



# ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

**том 192**



ИЗДАЮТСЯ С 1907 Г.

НАУКА В САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ  
ГОРНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ



ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ХИМИИ,  
МЕТАЛЛУРГИИ, ОБОГАЩЕНИИ, АВТОМАТИЗАЦИИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ 2011



# САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Из первого устава  
Горного училища:  
«... Берг-Коллегия надеется, что  
выбранные ею учителя не оставят  
исполнить с ревностью свою дол-  
жность, а учащиеся с их стороны  
показать в науках успехи, и упот-  
ребя их к общей пользе, доказать  
усердие к услуге отечества и к  
пользе своего роду; долг, котора-  
го требует от них благодарность,  
честность, закон и собственная их  
самых польза».



Санкт-Петербургский государственный горный универ-ситет сегодня — это сеть специализированных аудито-рий, оснащенных современными отечественными и за-рубежными приборами и оргтехникой. Благоприятная сре-да университета способствует высокому уровню интеллекта и культуры студентов — будущих инженеров, ученых и педа-гогов.

Это более 7 500 студентов, более 150 000 м<sup>2</sup> учебно-научных площадей. Университет имеет высший государственный статус образовательной системы России, являясь особо ценным объ-ектом культурного наследия народов Российской Федерации.

Университет ведет подготовку по 8 направлениям бакалаври-ата и магистратуры, по 28 инженерным специальностям для России и 53 стран Азии, Европы, Африки и Америки. Универ-ситет — это лучшее академическое образование в области геологии, горного дела, шахтного строительства, металлур-гии, геодезии, экономики, экологии по всему спектру по-лезных ископаемых, включая нефть и газ. Университет име-ет высшую квалификацию профессорско-преподавательского состава — более 85 % — доктора и кандидаты наук, более 30 профессоров являются заслуженными деятелями науки.

Университет обладает уникальной научно-исследователь-ской базой и выполняет исследования по следующим прио-ритетным направлениям:

- Технологическое развитие минерально-сырьевой базы
- Разработка эффективных и ресурсосберегающих техноло-гий добычи и переработки минерального сырья
- Разработка технологий обеспечения экологической безо-пасности на объектах минерально-сырьевого комплекса
- Обеспечение экономического и правового механизмов управления недропользованием

Россия, 199106, Санкт-Петербург,  
21 линия В.О., 2  
Тел. (812) 327 7360,  
факс (812) 327 7359  
E-mail: [spmi@mail.wplus.net](mailto:spmi@mail.wplus.net)  
<http://www.spmi.ru>



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Том 192  
Издаются  
с 1907 г.

# ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА



## ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ХИМИИ, МЕТАЛЛУРГИИ, ОБОГАЩЕНИИ, АВТОМАТИЗАЦИИ

---

### Редакционный совет:

В.С.ЛИТВИНЕНКО, д-р техн. наук, профессор  
(председатель)

Р.И.ВЯХИРЕВ, д-р экон. наук

А.Н.ДМИТРИЕВСКИЙ, д-р геол.-минерал. наук,  
профессор, академик РАН

Н.П.ЛАВЕРОВ, д-р геол.-минерал. наук,  
профессор, академик РАН

Н.В.ПАШКЕВИЧ, д-р экон. наук, профессор

Д.В.РУНДКВИСТ, д-р геол.-минерал. наук,  
профессор, академик РАН

Х.М.СОВМЕН, канд. экон. наук

В.Е.СОМОВ, д-р экон. наук

К.Н.ТРУБЕЦКОЙ, д-р техн. наук, профессор, академик РАН

**Главный редактор** В.С.ЛИТВИНЕНКО,  
д-р техн. наук, профессор

### Редколлегия тома:

И.Н.БЕЛОГЛАЗОВ, д-р техн. наук, профессор  
(председатель)

В.М.СИЗЯКОВ, д-р техн. наук, профессор

Н.М.ТЕЛЯКОВ, д-р техн. наук, профессор

Д.Э.ЧИРКСТ, д-р хим. наук, профессор

В.Б.КУСКОВ, канд. техн. наук, доцент

Е.В.СИЗЯКОВА, канд. техн. наук

Т.Е.ЛИТВИНОВА, канд. техн. наук, доцент

### Редакция:

Л.С.Лебедев (начальник РИЦ),

Е.С.Дрибинская, Л.А.Левина, И.В.Неверова,

Н.И.Сочивко

**Адрес редакции:** 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2

Тел. (812) 328-8430; факс (812) 327-7359  
E-mail: spmi@mail.wplus.net

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2011



УДК 681.3:681.5

ББК 65.28

И766

В 192-м томе «Записок Горного института» по материалам IV и V Международных конференций «Инновационные технологии в автоматизации и диспетчеризации горно-добывающих и перерабатывающих предприятий» и конференции «Курнаковские чтения», прошедших в Горном институте в 2009-2010 гг., опубликованы исследования ученых в области металлургии, обогащения и автоматизации технологических процессов в горно-добывающей отрасли, выполненные за последние 2 года. Материалы сборника объединяет инновационный подход к решению актуальных задач, стоящих перед производством, многие научные разработки находятся на стадии внедрения в промышленность.

В работе конференций принимали участие руководители предприятий горно-добывающего и перерабатывающего комплекса, специалисты в области автоматизации и диспетчеризации горных и металлургических предприятий, а также представители компаний и фирм – производителей технических средств автоматизации.

Сборник представляет интерес для специалистов в области металлургии, обогащения, автоматизации и диспетчеризации предприятий горно-металлургического комплекса, а также для студентов, аспирантов и преподавателей технических вузов.

Научный редактор проф. И. Н. Белоглазов

The 192-th Volume of «Proceedings of the Mining Institute» articles include researches and developments in the field of metallurgy, beneficiation and automation of technological processes in the mining branch that were conducted by scientists of the Mining Institute of the last two years. The new approach in solving of the actual problems facing manufacture unites covered works that are presented in the collection. Many scientific advances are under implementation in the industry.

The papers of participants of the IV and V International conferences «The new technologies in automation and centralization of control for the mining and processing enterprises», and the conference «Kurnakov readings» (passed in the Mining institute in 2009-2010) are also presented in section «Automation». Heads of the mining and processing enterprises, experts in the field of automation and centralization of control for the mining and metallurgical enterprises and representatives of the companies and firms – manufacturers of technical automation medium - all took part in the conferences.

The collection is of interest for experts in the field of metallurgy, beneficiation, automation and centralization of control for the enterprises of a mining-metallurgical complex, and also for students, post-graduate students and teachers of technical universities.

Заключение экспертизы постоянно действующей технической комиссии  
от 15.09.2011 г. Протокол № 2с

ISBN 978-5-94211-518-0

ISSN 0135-3500

© Санкт-Петербургский государственный  
горный университет, 2011

© Обложка. Рекламно-издательская фирма  
«ГАЛАРТ», 2011



## СОДЕРЖАНИЕ

### ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ И ОБОГАЩЕНИИ

<b>Сизяков В.М., Сизякова Е.В., Тихонова Е.В.</b> Исследование условий образования гидросульфоалюминатов кальция в системе $\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{SO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ .....	9
<b>Бричкин В.Н., Новиков Н.А., Беседин А.А., Гордюшенков Е.Е.</b> Процессы кристаллообразования химических осадков.....	15
<b>Дубовиков О.А., Николаева Н.В.</b> Исследование процесса кондиционирования бокситов.....	19
<b>Кусков В.Б., Львов В.В.</b> Обогащение углей в гидроциклоне с автоматическим управлением.....	24
<b>Мирвалиев С.А., Теляков А.Н., Напсиков В.В., Салтыкова С.Н., Теляков Н.М.</b> Определение характера режима плавки сульфидного материала в аппарате газоструйного вращения.....	28
<b>Петров Г.В., Ковалев В.Н.</b> Сульфатизационное вскрытие продуктов пирометаллургической переработки техногенных платиносодержащих отходов.....	32
<b>Бажин В.Ю., Макушин Д.В.</b> Влияние МГД-стабильности мощного алюминиевого электролизера на выход по току.....	35
<b>Бричкин В.Н., Новиков Н.А., Радько В.В., Васильев В.В.</b> Влияние степени метастабильности растворов на кинетику массовой кристаллизации.....	39
<b>Напсиков В.В., Мирвалиев С.А., Салтыкова С.Н., Теляков Н.М.</b> Обжиг сульфидных материалов в кипящем слое.....	43
<b>Бодуэн А.Я., Иванов Б.С., Коновалов Г.В.</b> Влияние повышения качества медных концентратов на эффективность их переработки.....	46
<b>Дубовиков О.А., Николаева Н.В.</b> Поведение шамозита в процессе химического и термохимического кондиционирования бокситов.....	49
<b>Теляков Н.М., Салтыкова С.Н., Пурзвдаш М.</b> Изучение воздействия бактериального раствора на сульфидные медно-молибденовые руды.....	54
<b>Петров Г.В., Чернышев А.А., Ковалев В.Н., Андреев Ю.В.</b> Совершенствование технологии попутного получения селена при переработке анодных шламов электролиза меди.....	58
<b>Андреев Е.Е., Николаева Н.В., Львов В.В.</b> Способ автоматического управления работой мельницы самоизмельчения.....	61
<b>Орлов А.К., Коновалов Г.В., Бодуэн А.Я.</b> Пирометаллургическая селекция медно-цинковых материалов.....	65
<b>Бричкин В.Н., Николаева Н.В., Беседин А.А., Гордюшенков Е.Е.</b> Кинетика и механизм автоклавного осаждения кристаллогидратов.....	69
<b>Дубовиков О.А., Николаева Н.В.</b> Математическое описание процесса разложения каолинита щелочными растворами.....	73

<b>Петров Г.В., Чернышев А.А., Ковалев В.Н., Спыну А.Ю.</b> Изучение особенностей электрохимического поведения селена в биселенитных электролитах .....	77
<b>Теляков А.Н., Александрова Т.А., Рубис С.А.</b> Разработка технологии переработки различных по составу концентратов радиоэлектронного лома.....	81
<b>Леонов А.А., Изотова Н.С., Смирнов А.В., Теляков Н.М.</b> Способ мокрой очистки отходящих газов металлургических печей с использованием марганецсодержащих материалов.....	83
<b>Изотова Н.С., Леонов А.А., Смирнов А.В., Дарьин А.А.</b> Очистка отходящих газов металлургического производства от серосодержащих компонентов.....	85
<b>Теляков А.Н., Рубис С.А., Горленков Д.В.</b> Разработка эффективной технологии переработки промышленного сырья, содержащего благородные металлы.....	88
<b>Салтыкова С.Н., Васильев Ф.А., Доливо-Добровольская Г.И.</b> Влияние содержания железа на фазовый состав сульфидных сплавов.....	91
<b>Мартirosян М.В., Джорухян Р.Б., Мазманиян В.А.</b> Поведение нерастворимых анодов, полученных на основе вторичного свинца, при электроэкстракции меди из сернокислого раствора .....	94

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ И ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГОРНО-ДОБЫВАЮЩЕЙ И ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

