*Financial mathematics*). St.Petersburg: SPbGPU, 2013, p.219.
9. Nedosekin A.O. Mobilizatsionnaya ekonomika po-russki (*Mobilization economy in Russian*). St.Petersburg: Izd-vo SPbGPU, 2015, p.124.
10. Nedosekin A.O., Kalyuta V.Yu., Ternovaya Ya.O. Upravlenie tsenovymi riskami v neftegazovoi otrasli Rossii (*Price risk management in Russian oil & gas industry*). St.Petersburg: SPbGPU, 2015, p.167.
11. Oiken V. Osnovy natsional'noi ekonomii (*National economy foundations*). Moscow: Ekonomika, 1996, p.351.
12. Tsentrobanki protiv pravitel'stv (*Central banks against governments*) [Elektronnyi resurs]. URL: <http://voprosik.net/centrobanki-protiv-pravitelstv/> (data obrashcheniya 04.12.2015).
13. German Rentenmark [Electronic resource]. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/German_Rentenmark (date of access 2015.12.04).
14. MEFO [Electronic resource]. Available at: <http://en.wikipedia.org/wiki/MEFO> (date of access 2015.12.04).
15. Online PE data on Robert Shiller personal website [Electronic resource]. Available at: <http://www.econ.yale.edu/~shiller/data.htm> (date of access 2015.12.04).

Author A.O.Nedosekin, Dr. of Economics, Professor, sedok@mail.ru (Saint-Petersburg Mining University, Russia).
Manuscript Accepted 2.02.2016.

УДК 65.053+621.311

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬЮ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ

Е.И.РЕЙШАХРИТ

Санкт-Петербургский горный университет, Россия

В статье рассмотрены направления развития энергоменеджмента на предприятиях нефтеперерабатывающей отрасли, обоснована необходимость разработки методики формирования элементов системы энергоменеджмента с учетом отраслевой специфики. В качестве элементов такой системы рассмотрены бенчмаркинг и внутренний энергоаудит. Обозначены причины, сдерживающие развитие бенчмаркинга в России, предложены принципы формирования и показатели системы бенчмаркинга энергоменеджмента на уровне отрасли и предприятия, изложена методика отнесения нефтеперерабатывающего предприятия к определенному классу по уровню развития энергоменеджмента, этапы проведения и показатели ежегодной самооценки (внутреннего энергоаудита) состояния энергоменеджмента на предприятии, позволяющие выявить основные проблемы повышения энергоэффективности и сформировать перечень мероприятий по их устранению.

Ключевые слова: энергоменеджмент, энергосбережение, энергоэффективность, топливно-энергетический комплекс, нефтеперерабатывающие предприятия, бенчмаркинг энергоменеджмента, стандарт ISO 50001:2011, методологии «Solomon Associates», внутренний энергоаудит.

Как цитировать эту статью: Рейшахрит Е.И. Особенности управления энергоэффективностью на предприятиях нефтеперерабатывающей отрасли // Записки Горного института. 2016. Т.219. С.490-497. DOI 10.18454/PMI.2016.3.490

Понятия «энергоэффективность» и «энергосбережение». Государственная политика в области энергоэффективности. В научных публикациях понятия «энергоэффективность» и «энергосбережение» часто употребляются в качестве синонимов, что неверно.

Термин «эффективность» связан, как правило, с достижением каких-либо определенных результатов с минимально возможными издержками или получения максимально возможного объема продукции из данного количества ресурсов [14].

По мнению автора, эффективность использования энергии, или повышение энергоэффективности означает такое состояние системы (использование энергетических ресурсов), при котором энергопотребление сводится к минимально возможному уровню для производства продукции без снижения ее качества. Энергоэффективность опирается, как правило, на оптимизацию потребления, которая, в свою очередь, достигается путем нахождения менее энергоемких затрат.

Энергосбережение ставит своей целью сокращение чрезмерного (сверх установленных норм) потребления энергии, а также исключения ее потерь. Применительно к энергоменеджменту энергосбережение вполне корректно рассматривать как составную часть энергоэффективности.

Энергоемкость валового внутреннего продукта России по состоянию на 2013 г. примерно в 2,5 раза выше среднемирового уровня и в 2,5-3,5 раза выше, чем в развитых странах [7]. Сохранение высокой энергоемкости российской экономики приводит к снижению энергетической безопасности России и сдерживанию экономического роста.

Государственная политика в области энергоэффективности и энергосбережения отражена в ряде законодательных актов:

– Федеральный закон № 261 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

– Государственная программа Российской Федерации «Энергоэффективность и развитие энергетики».

– «Энергетическая стратегия России на период до 2035 г.».

– Государственная программа «Энергоэффективность и развитие энергетики».

В 2014 г. произошли следующие изменения системы управления энергосбережением и повышением энергоэффективности:

- на федеральном уровне: внедрен механизм включения показателей энергоэффективности в отраслевые государственные программы;

- на региональном уровне: представлены региональные стандарты в области энергоэффективности;

- на уровне компаний: Министерством энергетики РФ предложено устанавливать показатели энергоэффективности для топ-менеджмента, для всех подразделений компаний, а также определять данные показатели на базе сравнения с зарубежными аналогами. Начато внедрение стандартов управления энергоэффективностью в компаниях (энергоменеджмент, PR).



В международной практике для организаций основным стандартом по энергоменеджменту является ISO 50001:2011 [16]. Данный стандарт системы энергоменеджмента основывается на цикле Деминга (цикл «Plan – Do – Check – Act» (PDCA)) . В России принят аналог международного стандарта – ГОСТ Р ИСО 50001.

Энергоменеджмент в нефтеперерабатывающей отрасли. Значительная часть энергии, производимой в России (около 45 %), потребляется ТЭК. Кроме того, ТЭК обеспечивает более 45 % поступлений в доходную часть консолидируемого бюджета Российской Федерации, а доля отраслей ТЭК в объеме внутреннего валового продукта составляет почти 30 % [15]. Поэтому повышение энергоэффективности особенно важно для отраслей топливно-энергетического комплекса и, в частности, в нефтепереработке.

Нефтеперерабатывающая отрасль характеризуется энергоемкими процессами производства. По данным ОАО «ВНИПИнефть», Россия тратит значительно больше топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) на производство 1 тыс. т нефтепродуктов [13]. Доля затрат на топливо и энергию в себестоимости нефтепереработки составляет 54,7 % [4].

В 2008 г. правительством страны был принят технический регламент [10], направленный на внедрение европейских экологических стандартов на производство моторных топлив в России. Наиболее актуальной задачей для отрасли является увеличение глубины переработки нефти и улучшение качества моторных топлив до стандарта Евро-5, что требует дополнительных энергозатрат. Как следствие, это приведет к повышению энергоемкости производства.

В 2010 г. была принята «Генеральная схема развития нефтяной отрасли Российской Федерации на период до 2020 г.», согласно которой одной из основных задач государства является создание экономических стимулов для модернизации нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ) в направлении значительного увеличения глубины переработки. В данном документе предложен целевой сценарий развития нефтеперерабатывающей промышленности России, который учитывает:

- необходимость технологической модернизации отечественных НПЗ;
- повышение качества конечной продукции, в том числе ужесточение экологических требований к моторному топливу;
- обеспечение внутреннего спроса на основные нефтепродукты в перспективе до 2020 г.;
- прогноз изменения внешнего рынка нефтепродуктов и нарастающей на нем конкуренции;
- экономическую эффективность проектов модернизации НПЗ.

В 2011 г. правительством были предприняты меры по стимулированию привлечения инвестиций в отрасль и, в первую очередь, в модернизацию производства. Важную роль в создании экономических стимулов модернизации сыграло внедрение налоговой системы «60-66-90-10», введенной в октябре 2011 г., в соответствии с которой снижены экспортные пошлины на нефть с 65 до 60 % от ее цены; пошлина на экспорт темных нефтепродуктов установлена в размере 66 % от пошлины на экспорт сырой нефти; введены пошлины на вывоз автобензинов в размере 90 % от величины пошлины на нефть. Таким образом, достигнута унификация пошлин на вывоз темных и светлых нефтепродуктов.

К ключевым показателям состояния нефтеперерабатывающей отрасли относятся глубина переработки, уровень выхода светлых нефтепродуктов и коэффициент загрузки производственных мощностей по первичной переработке нефти.

Одной из основных задач проекта «Энергетическая стратегия до 2035 г.» в части, касающейся нефтяного комплекса, предусмотрено сбалансированное развитие нефтепереработки в направлении дальнейшего повышения глубины переработки нефти и роста качества выпускаемых нефтепродуктов в увязке с потребностями внутреннего и внешнего рынков. Кроме того, проект предусматривает также развитие ресурсо- и энергосбережения, сокращение потерь на всех стадиях технологического процесса при подготовке запасов, добыче, транспортировке и переработке нефти.

В Минэнерго к 2018 г. планируется увеличить глубину переработки нефти на российских нефтеперерабатывающих заводах до 85 % (сегодня – 75 %) и достичь доли моторных топлив 5-го экологического класса до 98 % в общем объеме производства [9].

Энергоэффективность и энергосбережение взаимосвязаны и являются важнейшими составляющими системы энергоменеджмента, основная цель которого – повышение уровня энергоэффективности. Решение управленческой задачи в рассматриваемой области заключается в последовательном применении системного подхода к энергоменеджменту.

НПЗ представляет собой совокупность нефтетехнологических процессов (установок, цехов, блоков), а также вспомогательных и обслуживающих служб, обеспечивающих нормальное функционирование предприятия и производства нефтепродуктов [2].



Структура каждого нефтеперерабатывающего завода уникальна, так как она зависит от состава и качества перерабатываемого сырья, спецификации на продукцию и экологические стандарты, рыночного спроса. Характерной особенностью НПЗ является получение различной продукции из одного исходного нефтяного сырья. По ассортименту выпускаемой продукции предприятия нефтеперерабатывающей отрасли принято классифицировать на следующие группы (профили):

- 1) топливного профиля;
- 2) топливно-масляного профиля;
- 3) топливно-нефтехимического профиля (нефтехимические комбинаты);
- 4) нефтехимические комбинаты топливно-масляно-нефтехимического профиля.

НПЗ топливно-нефтехимического профиля производят помимо различных видов топлива и углеродных материалов и другую нефтехимическую продукцию: полимеры, реагенты и т.д. Комплексная переработка нефти экономически эффективнее, чем узкоспециализированная. С изменением схемы переработки нефти меняется объем эксплуатационных затрат и себестоимость нефтепродуктов.

Состояние отечественной нефтепереработки характеризуется как сложное. Износ основных фондов около 70 %. Отсутствует необходимый набор вторичных процессов переработки нефтяного сырья.

Устаревшая инфраструктура предприятий отрасли приводит к увеличению числа рисков в области производственной безопасности, охраны окружающей среды и обеспечения конкурентоспособности. Из-за износа нефтеперерабатывающих мощностей возрастают трудности с переработкой вязких сортов нефти, объем добычи которой увеличивается с истощением месторождений малосернистой нефти [12].

Бенчмаркинг в системе энергоменеджмента НПЗ. Как уже отмечалось, структура каждого нефтеперерабатывающего завода уникальна, что вызывает необходимость применения индивидуальной методики анализа и оценки, учитывающей, в первую очередь, специфику технологических процессов. Всемирно признанной является методология оценки эффективности нефтепереработки американской консалтинговой фирмой «Solomon Associates» Inc. «Конкурентный анализ функционирования и контроль затрат» (Competitive Performance Analysis and Costs Control). Одним из элементов данной методики является бенчмаркинговые исследования.

В ISO 50001:2011 Системы энергетического менеджмента приводится определение бенчмаркинга в энергоменеджменте как «процесса сбора, анализа и определения соотношения между данными, которые характеризуют энергетическую результативность между сопоставимыми видами деятельности с целью оценки и сравнения этой результативности между одинаковыми или различными элементами или образованиями». В Приложении к ISO 50001:2011 подчеркивается, что бенчмаркинг – это один из инструментов поддержания и непрерывного улучшения энергодеятельности (energy performance) в рамках такого элемента системы энергоменеджмента, как процесс энергопланирования (energy planning).

Под бенчмаркингом энергоменеджмента нами понимается процесс определения, понимания и адаптации имеющихся примеров эффективного использования энергоресурсов на нефтеперерабатывающих предприятиях с целью повышения энергоэффективности и реализации потенциала энергосбережения [11]. Целью бенчмаркинга энергоменеджмента является, в конечном счете, определение потребностей в изменениях и достижение успеха в результате этих изменений. Среди ключевых задач проведения бенчмаркинга выделим следующие: укрепление конкурентных позиций; повышение энергетической и производственной эффективности в целом; определение «слабых» мест; разработка предложений по энергосбережению и повышению энергетической эффективности.

Для российских предприятий применение бенчмаркинга в качестве инструмента энергоменеджмента сдерживается рядом причин, основными из которых являются [11]:

- 1) закрытость и непубличность российских предприятий в плане информации, необходимой для применения бенчмаркинга;
- 2) непригодность информации существующих в настоящее время форм официальной статистической отчетности в области использования энергоресурсов для бенчмаркинга (4-ТЭР «Сведения об остатках, поступлении и расходе топливно-энергетических ресурсов, сборе и использовании отработанных нефтепродуктов» и 11-ТЭР «Сведения об использовании топлива, теплоэнергии и электроэнергии на производство отдельных видов продукции, работ (услуг)»);
- 3) отсутствие адаптации западных методик бенчмаркинга к российским условиям;
- 4) отсутствие разработанных комплексных методик бенчмаркинга для российских условий.