<b>Козярук А.Е.</b> Системы управления и диагностики электромеханического оборудования карьерных экскаваторов .....	100
<b>Боченков Д.А., Сташинов Ю.П., Курнаков В.А.</b> Реализация устройства автоматического управления шахтной водоотливной установкой на программируемом логическом контроллере.....	105
<b>Данилова Н.В., Кадыров Э.Д.</b> Применение нечеткой логики для моделирования процесса плавки медно-никелевого концентрата в печи Ванюкова .....	107
<b>Иванов С.Л., Фокин А.С., Потапенко В.С., Подхалюзин С.П.</b> Мониторинг состояния, прогнозирование и повышение остаточного ресурса трансмиссии и опорных подшипников трубчатых печей.....	111
<b>Андреев Е.Е., Львов В.В., Николаева Н.В.</b> Автоматизация процесса двухстадийного измельчения на примере ОФ-1 ГМК «Печенганикель».....	115
<b>Кадыров Э.Д.</b> Комплексная автоматизированная система управления пирометаллургическим производством меди .....	120
<b>Загивный Э.А., Маларев В.И., Зырин В.О.</b> Автоматизация электротермического комплекса с забойным парогенератором для повышения нефтеотдачи пластов с высоковязкой нефтью.....	125
<b>Данилова Н.В., Кадыров Э.Д.</b> Алгоритмы нечеткой логики в управлении автогенной плавкой медно-никелевых сульфидных материалов.....	130
<b>Блинов А.М.</b> Некоторые аспекты автоматизации технологических процессов предприятий с учетом информационной безопасности .....	136
<b>Бажин В.Ю., Петров П.А.</b> Диагностика технологического процесса мощных алюминиевых электролизеров с помощью прикладных программ.....	140
<b>Феоктистов А.Ю., Каменецкий А.А., Блехман Л.И., Васильков В.Б., Скрябин И.Н., Иванов К.С.</b> Применение метода дискретных элементов для моделирования процессов в горно-металлургической промышленности .....	145



<b>Кадыров Э.Д., Симаков А.С., Воловиков А.Ю., Соколова Е.А.</b> Автоматизированная система оперативного диспетчерского управления газораспределительной станцией.....	150
<b>Любчик А.Н., Крапивский Е.И., Большунова О.М.</b> Прогнозирование технического состояния магистральных трубопроводов на основе анализа аварийных ситуаций.....	153
<b>Васильев В.В.</b> Система управления рудно-термической печи с использованием гармонических составляющих тока электродов .....	157
<b>Козярук А.Е., Жуковский Ю.Л., Бабурин С.В., Коржев А.А., Кривенко А.В.</b> Диагностика и оценка остаточного ресурса электромеханического оборудования, работающего в тяжелых условиях, по электрическим параметрам.....	161
<b>Снесивцев А.В., Горшков Ю.В., Дудорова М.Л., Лазарев В.И.</b> Управление качеством штейна процесса Ванюкова на основе нейронечетких моделей .....	167
<b>Педро А.А., Белоглазов И.Н., Белоглазов И.И.</b> Характер поведения гармонической составляющей с частотой 100 Гц в токе электрода рудно-термической печи.....	172
<b>Белоглазов И.И.</b> Расчет кинетики химических и металлургических реакций с помощью интервального метода с целью контроля исследуемых процессов .....	179
<b>Свириденко А.О., Беляков С.А.</b> Средства автоматизации в технологическом процессе флотации руд полезных ископаемых.....	183
<b>Петров П.А.</b> Трехмерное распределение тепла в элементах конструкции электролизера с предварительно обожженными анодами .....	187
<b>Иванов П.В., Бойков А.В.</b> Области применения систем машинного зрения.....	190
<b>Котелева Н.И.</b> Новый подход к управлению процессом шахтного обжига металлургического известняка .....	192
<b>Снесивцев А.В., Белоглазов И.И., Кимяев И.Т.</b> Изучение характеристик информационных каналов при управлении печью кипящего слоя .....	197
<b>Загрянный Э.А., Маларев В.И., Васильева Е.Е.</b> Система управления электротермическим комплексом на основе забойного скважинного электропарогенератора для термического воздействия на продуктивные пласты высоковязкой нефти.....	203
<b>Сташинов Ю.П., Боченков Д.А., Волков В.В.</b> Энергосберегающее регулирование режима работы главных водоотливных установок шахт и рудников .....	209
<b>Котелева Н.И., Шабловский И.Е., Кошкин А.В.</b> Компьютерные тренажеры для обучения операторов технологических процессов нефтегазовой отрасли: анализ существующих решений и пути их усовершенствования.....	212
<b>Иванов П.В., Бойков А.В.</b> Преимущества применения программного комплекса LabView для создания систем машинного зрения .....	216
<b>Загрянный Э.А., Устинов Д.А., Маларев В.И., Васильева Е.Е.</b> Влияние работы забойных электротермических комплексов на качество электроэнергии в сетях с изолированной и глухозаземленной нейтралью .....	219
<b>Устинов Д.А., Турышева А.В.</b> Обоснование рациональной схемы электроснабжения машин и комплексов нефтегазодобывающих предприятий.....	224
<b>Сафонов Д.Н., Хаккинен Антти, Краславски Анжи, Белоглазов И.Н., Палмер Джейсон, Экберг Бьярне</b> Применение метода определения воздухопроницаемости для оценки фильтруемости различных суспензий .....	228

## CONTENTS

### *INNOVATION TECHNOLOGYE IN THE FIELD OF METALLURGY AND ENRICHMENT*

<i>Sizyakov V.M., Sizyakova E.V., Tikhonova E.V.</i> Investigation of conditions of formation calcium hydrosulfasaluminates in the $\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{SO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ system.....	9
<i>Brichkin V.N., Novikov N.A., Besedin A.A., Gordjushenkov E.E.</i> Processes of chemical deposit crystalization .....	15
<i>Dubovikov O.A., Nikolaeva N.V.</i> Process study of conditioning of bauxites.....	19
<i>Kuskov V.B., Lvov V.V.</i> Method for coal preparation with automatic control .....	24
<i>Mirvaliev S.A., Telyakov A.N., Napsikov V.V., Saltykova S.N., Telyakov N.M.</i> Character determination of fusion mode of sulphidic material in the gas-jet rotation devise.....	28
<i>Petrov G.V., Kovalev V.N.</i> Sulphatization refinement of products from pyrometallurgical processing of technogenic waste containing platinum metals.....	32
<i>Bazhin V.Y., Makushin D.V.</i> Influence of MGD-stability at the current efficiency of powerful aluminium pot .....	35
<i>Brichkin V.N., Novikov N.A., Radko V.V., Vasilyev V.V.</i> The effect of degree of metastable solutions on mass crystallization kinetics .....	39
<i>Napsikov V.V., Mirvaliev S.A., Saltykova S.N., Telyakov N.M.</i> Sulphidic materials roasting in a fluidized bed.....	43
<i>Boduen A.J., Ivanov B.S., Konovalov G.V.</i> Influence of improvement of quality of copper concentrates on efficiency of their processing.....	46
<i>Dubovikov O.A., Nikolaeva N.V.</i> Behaviour chamoisite when in use of chemical and thermochemical conditioning of bauxites .....	49
<i>Telyakov N.M., Saltykova S.N., Purevdash M.</i> Study of influence of the bacterial solution on copper molybdenum sulphide ores .....	54
<i>Petrov G.V., Chernyshev A.A., Kovalev V.N., Andreev Y.V.</i> Improvement of the technology associated production of selenium in recycling sludge anodic electrolysis of copper ..	58
<i>Andreev E.E., Nikolaeva N.V., Lvov V.V.</i> Method of automatic control over autogenous mill operation .....	61
<i>Orlov A.K., Konovalov G.V., Boduen A.J.</i> Pyrometallurgical selection of copper-zinc materials.....	65
<i>Brichkin V.N., Nikolaeva N.V., Besedin A.A., Gordjushenkov E.E.</i> Kinetics and mechanism of autoclave precipitation of crysalline.....	69
<i>Dubovikov O.A., Nikolaeva N.V.</i> The mathematical formulation of process of decomposition alkaline solution kaolin .....	73
<i>Petrov G.V., Chernyshev A.A., Kovalev V.N., Spinu A.Y.</i> Study of the electrochemical behaviour of selenium in biselenium electrolytes .....	77



<b>Telyakov A.N., Alexandrova T.A., Rubis S.A.</b> Development of technology for processing different electronic scrap composition concentrates .....	81
<b>Izotova N.S., Leonov A.A., Smirnov A.V., Darin A.A.</b> The way of waste gases wet purification of metallurgical furnace using manganese materials .....	83
<b>Izotova N.S., Leonov A.A., Smirnov A.V., Darin A.A.</b> Sulfur-containing elements Purification of waste gases of metallurgical production .....	85
<b>Teliakov A.N., Rubis S.A., Gorlenkov D.V.</b> Developing an effective technology for processing of industrial raw materials containing noble metals .....	88
<b>Saltykova S.N., Vasiliev F.A., Dolivo-Dobrovolskay G.I.</b> The impact of iron content on sulphide alloys compound .....	91
<b>Martirosyan M.V., Jorukhyan R.B., Masmanyany V.A.</b> Behavior of insoluble anodes obtained on the base of secondary lead by electrowinning copper from sulfuric solution .....	94

## **AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND MANUFACTURES IN MINING AND PROCESSING INDUSTRIES**

<b>Kozyaruk A.E.</b> Control systems and diagnostics of the electromechanical equipment of career dredges .....	100
<b>Bochenkov D.A., Stashinov Y.P., Kurnakov V.A.</b> Realization of the arrangement of automatic control mine water-outflow installation on the programmed logical controller .....	105
<b>Danilova N.V., Kadyrov E.D.</b> Application of fuzzy-logic for modelling of process of fusion of the medno-nickel concentrate in furnace Vanjukova .....	107
<b>Ivanov S.L., Fokin A.S., Potapenko V.S., Podkhalyuzin S.P.</b> Monitoring of condition, forecasting and increasing of residual resource of transmission and supported bearings of tubular furnaces .....	111
<b>Andreev E.E., Lvov V.V., Nikolaeva N.V.</b> Automation of two stadial grinding for example mineral separation plant GMK «PECHENGANICKEL» .....	115
<b>Kadyrov E.D.</b> Integrated automatic process control system of pyrometallurgical copper production .....	120
<b>Zagrivny E.A., Malarev V.I., Zyrin V.O.</b> Electrothermal complex with downhole electrosteam generator's automation to aid in layer with high viscosity oil recovery .....	125
<b>Danilova N.V., Kadyrov E.D.</b> Algorithms of fuzzy logic in control of autogenous fusion of copper-nickel sulphidic materials .....	130
<b>Blinov A.M.</b> Some problems of automation of technological processes of the enterprises with using of information security .....	136
<b>Bazhin V.Y., Petrov P.A.</b> Diagnostics of technological process of powerful aluminium pots by means of special programs .....	140
<b>Feoktistov A.J., Kamenecki A.A., Blekhman L.I., Vasilkov V.B., Skryabin I.N., Ivanov K.S.</b> The application of discrete element method to mining and metallurgy process modeling .....	145
<b>Kadyrov E.D., Simakov A.S., Volovikov A.J., Sokolova E.A.</b> The automated system of operative dispatching management of gas distribution station .....	150
<b>Lubchik A.N., Krapivsky E.I., Bolshunova O.V.</b> Prediction of the technical status of pipeline based on analysis .....	153
<b>Vasiliev V.V.</b> Control system of ore-smelting furnace using harmonic components of electrodes current .....	157

<b>Kozyaruk A.E., Shukovsky Y.L., Baburin S.V., Korzhev A.A., Krivenko A.V.</b> Diagnostics and estimation of the residual resource of the electromechanical equipment working under trying conditions on electric parameters.....	161
<b>Spesivtsev A.V., Gorshkov Y.V., Dudorova M.L., Lazarev V.I.</b> Matte quality management of vanyukov's process on the basis of neuro-fuzzy models .....	167
<b>Pedro A.A., Beloglazov I.N., Beloglazov I.I.</b> About the nature of harmonic component with frequency of 100 Hz in electrodes current of ore-smelting furnace.....	172
<b>Beloglazov I.I.</b> The calculation of the kinetics of chemical and metallurgical processes for the purpose of the control at use of the interval method .....	179
<b>Sviridenko A.O., Belyakov S.A.</b> Automation means in technological process of flotation of ores of minerals .....	183
<b>Petrov P.A.</b> 3D heat distribution in the construction of the reduction cell with burned anodes .....	187
<b>Ivanov P.V., Boikov A.V.</b> Spheres of using technical vision .....	190
<b>Koteleva N.I.</b> The new approach to control of the metallurgical limestone shaft kilning process.....	192
<b>Spesivtsev A.V., Beloglazov I.I., Kimyaev I.T.</b> Study of information channels characteristics in control fluid bed furnace .....	197
<b>Zagrivny E.A., Malarev V.I., Vasilieva E.E.</b> Electrothermal complex including steam and gas electrogenerator for thermal influence to productive layers of the highly viscous oil control system .....	203
<b>Stashinov Y.P., Bochenkov D.A., Volkov V.V.</b> Energy saving regulation of the mode of operation main water-outflow installation .....	209
<b>Koteleva N.I., Shablovsky I.E., Koshkin A.V.</b> Computer training simulator for instruction of oil and gas technological processes operators: the analysis of existing decisions and the way of their improvement.....	212
<b>Ivanov P.V., Boikov A.V.</b> Advantages of application of program complex LabView to creation of visual systems .....	216
<b>Zagrivny E.A., Ustinov D.A., Malarev V.I., Vasilieva E.E.</b> The electrothermal complexes influence on quality of the electric power in the isolated and deaflly earthed neutral networks .....	219
<b>Ustinov D.A., Turyшева A.V.</b> Substantiation study about the rational circuit of power supply of machines and complexes of the oil and gas producing enterprises .....	224
<b>Safonov D.N., Häkkinen Antti, Kraslawski Andrzej, Beloglazov I.N., Palmer Jason, Ekberg Bjarne.</b> Application of air-permeability method for filterability prediction of different materials.....	228



**ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
В МЕТАЛЛУРГИИ И ОБОГАЩЕНИИ**

**INNOVATION TECHNOLOGIE  
IN THE FIELD OF METALLURGY AND ENRICHMENT**

---

УДК 669.712.1

**В.М.СИЗЯКОВ**, д-р техн. наук, профессор, (812) 328-82-65  
**Е.В.СИЗЯКОВА**, канд. техн. наук, ассистент, [evsi2006@yandex.ru](mailto:evsi2006@yandex.ru)  
**Е.В.ТИХОНОВА**, аспирантка, (812) 328-84-59  
*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

**V.M.SIZYAKOV**, Dr. in eng. sc., professor, (812) 328-82-65  
**E.V.SIZYAKOVA**, PhD in eng. sc., assistant, [evsi2006@yandex.ru](mailto:evsi2006@yandex.ru)  
**E.V.TIKHONOVA**, post-graduate student, (812) 328-84-59  
*Saint Petersburg State Mining University*

**ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ОБРАЗОВАНИЯ  
ГИДРОСУЛЬФОАЛЮМИНАТОВ КАЛЬЦИЯ В СИСТЕМЕ  
 $\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{SO}_3 - \text{H}_2\text{O}$**

Гидросульфалюминаты кальция (ГСАК) являются одним из компонентов цементного камня. Они медленно (4-6 мес.) образуются вместе с упорядочением структуры цементного камня в водной среде при умеренной температуре (0-25 °С). Низкая скорость кристаллизации ГСАК не позволяла рассматривать их как самостоятельные объекты для использования в различных технологических целях.

Доказана возможность образования ГСАК ( $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot m\text{SO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) в среде сильных электролитов – алюминатных растворах глиноземного производства. Они кристаллизуются в течение короткого времени (1-2 ч) и сохраняют свою устойчивость достаточно долго – 24-36 ч. Это позволило наметить пути их промышленного использования.

**Ключевые слова:** гидросульфалюминат, кальций, глинозем, синтез, алюминатный раствор.

**INVESTIGATION OF CONDITIONS  
OF FORMATION CALCIUM HYDROSULFASALUMINATES  
IN THE  $\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{SO}_3 - \text{H}_2\text{O}$  SYSTEM**

Calcium hydrosulfasaluminates (GSAK) is a component of cement. They are slowly formed together with the forming of the structure of cement in water solution at measurable temperatures (0-25 °C) during about 4-6 months. Slow rate of crystallization of GSAK wasn't allowed to treat them as self-autonomy objects for use in various technological applications.

The possibility of formation of GSAK ( $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot m\text{SO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) is proved in an environment of saturated electrolytes – aluminates solutions of alumina production. They crystallize in a short time about 1-2 hours and retain their stability in long time about 24-36 hours. This allowed for us to identify ways of their industrial use.

**Key words:** hydrosulfasaluminate, calcium, alumina, synthesis, aluminates solution.

Гидросульфоалюминаты кальция (ГСАК) являются компонентами цементного камня, они образуются при его твердении в водной среде в течение 4-6 мес. при температуре 0-25 °С.

Из литературы [6] известно, что в системе  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SO}_3 - \text{H}_2\text{O}$  кристаллизуется два основных гидрата, относительно стабильных в водной среде, гидрат моносulfатной формы  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_4(12-18)\text{H}_2\text{O}$  и гидрат трехsulfатной формы (эттрингит)  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ . В работе Лерча и др. [13] впервые дана физико-химическая характеристика гидрата моносulfата, образующего гексагональные пластинки и дающего базисный параметр 0,892 нм. В зависимости от содержания кристаллизационной воды и состава базальный рефлекс меняется; так, в гидрате с 18 молекулами воды он равен 0,954 нм, с семью молекулами – 0,82 нм [6]. В отличие от моносulfата эттрингит относительно стабилен при изменении условий окружающей среды. Его дифракционный максимум 0,97 нм не меняется в широком интервале возможных изменений молекулярной воды [1, 14, 15]. Трисulfоалюминат образует игловидные и призматические кристаллы [6]. Установлено, что адсорбция ионов  $\text{SO}_4^{2-}$  в гексагональных гидроалюминатах задерживает их превращение в  $\text{C}_3\text{AH}_6$  [7, 11]. При контакте со щелочами sulfатированные алюминаты могут образовывать sulfоалюминатно-щелочную фазу примерного состава  $4\text{CaO} \cdot 0,9\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1,1\text{SO}_3 \cdot 0,5\text{Na}_2\text{O} \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ , однако границы области ее существования и точный состав не удалось установить [12]. Под действием  $\text{CO}_2$  гидросульфоалюминат образует полукарбоалюминат кальция  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 0,5\text{CO}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  (0,82 нм) и эттрингит [16]. Дальнейшая карбонизация превращает полукарбоалюминат в карбоалюминат и окончательно в карбонат кальция. Для  $\text{SO}_4^{2-}$  сохраняются принципы неорганического анионного обмена в четырехкальциевом гидроалюминате  $[\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6][\text{OH}, aq]$  с замещением гидроксильного иона и образованием твердого раствора. Впервые такой твердый раствор со степенью замещения

$m = 1/2\text{SO}_4^{2-}$  был описан в работе [3]. При 25 °С моносulfат может находиться в равновесии с гидроксидом кальция и эттрингитом.

Рассматривая последовательность реакций в системе  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ , некоторые исследователи пришли к выводу, что на первой стадии образуется эттрингит  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ , а затем за счет эттрингита образуется низкосulfатный sulfоалюминат, который после израсходования всего количества  $\text{SO}_3$  образует твердый раствор с четырехкальциевым гидроалюминатом [5].

Длительное вызревание гидросульфоалюминатов в процессе твердения цементного камня не позволяло рассматривать их для использования в технологических целях. Необходимо было создать принципиально новые условия для радикального ускорения химической реакции их кристаллизации. Такими условиями явился перевод синтеза ГСАК из нейтральной водной среды в среду сильных электролитов – алюминатных растворов глиноземного производства, – что позволило ускорить реакцию образования ГСАК (вместо 4-6 мес. – 2 ч.).

Образование карбо- и sulfоалюминатов кальция в системе  $\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{CO}_2 - \text{SO}_3 - \text{H}_2\text{O}$  при высоких концентрациях  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  практически не изучено [4, 12]. Учитывая технологические параметры глиноземного производства [8-10], исследовали систему  $\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{SO}_3 - \text{H}_2\text{O}$  при температуре 60-90 °С, концентрации  $\text{Al}_2\text{O}_3 - 85-90 \text{ г/дм}^3$ ;  $\alpha_k = 1,5$ ; молекулярное отношение  $\text{CaO}:\text{Al}_2\text{O}_3 = 3$  и различном количестве  $\text{SO}_3 - 10; 14; 28 \text{ и } 60 \text{ г/дм}^3$ . Наиболее устойчивые алюмосульфатные фазы получают при температуре 60 °С. Время экспозиции изменяли в широком пределе – от 10 до 180 мин.

Первоначально все рентгеновские съемки синтезированных фаз осуществляли в закрытой кювете, в качестве пленки использовали полиэтилен. Исследованные фазы проявляют склонность к изменению состава своей поверхности за счет взаимодействия с углекислотой воздуха и естественной дегид-

ратации. Как правило, они сохраняют устойчивость в течение 24-36 ч.

Синтез сульфоалюминатов при 60 °С в алюминатном растворе с концентрацией 10 г/дм<sup>3</sup> SO<sub>3</sub> позволил выявить новую низкосульфатную фазу с дифракционным максимумом  $d_{001} = 0,756$  нм (пики 0,756 и 0,376 нм), но выделить ее в чистом виде не удалось. Образованию этой фазы сопутствует кристаллизация C<sub>3</sub>АН<sub>6</sub>.

При увеличении содержания SO<sub>3</sub> в исходном растворе до 15 г/дм<sup>3</sup> кристаллизуется в основном сульфоалюминат с базисным расстоянием 0,83 нм, примесь C<sub>3</sub>АН<sub>6</sub> составляет 20-25 %. Полученную фазу можно рассматривать как твердый раствор SO<sub>3</sub> в четырехкальциевом гидроалюминате [3]. Дальнейшее повышение сульфатов в алюминатном растворе до 28 г/дм<sup>3</sup> SO<sub>3</sub> приводит к образованию двух низкосульфатных фаз: с 0,83 и 0,96 нм. Стабильность полученных фаз повышается. Они существуют в алюминатном растворе до 120 мин, затем начинается их постепенный переход в C<sub>3</sub>АН<sub>6</sub>. Из

алюминатных растворов высокой концентрации (SO<sub>3</sub> ~ 60-65 г/дм<sup>3</sup>) кристаллизуется моносульфатная фаза с дифракционным максимумом 0,96 нм (с небольшой примесью фазы 0,83 нм). В отличие от гидрокарбоалюминатных фаз низкосульфатные соединения характеризуются определенной зависимостью дифракционных максимумов от количества поглощенного SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. С увеличением степени насыщения сульфатом величина базального рефлекса сульфоалюминатных фаз возрастает.

Высушенные до постоянного веса в эксикаторе низкосульфатные фазы были исследованы методами рентгеноструктурного, а также электронно-микроскопического, ИК-спектра и термографического анализов.

Химический и молекулярный состав фаз приведен в таблице. Наиболее чистые образцы сульфоалюминатных фаз получают при молярном отношении SO<sub>3</sub>: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в исходном растворе ≥ 0,4.