В настоящее время в нашей стране системы сопоставления показателей (бенчмаркинга) для предприятий, производящих сходные продукты могут работать в двух режимах [4]:

1. Обязательный и обезличенный. Приводятся данные по удельным расходам энергии на производство промышленной продукции для предприятий, но сами предприятия не указываются. Эта система первоначально может быть сформирована на основе данных формы 11-ТЭР, которые ежегодно публикуются, но не ограничиваться ими. Она может широко использовать зарубежные данные, в том числе специальных информационных систем бенчмаркинга и определения показателей лучших мировых практик по уровню энергоэффективности [4].

2. Добровольный с упоминанием названия компании. В этом случае система рейтинга компаний создается добровольно на основе работы отраслевых промышленных ассоциаций при поддержке отраслевых научных и информационных центров. Ее работа организуется в виде ежегодных специальных рабочих совещаний, а так же, как страница в сети Интернет и как рубрика в специализированных изданиях.

Бенчмаркинг в нефтеперерабатывающей отрасли должен быть встроен в систему энергоменеджмента, разработанную с учетом ее специфики. Один из возможных вариантов системы энергоменеджмента отрасли представлен на рисунке.

Система бенчмаркинга должна включать четыре раздела [11]: 1) потребление ТЭР; 2) производственные характеристики предприятия; 3) целевые показатели энергосбережения и повышения энергоэффективности для нефтеперерабатывающей отрасли; 4) реализация энергосберегающих мероприятий, шт.

Первый раздел содержит показатели фактического расхода ТЭР, потребляемых НПЗ, на всю произведенную продукцию (выполненные работы). Второй раздел раскрывает уровень производственного развития предприятия, а также ряд показателей по методологии «Solomon Associates» [2 5, 6]. В третьем разделе отражаются отраслевые индикаторы государственных программ Российской Федерации по энергосбережению и повышению энергетической эффективности в нефтегазовой отрасли [1, 3]. Показатели четвертого раздела отражают выполнение плана по реализации энергосберегающих мероприятий.

Ряд параметров, необходимых для сравнения показателей, в статистических формах отсутствует, что вызывает необходимость применения специальной формы оперативного учета. По нашему мнению, форма текущего оперативного учета должна содержать следующие показатели: 1) ввод технологических установок по программе модернизации, ед.; 2) технологическая энергоемкость продукции; 3) индекс энергоемкости, %; 4) уровень использования мощности, %; 5) индекс энергетической эффективности для переработки нефти, %; 6) доля потенциала энергосбережения, %; 7) удельный расход энергии на переработку нефти на единицу первичной переработки, кг у. т./т; 8) удельный расход энергии на транспортировку нефти по трубопроводам, кг у.т./ тыс. т км; 9) удельный расход энергии на транспортировку нефтепродуктов по трубопроводам, кг у.т./ тыс. т км; 10) общее количество реализованных мероприятий, шт.

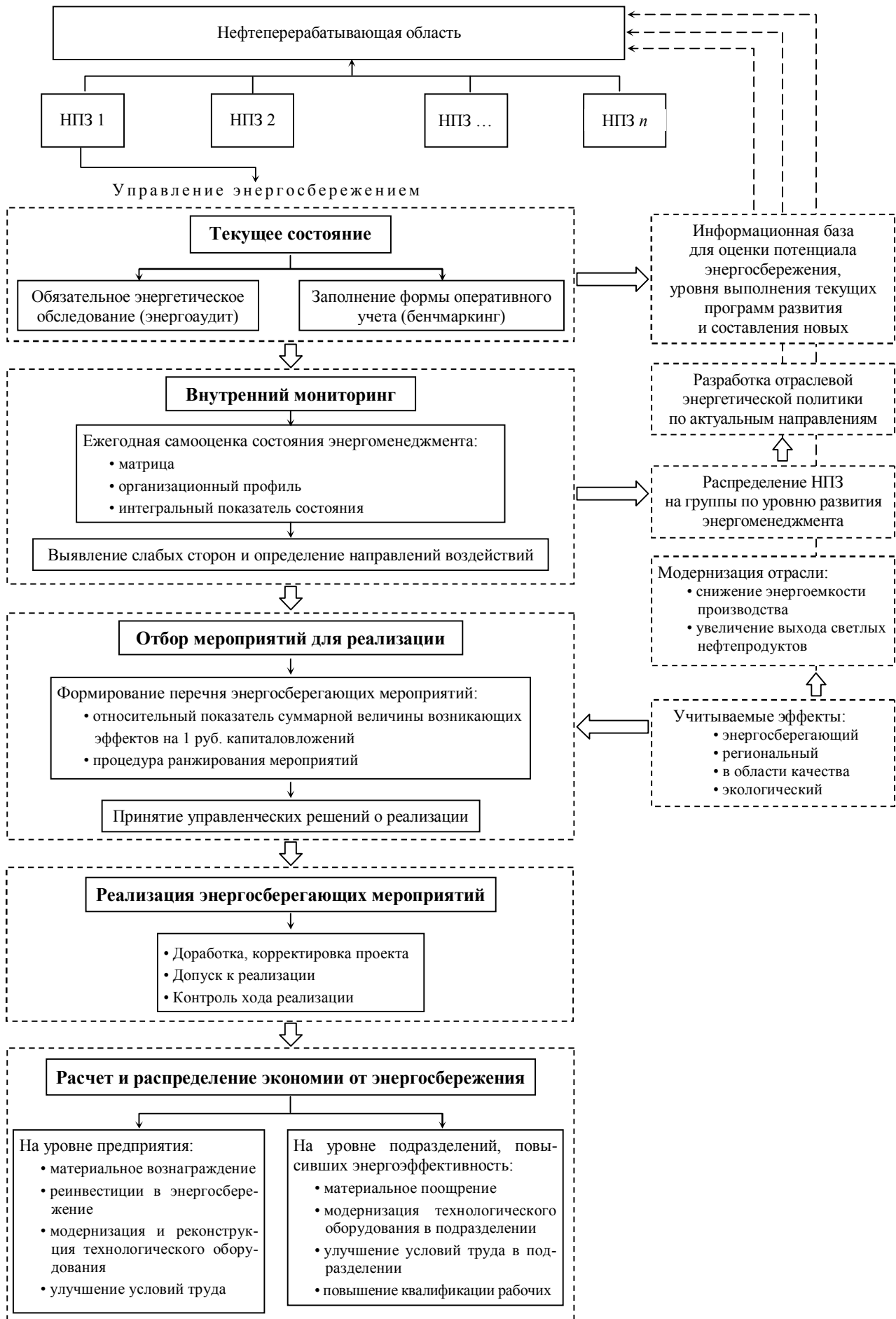
Для применения бенчмаркинга на уровне отрасли основные технико-экономические показатели всех нефтеперерабатывающих предприятий представляются графически в виде квартилей. Для этого проводится ранжирование совокупности всей информации по отраслевым показателям и разделение ее на четыре части. Каждый квартиль представляет 25 % от всего состава участников, упорядоченных по значению некоторого показателя. В зависимости от сущности показателя заводы с наилучшими показателями входят в первый либо четвертый квартиль, а с наихудшими – в четвертый либо первый соответственно.

Этапы проведения бенчмаркинга для достижения целей повышения энергетической эффективности представлены в табл. 1.

Таблица 1

Этапы проведения бенчмаркинга энергоменеджмента для нефтеперерабатывающих предприятий [11]

Этапы	Содержание этапа
Цель и планирование	Оценка деятельности и стимулирование повышения энергоэффективности нефтеперерабатывающей отрасли
Сбор и проверка данных	Заполнение формы оперативного учета Консолидация всех данных в информационной системе Минэнерго
Анализ и результаты	Публикация результатов бенчмаркинга в открытом доступе на сайте Министерства энергетики РФ Ранжирование данных
Отчетность	Определение потребностей предприятия в изменениях и достижение успеха в результате этих изменений



Система энергоменеджмента нефтеперерабатывающей отрасли [11]



Все показатели (элементы) матрицы энергоменеджмента объединены в шесть групп по областям энергоменеджмента:

- политика в области энергоэффективности: энергетическая политика, энергетическое планирование;
- организация: организационная структура, обучение персонала, мотивационное обеспечение;
- реализация системы маркетинга: маркетинг;
- технология: технологии и применяемая техника;
- мониторинг системы: информационные системы;
- финансовое обеспечение: инвестиции.

Предлагается выделить пять классов уровней развития энергоменеджмента от 0-го до 4-го (самый высокий). Отнесение предприятия к определенному классу уровня развития энергоменеджмента осуществляется на основании расчета величины интегрального показателя (EM_i), значение которого варьирует от 4 до 180 [11]:

$$EM_i = \sum R_i m_j,$$

где R_i – характеристика матрицы энергоменеджмента, $i = 1-9$; m_j – класс уровня развития энергоменеджмента, $j = 0-4$.

При этом значение 4 соответствует положению, когда только один из элементов энергоменеджмента оценен на уровне первого класса, а все остальные элементы получили нулевые оценки. Максимальное значение интегрального показателя возможно, когда все элементы энергоменеджмента находятся на 4-м, самом высоком уровне развития.

Этапы проведения ежегодной самооценки состояния энергоменеджмента на нефтеперерабатывающем предприятии представлены в табл.2.

Таблица 2

Этапы проведения самооценки состояния энергоменеджмента

Номер этапа	Этапы	Содержание процедуры
0	Проведение экспертного оценивания	Присвоение экспертами рангов каждой составляющей энергоменеджмента (разовая процедура)
I	Обработка результатов экспертного оценивания	Обработка результатов. Оценка согласованности мнений экспертов
II	Оценка текущего состояния энергоменеджмента по организационному профилю	Построение организационного профиля энергоменеджмента Выявление проблемных областей
III	Выводы и рекомендации	Расчет интегрального показателя, характеризующего состояние энергоменеджмента Составление рекомендаций по результатам самооценки

Для отрасли значимость использования нефтеперерабатывающими заводами методики ежегодной самооценки заключается в определении количества НПЗ, относящихся к определенным классам уровня развития энергоменеджмента, что позволит корректировать программы развития отрасли.

Следует отметить, что при реализации предложенной матрицы энергоменеджмента, элемент мониторинга должен иметь четкую привязку к уровням иерархической структуры предприятия [8]:

- нижний уровень (насос-двигатель, вентиляционная установка, печь);
- средний уровень (установка, объект);
- верхний уровень (предприятие).

Самооценка позволяет выявить основные проблемы в рамках повышения энергоэффективности и сформировать перечень мероприятий по их устранению.

Источником потенциальных мероприятий для включения их в программу энергосбережения и повышения энергоэффективности предприятия могут являться результаты энергетического обследования (энергоаудита), банк идей, организованный внутри самого предприятия, и другие источники.

В качестве показателей энергоэффективности можно использовать показатели для определения конкурентоспособности предприятия [8]: индекс энергоемкости; индекс эффективности ремонтных затрат; индекс эффективности персонала, индекс эффективности ремонтного персонала; индекс эффективности неремонтного персонала; индекс эффективности неэнергетических затрат; индекс объемного увеличения; индекс выбросов углерода. Следует иметь в виду, что сравнение показателей возможно только для предприятий аналогичного профиля.

Оценку уровня энерготехнологической эффективности можно проводить на основе тех же данных, которые используются для расчета индекса предприятия нефтепереработки по методике «Solomon Associates».



Для расчета показателей энергоэффективности для нефтеперерабатывающего предприятия может быть использовано современное программное обеспечение, например MATLAB [8].

Применение современного программного обеспечения позволяет более точно определить показатели и значительно сократить время на расчеты.

Заключение. Система управления деятельностью, направленной на повышение энергетической эффективности в нефтеперерабатывающей отрасли, включает следующие управленческие действия и инструменты: бенчмаркинг предприятий нефтеперерабатывающей отрасли; оценка текущего состояния энергоменеджмента НПЗ; внутренний мониторинг энергетического хозяйства; отбор и последующая реализация энергосберегающих мероприятий; расчет и распределение экономии, полученной в результате реализации энергосберегающих мероприятий.

Для использования бенчмаркинга в качестве элемента системы энергоменеджмента для нефтеперерабатывающих предприятий необходима информация, учитывающая специфику отрасли, для чего предложена форма оперативного учета. Это дает возможность осуществлять мониторинг деятельности, направленной на энергосбережение и повышение энергетической эффективности.

Оценка текущего состояния энергоменеджмента должна проводиться предприятием ежегодно по рассмотренной методике самооценки на основе предложенного инструментария внутреннего аудита, включающего: матрицу энергоменеджмента, адаптированную к условиям российских НПЗ; построение организационного профиля энергоменеджмента; способ расчета интегрального показателя оценки состояния энергоменеджмента, позволяющего отнести предприятие к определенному классу уровня развития энергоменеджмента.