Рентгенограмма низкосульфатной фазы с насыщением SO<sub>3</sub> ~ 0,14 мол.дол. дает рефлекс

**Взаимодействие в системе Na<sub>2</sub>O – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – CaO – SO<sub>3</sub> – H<sub>2</sub>O при температуре 60 °С, τ = 3 ч, CaO:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 3**

Состав исходного раствора			Состав раствора после опыта, г/дм <sup>3</sup>		Химический состав твердых фаз, %					Молярные отношения в твердых фазах		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , г/дм <sup>3</sup>	SO <sub>3</sub> , г/дм <sup>3</sup>	α <sub>к</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	ППП	CaO: Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub> : Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O: Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
89,4	10,1	1,52	15,4	1,59	43,4	21,9	2,40	0,66	30,5	3,61	0,14	7,9
85,6	15,3	1,48	16,6	5,4	43,8	21,2	2,96	0,76	31,05	3,76	0,18	8,29
85,6	28,4	1,53	24,8	12,7	42,2	19,4	5,28	0,61	31,53	3,96	0,35	9,21
85,6	65,2	1,51	25,1	32,3	40,5	18,2	9,15	0,81	30,26	4,06	0,64	9,44

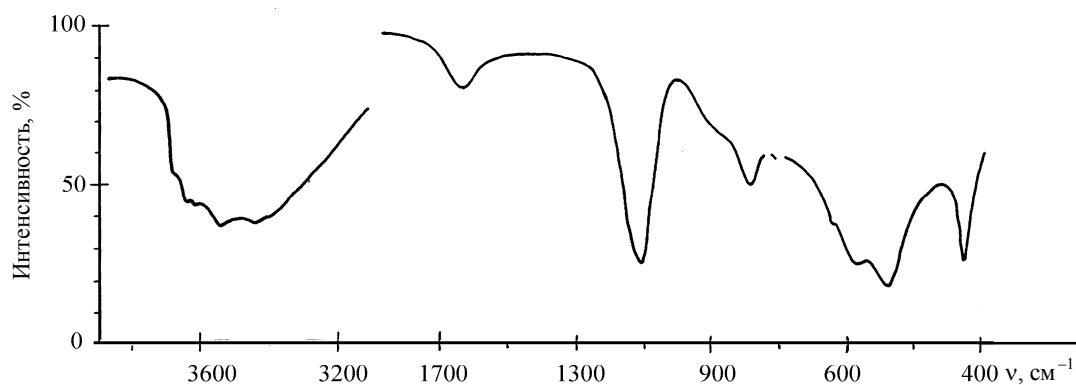


Рис.1. Эталонный образец сульфоалюмината кальция 4CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·0,35 SO<sub>3</sub>·9H<sub>2</sub>O, синтезированный авторами



0,76 нм; фаза с содержанием  $\text{SO}_3 \sim 0,18$  характеризуется двумя основными дифракционными максимумами 0,76 и 0,82 нм. Такие же рефлексы проявляют сульфоалюминатные фазы с насыщением  $\text{SO}_3$ , равным соответственно 0,35 и 0,64, только в них преобладает фаза с базисным расстоянием 0,82 нм. Дифракционный максимум 0,96 нм, относящийся к фазам с 0,35 и 0,64  $\text{SO}_3$ , снятым в закрытой кювете, исчез. Последнее связано с тем, что фаза 0,96 нм при температуре сушки  $\sim 20^\circ\text{C}$  является неустойчивой, но в отличие от литературных данных она сформировалась не в фазу 0,9 нм [4], а в фазы 0,82 и 0,76 нм. Низкосульфатная фаза 0,83 нм также перешла в фазы 0,82 и 0,76 нм. Известно [4], что рефлексы 0,82 и 0,76 нм относятся к карбонизированным фазам. Если бы произошла достаточно глубокая карбонизация сульфоалюминатного соединения, то в результате образовались бы две фазы – карбоалюминатная (0,82 и 0,76 нм) и эттрингит  $3\text{CaO} \cdot 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$  с базальным рефлексом 0,97 нм [6]. Однако в нашем случае признаков эттрингита не обнаружено. ИК-спектры высушенных образцов всех сульфоалюминатных фаз свидетельствуют о том, что сульфогруппа входит в решетку гидроалюминатной фазы (полоса  $1120\text{--}1140\text{ см}^{-1}$ ) (рис.1). Характерными полосами поглощения для сульфоалюмината кальция являются  $425, 530, 580, 800\text{ см}^{-1}$ ; полосы поглощения, относящиеся к колебаниям гидроксильных групп –  $3350, 3580, 3670\text{ см}^{-1}$ , широкие, размытые, что может свидетельствовать о метастабильных превращениях в кристаллической решетке сульфоалюминатных фаз (структура «плывет»).

На рис.2 приведены термограммы сульфоалюминатов кальция с различным насыщением по  $\text{SO}_3$  ( $m = 0,14; 0,18; 0,35; 0,64$ ). По мере повышения насыщения образцов по  $\text{SO}_3$  происходит уменьшение интенсивности пика обезвоживания  $\text{C}_3\text{AH}_6$  ( $330\text{--}420^\circ\text{C}$ ), т.е. количество примеси снижается. Остальные эффекты сульфоалюминатов кальция распределяются следующим образом:  $130\text{--}270^\circ\text{C}$  – обезвоживание препаратов;  $565^\circ\text{C}$  – выделение  $\text{CaSO}_4$ ,

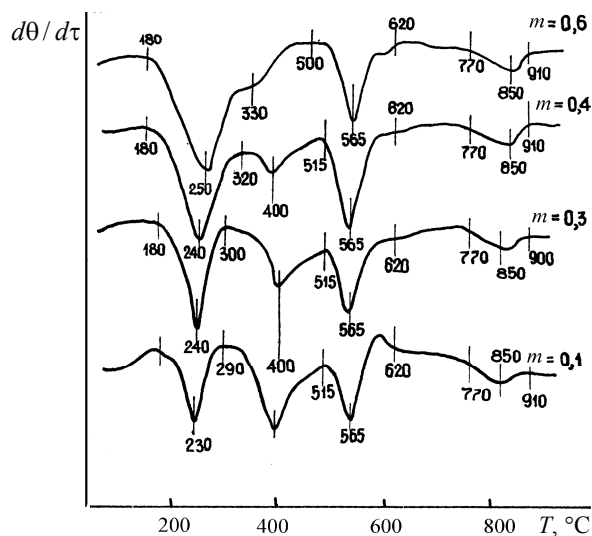


Рис.2. Термограммы образцов сульфоалюминатов кальция  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot m \text{SO}_3 \cdot (8\text{--}9,5)\text{H}_2\text{O}$  с различной степенью насыщения



Рис.3. Электронно-микроскопический снимок сульфоалюмината кальция  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 0,35 \text{SO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$

$\sim 800\text{--}900^\circ\text{C}$  – удаление группы  $\text{CO}_2$  (результат вторичной карбонизации образцов).

Сопоставляя результаты наших исследований сульфоалюминатных фаз и литературные данные [4], легко исключить кажущуюся

щееся недоразумение с объяснением перехода сульфоалюминатных фаз в соединения, которые характеризуются по рентгену признаками карбоалюминатов (0,76 и 0,82 нм). Суть заключается в поверхностной карбонизации низкосульфатных фаз, а как отмечалось [4], даже малая степень карбонизации вызывает сильные базальные рефлексы 0,82 и 0,76 нм. Причем пик 0,83 нм, который относится к сульфоалюминатной фазе, передается пиком 0,82 нм, а дифракционный максимум новой низкосульфатной фазы 0,756 нм перекрывается пиком 0,76 нм.

Как показывают электронно-микроскопические исследования (рис.3), низкосульфатные фазы кристаллизуются в виде пластинчато-лепестковых форм, некоторые скопления пластин размыты, что свидетельствует о протекающих в них превращениях. Толщина пластинок 30-40 нм, удельная поверхность 30 м<sup>2</sup>/г.

### Выводы

На основании результатов исследований были синтезированы гидросульфоалюминаты кальция на промышленных растворах глиноземного производства «БазэлЦемент – Пикалево» с использованием заводской извести (активность СаО – 88 %). Полученные препараты состава  $(3,9-3,95)\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \times (0,3-0,34)\text{SO}_3 \cdot (8,8-9,2)\text{H}_2\text{O}$  были использованы в форопытах в качестве сорбента для очистки алюминатных растворов от органических соединений, а также в различных композициях вяжущих материалов для производства специальных цемента.

Результаты форопытов позволяют утверждать, что гидросульфоалюминаты, синтезированные в условиях глиноземного производства, найдут эффективное применение в металлургической, химической промышленности и стройиндустрии.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Берман Х.А. Условия стабильности эттрингитовых соединений / Х.А.Берман, Е.С.Ньюмен // 4-й Международный конгресс по химии цемента. М.: Стройиздат. 1964. С.201-212.

2. Будников П.П. Специальные цементы / П.П.Будников, Р.Д.Азелицкая // ЖПХ, 1959. № 32. С.1181-1185.

3. Дош В. Состав и технология сульфоалюмосиликатных компонентов цемента / В.Дош, Х.Келлер // 6-й Международный конгресс по химии цемента. М.: Стройиздат, 1976. № 3. С.141-146.

4. Зелигман П. Процессы кристаллизации в производстве цемента / П.Зелигман, Н.Грининг // 5-й Международный конгресс по химии цемента. М.: Стройиздат, 1973. С.168-185.

5. Кантро Д.Л. Технология производства сульфоалюминатных цементов / Д.Л.Кантро, Л.Е.Коупленд // 4-й Международный конгресс по химии цемента. М.: Стройиздат, 1964. С.306-334.

6. Мета П.К. Кристаллизация основных гидратов в системе  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SO}_3 - \text{H}_2\text{O}$  / П.К.Мета, М.Поливка // 6-й Международный конгресс по химии цемента. М.: Стройиздат, 1976. № 3. С.158-172.

7. Миленц Р. О роли сульфат-ионов в процессе кристаллизации алюминатов кальция // 5-й Международный конгресс по химии цемента. М.: Стройиздат, 1973. С.388-402.

8. Сизяков В.М. Модернизация технологии комплексной переработки Кольских нефелиновых концентратов на Пикалевском глиноземном комбинате: Труды II Международного конгресса «Цветные металлы – 2010». Красноярск, 2-4 сентября 2010. С. С.367-378.

9. Сизяков В.М. О механизме вторичных потерь при выщелачивании нефелиновых спеков / В.М.Сизяков, Е.В.Сизякова, С.Б.Фокина: Труды I Международного конгресса «Цветные металлы – Сибири». Красноярск, 8-10 сентября 2009. С.145-151.

10. Сизяков В.М. Технология низкотемпературного выщелачивания нефелиновых спеков / В.М.Сизяков, Е.В.Сизякова, С.А.Модестова: Труды I Международного конгресса «Цветные металлы – Сибири». Красноярск, 2009. С.142-144.

11. Соловьева Е.С. Условия образования алюминатов кальция / Е.С.Соловьева, Е.Е.Сегалова // Коллоидный журнал. 1961. № 23. С.306-314.

12. Dosch W., Zur Strassen H. Du vervollkommung der technologie des zemints // Zem. Kalk-Gips. 1967. V.20. P.392-401.

13. Lerch W., Ashton F.W., Boque Rl.H. The Sulfoaluminates on Calcium // Jour. of Res., Nat. Bur. of Stand., 1929. V.2. P.715-731.

14. Mehta P.K. Mechanism of Expansion Associated with Ettringite Formation // Ibid. V.1, 3. P.1-6.

15. Mehta P.K., Klein A. About Structure of fast hard Portland Cement. Symposium on Structure of Portland Cement Paste and Concrete // Highway Research Board, Special Report, 1966. N 90. P.328-352.