В качестве показателей энергоэффективности можно использовать показатели для определения конкурентоспособности предприятия, для расчета которых может быть применено современное программное обеспечение, например MATLAB.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алтухова М.В. Анализ и оценка деятельности производственных организаций в области энергосбережения (на примере предприятий приборостроения) // Среднерусский вестник общественных наук. 2011. № 3. С. 131-138.
2. Ахметов С.А. Технология и оборудование процессов переработки нефти и газа / С.А.Ахметов, Т.П.Сериков, И.Р.Кузеев, М.И.Баязитов; Под ред. С.А.Ахметова. СПб: Недра, 2006. 868 с.
3. Баланс энергоресурсов Российской Федерации [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.gks.ru/free_doc/new_site/business/prom/en_balans.htm
4. Башмаков И.А. Повышение энергоэффективности в российской промышленности. Что делать! // Энергосовет. 2013. № 3 (28). С. 41-56.
5. Выгон Г.В. Энергополитика, энергостратегия и прогнозы: целевые показатели заданы без вектора развития // Современная экономическая политика и ключевые точки роста российской нефтегазовой отрасли: Материалы конференции. 18 марта 2014 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.assoneft.ru/anons/ННФ_201403118.pdf
6. Гайда И.В. Путь к глобальной конкурентоспособности: повышение энергоэффективности нефтегазового комплекса // Энергоэффективность и энергосбережение: Материалы II Международного форума (ENES-2013). 21-23 ноября 2013 г. М. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://enes-expo.com/docs/prezentatsii_dlya_programmy/21112013/BCG.pdf
7. Кулагин А.О. Реализации и развитии госполитики в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности // По материалам Международного электроэнергетического форума UPGrid-2012. Красноярск. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.energyland.info/interviewshow-391>.
8. Лахов Ю.А. Определение показателей энергоэффективности нефтеперерабатывающего предприятия // Siance Time. 2014. Вып. № 7(7). С. 198-207.
9. Новак А.В. План работы Минэнерго до 2018 г. / РИА «Новости». М. 20.11.2013. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.rg.ru/2013/06/27/minenergo-site.html>
10. Об утверждении технического регламента «О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и топочному мазуту»: Постановление правительства Российской Федерации от 27 февраля 2008 г. // Российская газета. 05 марта 2008. № 118.
11. Рейшахрит Е.И. Развитие инструментов энергоменеджмента для нефтеперерабатывающих предприятий / Е.И.Рейшахрит, Е.К.Хусаинова // Корпоративное управление и инновационное развитие экономики Севера: Вестник научно-исследовательского центра корпоративного права, управления и венчурного инвестирования Сыктывкарского государственного университета. 2015. № 2. С. 50-67.
12. Хусаинова Е.К. Специфика рисков на нефтеперерабатывающих предприятиях в России // Актуальные проблемы современной экономики: Материалы междунар. науч.-практ. конф. Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет», 2012. С. 95-96.
13. Хусаинова Е.К. Совершенствование подхода к оценке эффективности энергосберегающих проектов в нефтеперерабатывающей отрасли / Е.К.Хусаинова Е.И.Рейшахрит // Экономические науки: Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2015. № 2 (216). С. 76-84.
14. Экономический словарь [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://dic.academic.ru/dic.nsf/econ_dict/16954
15. Энергоэффективность: катализатор экономики [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://businessofrussia.com/march-2014/item/579-energyefficiency.html>
16. ISO 50001:2011. Системы энергетического менеджмента. Требования и руководство по применению. М.: Стандартинформ, 2012. 52 с.

*Автор Е.И.Рейшахрит, д-р экон. наук, профессор, anel0610@mail.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Россия)
Статья принята к публикации 2.02.2016.*



SPECIFIC FEATURES OF ENERGY EFFICIENCY MANAGEMENT AT ENTERPRISES OF OIL PROCESSING INDUSTRY

E.I. REISHAHRIT

Saint-Petersburg Mining University, Russia

The paper involves consideration of key directions of energy management development at oil processing enterprises. It proves the necessity of creation a special method, which would help to form an energy management system, taking into account the specificity of oil processing industry. The elements of such a system are benchmarking and internal energy audit. The reasons constraining the development of benchmarking in Russia are analyzed, the principles and indicators of energy management benchmarking on the level of industry and an enterprise are offered. The paper represents a method of oil-refining companies' classification in accordance with the level of their energy management development. It also contains information on the stages and indicators of annual internal energy audit aimed at defining the state of energy management and its problems with consequent development of measures to resolve them.

Key words: energy management, energy saving, energy efficiency, fuel and energy complex, oil processing enterprises, energy management benchmarking, standard ISO 50001:2011, Solomon Associates methods, internal energy audit.

How to cite this article: Reishahrit E.I. Specific features of energy efficiency management at enterprises of oil processing industry. *Zapiski Gornogo instituta*. 2016. Vol.219, p.490-497. DOI 10.18454/PMI.2016.3.490

REFERENCES

1. *Altuhova M.V.* Analiz i ocenka dejatel'nosti proizvodstvennyh organizacij v oblasti jenergosberezhenija (na primere predpriyatij priborostroenija) (*Analysis and evaluation of production companies in the field of energy conservation on example of instrument engineering enterprises*). *Srednerusskij vestnik obshhestvennyh nauk*. 2011. N 3, p.131-138.
2. *Ahmetov S.A., Serikov T.P., Kuzeev I.R., Bajazitov M.I.* Tehnologija i oborudovanie processov pererabotki nefiti i gaza (*Technology and equipment for oil and gas processing: textbook*). Ed. by S.A.Ahmetova. St. Petersburg: Nedra, 2006, p.868.
3. *Balans jenergoresursov Rossijskoj Federacii (Balance of energy resources of the Russian Federation)* [Elektronnyj resurs]. Available at: http://www.gks.ru/free_doc/new_site/business/prom/en_balans.htm
4. *Bashmakov I.A.* Povyshenie jenergojefektivnosti v rossijskoj promyshlennosti. Chto delat'! (*Increasing of energy efficiency of the Russian industry. What to do!*). *Jenergosovet*. 2013. N 3 (28), p.41-56.
5. *Vygon G.V.* Jenergopolitika, jenergostrategija i prognozy: celevye pokazateli zadany bez vektora razvitiya (*Energy policy, energy strategy and forecasts: target indicators are set without vector of development*). *Sovremennaja jekonomicheskaja politika i kljuchevye tochki rosta rossijskoj neftegazovoj otrasli: Materialy konferencii*. 18 marta 2014 g. [Elektronnyj resurs]. Available at: www.assoneft.ru/anons/NNF_201403118.pdf
6. *Gajda I.V.* Put' k global'noj konkurentosposobnosti: povyshenie jenergojefektivnosti neftegazovogo kompleksa *Way to the global competitiveness: raise of energy efficiency in oil and gas complex*. *Jenergojefektivnost' i jenergosberezhenie: Materialy II Mezhdunarodnogo foruma (ENES-2013)*. Moscow. 21-23 nojabrja 2013 g. [Elektronnyj resurs]. Available at: http://enes-expo.com/docs/prezentatsii_dlya_programmy/21112013/BCG.pdf
7. *Kulagin A.O.* Realizacii i razvitiu gospolitiki v oblasti jenergosberezhenija i povyshenija jenergeticheskogo jefektivnosti (Realization and development of the state policy in the field of energy saving and increasing of energy efficiency). *Po materialam Mezhdunarodnogo jelektrojenergeticheskogo foruma UPGrid-2012*. Krasnojarsk. [Elektronnyj resurs]. Available at: <http://www.energyland.info/interviewshow-391>.
8. *Lahov Ju.A.* Opredelenie pokazatelej jenergojefektivnosti neftepererabatyvajushhego predpriyatija (*Determination of the energy efficiency indicators of oil processing companies*). *Siance Time*. 2014. Iss. N 7(7), p.198-207.
9. *Novak A.V.* Plan raboty Minjenergo do 2018 g. (*Work plan for the Ministry of energy up to 2018*). RIA «Novosti». Moskva. 20.11.2013. [Elektronnyj resurs]. Available at: <http://www.rg.ru/2013/06/27/minenergo-site.html>
10. *Ob utverzhdenii tehničeskogo reglamenta «O trebovanijah k avtomobil'nomu i aviacionnomu benzinu, dizel'nomu i sudovomu toplivu, toplivu dlja reaktivnyh dvigatelej i topochnomu mazutu»:* Postanovlenie pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 27 fevralja 2008 g. (*Approval of technical regulations «Requirements on motor and aviation gasoline, diesel and marine fuel, jet fuel and furnace fuel oil»:* *Resolution of the Russian Federation Government on February 27, 2008*). *Rossijskaja gazeta*. 05 marta 2008. N 118.
11. *Rejshahrit E.I., Husainova E.K.* Razvitie instrumentov jenergomenedzhmenta dlja neftepererabatyvajushhih predpriyatij (*Development of the instruments of energy management for oil processing companies*). *Korporativnoe upravlenie i innovacionnoe razvitie jekonomiki Severa: Vestnik nauchno-issledovatel'skogo centra korporativnogo prava, upravlenija i venčurnogo investirovanija Syktyvkar'skogo gosudarstvennogo universiteta*. 2015. N 2, p.50-67.
12. *Husainova E.K.* Specifika riskov na neftepererabatyvajushhih predpriyatijah v Rossii (*Specific risks of the Russian oil processing enterprises*). *Aktual'nye problemy sovremennoj jekonomiki: Materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Izhevsk: Izd-vo «Udmurtskij universitet»*, 2012, p.95-96.
13. *Husainova E.K., Rejshahrit E.I.* Sovershenstvovanie podhoda k ocenke jefektivnosti jenergosberegajushhih projektov v neftepererabatyvajushhej otrasli (*Improvement of the approach to evaluation of energy efficiency projects in oil processing industry*). *Jekonomicheskie nauki: Nauchno-tehničeskije vedomosti SPbGPU*. 2015. N 2(216), p.76-84.
14. *Jekonomicheskij slovar' (Economic dictionary)* [Elektronnyj resurs]. Available at: http://dic.academic.ru/dic.nsf/econ_dict/16954
15. *Jenergojefektivnost': katalizator jekonomiki (Energy efficiency as a catalyst of economics)* [Elektronnyj resurs]. Available at: <http://businessofrussia.com/march-2014/item/579-energyefficiency.html>
16. *ISO 50001:2011. Sistemy jenergeticheskogo menedzhmenta. Trebovanija i rukovodstvo po primeneniju (Energy management systems – Requirements with guidance for use (IDT))*. Moscow: Standartinform, 2012, p.52.

Author E.I.Reishahrit, Dr. of Economics, Professor, anel0610@mail.ru (Saint-Petersburg Mining University, Russia).
Manuscript Accepted 2.02.2016.



Горное образование: традиции и перспективы в XXI веке

УДК 37.026.7:(130.2+930.85)

КУЛЬТУРОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВАНИЯ КОНЦЕПЦИИ «EDUTAINMENT» КАК СТРАТЕГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ОБЩЕКУЛЬТУРНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ В ВУЗАХ НЕГУМАНИТАРНОГО ПРОФИЛЯ

С.А.РАССАДИ́НА

Санкт-Петербургский горный университет, Россия

Статья посвящена актуальной образовательной стратегии «edutainment» (от англ. *education* – образование и *entertainment* – развлечение, интересное времяпрепровождение). Рассматриваются социокультурные факторы, под воздействием которых получили распространение релевантные образовательные методики.

Обосновывается целесообразность привлечения данной стратегии в ходе преподавания культуроведческих дисциплин в вузах негуманитарного профиля. Приведены примеры мотивированного использования концепции «edutainment» при организации самостоятельной работы студентов по изучению культурного наследия. Описана методика проведения образовательного эксперимента и дана оценка его научно-практических результатов.

Ключевые слова: культурология, edutainment, образовательные технологии, компетентностный подход, самостоятельная работа студентов.

Как цитировать эту статью: Рассадина С.А. Культурологические основания концепции «edutainment» как стратегии формирования общекультурных компетенций в вузах негуманитарного профиля // Записки Горного института. 2016. Т.219. С.498-503. DOI 10.18454/PMI.2016.3.498

Термин «edutainment», образованный стяжением слов *education* – образование, обучение и *entertainment* – развлечение, интересное времяпрепровождение, в настоящее время широко используется как в сфере организации досуга, так и в сфере образования. Круг явлений, обозначаемых данным термином, представляет интерес как культурный феномен, возникший за счет объединения традиционных методик занимательного обучения с возможностями современных информационно-коммуникационных технологий.

В ряду научных публикаций, посвященных исследованию категории «edutainment», в первую очередь необходимо отметить обзорную статью Н.А.Кобзевой, в которой рассмотрены методологические преимущества данного подхода и различные формы его реализации. На основании анализа научной литературы и интернет-источников Н.А.Кобзева определяет «edutainment» как технологию обучения, особенностью которой «является внедрение современных форм развлечения в систему традиционных лекций, уроков, занятий, семинаров и мастер-классов, так как без телевизионных программ, настольных, компьютерных и видеоигр, фильмов, музыки, веб-сайтов, мультимедийных программ и т.д. уже невозможно представить современное обучение и общение. Проходить занятия и мероприятия в формате технологии «edutainment» могут в кафе, парке, музее, офисе, галерее, клубе, где можно получить информацию по какой-либо познавательной теме в непринужденной атмосфере» [8, с.193]. Само содержание приведенной цитаты, демонстрируя многообразие форматов «edutainment», дает нам основание не согласиться с классификацией данного феномена как «технологии обучения». Подобная трактовка подразумевает необходимость конкретизировать представление о технологии «edutainment», указав значимые отличия от других образовательных технологий, что затруднительно ввиду принципиальной вариативности рассматриваемой категории.

Стремление охарактеризовать «edutainment» как специфическую технологию или методику обучения приводит к неоправданному сужению содержания этого понятия. Так, например, согласно определению, приведенному в часто цитируемой работе О.Л.Гнатюк, категория «edutainment» предполагает «цифровой контент, соединяющий образовательные и развлекательные элементы» [3, с.65]. Предпринятый нами анализ научных статей, методических разработок и рекламных публикаций показал, что в целом данное понятие охватывает широкий диапазон образовательных практик, которые активно задействуют возможности современных информационно-коммуникационных технологий, но не ограничиваются их областью. Сфере «edutainment», безусловно, присущи опора на визуальный материал, интерактивность и неформальная подача информации, однако определяющие характеристики не связаны с конкретными приемами и средствами обучения, существенна основополагающая интенция – стремление сделать процесс познания увлекательным. Этим определяется многообразие форм, объединяемых под рубрикой «edutainment»: общая концепция адаптируется под адресную аудиторию, место действия, техническое оснащение и цель образовательной коммуникации.



В таком ключе категория «edutainment» рассматривается в работах О.А.Богдановой и О.О.Дьяконовой, отражающих историческое развитие и актуальное многообразие образовательных практик, соотносимых с данным понятием. Упомянутые авторы видят в концепции «edutainment» не только и не столько набор конкретных методик, сколько «образовательное явление» [4, с.273], вошедшее в себя достижения педагогики, психологии, информатики и смежных областей знания [1, с.63; 5, с.184]. Выбор конкретного формата «edutainment» зависит от психологических потребностей учащихся, поскольку основная цель исследуемого подхода – пробудить интерес, вызвать эмоциональную реакцию, способствующую усвоению новых знаний. Широко трактует методологическую концепцию «edutainment» С.В.Рыбушкина, определяя ее как «форму передачи данных через развлекательные обучающие материалы и педагогические технологии» [11, с.36]. Особо стоит выделить точку зрения Н.Б.Гвишиани, которая рассматривает «edutainment» как один из «инновационных смешанных жанров» (в их числе упомянуты также «infotainment», «infomercial», «advertorial»); как указывает автор, эти жанры возникли под влиянием коммерческих стратегий подачи информации и воплощают «тенденцию «продвижения» (*promotion*) содержания научных сообщений в облегченном «развлекательном» ключе» [2, с.39].

Таким образом, концепция «edutainment» может быть представлена как стратегия позиционирования образовательных методик, нацеленная на то, чтобы вызвать у обучаемых интерес за счет аналогии с популярными формами рекреационного времяпрепровождения. Соответственно, формы «занимательного обучения» должны отражать актуальный культурный срез досуговых практик. В настоящее время категория «edutainment» объединяет просветительские проекты, осуществляемые средствами массовой информации, виртуальные образовательные проекты, познавательные компьютерные игры, музейную педагогику, популярные лекции в креативных пространствах, мастер-классы и другие формы интеллектуального досуга. Вместе с тем, этот «образовательный жанр» находит применение в учебных заведениях. Среди востребованных методик, реализуемых в рамках основного образовательного процесса, преобладают форматы, задействующие мультимедийный контент, игровые формы, интерактивное обучение. Преподаватели высшей школы видят в стратегии «edutainment» средство популяризации научных знаний [13], способ преодоления психологического барьера при изучении иностранного языка [9], методику практической передачи профессиональных навыков [12]. Показательно, что авторы упомянутых публикаций предлагают использовать стратегию «edutainment» как средство осуществления основных целей образовательного процесса и формирования компетенций, предусмотренных ФГОС ВПО.

Важным аспектом популярных практик формата «edutainment» является то, что они служат целям самообразования, в том числе с использованием виртуальных ресурсов [10, с.224-225]. Поэтому особенно перспективным представляется использование приемов «edutainment» при организации самостоятельной работы студентов. На этом основании нами была разработана методика, предназначенная для формирования общекультурных компетенций у студентов негуманитарных специальностей. Методика апробирована в рамках курса «Культурология», изучаемого в Санкт-Петербургском горном университете.

Необходимость исследовать возможности формата «edutainment» и использовать их в учебном процессе была обусловлена не только внутренними педагогическими мотивами, но и внешними академическими факторами. В настоящее время преподавание гуманитарных дисциплин в технических вузах зачастую ограничивается чтением небольших вводных курсов, в рамках которых на незначительное количество аудиторных часов приходится достаточно большой объем самостоятельной работы студентов. Так, в учебных планах большинства направлений подготовки бакалавриата, имеющих в Горном университете, на изучение дисциплины «Культурология» отведено 72 часа (2 ЗЕТ), из которых только 34 часа выделены для чтения лекций и проведения практических занятий. Таким образом, половину работы по изучению предмета студенты должны проделать самостоятельно. Есть и такие направления, учебные планы которых предусматривают 2/3 самостоятельной подготовки по дисциплине (74 часа из 108). Поэтому важно определиться с тем, на что должна быть направлена познавательная активность студентов в это время, и продумать, какими методическими средствами можно ее оптимизировать.

В образовательных стандартах для вузов технического профиля в перечне общекультурных компетенций чаще всего присутствуют следующие: умение использовать методы гуманитарных наук для осмысления исторических и современных реалий; умение находить информацию в «глобальных компьютерных сетях»; «стремление к саморазвитию, повышению своей квалификации». Конкретные формулировки могут отличаться в деталях, однако их смысловое тождество очевидно.



Применительно к дисциплине «Культурология» эти общекультурные компетенции объединяются общей задачей: студенты должны научиться, опираясь на полученные знания, самостоятельно находить необходимую информацию культурологического содержания.

По убеждению автора статьи, такие традиционные формы домашних заданий, как подготовка устного сообщения, написание реферата или подготовка мультимедийной презентации, себя не оправдывают. С одной стороны, работа с объемными текстами по узкой тематике мало способствует формированию целостных представлений о культуре человечества; с другой стороны, достаточно часто студенты технического вуза стараются избежать сложной для них работы по анализу и компиляции текстовой информации, предпочитая воспользоваться готовыми работами, которые в изобилии находятся в сети Интернет. Поэтому нужны такие домашние задания, которые действительно будут способствовать выработке навыков самообразования и, в частности, помогут студентам научиться ориентироваться в виртуальном корпусе текстового и визуального материала. Некоторые примеры заданий такого типа представлены в учебном пособии, разработанном автором данной статьи [7]. Задания сформулированы таким образом, чтобы студенты смогли на собственном опыте убедиться в обилии информационных ресурсов, рассказывающих о классическом наследии культуры, научились находить историческую информацию по частичным данным и активно использовали медийный потенциал сети Интернет.

Как показывает опыт преподавания в Горном университете, такой подход является культурологически мотивированным, поскольку у современного поколения студентов интернет-навигация ассоциируется с рекреационным времяпрепровождением, а поиск информации по частичным данным воспринимается как выполнение игровой задачи (прохождение квеста). Поэтому в дополнение к базовому набору учебных заданий был составлен экспериментальный комплект занимательных задач, требующих многоступенчатого поиска и отбора информации по принципу веб-квеста. Формулировки заданий разрабатывались с участием студентов, ведущих исследовательскую работу в качестве ассистентов профессора. Благодаря этому были учтены интеллектуальные запросы и познавательные возможности адресной аудитории [6].

По своей структуре такие задания напоминают вопросы для интеллектуальной игры: они включают в себя информационную часть и формулировку вопроса. Сведения, составляющие информационную часть, должны привлекать интерес, а также содержать ключевые слова для интернет-навигации и опорные факты для построения умозаключения. В ходе решения таких задач студентам приходится использовать имеющиеся у них знания, однако главная цель состоит в том, чтобы расширить свой кругозор, а вместе с тем научиться видеть взаимосвязи между различными реалиями, сопоставлять факты, находить недостающую информацию, делать выводы. Хотя работа с заданиями предполагает использование информации из сети Интернет, вопросы сформулированы таким образом, чтобы нельзя было получить ответ путем простого поискового запроса. Нужно увидеть в тексте задачи подсказку и расшифровать ее, познакомиться с упомянутыми в вопросе реалиями и внимательно изучить их, найти дополнительную информацию, отсеять лишнее и сделать вывод на основании собранных фактов.

Продемонстрируем дидактическую структуру заданий на примере одного из вопросов: *Некий известный напиток в XVIII в. считался прерогативой модниц и интеллектуалов. От названия этого напитка образовано слово, ставшее ласковым прозвищем самых младших воспитанниц Смольного института, которые еще не успели проявить себя ни как известные модницы, ни как яркие интеллектуалы. О каком напитке идет речь, и с какой чертой внешнего вида девочек было связано их прозвище? Подсказку можно найти, посмотрев на портрет Ф.С.Ржевской и Н.М.Давыдовой* (вопрос составлен студенткой Е.К.Лаврентьевой). Ответ: *кофе*. Именно этот напиток в то время считался напитком щеголей и интеллектуалов; сохранились свидетельства горячего пристрастия к кофе императрицы Екатерины II. Подсказкой является упоминание о портрете двух девочек, при этом говорится, что нужно обратить внимание на их внешний вид: девочки отличаются друг от друга цветом платьев, у младшей оно коричневое. Из-за такой расцветки форменных платьев самых младших учениц называли «кофейницами». Учебная задача состоит в том, чтобы привлечь внимание студентов к истории Смольного института и к творчеству Д.Г.Левицкого. Как показал опрос студентов, выполнявших это задание, не получается найти ответ (название напитка) прямым запросом, неизбежно приходится знакомиться с текстами, рассказывающими о портретах работы Левицкого или о жизни воспитанниц Смольного института.

Подготовлены занимательные задачи по творчеству А.П.Антропова, В.Л.Боровиковского, Ф.А.Бруни, К.П.Брюллова, А.Г.Венецианова, А.А.Иванова, Д.Г.Левицкого, А.П.Лосенко, И.Н.Никитина, Ф.С.Рокотова, художников объединения «Мир искусства». Как видно, в фокусе внимания находится классическое художественное наследие отечественной культуры. Отправной точкой по-



служила коллекция Русского музея, поскольку представленные в ней художественные произведения позволяют актуализировать школьные знания по истории России и знание классических сюжетов, а вместе с тем дают повод многое узнать о реалиях культуры XVIII-XX веков и научиться анализировать визуальный код культуры. Тематика, связанная с коллекциями петербургских музеев и другими реалиями петербургской культуры, особенно важна для изучения культурологии в Горном университете, поскольку в его стенах большинство составляют студенты, приехавшие из других регионов. Выполнение таких заданий поможет им открыть для себя культурный потенциал Северной столицы, научит осмысленно воспринимать увиденное.

В осеннем семестре 2015-16 учебного года экспериментальный блок заданий, состоящий из 50 вопросов, был предложен в качестве домашней работы студентам I курса, изучавшим дисциплину «Культурология». Задания были распределены по вариантам таким образом, что каждый студент получил по три вопроса, при этом один из вопросов был связан с реалиями XVIII века, второй относился к XIX веку, а третий – к периоду Серебряного века в истории отечественной культуры. Для получения положительной оценки необходимо было найти ответ на все три вопроса. Суть эксперимента состояла в том, что студентам предлагалось не просто найти ответ, они должны были описать стратегию поиска. Это позволило нам собрать необходимые сведения о том, какие методы самостоятельного получения информации являются приоритетными для студентов-первокурсников Санкт-Петербургского горного университета, какими приемами поиска они владеют и какими критериями отбора информации руководствуются в спорных случаях.

Образовательный эксперимент дал положительные результаты. Прежде всего, необходимо отметить, что верные ответы на самые сложные вопросы, требующие многоэтапного поиска информации и анализа данных, были найдены юношами, которые в течение семестра не проявляли заметного интереса к изучению дисциплины «Культурология». Это можно объяснить именно успехом стратегии «edutainment», т.е. тем, что структура задания на интуитивном уровне действительно была воспринята как аналог игры-квеста.

Вместе с тем, нам удалось сделать важные культурологические наблюдения относительно методов поиска и анализа информации. Эксперимент показал, что при выполнении заданий анализ текстовой информации преобладает над анализом визуальной информации. Это стало неожиданным результатом, требующим культурологического осмысления. Поскольку современная культура в целом обычно описывается в терминах преобладания визуального плана над текстовым, можно было ожидать, что наибольший процент успешно выполненных заданий мы увидим в тех случаях, где достаточно найти в сети Интернет какое-либо художественное произведение и рассмотреть его. Но эксперимент показал обратное – именно такие задания вызывают у студентов наибольшее затруднение.

Приведем конкретные примеры. Вопрос: *На картине, написанной художником А.А.Ивановым на сюжет из Нового Завета, изображены Иисус Христос и Мария Магдалина. Картина называется «Явление Христа Марии Магдалине после Воскресения». Однако и без названия можно понять, что изображенная на картине сцена происходит после событий Страстной недели. Какая деталь подсказывает, что Христос предстал перед Марией Магдалиной после своего Воскресения?* (вопрос составлен студенткой Н.И.Карпекиной). Ответ: *одеяние Христа оставляет торс полуобнаженным, позволяя увидеть след от копья, которым он был пронзен после распятия.* Не все студенты, получившие эту задачу, успешно справились с ее решением, так как подразумеваемая деталь не упоминается в вербальных описаниях картины. Даже знание новозаветных сюжетов не всегда помогает находению правильного ответа, поскольку ответ предполагает анализ визуального кода культуры.

Вопрос: *На картине М.В.Добужинского изображено поселение, типичное для России начала XIX века. Жизнь его обитателей была строго регламентирована, подчинена уставам и предписаниям высшего начальства. Условия были настолько тяжелы, что генерал Барклай-де-Толли писал: «Нельзя ожидать ни успокоения воинов, ни улучшения их состояния, а в противоположность должно даже опасаться упадка военного духа и жалобного ропота». Создание таких поселений было одним из аспектов политики, проводимой государственным и военным деятелем, от фамилии которого было образовано понятие, означающее целый комплекс тенденций в жизни России той эпохи. Назовите картину М.В.Добужинского* (вопрос составлен студенткой А.Н.Ахмедовой). Ответ: *«В военном поселении».* Студенты, нашедшие правильный ответ, опирались либо на школьные знания истории (военные поселения, аракчеевщина, далее – поиск картины Добужинского на заданную тему), либо на технологию поиска изображений по ключевым словам (поселение + Добужинский). И то, и другое – ожидаемая стратегия достижения нужного результата. Однако некоторыми была допущена очень показательная ошибка: в ответе приводилась картина «Город в николаевское время». При разборе ошибок в качестве причины, по которой картина «В военном поселении» не рассматривалась как допустимый вариант ответа, студенты указали на то, что полотно Добужинского выглядит слишком ярко, оптимистично, жизнерадостно и потому не ассоциируется с мрачными реалиями аракчеевщины.