16. Steinour H.H. Kinetics of interaction of alkali with sulphoaluminatum of calcium // Portl. Cem. Ass. Res. Dev. Bull. 1951. V.43. P.68-70.

### REFERENCES

1. Berman H.A., Newman E.C. The conditions of stability of ettringite connections // The fourth International congress in cement chemistry. Moscow: Stroyizdat. 1964. P.201-212.

2. Budnikov P.P., Azelitskay R.D. The special Cements // JPH. 1959. N 32. P.1181-1185.
3. Dosh B., Keller X. Composition and technology of sulphoaluminatun components of cement // The sixth International congress in cement chemistry. Moscow: Stroyizdat, 1976. N 3. P.141-146.
4. Zeligman P., Grining N. Crystallization processes in cement production // The fifth International congress in cement chemistry. Moscow: Stroyizdat, 1973. P.168-185.
5. Kantro D.L., Kouplend L.E. The technology of production of sulphoaluminatum cements // The Fourth International congress in cement chemistry. Moscow: Stroyizdat, 1964. P.306-334.
6. Meta P.K., Polivka M. On the role of sulfate ions in the process of crystallization of calcium aluminate // The Sixth International congress in cement chemistry. Moscow: Stroyizdat, 1976. N 3. P.158-172.
7. Mileni R. Crystallization of major hydrates in the system  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SO}_3 - \text{H}_2\text{O}$  // The Fifth International congress in cement chemistry. Moscow: Stroyizdat, 1973. P.388-402.
8. Siziakov V.M. The modernization of technology of the Kola nepheline concentrates complex processing at Pikalevsky aluminous plant // II International congress «Nonferrous metals – 2010». Krasnoyarsk, 2-4 september 2010. P.367-378.
9. Siziakov V.M., Siziakova E.V., Fokina S.B. About the mechanism of secondary losses at nepheline cakes leaching // I International congress «Nonferrous metals of Siberia». Krasnoyarsk, 8-10th September, 2009. P.145-151.
10. Siziakov V.M., Siziakova E.V., Modestova S.A. The technology low-temperature leaching of nepheline cakes // I International congress «Nonferrous metals of Siberia». Krasnoyarsk, 2009. P.142-144.
11. Soloveva E.S., Segalova E.E. Conditions of formation of calciumaluminate // The colloid magazine. 1961. N 23. P.306-314.
12. Dosch W., Zur Strassen H. // Improvement of the technology of cement production. Zem. Kalk-Gips, 1967. V.20. P.392-401.
13. Lerch W., Ashton F.W., Boque Rl.H. The Sulfoaluminates on Calcium // Jour. of Res., Nat. Bur. of Stand., 1929. V.2. P.715-731.
14. Mehta P.K. Mechanism of Expansion Associated with Ettringite Formation // Ibid. V.1, 3. P.1-6.
15. Mehta P.K., Klein A. About Structure of fast hard Portland Cement. Symposium on Structure of Portland Cement Paste and Concrete // Highway Research Board, Special Report, 1966. N 90. P.328-352.
16. Steinour H.H. Kinetics of interaction of alkali with sulphoaluminatum of calcium // Portl. Cem. Ass. Res. Dev. Bull. 1951. V.43. P.68-70.

**В.Н.БРИЧКИН**, *д-р техн. наук, профессор, kafmetall@mail.ru*

**Н.А.НОВИКОВ**, *аспирант, kafmetall@mail.ru*

**А.А.БЕСЕДИН**, *студент, kafmetall@mail.ru*

**Е.Е.ГОРДЮШЕНКОВ**, *студент, kafmetall@mail.ru*

*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

**V.N.BRICHKIN**, *Dr. in eng. sc., professor, kafmetall@mail.ru*

**N.A.NOVIKOV**, *post-graduate student, kafmetall@mail.ru*

**A.A.BESEDIN**, *student, kafmetall@mail.ru*

**E.E.GORDJUSHENKOV**, *student, kafmetall@mail.ru*

*Saint Petersburg State Mining University*

## ПРОЦЕССЫ КРИСТАЛЛООБРАЗОВАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ОСАДКОВ

Показана роль термодинамических и кинетических факторов в процессе формирования реальной структуры химических осадков. На примере осаждения гиббсита из алюминатных щелочных растворов установлено значение параллельно протекающих процессов кристаллизации в формировании производственных (реологических) свойств твердой фазы, образующейся при химическом взаимодействии.

**Ключевые слова:** кинетика, кристаллизация, формы роста, химические осадки.

## PROCESSES OF CHEMICAL DEPOSIT CRYSTALIZATION

The role of thermodynamic and kinetic factors in the formation of the real structure of chemical precipitation. On the example of gibbsite precipitation from alkaline aluminate solutions is set to take place in parallel crystallization processes in the formation of production (rheological) properties of the solid phase formed during the chemical interaction is presented.

**Key words:** kinetics, crystallization, growth form, chemical deposit.

Формирование оптимальной структуры поликристаллических осадков, безусловно, относится к одной из важнейших задач химико-металлургической технологии, так как именно на этапе выделения твердой фазы из раствора (или расплава) закладываются ее производственные и технологические свойства, позволяющие эффективно использовать или перерабатывать полученный продукт. При кристаллизации из растворов зачастую требуется обеспечить химическую однородность и чистоту осадка, коррозионную устойчивость или химическую активность, оптимальные физико-механические характеристики, такие как низкая слеживаемость и пыление, высокая технологичность в отношении отделения и промывки твердой

фазы, сушки и обжига, транспорта и хранения, ряда других операций. Во многих случаях находятся приемлемые технические решения для достижения поставленных целей. Наиболее трудно решаются поставленные задачи в отношении химических осадков, т.е. малорастворимых продуктов химических реакций, характерных для гидрометаллургии цветных металлов. Все сказанное в полной мере относится к задачам, решаемым при осаждении гидроксида алюминия из растворов в производстве глинозема. Особенно эти вопросы актуальны в последнее время в связи с повышенными требованиями к качеству глинозема при использовании алюминиевых электролизеров, оборудованных системой автоматизированного



питания глиноземом. В то же время интерес к разработке фундаментальных основ кристаллизации гидроксида алюминия и подходов направленного формирования его кристаллофизических свойств имеет достаточно давнюю историю [1]. Одно из наиболее обстоятельных исследований по морфологии гиббсита приведено в работе [2]. Последние десятилетия заметный интерес к механизму кристаллизации гидроксида алюминия связан с изучением процессов агломерации дисперсных частиц, что имеет большое практическое значение для улучшения производственных показателей. Несмотря на высокую степень изученности массовой кристаллизации из растворов, существует известная неопределенность, связанная с выбором режима для получения продукции с заданными кристаллофизическими свойствами, из-за сложности и многофакторности процессов, сопровождающих химическое осаждение в реальных технологических условиях. С учетом общности законов кристаллизации, действующих в природных и искусственных системах, часть ответов на поставленные вопросы может быть получена на основе известных закономерностей ростовой кристаллографии. В соответствии с принципом Кюри и условием равновесия Гиббса состояние энергетического минимума для равновесного многогранника определяется выражением

$$\sum \sigma_i S_i = \min; V = \text{const},$$

где  $\sigma_i$  – удельная свободная поверхностная энергия границы фаз;  $S_i$  – величина поверхности  $i$ -й грани;  $V$  – объем кристалла.

Следовательно, из всех возможных кристаллических форм равновесной и наиболее вероятной является та, которая обладает наименьшей свободной или межфазной энергией. По теореме Вульфа, чем выше поверхностная энергия, тем меньше площадь грани. Вследствие этого исчезают неустойчивые грани, а стабильные увеличиваются в размерах, и в конечной стадии роста кристалла сохраняются грани с наименьшей скоростью роста. Большинство форм макроскопических кристаллов, проявляющихся в результате кристаллизации, не являются равновесными, и

в реальных условиях скорости роста различных граней не пропорциональны поверхностным энергиям. В этом смысле принцип Гиббса – Кюри – Вульфа к формам роста неприменим, так как помимо полиэдрических реальные кристаллы имеют все возможные иные формы роста, характеризующиеся завышенной поверхностной энергией. При этом общее условие термодинамически предпочтительного неравновесного состояния системы, соответствующее экстремальности производства теплоты диссипации и минимуму ее изменения во времени, может быть записано в виде [3]

$$\left| \frac{dQ}{d\tau} \right| = \left| \frac{AjdS}{d\tau} \right| = \min,$$

где  $Q$  – теплота рассеяния;  $\tau$  – время;  $A$  – химическое сродство;  $j$  – удельная скорость роста или растворения (поток);  $S$  – поверхность кристаллической фазы.

Отсюда видно, что при росте и растворении кристалл как бы стремится поддерживать общее производство теплоты рассеяния (диссипации), приобретая форму, максимально препятствующую его изменению во времени. При этом проявляется внутрен-

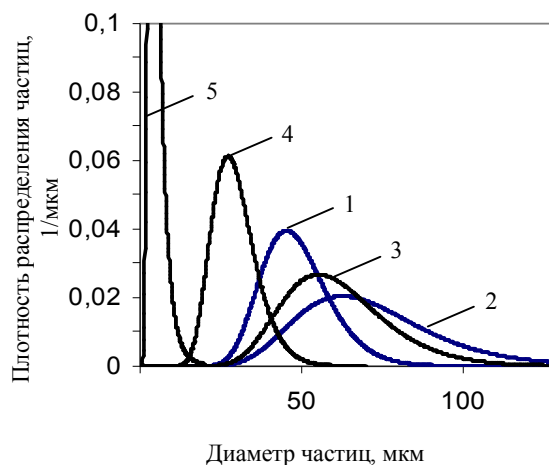


Рис. 1. Плотность распределения по крупности осадков гидроксида алюминия, полученных осаждением на затравке из алюминатных растворов  
1 – затравочный гидрат (узкая фракция); 2 – широкая фракция затравочного (байеровского) гиббсита;  
3 – продукт осаждения на байеровской затравке;  
4 – осадок на карбонизационной затравке; 5 – осадок на затравке

няя противоречивость неравновесной системы, стремящейся максимально быстро перейти в состояние равновесия и в то же время сохранить состояние с прежним производством теплоты. Один из наиболее распространенных путей перехода неравновесной системы в такое состояние заключается в реализации механизмов, увеличивающих дисперсность кристаллической фазы и соответственно ее поверхность. На рис.1 приведены результаты дисперсионного анализа затравочного гидроксида алюминия и продуктов декомпозиции, выполненной в однотипных условиях. При использовании затравки различной природы и фракционного состава, в зависимости от кинетической предпочтительности процесса, система переходит в неравновесное стационарное состояние различными путями, формирующими адекватную структуру осадка. Наиболее распространенные примеры перехода твердой фазы в дисперсное состояние связаны с преимущественным развитием механизмов гомогенного и гетерогенного зародышеобразования и хорошо известны из практики химического осаждения. При невозможности реализации подобных процессов отклик системы на неравновесные условия связан с развитием механизмов реального кристаллообразования. С ними связано изменение гранных форм, неполногранный и дендритный рост, расщепление и двойникование, эпитаксиальный и блочный рост, выклинивание и др. На рис.2 приведены изображения кристаллов гиббсита, образующихся в различных условиях декомпозиции алюминатных растворов [2]. Еще более глубокие изменения кристаллических индивидов возможны в процессе карбонизации алюминатных растворов, включая образование сферолитов различной структуры [4].

Оценить вклад каждого из механизмов в формирование структуры конечного продукта можно исходя из принципа независимости параллельных процессов, а следовательно, и независимости их скорости с учетом распространенного описания кинетики осаждения гидроксида алюминия уравнением вида

$$-dC/d\tau = K(C - C_p)^2, \quad (1)$$

где  $C$ ,  $C_p$  – концентрация  $Al_2O_3$  в пересыщенном и равновесном растворе;  $\tau$  – время;  $K$  – константа скорости реакции, являющаяся в общем случае функцией конкретного механизма процесса.