Как видим, успешная стратегия поиска строится на вербальных элементах. С одной стороны, это обусловлено принципом работы поисковых машин. С другой стороны, как выявил наш эксперимент, изображению не приписывается функция самодостаточного носителя информации: при наличии выбора студенты с большей вероятностью используют текстовое описание картины, а не ищут ответ в самом изображении. Характерное для современной культуры обилие визуального материала, в том числе используемого при виртуальной коммуникации, парадоксальным образом приводит к тому, что изображение спонтанно не воспринимается как текст, элементы которого доступны для прочтения и требуют интерпретации. Изображение привычно трактуется как элемент декоративного оформления, насыщенный эмоциональными коннотациями, тогда как информация и знание должны быть представлены в вербальной форме.

С точки зрения культурологии, мы лишь подтвердили, что визуальный код культуры не является предметом непосредственного восприятия, но требует навыков анализа и интерпретации зрительной информации. Однако сделанные нами наблюдения представляют несомненную методическую ценность. Современные технические средства позволяют использовать разнообразный визуальный материал, но, как можно предположить, включение такого материала в учебный процесс не является самодостаточным. Одновременно необходимо учить студентов вычленять и вербализовать информационную составляющую изображений. В противном случае, например, иллюстрации к лекционному материалу могут быть восприняты как несущественный декоративно-эмоциональный фон.

Завершая изложение опыта использования заданий категории «веб-квест», отметим, что описанная методика апробирована в рамках курса «Культурология», однако и сам подход в целом, и даже многие из предложенных заданий применимы в рамках других гуманитарных дисциплин, обеспечивающих формирование базовых общекультурных компетенций. Методически направляемая и должным образом контролируемая, такая работа способствует выработке навыков самообразования, важнейший из которых, на наш взгляд, заключается в умении задавать себе вопросы и находить на них ответы, используя возможности современного информационного пространства.

Подводя итоги, можно сказать, что стратегия «edutainment» применима для формирования общекультурных компетенций в системе высшего образования. Преимущество рассмотренного подхода состоит в том, что он позволяет повысить мотивацию к самостоятельной работе по изучению непрофильных дисциплин, в нашем случае дисциплин гуманитарного цикла. Мы показали, что данная стратегия может быть успешно использована в рамках основного учебного процесса, не требуя отказа от стандартных форм академической работы или подмены целей и содержания учебной деятельности. Требуемый эффект достигается посредством разработки заданий, структура и способ выполнения которых ассоциируются с распространенными формами рекреационного времяпрепровождения. Особое достоинство методики, описанной в статье, состоит в том, что она согласуется с актуальными требованиями ФГОС ВПО, в которых уделено значительное внимание таким общеобразовательным навыкам, как умение самостоятельно находить и анализировать информацию гуманитарного содержания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богданова О.А. Эдьютейнмент как особый тип учения // Вестник Московского городского педагогического университета. Серия «Информатика и информатизация образования». 2014. № 4 (30). С.61-65.
2. Гвишиани Н.Б. Регистры, жанры и дисциплины в составе предметного дискурса // Вестник СамГУ. 2015. № 4 (126). С.38-45.
3. Гнатюк О.Л. Основы теории коммуникации. М.: КНОРУС, 2010. 256 с.
4. Дьяконова О.О. Дидактический утилитаризм: эдьютейнмент как инновационное решение проблем образования взрослых // Вестник ТверГУ. Серия «Педагогика и психология». 2015. № 3. С.271-276.
5. Дьяконова О.О. Понятие «эдьютейнмент» в зарубежной и отечественной педагогике // Сибирский педагогический журнал. 2012. № 6. С. 182-185.
6. Карпекина Н.И. Разработка комплекта задач по теме «Русское искусство XVIII-XIX вв. в собрании Русского музея» / Н.И.Карпекина, Е.К.Милютина, С.А.Рассади́на // Современные образовательные технологии в преподавании естественно-научных и гуманитарных дисциплин: Сб. науч. трудов; Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», СПб, 2015. С. 707-711.
7. Кириленко С.А. Культурология: Практикум / СПГИ, СПб. 2005. 111 с.
8. Кобзева Н.А. Edutainment как современная технология обучения // Ярославский педагогический вестник. 2012. Т. 2. № 4. С. 192-195.
9. Радаева Ю.В. Эдьютейнмент как средство снятия языкового барьера (на примере проведения кулинарного мастер-класса) // Филологические науки. Вопросы теории и практики. Тамбов: Грамота, 2014. № 1 (31). Ч.1. С.157-160.
10. Рублева Е.В. Новая парадигма обучения или просто развлечение? Цели образования в XXI веке // Вестник совета молодых ученых. Орск: Изд-во Орского гуманитарно-технологического института. 2013. № 4. С.223-227.
11. Рыбушкина С.В. Ассимиляция иноязычных неологизмов в современном русском языке под влиянием экстралингвистических факторов (на примере компьютерно-опосредованного образовательного дискурса) // Вестник Томского государственного университета. 2015. № 392. С. 34-38.



12. Самойлов А.С. Развитие аксиологической направленности профессионального мышления будущих учителей в контексте требований ФГОС ВПО 3-го поколения // Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. 2013. № 1 (5). С.147-152. [Электронный ресурс]. URL:<http://www.vestospu.ru> (дата обращения: 15.01.2016).

13. Смирнов В.А. Актуальные проблемы культурации в образовании: средства и формы научной популяризации // Культура и образование. 2014. № 9. [Электронный ресурс]. URL: <http://vestnik-rzi.ru/2014/09/2333> (дата обращения: 15.01.2016).

*Автор С.А.Рассади́на, д-р филос. наук, доцент, ruskaf1@spmi.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Россия).
Статья принята к публикации 15.02.2016.*

CULTUROLOGICAL ELEMENTS OF EDUTAINMENT EMPLOYED IN BASIC CULTURAL FORMATION OF NON-HUMANITIES STUDENTS

S.A.RASSADINA

Saint-Petersburg Mining University, Russia

The article considers the trending concept of edutainment (a portmanteau of 'education' and 'entertainment'), and studies the socio-cultural factors that have helped to spread such educational methods. The author demonstrates the concept's relevance to teaching cultural studies at non-humanities universities; exemplifies it through her own experience of applying edutainment to coaching students' research of the cultural heritage; describes the methodology of the educational experiment; and assesses its theoretical and practical results.

Key words: cultural history, edutainment, educational strategy, competency-based learning, students' extra-curriculum activities.

How to cite this article: Rassadina S.A. Culturological elements of edutainment employed in basic cultural formation of non-humanities students. *Zapiski Gornogo instituta*. 2016. Vol.219, p.498-503. DOI 10.18454/PMI.2016.3.498

REFERENCES

1. Bogdanova O.A. Edutainment kak osobyy tip ucheniya (*Edutainment as a Special Type of Teaching*). Vestnik Moskovskogo gorodskogo pedagogicheskogo universiteta. Seriya «Informatika i informatizatsiya obrazovaniya». 2014. N 4 (30), p.61-65.
2. Gvishiani N.B. Registry, zhanry i distsipliny v sostave predmetnogo diskursa (*Registers, Genres and Disciplines in the Composition of Subject Discourse*). Vestnik SamGU. 2015. N 4 (126), p.38-45.
3. Gnatyuk O.L. Osnovy teorii kommunikatsii (*Communicational studies. Basic Course*). Moscow: KNORUS, 2010, p.256.
4. Dyakonova O.O. Didakticheskij utilitarizm: edutainment kak innovatsionnoe reshenie problem obrazovaniya vzroslykh (*The Didactic Utilitarianism: Edutainment as an Innovative Solution to the Problems of Adult Education*). Vestnik TverGU. Seriya «Pedagogika i psikhologiya». 2015. N 3, p.271-276.
5. Dyakonova O.O. Ponyatie «edutainment» v zarubezhnoj i otechestvennoj pedagogike (*Edutainment in Foreign and Domestic Education*). Sibirskij pedagogicheskij zhurnal. 2012. N 6, p.182-185.
6. Karpekina N.I., Milyutina E.K., Rassadina S.A. Razrabotka komplekta zadach po teme «Russkoe iskusstvo XVIII-XIX vv. v sobranii Russkogo muzeya» («*The Russian Museum's Collection of Russian Arts, 18th-19th Centuries*»: A Set of Quiz Problems for Students' Independent Solving). *Sovremennye obrazovatelnye tekhnologii v prepodavanii estestvenno-nauchnykh i gumanitarnykh distsiplin*: Sb. nauch. trudov. Natsional'nyi mineral'no-syr'evoi universitet «Gornyi». St. Petersburg 2015, p.707-711.
7. Kirilenko S.A. Kulturologia. Praktikum (*Culture Studies. Practicum*). SPGGI, St. Petersburg, 2005, p.111.
8. Kobzeva N.A. Edutainment kak sovremennaya tekhnologiya obucheniya (*Edutainment as a Modern Technology of Education*). Yaroslavskij pedagogicheskij vestnik. 2012. Vol.2. N 4, p.192-195.
9. Radaeva Yu.V. Edutainment kak sredstvo snyatiya yazykovogo barera (na primere provedeniya kulinarного master-klassa) (*Edutainment as Means of Language Barrier Break (by Example of Culinary Master-Class)*). Filologicheskie nauki. Voprosy teorii i praktiki. Tambov: Gramota, 2014. N 1 (31). P.1, p.157-160.
10. Rubleva E.V. Novaya paradigma obucheniya ili prosto razvlechenie? Tseli obrazovaniya v XXI veke (*New educational paradigm or just entertainment? Educational goals in the 21st century*). Vestnik soвета molodykh uchenykh. Orsk: Izd-vo Orskogo gumanitarno-tekhnologicheskogo instituta. 2013. N 4, p.223-227.
11. Rybushkina S.V. Assimilyatsiya inoyazychnykh neologizmov v sovremennom russkom yazyke pod vliyaniem ekstralingvisticheskikh faktorov (na primere kompyuterno-oposredovannogo obrazovatel'nogo diskursa) (*Assimilation of Foreign Neologisms in the Modern Russian Language under Extra-Linguistic Influence (on the Example of Computer-Mediated Educational Discourse)*). Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. 2015. N 392, p.34-38.
12. Samojlov A.S. Razvitie aksiologicheskoy napravlenosti professional'nogo myshleniya budushchikh uchitelej v kontekste trebovaniy FGOS VPO 3-go pokoleniya (Development of Axiological Orientation of Professional Thinking of Future Teachers in the Context of 3rd Generation Federal State Education Standard). Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. 2013. N 1 (5), p.147-152. [Online resource]. URL:<http://www.vestospu.ru>.
13. Smirnov V.A. Aktualnye problemy kulturatsii v obrazovanii: sredstva i formy nauchnoj populyarizatsii (*Culturation's Actual Problems in Education: Means and Forms of Scientific Popularisation*). *Kultura i obrazovanie*. 2014. N 9. [Online resource]. URL: <http://vestnik-rzi.ru/2014/09/2333>.

*Author S.A.Rassadina, Dr. of Philosophy, Associate Professor, ruskaf1@spmi.ru (Saint-Petersburg Mining University, Russia).
Manuscript Accepted 15.02.2016.*

УДК 81.26

ЗАЙМСТВОВАНИЯ ИЗ НЕМЕЦКОГО ЯЗЫКА В РУССКОЙ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ТЕРМИНОЛОГИИ

Ю.М.СИЩУК

Санкт-Петербургский горный университет, Россия

В статье рассмотрены основные факторы, повлиявшие на формирование русской горно-геологической терминологии, показана роль интенсивно развивающихся в 18 веке российско-германских производственных, научных и академических связей в становлении горного дела и металлургии в России.

Анализируются заимствования из немецкого языка в горной, геологической и металлургической терминологии, а также политехнические термины-германизмы. Выделены терминологические элементы, указывающие на принадлежность к данным областям деятельности человека, анализируется структура терминов.

Рассмотрены термины, заимствованные из немецкого языка, служащие номинации лиц по профессии, минералов и химических элементов, особенностей залегания полезных ископаемых, разновидностей горных выработок, оборудования и установок, материалов, сплавов и продуктов в металлургическом и горном производстве.

Ключевые слова: терминосистема, германизм, горно-геологическая терминология, горная терминология, геологическая терминология, металлургическая терминология.

Как цитировать эту статью: Сищук Ю.М. Заемствования из немецкого языка в русской горно-геологической терминологии // Записки Горного института. 2016. Т.219. С.504-507. DOI 10.18454/PMI.2016.3.504

Тесное сотрудничество с немецкими учеными и промышленниками в период становления и интенсивного развития горнозаводского дела в России обусловило наличие заимствованных из немецкого языка терминов горного дела, которые не вышли из употребления до настоящего времени. Начало такому тесному сотрудничеству положил Петр Первый, посетивший Саксонию в 1698 г. и пригласивший специалистов для поиска полезных ископаемых. Тогда в Россию были направлены горный мастер Эндерлин и рудных дел мастер Блюэр с двенадцатью горняками, которые успешно осуществляли деятельность по поиску полезных ископаемых и развитию производства на шахтах.

Важным толчком к активному участию немецких специалистов в развитии горного дела и металлургии в России послужило издание Петром I указов, согласно которым иностранцам предоставлялась свобода горного промысла. Немецкие специалисты активно привлекались для развития горнозаводского дела в России, возглавляли комиссии и ведомства. Развитие горного образования в России связано с основанием Горного училища при Берг-Коллегии в 1773 г. в тесной связи с Фрайбергской горной академией, учрежденной несколькими годами ранее. Связи двух старейших горных школ интенсивно развиваются со дня их основания. Из 3000 иностранных студентов, получивших образование во Фрайберге до Второй мировой войны, почти треть – студенты из России. Только с 1866 по 1916 гг. во Фрайберге прошли обучение 687 русских студентов [7, с.80], многие впоследствии заняли ведущие позиции в Горном корпусе, например, начальник российской горной службы Андрей Дерябин. Такие тесные научные и производственные связи не могли не отразиться и на терминологии горнозаводского дела, которая активно пополнялась в 18 веке.

Рассмотрим основные факторы, повлиявшие на развитие и становление горно-геологической терминологии. Под горным делом традиционно понимается область деятельности человека по освоению недр Земли, включающая все виды техногенного воздействия, извлечение полезных ископаемых, их первичную переработку [5, т.2, с.100]. Термины горного дела как наименования специальных понятий, требующие дефиниции [6, с.15], составляют терминосистемы в данной области научной и производственной деятельности: геологическую, включающую наименования объектов освоения недр (природных минеральных тел, их свойств и явлений), горную, связанную с разработкой полезных ископаемых, и металлургическую, связанную с переработкой добытого сырья.

Формирование системы терминов горного дела происходит в 13-15 веках на фоне развития добычи полезных ископаемых в Германии. Немалую роль в становлении горной терминологии сыграло развитие книгопечатания в Германии и издание первых книг по горному делу, здесь нельзя не упомянуть «De re metallica libri XII» Г.Агриколы, изданную в 1556 г. на латинском языке, уже через год переведенную на немецкий, а затем и на многие другие языки. Эта книга – первое систематическое описание работы горных и металлургических предприятий, первое письменное закрепление терминологии горного дела. В 16 и 17 веках издаются и другие значимые труды по горному делу на немецком языке, например: Erkler L. «Beschreibung allerfuernemisten mineralischen Ertzt vund Bergwerksarten», (1547); Span.S. «Sechshundert Berg-Urthel» (1673); Loehneysz G.E. «Gruendlicher und ausfuertlicher Bericht von Bergwerken» (1690) [5, т.2, с.111]. В 18 веке появляются первые описания уральских и си-



бирских заводов, сделанные немецкими учеными и горняками, приглашенными Петром I: Messerschmidt D. «Forschungsreise durch Sibirien»; Генин В. Де «Описание уральских и сибирских заводов» (1735); Герман И.Ф. «Сочинения о сибирских рудниках и заводах» (1797-1801).

Важную роль в систематизации терминологии следует отнести и лексикографическим источникам. Первым словарем, отразившим специфику языка петровской эпохи, был Голландско-русский лексикон Брюса (1717). В нем в качестве эквивалентов к голландским словам давались голландизмы и германизмы, принадлежавшие по времени своего появления в русском языке к неологизмам [1, с.25]. Первый словарь горных терминов появился в России в 1841 г., его появление имело большое значение для систематизации терминологии Горного дела.

Основоположником Горной науки в России считается М.В.Ломоносов, который обучался во Фрайберге. «Главное мое дело есть горная наука, для которой я был в Саксонию послан...» Во время учебы во Фрайберге Ломоносов ознакомился с трудом Агриколы «Де Ре металлика», впоследствии в своей книге «Элементы металлургии» он делает множество ссылок на этот труд [7, с. 77]. Многочисленные специальные горняцкие выражения на немецком языке в публикациях Ломоносова подтверждают сильное немецкое влияние, выражающееся в отдельных немецких терминах, оборотах речи, в первую очередь в названиях металлов и минералов, например «кобальт», «висмут» «вольфрам», «кварц», «поташ», «цинк», «шихта» и т.п. Вероятно, здесь проявилось не только стремление Ломоносова к терминологической точности, но и большая восприимчивость русских горняков к немецкому языку после того, как их немецкие коллеги многие десятилетия вносили свой вклад в развитие российского горного и металлургического дела.

В процессе формирования русского терминологического корпуса горно-геологического профиля четко прослеживается общая тенденция к интернационализации терминологии – к заполнению номинативных лакун под влиянием иноязычных терминосистем [4]. На процессы номинации оказывали влияние такие внутренние и внешние факторы, как развитие производства, увеличение научных знаний, использование иностранных технологий, переводческая деятельность и др. [2, с.5]. Поскольку собственное производство развивалось при непосредственном участии немецких специалистов, отсутствующие номинации для обозначения процессов производства, описания горно-геологических условий, способов разработки заполнялись заимствованиями из немецкого языка.

Термины, служащие номинации лиц по профессии, должностей и ведомств, как и многие административные термины, были заимствованы в Петровскую эпоху преимущественно из немецкого языка [3, с.61]. Это такие номинации, как *берггауэр* (нем. *Berghauer*) – горный рабочий, *бергмейстер* (нем. *Bergmeister*) – горный начальник, *бергпробирер* (нем. *Bergprobierer*) – рудоиспытатель, *гутермейстер* (нем. *Huettenmeister*), *гутенфервальтер* (нем. *Huettenverwalter*), *шихтмейстер* (нем. *Schichtmeister*), *штэйгер* (нем. *Steiger*), *вашштэйгер* (нем. *Waschsteiger*) и *борштэйгер* (нем. *Bohrsteiger*) [4, с.62].

Во многих терминах отмечается наличие видовых терминоэлементов *Berg-* (гора) и *Huetten-* (металлургический завод), указывающих на принадлежность специалистов к горному либо металлургическому производству. Терминоэлемент *Berg-* как видовое понятие для определения принадлежности к процессу добычи присутствует также в названии ведомств и законодательных актов Петровской эпохи – *Берг-коллегия*, *Берг-привилегия*, *Берг-регламент* и пр.

Ряд терминов, пришедших из немецкого языка, можно отнести к межотраслевым или политехническим терминам. Так, в горной энциклопедии и в профильных немецко-русских словарях обнаруживаются такие заимствования, как *букса* (нем. *Buchse*) – дужка, *аншлиф* (нем. *Anschliff*), *цанфа* (нем. *Zapfen*) – втулка, *цанга* (нем. *Zange*) – щипцы, *шибер* (нем. *Schieber*) – заслонка, *ширма* (нем. *Schirm*) – заслон, *штанга* (нем. *Stange*) – стержень, *ригель* (нем. *Riegel*) – стопор, задвижка, *штуф* (нем. *Stufe*), *шпиль* (нем. *Spill*), *штемпель* (нем. *Stempel*), *шпиндель* (нем. *Spindel*), *шлиц* (нем. *Schlitz*) – щель, *шабер* (нем. *Schaber*) – скребок и др [8]. Это примеры междисциплинарных терминологических омонимов, которые входят в терминологии различных наук. Наличие русского наименования параллельно с немецким заимствованием также являлось характерной чертой терминологии, пришедшей к нам из Петровских времен, поскольку «в Петровскую эпоху происходило заимствование не только тех иноязычных слов, которыми обозначались новые для русского общества вещи и понятия, но и вытеснение знакомых прежних названий западноевропейскими» [3, с.62].

Мы уже говорили о влиянии немецкого языка на номинацию минералов и химических элементов. Например, термины, образованные в немецком языке на основе метафорического переосмысления исконного значения слова: *кобальт* (ср. *Kobold* – домовый, гном), *никель* (ср. *Nickel* – имя горного духа, гнома). Традиционно ряд минералов был назван по месту их нахождения на территории Германии: *аннабергит* – по названию месторождения *Annaberg* в Рудных горах, *ашарит* – по месту находки возле городка *Aschersleben*, *спессартин* (нем. *Spessart*), *тешенит* (нем. *Teschen*). В названиях ми-



нералов увековечены также имена немецких и австрийских ученых, их открывших: *кизерит* (немецкий ученый *D.Kieser*), *бемит* (*J.Boehm*), *бишофит* (*G.Bischof*), *браунит* (*M.Braun*), *карналлит* (*R.Von Carnall*) и др.

В геологической терминологии, помимо названий минералов, встречаются также немецкие заимствования – наименования, обозначающие особенности рельефа и залегания полезных ископаемых: *штокверк* (нем. *Stockwerk* – рудное тело), *шток* (нем. *Stock* – горный массив), *горст* (нем. *Horst* – гнездо) – участок земной коры, занимающий приподнятое положение по отношению к окружающим областям, *грабен* (нем. *Graben* – ров) опущенный участок земной коры, *мульда* (нем. *Mulde* – корыто) – тектоническая впадина, *букель* (нем. *Buckel*) – остроугольно изогнутый пласт, *буцен* (нем. *Putzen*) – рудное тело неправильной формы, *кар* (нем. *Kar*) – углубление части гор, *бергшрунд* (нем. *Bergschrund*) – подгорная трещина, *зальбанд* (нем. *Salband*) – зона контакта минеральной жилы с вмещающими породами. Отдельно следует отметить наличие в заимствованных терминах наименований сложной структуры, например композит, зальбанд, бергшрунд, штокверк.

В горной терминологии заимствованные из немецкого языка номинации служат для обозначения базовых понятий. Сам термин *шахта* пришел в русский язык из немецкого (нем. *Schacht*), терминологический элемент *шахта* как родовой встречается в обозначениях разновидностей шахт: *кунстшахта* (нем. *Kunstschacht* – водяная шахта), *рихтшахта* (нем. *Richtschacht* – разведочная шахта), *форшахта* (нем. *Vorschacht* – шахта для входа и выхода горняков), *трейбшахта* (нем. *Treibschacht*), *фердершахта* (нем. *Foerderschacht*), *циехшахта* (нем. *Ziehschacht*) – шахты, оборудованные подъемными машинами. Большая часть этих терминов являются на сегодняшний день архаичными наименованиями.

Германизмы служат также для номинации основных разновидностей горных выработок: *гезенк* (нем. *Gesenk*) – восстающая горная выработка на угольных шахтах, *шурф* (нем. *Schurf*) – вертикальная горная выработка квадратного, круглого или прямоугольного сечения, *штольня* (нем. *Stollen*) – подземная горная выработка, имеющая выход на поверхность, является основной вскрывающей выработкой при разработке месторождений в районах с гористым рельефом, *штрек* (нем. *Strecke*) – горизонтальная подземная горная выработка, *бресберг* (нем. *Bremsberg*) – наклонная горная выработка, не имеющая выхода на поверхность, предназначенная для транспортирования полезного ископаемого с верхних горизонтов на нижние, *орт* (нем. *Ort*) – горизонтальная горная выработка, проводится вкрест простирания пласта, *квершлаг* (нем. *Querschlag*) – горизонтальная подземная горная выработка, пройденная по вмещающим породам вкрест простирания пласта. Терминами – германизмами обозначены также различные элементы для обеспечения технологии добычи, например: *шпур* (нем. *Spur*) – искусственное углубление в твердой среде для размещения зарядов при взрывных работах, установки крепи; *штрасса* (нем. *Strosse*) – нижняя часть тоннельной выработки; *зунпф* (нем. *Sumpf*) – выемка для приема воды и гидросмесей; *зинкверк* (нем. *Sinkwerk*) – штольня, в которой накапливают насыщенный солью раствор и др [9].

Заемствования из немецкого языка присутствуют также в металлургической терминологии – в области обогащения и переработки добытого сырья, активно развивавшейся в России в 19 веке при участии немецких специалистов и с использованием немецкого оборудования. В частности, немецкие заимствования используются для номинации установок для обогащения рудного материала: *герд*, *вашгерд*, *гидровашгерд*, *плангерд* – общую часть этих терминов составляет родовой терминологический элемент *герд* (от нем. *Geraet* – прибор, устройство), здесь он сочетается с видовым элементом *ваш-* (от нем. *waschen* – мыть).

Большое количество немецких заимствований отмечается в наименовании промежуточных продуктов в металлургическом производстве, в частности, термин *шихта* (нем. *Schicht*), обозначающий рудную смесь для сплава, а также его производные – *шихтовка* и гибридо-термин *шихта доменная* (от нем. *Hochofenschicht*); термин *шлак* (нем. *Schlacke*) – расплавленная масса примесей, покрывающая при плавильных процессах поверхность жидкого металла, имеет также двусоставные производные – *кальки* и *полукальки*: *первичный шлак* (от нем. *primaere Schlacke*), *шлаковата* (от нем. *Schlackenwolle*), *шлакообразование* (нем. *Schlackenbildung*). Германизмы служат номинации различных сплавов, примесей и промежуточных продуктов металлургического производства: *гартблей* (нем. *Hartblei*) – свинцово-сурьмяный сплав, *штейн* (нем. *Stein*) – сплав сульфидов цветных металлов и железа, *шлих* (нем. *Schlich*) – концентрат тяжелых металлов, остающийся в воде после промывки горных пород, *абзуг* (нем. *Abzug*) – шлак, получающийся при добывании серебра, *тотерманн* (нем. *Toter Mann* – досл. «мертвый человек») – термин-метафора – неподвижная спекшаяся масса в доменной печи.