После интегрирования (1) при начальных условиях ( $\tau = 0$  и  $C = C_0$ ) запишем уравнение в виде

$$(C_0 - C) = K\tau(C_0 - C_p)(C - C_p). \quad (2)$$

Осуществляя процесс по ряду параллельных механизмов, подчиняющихся кинетическому уравнению (1), получим уравнение

$$-dC/d\tau = -dC_1/d\tau - dC_2/d\tau \dots - dC_i/d\tau = K_1(C - C_p)^2 + K_2(C - C_p)^2 + \dots + K_i(C - C_p)^2. \quad (3)$$

После подстановки  $C$  из уравнения (2) в кинетическое уравнение понижения концентрации по первому и последующим параллельным процессам имеем

$$-\frac{dC_1}{d\tau} = K_1 \left[ \frac{1 + K\tau(C_0 - C_\delta)}{C_0 + K\tau(C_0 - C_\delta)} - C_\delta \right]^2. \quad (4)$$

Учитывая постоянство множителя в уравнении (4), справедливы следующие соотношения:

$$dC_1/dC_2 = K_1/K_2;$$

$$dC_1/dC_3 = K_1/K_3; \quad dC_1/dC_i = K_1/K_i. \quad (5)$$

После интегрирования уравнений (5) от  $C_0$  до  $C_1, C_2, C_3, \dots C_i$  получим

$$(C_0 - C_1)/(C_0 - C_2) = K_1/K_2;$$

$$(C_0 - C_1)/(C_0 - C_3) = K_1/K_3;$$

$$(C_0 - C_1)/(C_0 - C_i) = K_1/K_i. \quad (6)$$

Поделив левые части уравнений (6) на  $C_0 - C_p$ , перейдем к относительным величинам, выражающим степень протекания процесса по каждому из механизмов. Тогда доля продуктов ( $\alpha_i$ ), образовавшихся по одному из параллельных механизмов, при условии  $\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_i = n$

$$\alpha_i = nK_i/(K_1 + K_2 + \dots + K_i), \quad (7)$$

где  $n$  – суммарная степень завершения процесса к данному моменту времени.

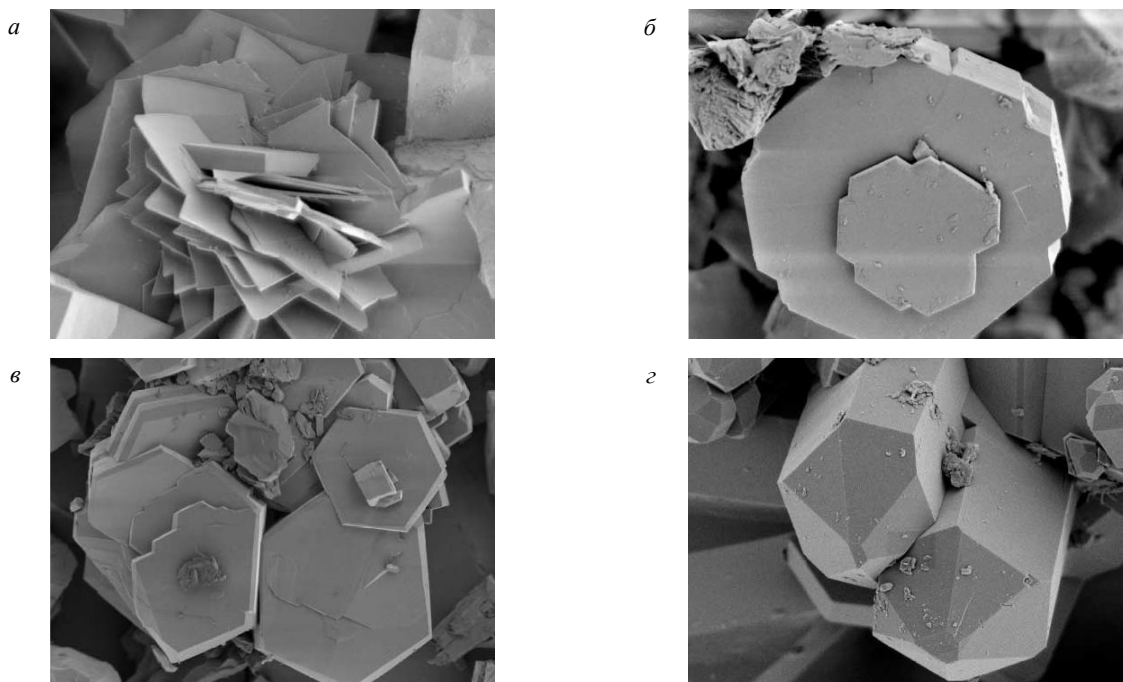


Рис.2. Формы роста кристаллов гибbsite, образующихся при осаждении из алюминатных растворов [2]:  
*а* – сложный агрегат, образованный путем расщепления в плоскости симметрии гибbsiteа пластинчатых двойников по  $\{110\}$ ; *б* – автоэпитаксия двойника гибbsiteа; *с* – сложный расщепленный относительно оси симметрии кристалл гибbsiteа, образованный при участии процессов двойникования и эпитаксии; *г* – двойник гибbsiteа по  $\{100\}$

Таким образом, наблюдается закономерное влияние неравновесных условий кристаллизации гибbsiteа на его производные свойства посредством механизмов, преимущественно реализуемых в данных условиях, а доля участия конкретного механизма определяется его кинетическими характеристиками.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бричкин В.Н. Рост и морфология технического гидроксида алюминия / В.Н.Бричкин, Е.В.Сизякова // Цветные металлы. 2006. № 9. С.62-65.
2. Кузнецов С.И. Характер роста кристаллов гидраргиллита в процессе декомпозиции алюминатных растворов // Цветные металлы. 1956. № 11. С.59-63.
3. Трейвус Е.Б. Кинетика роста и растворения кристаллов. Л.: Изд-во ЛГУ, 1979. 248 с.

4. Sweegers C. Morphology, evolution and other characteristics of gibbsite crystals grown from pure and impure aqueous sodium aluminate solutions / C.Sweegers, H.C. de Coninck, H.Meeke and other // Journal of Crystal Growth. 2001. V.233. P.567-582.

#### REFERENCES

1. Brichkin V.N., Sizyakova E.V. Growth and Morphology of technical aluminum hydroxide // Non-Ferrous Metals. 2006. N 9. P.62-65.
2. Kuznetsov S.I. Nature of crystal growth hydrargillite during decomposition of aluminate solutions // Non-Ferrous Metals. 1956. N 11. P.59-63.
3. Treyvus E.B. Kinetics of growth and dissolution of crystals. Leningrad University Publishers. 1979. 248 p.
4. Sweegers C. Morphology, evolution and other characteristics of gibbsite crystals grown from pure and impure aqueous sodium aluminate solutions / C.Sweegers, H.C. de Coninck, H.Meeke and other // Journal of Crystal Growth. 2001. V.233. P.567-582.

**О.А.ДУБОВИКОВ**, канд. техн. наук, доцент, (812)328-86-60  
**Н.В.НИКОЛАЕВА**, канд. техн. наук, ассистент, (812)328-82-85  
*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

**O.A.DUBOVIKOV**, PhD in eng. sc., associate professor, (812)328-86-60  
**N.V.NIKOLAEVA**, PhD in eng. sc., assistant (812)328-82-85  
*Saint Petersburg State Mining University*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ БОКСИТОВ

Представлены результаты выщелачивания термоактивированных кремнийсодержащих минералов щелочесодержащими растворами. Показано, что при обескремнивании боксита наблюдается постепенное затормаживание растворения диоксида кремния и оксида алюминия за счет образования экранирующего слоя. Увеличение температур выщелачивания, обжига и кремневого модуля исходного боксита приводит к возрастанию коэффициента торможения.

**Ключевые слова:** выщелачивание, термоактивация, бокситы, обескремнивание.

## PROCESS STUDY OF CONDITIONING OF BAUXITES

Results of desalination thermoactivated siliceous minerals alkali-containing are presented by solutions. Testify that at desilication bauxite it is observed gradual braking dissolution of a dioxide of silicon and alumina oxide at the expense of formation of a shielding layer. The increase in temperatures desalination roasting and the silicon module of initial bauxite leads to increase of factor of braking.

**Key words:** extraction, thermoactivation, bauxites, desiliconization.

Обескремниванием боксита, заключающемся в выщелачивании исходных или термоактивированных кремнийсодержащих минералов щелочесодержащими растворами, в отдельных случаях удастся поднять кремневый модуль низкосортного сырья в несколько раз и получить бокситовый концентрат, пригодный для переработки по способу Байера [2, 5]. Однако технология обескремнивания осложняется тем, что выщелачивание диоксида кремния и частичное растворение оксида алюминия в щелочном растворе сопровождается вторичным процессом – образованием гидроалюмосиликата натрия (ГАСН), осаждающимся на частицах твердой фазы. Создавая преграду для непосредственного контакта минералов боксита с раствором, он тем самым снижает степень обескремнивания боксита. Анало-

гичное тормозящее действие оказывает слой пористых остатков выщелачивания, сохраняющих скелетную структуру исходных бокситовых частиц. Соответственно нарастанию слоя и изменению его пористости растет влияние диффузионной составляющей скорости процесса, которая становится соизмеримой со скоростью химического взаимодействия. Затем с увеличением глубины взаимодействия боксита со щелочным раствором скорость начинает лимитироваться скоростью диффузии.

Для описания представленной модели химического кондиционирования бокситов были приняты следующие допущения и обозначения:

1) реагирующие со щелочным раствором компоненты равномерно распределены в общей массе боксита;



2) взаимодействие компонентов боксита с раствором происходит в толще твердой фазы, не нарушая ее структуры;

3) поверхность взаимодействия остается постоянной;

4)  $\alpha$ ,  $\alpha_1$ , и  $\alpha_2$  – количество компонента соответственно в растворе, прореагировавшего с раствором и в образовавшемся ГАС-Не (в долях единицы от содержания в исходном боксите);

5)  $\tau$  – время взаимодействия, ч;

6)  $M$  и  $\beta$  – суммарная скорость реакции и коэффициент торможения в уравнении Дроздова – Ротиняна [1, 4];

7)  $A$ ,  $B$  и  $C$  – коэффициенты полинома.