Анализ немецких заимствований в составе горной, геологической и металлургической терминологии показал, что при общем небольшом количестве германизмов в корпусе данных терминосистем следует отметить их особую роль, поскольку они закрепились в русском языке на фоне интенсивных социокультурных, деловых и производственных контактов с немецкими учеными и промышленни-



ками, которые внесли существенный вклад в развитие горного дела в России. Данные термины можно отнести к базовым, ключевым понятиям, несущим важную специальную информацию, они многократно употребляются при описании систем разработки, технологических процессов, а также закрепились в составе сложных производных слов, многокомпонентных терминов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Биржакова Е.Э. Русская лексикография 18-го века. СПб: Нестор-История. 2010. 212 с.
2. Борхвальдт О.В. Лексика золотопромышленности в аспекте исторического терминоведения русского языка: Автореф. дис... д-ра филол. наук / Красноярский гос. пед. ун-т, 2000. 56 с.
3. Виноградов В.В. Очерки об истории русского литературного языка 17-18 веков. М.: Высшая школа, 1982. 529 с.
4. Голованова Е.И. Немецкие заимствования в горнозаводской терминологии Урала (XVIII в.) // Гуманитарный вектор. Серия «Педагогика, психология». 2011. № 4. С.61-66.
5. Горная энциклопедия / Гл. редактор Е.А.Козловский. В 5 томах. М.: Советская энциклопедия, 1984.
6. Даниленко В.П. Русская терминология. Опыт лингвистического описания. М.: Наука. 1977. 243 с.
7. Крокер Э. 300 лет немецко-русского сотрудничества в горном деле / Э.Крокер, В.Крокер // Горный вестник. 2000. С.72-92.
8. Немецко-русский горный словарь. М.: Советская энциклопедия, 1984. 1200 с.
9. Современный немецко-русский словарь по горному делу и экологии горного производства. М.: Руссо, 2003. 584 с.

Автор Ю.М.Сищук, к-т филол. наук, зав. кафедрой, Julia.sishchuk@spmi.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Россия).

Статья принята к публикации 05.03.2016.

GERMAN BORROWINGS IN RUSSIAN MINING-AND-GEOLOGICAL TERMINOLOGY

YU.M.SISHCHUK

Saint-Petersburg Mining University, Russia

The article describes the main factors in Russian mining-and-geological terminology forming, the function of intensively rising Russian-German industrial, scientific and academic collaboration in mining and metallurgical development in Russia in 18th century.

German borrowings in mining, geological and metallurgical terminology as well as German polytechnical terms are analysed. Terminoelements, indicating the belonging to the fields of work are marked, the term structure is analysed.

German borrowing terms for nominating occupations, minerals and chemical elements, mineral deposits peculiarities, mine varieties, equipment and installations, materials, alloys and mining-and-metallurgical products are considered.

Key words: term system, germanism, mining-and geological terminology, mining terminology, geological terminology, metallurgical terminology.

How to cite this article: Sishchuk Yu.M. German borrowings in russian mining-and-geological terminology. Zapiski Gornogo instituta. 2016. Vol.219, p.504-507. DOI 10.18454/PMI.2016.3.504

REFERENCES

1. Birzhakova E.Je. Russkaya leksikografiya 18-go veka (Russian *lexicography of the 18th century*). St. Petersburg: Nestor-Istoriya. 2010, p.212.
2. Borhval'dt O.V. Leksika zolotopromyshlennosti v aspekte istoricheskogo terminovedeniya russkogo yazyka (*Gold mining vocabulary in the respect of Russian historic terminology studying*): Avtoref. dis...d-ra filol. nauk. Krasnoyarskii gos. ped. un-t. 2000, p.56.
3. Vinogradov V.V. Oчерки ob istorii russkogo literaturnogo yazyka 17-18 vekov (*Essays on the history of Russian literary language of the 17th-18th centuries*). Moscow: Vysshaya shkola, 1982, p.529.
4. Golovanova E.I. Nemetskie zaимstvovaniya v gornozavodskoi terminologii Urala (XVIII v.) (*German borrowings in the Ural mining terminology (XVIIIth century)*). Gumanitarnyi vektor. Seriya «Pedagogika, psikhologiya». 2011. N 4, p.61-66.
5. Gornaya entsiklopediya (*Mining encyclopedia*). Ch. editor E.A.Kozlovskij. V 5 tomah. Moscow: Sovetskaya entsiklopediya, 1984.
6. Danilenko V.P. Russkaya terminologiya. Opyt lingvisticheskogo opisaniya (*Russian terminology. Linguistic description experience*). Moscow: Nauka, 1977, p.243.
7. Kroker Je., Kroker V. 300 let nemetsko-rossiiskogo sotrudnichestva v gornom dele (*300 years to the German-Russian partnership in Mining*). Gornyi vestnik. 2000, p.72-92.
8. Nemetsko-russkii gornyi slovar' (*German-Russian Mining dictionary*). Moscow: Sovetskaya entsiklopediya, 1984, p.1200.
9. Sovremennyi nemetsko-russkii slovar' po gornomu delu i ekologii gornogo proizvodstva (*Contemporary German-Russian dictionary on Mining and Manufacutring ecology*). Moscow: Russo, 2003, p.584.

Author Yu.M.Sishchuk, PhD in Philology, Head of Department, Julia.sishchuk@spmi.ru (Saint-Petersburg Mining University, Russia).

Manuscript Accepted 05.03.2016.

УДК 81'26

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА НАУЧНОГО ДИАЛОГА В СОВРЕМЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ ВУЗЕ

Д.А.ЖУКИНА

Санкт-Петербургский горный университет, Россия

Теория научного диалога рассматривается в свете диалоговой концепции М.М.Бахтина, опора на закон диалогической социализации в практической деятельности педагога понимается как необходимое условие общекультурного и профессионального роста индивида. Обосновывается необходимость использования риторических стратегий и тактик, повышающих эффективность ведения диалога в учебно-научном сообществе. В зависимости от проблематики, статуса и состава участников, условий проведения, жанра определены цели научного диалога: формирование (корректировка) научной картины мира; формулирование научных законов, принципов, методов; мониторинг актуальных проблем и вопросов в определенной отрасли науки; верификация научных выводов, положений, концепций; согласие (несогласие, возражение) с иной (противоположной) точкой зрения, позицией, взглядами; оценка научных фактов, мнений, подходов. Уточняется классификация научного диалога применительно к культурно-образовательной среде технического вуза. Доказывается мысль о том, что навыки ведения научного диалога востребованы в учебной коммуникации и дальнейшей научно-профессиональной деятельности выпускников технического вуза.

Ключевые слова: научный диалог, диалоговая концепция М.М.Бахтина, диалогическая социализация, риторические стратегии и тактики, учебно-научное сообщество.

Как цитировать эту статью: Жукина Д.А. Теория и практика научного диалога в современном техническом вузе // Записки Горного института. 2016. Т.219. С.508-512. DOI 10.18454/PMI.2016.3.508

В федеральных государственных образовательных стандартах высшей школы всех поколений по техническим специальностям профессиональная компетенция определяется как способность к успешной профессиональной коммуникации, производственной, научно-исследовательской деятельности, владение соответствующими знаниями, которые базируются на личностных качествах, призванных обеспечить эффективность выполнения различных видов работы. Перечислим базовые общекультурные компетенции, формируемые у студентов технических вузов при изучении гуманитарных, в том числе речеведческих, дисциплин: владение культурой мышления, способность к обобщению, анализу и восприятию информации, ее критическому осмыслению, систематизации, прогнозированию; свободное владение литературной и деловой письменной и устной речью на русском языке, навыками публичной научной речи; способность логически верно, аргументированно, ясно и грамотно строить устную и письменную речь; способность самостоятельно приобретать новые знания, используя современные образовательные и информационные технологии.

На кафедре русского языка и литературы Горного университета читается ряд предметов, связанных с формированием названных компетенций: «Русский язык и культура речи», «Культура русской научной и деловой речи», «Культура речи и деловое общение». Одной из основных задач преподавателей русского языка является развитие у студентов навыков и умений эффективного речевого поведения в научной сфере. Конкретизируется минимум знаний и умений, необходимых студенту технического вуза: создание письменных и устных текстов научного стиля в различных жанрах, изучение основных стратегий и тактик ведения научной дискуссии, формулирование и аргументация собственной точки зрения в научном и учебно-научном общении, продуцирование монологических и диалогических высказываний.

В лингвистике и риторике диалог традиционно понимается как обмен репликами между двумя людьми, а монолог – как речь одного человека. Диалог – форма речи, способ познания и отражения действительности – известен с античных времен. Диалог у Платона демонстрирует внутреннее движение мышления, порождение мысли. По мнению Ю.В.Рождественского, в развитии античного диалога можно выделить три направления: диалектика – ученая беседа, цель которой развитие знаний; эридика – спор с целью отстаивания практического интереса; софистика – диспут, в котором мудрость присутствует ради выгоды [6]. Важно подчеркнуть, что диалог изначально предполагал чередование реплик, наличие общей темы, участие двух и более собеседников. Академическая риторика формировалась как высокое искусство общения с учениками, о чем свидетельствуют работы Сократа, Платона, Аристотеля. Дидактический потенциал диалога определялся риторическим мастерством учителя и умением ученика аргументировать свое мнение, позицию, точку зрения.

Единицей диалогической речи считают «диалогическое единство» (термин Н.Ю.Шведовой [7]), которое состоит как минимум из двух реплик, инициативной и реактивной, из стимула и реакции. Принципиально важна взаимосвязь реплик. Одним из наиболее изученных диалогических единств



является «вопрос – ответ». Древнегреческие философы считали, что диалог есть «речь, состоящая из вопросов и ответов» [3, с. 164]. Выделяют также следующие функциональные пары диалогических реплик: побуждение (приказ, просьба, предложение, пожелание и др.) – реакция на побуждение (соглашение выполнить, отказ); сообщение (информация, утверждение) – реакция на сообщение (разъяснение, дополнение, уточнение, возражение, согласие, оценка). Диалог, бытовой и научный, обычно происходит в типичных ситуациях общения, предполагающих соблюдение норм поведенческого и речевого этикета. Научный диалог характеризуется общими, свойственными данной форме речи, и специфическими чертами.

Рассмотрим функции научного диалога. Коммуникативная функция реализуется в качестве основной как обмен научной информацией, мыслями (определенными фрагментами знания) между участниками общения. С коммуникативной функцией тесно связаны чрезвычайно важные для дискурса науки мыслительная (когнитивная) и познавательная функции. Научный диалог способствует генерации знаний; при помощи научных понятий, сложившихся в результате абстрагирования и обобщения, происходит категоризация мира. Специфика номинативной функции в научном диалоге обусловлена необходимостью отбора терминов в рамках определенной терминосистемы.

Современный научный текст принципиально диалогичен, диалогичность реализуется в прямом и косвенном цитировании, а также при ссылках на научный контекст. Кроме того, диалогично само обращение к адресату и вовлечение его в рассуждение. Научная проблема в какой-либо отрасли знания формулируется только в творческом взаимодействии различных школ, подходов, концепций. В процессе обсуждения проблемы рождается истина, максимальное приближение к истине является целью любой науки. В рамках научного сообщества необходимо поддерживать паритет участников общения, их равенство, уважение друг к другу, эффективно использовать контактоустанавливающие языковые средства. Научный дискурс должен удовлетворять трем основным требованиям: проблематика – изучение окружающего мира, статус участников – равный, способ реализации взаимодействия – творческий диалог в устной и письменной речи.

Считаем целесообразным рассматривать теорию научного диалога в свете диалоговой концепции М.М.Бахтина, которая получила широкую известность в отечественной и зарубежной науке [например, 8]. Вводимое ученым понятие «диалогичность» приобретает характер коммуникативной универсалии, при этом монолог квалифицируется как разновидность диалога, так как «каждый монолог является репликой большого диалога» [1, с. 296]. Условно можно выделить три уровня, на которых, с точки зрения М.М. Бахтина, реализуется диалогичность.

Во-первых, классический диалог, внешний и внутренний, потребность вести внешние и внутренние диалоги является важнейшей для человека и составляет смысл его существования. В общении мысль одного собеседника обменивается на мысль другого, в результате чего происходит наращение мысли, порождение смысла.

Во-вторых, диалог может осуществляться не только в речи, но происходить также между культурами. Понятие «межкультурная коммуникация» впервые было сформулировано в 1954 г. в работе Г.Трейгера и Э.Холла «Культура и коммуникация. Модель анализа» [9]. Межкультурная коммуникация характеризуется тем, что при встрече представителей разных культур каждый из них, стремясь к взаимопониманию, действует в соответствии со своими культурными нормами. Классическое определение термина дано в книге Е.М.Верещагина и В.Г.Костомарова «Язык и культура», где межкультурная коммуникация понимается как адекватное взаимопонимание двух участников коммуникативного акта, принадлежащих к разным национальным культурам [2, с. 26].

В-третьих, диалогичность характеризует отдельное слово, которое, по определению М.М.Бахтина, становится «двухголосным словом». Оно двунаправлено, связано с контекстом, содержит дополнительные смысловые обертоны, значения, движется к своему адресату и от него обратно.

В научном, в том числе полемическом, дискурсе именно высказывание позволяет адекватно, достаточно полно и аргументированно передать собеседнику мысли. Высказывание, по мысли ученого, оказывается очень сложным явлением, если его рассматривать не изолированно, а в диалогических отношениях с другими, связанными с ним высказываниями. Высказывание взаимодействует не только с предшествующими, но и с последующими звеньями речевого общения, т.е. учитываются возможные ответные реакции. В сфере научной коммуникации предмет речи становится местом встречи с мнениями непосредственных собеседников или с точками зрения на различные теории, научные направления. «Понимание целых высказываний и диалогических отношений между ними неизбежно носит диалогический характер (в том числе и понимание исследователя-гуманитариста), понимающий (в том числе исследователь) сам становится участником диалога, хотя и на особом уровне (в зависимости от направления понимания или исследования)» [1, с. 305].



В зависимости от проблематики, статуса и состава участников, условий проведения, жанра могут быть определены следующие цели научного диалога: 1) формирование (корректировка) научной картины мира; 2) формулирование научных законов, принципов, методов; 3) мониторинг актуальных проблем и вопросов в определенной отрасли науки; 4) верификация научных выводов, положений, концепций; 5) согласие (несогласие, возражение) с иной (противоположной) точкой зрения, позицией, взглядами; 6) оценка научных фактов, мнений, подходов.

Обратимся к жанру учебной научной конференции, который требует особого педагогического внимания и теоретико-методического осмысления. Считаем целесообразным рассматривать учебную научную конференцию в двух пересекающихся и взаимообусловленных плоскостях. С одной стороны, учебная научная конференция, являясь компонентом вузовской дисциплины (например, лекционно-практического курса «Культура русской научной и деловой речи»), представляет собой разновидность аудиторного практического занятия, а также форму контроля знаний и коммуникативных умений учащихся. С другой стороны, выступление студента с сообщением (докладом) на научной конференции квалифицируется как апробация результатов его научно-исследовательской работы.

Анализируемый жанр учебно-научного подстиля позволяет развивать во взаимосвязи общекультурные и профессиональные компетенции учащихся технического вуза: находить, систематизировать и обобщать информацию для создания текстов различных жанров, продуцировать письменный и устный текст реферативного характера на определенную тему, знать и грамотно использовать нормы современного литературного языка, владеть фактами и аргументацией в рамках изученной темы, развивать навыки коммуникативного поведения в ситуации научного общения.

Традиционно выделяемые функции научного стиля текста – выражение, передача и хранение научной информации – в студенческой аудитории предлагается расширить, как это принято в научном сообществе, за счет привлечения авторитетных источников, ссылок на яркие и терминологически точные высказывания. Так, в классической работе «Мысль и язык», сопоставляя поэзию и науку, А.А.Потебня кратко обозначает роль науки как теоретической и практической деятельности: «Наука раздробляет мир, чтобы сызнова сложить его в стройную систему понятий» [5, с. 177]. Данная цитата помогает усвоить важную для студентов технического вуза мысль том, что цель науки – получение знаний о мире, объясняющих его в виде целостной системы.

Одной из необходимых форм подготовки к учебной научной конференции является реферирование, по мнению М.В.Ломоносова, «труд тяжелый и весьма сложный, цель которого не в том, чтобы передать вещи известные и истины общие, но чтобы уметь схватить новое и существенное в сочинениях, принадлежащих иногда людям самым гениальным» [4]. Работа над рефератом формирует у учащихся сложное интеллектуальное аналитико-синтетическое умение по извлечению и представлению в жанре вторичного научного текста актуальной в определенной научной области информации. Механизмы раскрытия смысловой структуры письменного и устного текста различны, поэтому при трансформации учебного реферата в текст устного выступления на конференции студентам необходимо выполнить ряд взаимосвязанных действий. Во-первых, выбрать из текста реферата востребованную в студенческой аудитории информацию, необходимую для раскрытия темы; во-вторых, представить информацию реферата логично, последовательно, корректно используя конструкции разговорного и публицистического стиля, минимизируя терминологическую лексику, при необходимости заменяя логический способ толкования синонимическим и описательными определениями; в-третьих, выстроить систему приведения аргументов, примеров и иллюстраций с учетом риторических законов (например, «гомеров порядок» расположения аргументов для убеждения).

Для выступления на учебной научной конференции студентам рекомендуется подготовить дополнительные тексты, которые могут быть использованы в качестве опорных: план-конспект (тезисы) выступления и презентация выступления. При установленном регламенте выступления на учебной конференции (сообщение продолжительностью 7 мин.) следует учесть рекомендации по количеству слайдов (не более 10-12, включая слайд, называющий тему и выступающего, и слайд, завершающий выступление), а также по их содержательному, графическому и композиционному оформлению. Внимание студентов следует обратить на отбор текстовой, иллюстративной и графической информации для презентации, по возможности представить различные формы презентации материала (текстовые слайды, использование компьютерной графики, анимации, видеороликов, звукового сопровождения), в том числе включающие творческие работы студентов.

Сценарий учебной научной конференции, тематически связанной с изучаемой в рамках курса проблематикой, преподаватель продумывает самостоятельно или вместе со студентами, при этом не только учитываются последовательность выступлений, их временные границы, но и оговариваются роли участников конференции (председатель или модератор, секретарь, выступающий с сообщением,

представитель аудитории, задающий вопрос, оппонент, эксперт). Разработанные правила являются обязательными для участников конференции: следование коммуникативным нормам и правилам общения в научной среде, соблюдение регламента, выбор корректных способов установления контакта с аудиторией, краткое формулирование вопроса по теме выступления и др.

Научный диалог в полной мере реализуется в следующих видах спора: дискуссия, полемика, диспут. Дискуссия (от лат. *discussio* – рассмотрение, исследование) – наиболее распространенный вид научного диалога, в котором научные или социально-значимые проблемы представлены с различных, в том числе противоположных, точек зрения. Главная цель дискуссии – принятие оптимального решения поставленной и рассмотренной проблемы. Диспут (от лат. *disputare* – рассуждать, спорить) обычно посвящен проблемам и явлениям искусства, культуры, науки. В отличие от дискуссии мнения, высказываемые в диспуте, не обязательно должны иметь объективное основание и могут быть субъективными. Цели диспута в большей мере просветительские: расширение кругозора участников, обсуждение возможных подходов к рассматриваемым проблемам. Полемика (от греч. *polemikos* – воинственный, враждебный) – столкновение противоположных, не сводимых к компромиссу точек зрения. Иногда полемизируют целые научные школы, для каждой из сторон это утверждение собственной позиции как единственно возможной.

В учебно-научном общении распространена дискуссия. Результативность дискуссии зависит от ряда условий. Прежде всего, важен сам участник, ведущий спор. Доброжелательность, уважение оппонентов, умение установить и поддерживать контакт, естественность жестов, позы и мимики, дружелюбный тон разговора, учтивая манера поведения, опрятный внешний вид – все это создает благоприятную атмосферу для общения. Результат будет тем успешнее, чем достойнее друг друга окажутся противники по своим знаниям, эрудиции, полемическому искусству. При подготовке к дискуссии учащимся необходимо продумать аргументы, предполагаемые возражения, вспомнить неопровержимые данные, которые подтвердят правоту суждений. Глубокое знание предмета ведет к точности и ясности выражения мыслей и к убедительной доказательности, напомним, что под «искусством убеждать» в Древней Греции понималась риторика. В процессе дискуссии формируется умение слушать возражения собеседника. Слушание – это сложный психологический процесс, состоящий из восприятия, осмысления и понимания. Только предельное внимание, заинтересованность в обсуждаемой теме или проблеме, сдержанность, ум и искусство слушать могут привести к желаемому результату. К возражениям оппонента, к замечаниям следует относиться с уважением. Важна краткость доказательства в споре и умение сжато излагать мысли. Каждый аргумент должен не только быть четок, ясен, но и иметь свое место в речи. Сначала должны идти наиболее легкие для понимания доказательства, затем с более подробным разъяснением, и, наконец, самые значительные, которые и утверждают правоту мыслей. Залогом успеха в дискуссии является богатство знаний, хорошее владение языком и механизмами речи, быстрота и точность реакций.

Как считает Ю.В.Рожественский, основные правила диалога предполагают социализацию человека через речь, это позволило ученому сформулировать закон диалогической социализации [6]. Основные правила диалога опосредованы моральными и речевыми нормами, содействуют социализации человека, вступающего в речевое взаимодействие с другими людьми. Поскольку диалог – это смена высказываний, связанных между собой одной темой, то очевидна целесообразность следующих правил: соблюдение очередности в разговоре, выслушивание собеседника, поддержание общей темы разговора. Ситуативность – особенность диалога как формы речи, в диалоге жесты или мимика могут заменять словесную реплику, поэтому необходимо учитывать невербальные знаки и экстралингвистические факторы

Таким образом, учебно-научная и исследовательская работа учащихся Горного университета в области прикладной риторики, включая изучение диалогических стратегий и тактик, позволяет выявить уровень их речевой компетентности, закрепляет навыки действия в статусно-релевантных речевых позициях, совершенствует коммуникативные умения начинающих исследователей в научной сфере, способствует развитию эвристического мышления, формирует основы самоорганизации познавательной деятельности. Навыки ведения научного диалога востребованы в учебной коммуникации и дальнейшей научно-профессиональной деятельности выпускников технического вуза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бахтин М.М. Эстетика словесного творчества. М.: Искусство, 1979. 424 с.
2. Верещагин Е.М. Язык и культура / Е.М.Верещагин, В.Г.Костомаров. М.: Русский язык. 1990. 246 с.
3. Диоген Лаэртский. О жизни, учениях и изречениях знаменитых философов. М.: Мысль, 1986. С.150-190.



4. Ломоносов М.В. О должности журналистов в изложении ими сочинений, назначенных для поддержания свободы сочинений. <http://vivovoco.rsl.ru/VV/MISC/4/LOMONOSOV.HTM> (Дата обращения: 15.10.2015).
5. Потебня А.А. Мысль и язык: Психология поэтического и прозаического мышления. М.: Лабиринт, 2010. 240 с.
6. Рождественский Ю.В. Теория риторики. М.: Флинта, Наука, 2006. 512 с.
7. Шведова Н.Ю. К изучению русской диалогической речи. Реплики-повторы // Вопросы языкознания. 1956. № 2. С. 67-82.
8. Todorov T. M.M. Bakhtine: Le principe dialogique. Paris: Editions du Seuil, 1981. 297 p.
9. Trager G., Hall E. Culture as Communication: A Model and Analysis // Explorations: Studies in Culture and Communication (3). New York, 1954. P.137-149.

Автор Д.А.Щукина, д-р филол. наук, профессор, dshukina@yandex.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Россия).

Статья принята к публикации 01.03.2016.

THEORY AND PRACTICE OF MODERN SCIENTIFIC DIALOGUE IN TECHNICAL HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTION

D.A.SHCHUKINA

Saint-Petersburg Mining University, Russia

Theory of scientific dialogue is being depicted in the light of dialogue conception of M.M.Bakhtin, dialogue socialization law reliance on in teacher's practical activity is being understood as an essential condition of common cultural and professional growth of an individual. Rhetoric strategies and tactics which heighten dialoguing effectiveness in educational-scientific community usage necessity is being substantiated. Depending on subject matter, status and list of participants, condition of the meeting, genre the aims of scientific dialogue are being determined as following: world picture formation/correction; scientific laws, principles, methods formulation; actual problems and topical issues in some certain brunch of science monitoring; scientific conclusions, regulations, conceptions verification; opposite point of view, position, opinion agreement with or disagreement; scientific facts, opinions, approaches estimation. Scientific dialogue classification in application to cultural-educational environment of technical higher educational institution is defined more exactly. The idea that skills to conduct scientific dialogue are demanded during training communication and further scientific-professional activity of a higher technical educational institution graduates is being proved.

Key words: scientific dialogue, dialogue conception of M.M.Bakhtin, dialogue socialization, rhetoric strategies and tactics, educational-scientific community.

How to cite this article: Shchukina D.A. Theory and practice of modern scientific dialogue in technical higher educational institution. Zapiski Gornogo instituta. 2016. Vol.219, p. 508-512. DOI 10.18454/PMI.2016.3.508

REFERENCES

1. Bakhtin M.M. Estetica slovesnogo tvorchestva (*Aesthetics of the wordy creation*). Moscow: Iskuststvo, 1979. 424 p.
2. Vereshchagin E.M., Kostomarov V.G. Yazyk i kultura (*Language and culture*). Moscow: Russkiy yazyk, 1990. 246 p.
3. Diogen Laertskiy. O zhizni, ucheniyah i izrecheniyah znamenityh filozofov (*About life, studies and statements of prominent philosophers*). Moscow: Mysl, 1986, p.150-190.
4. Lomonosov M.V. O dolzhnosti zhurnalistov v izlozhenii imi sochineniy, naznachennyh dlia podderzhaniya svobody sochineniy. (*About journalist's obligation in narrative by them of works composed with a purpose to maintain compositions freedom*) <http://vivovoco.rsl.ru/VV/MISC/4/LOMONOSOV.HTM> (Data obrashcheniya: 15.10.2015).
5. Potebnya A.A. Mysl i yazyk. Psihologiya poeticheskogo i prozaicheskogo myshleniya (*Idea and language. Poetical and prosaic thinking psychology*). Moscow: Labirint, 2010, 240 p.
6. Rozhdestvenskiy Yu.V. Teoriya ritoriki (*Theory of rhetoric*). Moscow: Flinta, Nauka, 2006. 512 p.
7. Shvedova N.Yu. K izucheniyu russkoj dialogicheskoy rechi. Repliki-povtory (*Some ideas about Russian dialogical speech studying. Remarks-retries*). Voprosy yazykoznaneya. 1956. N 2, p.67-82.
8. Todorov T. M.M.Bakhtine: Le principe dialogique. Paris: Editions du Seuil, 1981. 297 p.
9. Trager G., Hall E. Culture as Communication: A Model and Analysis. Explorations: Studies in Culture and Communication (3). New York, 1954, p.137-149.

Author D.A.Shchukina, Dr. of Philology, Professor, dshukina@yandex.ru (Saint-Petersburg Mining University, Russia). Manuscript Accepted 01.03.2016.