Математическое описание принятой модели кондиционирования бокситов может быть выведено из следующих концепций. Растворение оксидов алюминия и кремния бокситов только в начальной стадии определяется скоростью химической реакции, на это указывает энергия активации [3]. Затем растворение тормозится обволакивающим частицы слоем и, как показали проведенные нами исследования, с достаточной степенью точности описывается уравнением Дроздова – Ротиняна

$$\frac{1}{\tau} \ln \frac{1}{1-\alpha_1} - \beta \frac{\alpha_1}{\tau} = M. \quad (1)$$

Кинетические кривые процесса кристаллизации ГАСНа имеют характерную S-образную форму, следовательно, процесс характеризуется автоускорением. Причиной автоускорения может быть протекание процесса в несколько последовательных стадий и автокатализ продуктом. При этом нельзя провести четкую границу между окончанием процесса зародышеобразования и началом процесса роста кристаллов, как это делается по флуктуационной теории. Поэтому по экспериментальным данным было подобрано уравнение в виде полинома, описывающее процесс кристаллизации ГАСНа,

$$\alpha_2 = A(\tau - C)^{1/3} - B. \quad (2)$$

В общем виде обескремнивание бокситов относится к последовательным реакциям. Изменение количества компонента в

щелочном растворе имеет экстремальный характер:

$$\alpha = \alpha_1 - \alpha_2. \quad (3)$$

Максимальная концентрация компонента в растворе будет отвечать условию

$$\frac{d\alpha_1}{d\tau} = \frac{d\alpha_2}{d\tau}.$$

Поскольку прикладной интерес представляет извлечение диоксида кремния и оксида алюминия из боксита в раствор, то для определения оптимальной продолжительности обескремнивания и нахождения соответствующего ей извлечения компонента в раствор были проведены следующие преобразования. Из уравнений (1) и (2) следует

$$\frac{d\alpha_1}{d\tau} = \frac{M}{\frac{1}{1-\alpha_1} - \beta} \text{ и } \frac{d\alpha_2}{d\tau} = \frac{A}{(\tau - C)^{2/3}}.$$

Приравняем первые производные и решим относительно  $\alpha_1$ :

$$\alpha_1 = 1 - \frac{A}{3M(\tau_{\max} - C)^{2/3} + A\beta}. \quad (4)$$

Тогда максимальное извлечение компонента из боксита

$$\alpha_{\max} = 1 - \frac{A}{3M(\tau_{\max} - C)^{2/3} + A\beta} - A(\tau_{\max} - C)^{1/3} - B, \quad (5)$$

где  $\tau_{\max}$  соответствует моменту равенства скоростей

$$\frac{d\alpha_1}{d\tau} = \frac{d\alpha_2}{d\tau}.$$

Для численного определения  $\tau_{\max}$  выражение (4) подставим в уравнение (1) и, преобразовав, получим

$$\tau_{\max} = \frac{1}{M} \left\{ \beta \left[ \frac{A}{3M(\tau_{\max} - C)^{2/3} + A\beta} - 1 \right] - \ln \frac{A}{3M(\tau_{\max} - C)^{2/3} + A\beta} \right\}. \quad (6)$$

Таблица 1

## Вещественный состав бокситов

Номер пробы	Содержание, %								Кремневый модуль $\mu_{Si}$
	ППП	$Al_2O_3$	$SiO_2$	$Fe_2O_3$	FeO	$TiO_2$	CaO	$R_2O$	
1	11,75	43,13	18,97	21,94	—	2,39	0,07	—	2,27
2	12,41	41,00	10,35	29,6	7,4	—	0,85	0,13	3,90
3	12,48	47,06	11,60	28,5	—	—	—	—	4,05
4	11,70	44,63	8,81	29,78	—	2,86	0,83	—	5,06
5	12,54	48,05	7,95	28,0	3,54	—	0,70	0,15	6,00

Таблица 2

Численные значения коэффициентов  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $M$  и  $\beta$ 

Боксит $\mu_{Si}$	Температура, °C		$A \cdot 10^3$	$B \cdot 10^2$	$C$	$M \cdot 10^5$	$\beta$
	обжига	обескремнивания					
Диоксид кремния							
2,27	950	70	53,8	11,00	0,45	9000	1,345
2,27	950	80	139,3	22,00	0,79	6000	1,361
2,27	950	90	174,6	30,00	0,50	15000	1,401
4,05	925	80	74,3	11,00	1,02	3100	1,348
4,05	950	80	56,9	11,50	1,49	3100	1,405
4,05	975	80	62,0	12,00	2,50	4300	1,553
5,06	950	80	16,8	7,54	3,12	848	1,684
Оксид алюминия							
2,27	950	70	23,7	4,84	0,45	700	1,092
2,27	950	80	61,3	9,68	0,79	500	1,108
2,27	950	90	76,8	13,20	0,50	900	1,114
4,05	925	80	18,4	2,73	1,02	44	1,044
4,05	950	80	14,1	2,85	1,49	33	1,042
4,05	975	80	15,0	3,00	2,50	15	1,026
5.06	950	80	3,3	1,49	3,12	2	1,018

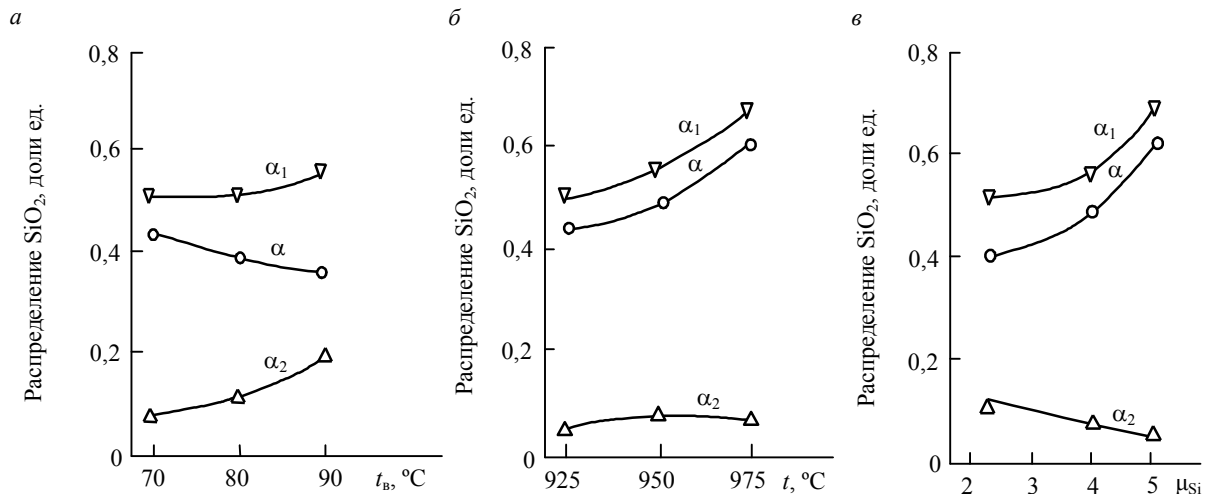
Для идентификации математического описания модели были проведены технологические опыты. Пробы бокситов Среднего Тимана (табл.1) измельчались до крупности –147 мкм.

Далее исходные или обожженные при температурах 925; 950; 975 °C бокситы обескремнивались щелочными растворами в интервале температур 70-90 °C при перемешивании пропеллерной мешалкой в режиме развитой турбулентности (критерий  $Re \geq 10000$ ). Концентрация щелочи натриевой, калиевой или их смеси поддерживалась постоянной (150 г/л  $R_2O_K$ ), так же как и соотношение жидкой фазы к твердой Ж:Т = 10:1. В каждом отдельном случае

изучали распределение во времени диоксида кремния и оксида алюминия и определяли входящие в уравнения (5) и (6) коэффициенты (табл.2).

По уравнению (6) определяли момент максимального извлечения компонента из боксита в раствор, а по уравнениям (2-4) – соответствующее этому моменту времени распределение компонента. Расчетные данные для диоксида кремния приведены на рисунке. Зависимости для оксида алюминия носят аналогичный характер.

Сопоставляя полученные результаты, можно сделать следующее заключение. Характерной чертой процесса обескремнивания обожженного боксита является посте-



Распределение диоксида кремния в зависимости от температур выщелачивания (а), обжига (б) и кремневого модуля боксита (в)

Таблица 3

Результаты обескремнивания исходных бокситов

Содержание в растворе	Время $\tau$ , ч	Твердая фаза						Извлечение в раствор SiO <sub>2</sub> , %
		Содержание, %					Кремневый модуль $\mu_{\text{Si}}$	
		Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
Исходный боксит ( $\mu_{\text{Si}}$ 3,90 )								
2,42 моль/л Na <sub>2</sub> O <sub>к</sub>	0,25	0,12	—	39,9	5,90	29,00	6,76	41,8
	0,50	0,13	—	40,0	5,80	28,93	6,90	42,7
	1,00	0,14	—	39,9	6,15	27,89	6,49	36,9
	1,5	0,13	—	40,0	6,35	28,91	6,30	37,2
	2,00	0,15	—	39,9	6,35	29,01	6,28	37,4
1,59 моль/л K <sub>2</sub> O <sub>к</sub>	0,25	—	0,095	39,9	8,45	29,00	4,72	16,7
	0,50	—	0,097	39,9	8,15	28,91	4,90	19,4
	1,00	—	0,094	39,9	7,70	29,01	5,18	24,1
	1,5	—	0,095	40,0	8,00	29,83	5,00	23,3
	2,00	—	0,096	40,0	8,00	29,54	5,00	22,6
Исходный боксит ( $\mu_{\text{Si}}$ 6,00 )								
2,42 моль/л Na <sub>2</sub> O <sub>к</sub>	0,25	0,110	—	48,9	5,15	28,00	9,50	35,2
	0,50	0,112	—	48,2	4,20	27,91	11,5	47,0
	1,00	0,121	—	48,0	4,40	27,83	10,9	44,3
	1,50	0,110	—	42,9	4,55	28,00	9,44	42,8
	2,00	0,111	—	48,8	5,00	27,65	9,77	36,3
1,59 моль/л K <sub>2</sub> O <sub>к</sub>	0,25	—	0,021	48,0	6,00	27,85	8,00	24,1
	0,50	—	0,073	47,9	5,90	28,01	8,12	25,8
	1,00	—	0,068	48,0	5,10	27,89	9,41	35,6
	1,5	—	0,070	48,0	5,10	27,75	9,41	35,3
	2,00	—	0,069	47,9	5,50	27,69	8,71	30,0
2,19 моль/л R <sub>2</sub> O <sub>к</sub>	0,25	0,160	0,080	48,0	6,06	28,01	7,92	23,8
	0,75	0,160	0,081	47,9	5,76	27,61	8,32	26,5
	1,00	0,160	0,082	48,0	4,60	27,65	10,4	41,4
	1,50	0,160	0,080	47,9	5,30	28,00	9,04	33,3
	2,00	0,160	0,080	47,8	5,90	28,00	8,11	25,8

пенное затормаживание растворения диоксида кремния и оксида алюминия за счет образования экранирующего слоя. Увеличение температур выщелачивания, обжига и кремневого модуля исходного боксита приводит к возрастанию коэффициента торможения, при этом наблюдается различное влияние образующейся пленки ГАСНа и слоя остатков от выщелачивания. Так, увеличение температуры выщелачивания интенсифицирует кристаллизацию ГАСНа, степень же растворения и связанный с ней слой остатков выщелачивания остаются практически постоянными. С возрастанием температуры обжига, за счет термоактивации алюмосиликатов, происходит более глубокое обескремнивание боксита, а вместе с ним уменьшающееся ядро взаимодействия твердой фазы экранируется более толстым слоем остатков. Если повышение температуры обжига вызывает качественные изменения в боксите, то с кремневым модулем связаны количественные изменения. Более качественный боксит содержит меньше диоксида кремния и активного оксида алюминия, представленных алюмосиликатами. Концентрация их в растворе, влияющая на образование ГАСНа, уменьшается и, как в предыдущем случае, торможение растворения связано с остатками выщелачивания.

Поскольку во время обжига происходит не только термическая активация алюмокремневых минералов, но и частичная пассивация образующегося оксида алюминия, поэтому и процесс обескремнивания исходных бокситов носит иной характер (табл.3).

Насыщение щелочного раствора оксидом алюминия происходит быстрее, а это интенсифицирует кристаллизацию ГАСНа, о чем свидетельствует содержание щелочи в

твердой фазе на постоянном уровне и более низкое извлечение в раствор диоксида кремния. Замена натриевой щелочи на калиевую или их смесь понижает мольную концентрацию, что в свою очередь снижает извлечение в раствор диоксида кремния.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дроздов Б.В. Кинетика процесса цементации // Труды 2-й Всесоюзной конференции по теоретической и прикладной химии. Киев, 1949. С.106-107.
2. Дубовиков О.А. О переработке некондиционных бокситов Казахстана / О.А.Дубовиков, А.Н.Наумчик, Н.И.Еремин // Записки Горного института. 1978. Т.78. С.42-44.
3. Кинетика обескремнивания обожженного боксита щелочными растворами / О.А.Дубовиков, А.Н.Наумчик, Н.И.Еремин и др. // Цветная металлургия. 1980. № 10. С.41-43.
4. Ротинян А.Л. Кинетика процесса обжига, выщелачивания, промывки и цементации / А.Л.Ротинян, Б.В.Дроздов // ЖОХ. 1949. Т.19. Вып.10. С.1843-1852.
5. Федосеев В.И. Выщелачивание гидраргиллитовых бокситов с повышенным содержанием каолинита алюминатными растворами с различным каустическим отношением / В.И.Федосеев, Ф.Ф.Федяев, С.И.Кузнецов // Известия вузов. 1977. № 4. С.74-78.

## REFERENCES

1. Drozdov B.V. Kinetics of process cementations // Works 2 All-Union conferences on theoretical and applied chemistry. Kiev, 1949. P.106-107.
2. Dubovikov O.A., Naumchik A.N., Eryomin N.I. About processing of sub-standard bauxites of Kazakhstan // The Proceedings of the Mining Institute. 1978. V.78. P.42-44.
3. Dubovikov O.A., Naumchik A.N., Eryomin N.I. Kinetics of desiliconization the burned bauxite alkaline solutions // Nonferrous metallurgy. 1980. N 10. P.41-43.
4. Rotinjan A.L., Drozdov B.V. Kinetics of process of burning, extraction, washings and cementations // MGC. 1949. V.19. Issue 10. P.1843-1852.
5. Fedoseyev V.I., Fedjaev F.F., Kuznetsov S.I. The extraction bauxites with the raised maintenance kaolin solutions with various caustic the relation // News of high schools. 1977. N 4. P.74-78.



**В.Б.КУСКОВ**, канд. техн. наук, доцент, (812)328-82-85

**В.В.ЛВОВ**, канд. техн. наук, ассистент, (812)328-82-85

*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

**V.B.KYSKOV**, PhD in eng. sc., associate professor, (812)328-82-85

**V.V.LVOV**, PhD in eng. sc., assistant lecturer, (812)328-82-85

*Saint Petersburg State Mining University*

## ОБОГАЩЕНИЕ УГЛЕЙ В ГИДРОЦИКЛОНЕ С АВТОМАТИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ

Конструкция обогатительного гидроциклона «Water-only» для обогащения угля разработана и испытана. Разработана схема автоматического управления работой гидроциклона. Применение автоматического управления позволило повысить технологические показатели обогащения.

**Ключевые слова:** автоматизация, классификация, обогащение, уголь, гидроциклон «Water-only».

## METHOD FOR COAL PREPARATION WITH AUTOMATIC CONTROL

The design of a concentrating hydrocyclone «Water-only» for coal preparation is developed and tested. The scheme of automatic control is developed by hydrocyclone work. Automatic control application has allowed raising technological indices of concentration.

**Key words:** automation, classification, concentration, coal, hydrocyclone «Water-only».

Как известно, гидроциклоны обычно применяются в качестве классифицирующих аппаратов, а также для обезвоживания и обесшламливания. Для обогащения обычно применяются тяжелосредние (суспензионные) гидроциклоны, в которых производится разделение сравнительно мелких частиц по плотности в тяжелой суспензии\*. Суспензионные гидроциклоны, несмотря на высокую эффективность разделения, имеют и ряд недостатков. В таких аппаратах необходимо использовать утяжелитель, который приходится постоянно покупать, так как часть утяжелителя безвозвратно те-

ряется с продуктами разделения. Кроме того, схемы обогащения в тяжелосредних гидроциклонах сложны. Они кроме собственно операции разделения в гидроциклоне включают и операции приготовления суспензии, отмывки и регенерации утяжелителя, что приводит к существенному удорожанию процесса.

Еще одним видом обогатительных циклонов являются так называемые короткоконусные гидроциклоны (сейчас их часто называют циклоны «Water-only»). Было установлено, что с увеличением угла конусности циклона все больше проявляется влияние плотности частиц на результаты их разделения. Так, циклоны, использующиеся для классификации (угол конусности 10 или 20°), делят частицы преимущественно по крупности, а циклоны с углом конусности 90° и более – по плотности.

\* Иофа М.Б. Обогащение мелкого угля в тяжелосредних гидроциклонах / М.Б.Иофа, Л.С.Зарубин, В.И.Хайдактн. М.: Недра, 1978.

*Iofa M.B., Zarubin L.S., Khaidaktn V.I. Enrichment of fine coal in hydrocyclones with the heavy environment. Moscow: Nedra, 1978.*

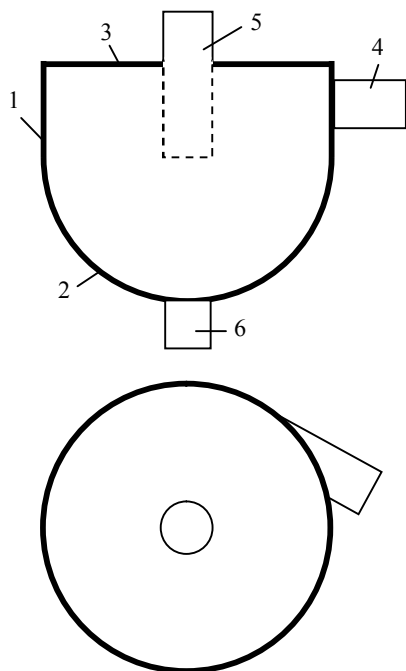


Рис.1. Обогащительный циклон с параболической нижней частью  
1 – цилиндрическая; 2 – параболическая;  
3 – верхняя плоская крышка; 4 – питающий патрубок; 5 – сливной патрубок; 6 – песковая насадка

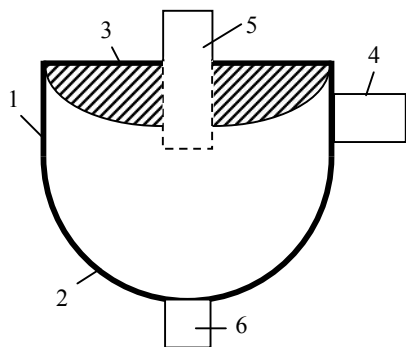


Рис.2. Обогащительный циклон с параболической верхней частью  
1 – цилиндрическая; 2 – параболическая;  
3 – верхняя параболическая крышка; 4 – питающий патрубок; 5 – сливной патрубок; 6 – песковая насадка

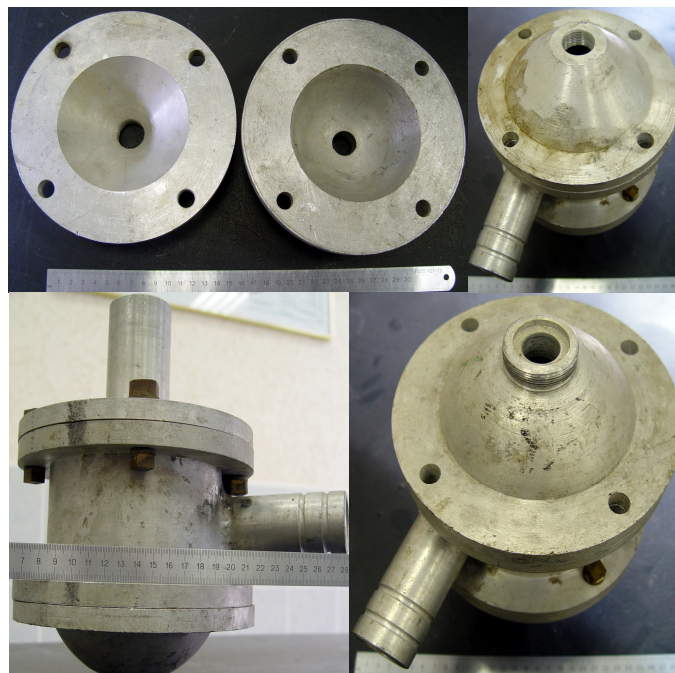


Рис.3. Опытные образцы гидроциклонов

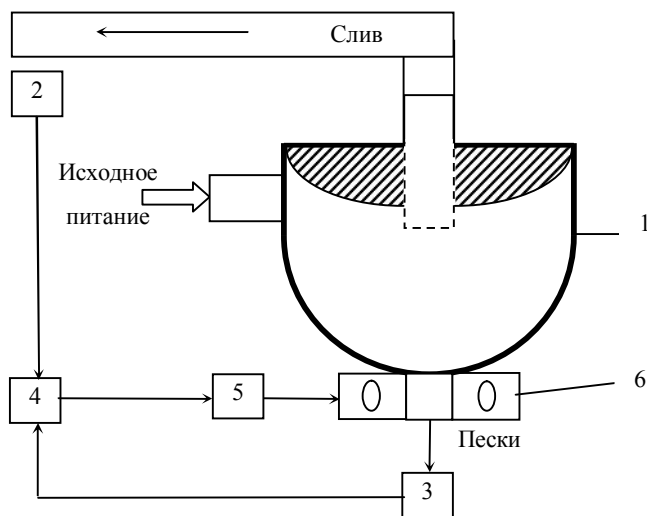


Рис.4. Схема автоматического управления гидроциклоном

На результаты разделения в циклонах «Water-only» влияют те же факторы, что и на работу обычных классифицирующих гидроциклонов (диаметр циклона, угол конусности, размеры патрубков, давление на входе и т.д.). Кроме того, появляются новые факторы: профиль конической части, высота

цилиндрической части и некоторые другие факторы.

Были испытаны гидроциклоны разных размеров и с различными профилями рабочих поверхностей. Из испытанных конструкций наилучшие показатели дали гидроциклоны с параболической нижней частью (рис.1).

Математическое моделирование показало, что для повышения эффективности разделения в таком циклоне верхнюю крышку лучше изготавливать не плоской, а параболической, повторяющей профиль нижней части (рис.2).

Внешний вид опытных образцов гидроциклонов приведен на рис.3.

Серия предварительных исследований была направлена в основном на экспериментальное подтверждение работоспособности такого аппарата, а также на разработку схемы его автоматизации.

Эксперименты показали, что при разжижении пульпы (Ж:Т) меньше 5 %, существенно ухудшаются технологические показатели. Увеличение разжижения от 5 до 10 % фактически не улучшает технологические показатели, но при этом снижается производительность по твердому, растут затраты на дальнейшее обезвоживание. Поскольку соотношение Ж:Т исходных шламов меньше 5 %, то, очевидно, что разделение в циклоне следует вести при минимально возможном соотношении Ж:Т, а именно от 5 до 6 %. Поэтому первой задачей автоматизации процесса обогащения в циклоне является автоматическое поддержание Ж:Т

в этих пределах. Это позволит получить оптимальные технологические показатели и снизить затраты на обогащение за счет минимизации расхода воды и снижении затрат на обезвоживание.

Существенно влияет на работу гидроциклонов (особенно обогатительных) давление на его входе. Для стабилизации давления на входе в суспензионный циклон обычно подается питание не через насос, а через специальный напорный бак. Но такая подача усложняет технологическую схему за счет нестабильного уровня угольных шламов в баке и увеличивает капитальные затраты. Автоматическое регулирование давления на входе производится с помощью насоса, оснащенного двигателем с регулируемой частотой вращения, и позволяет упростить и удешевить процесс без снижения технологических показателей.

На рис.4 представлена принципиальная схема автоматизации гидроциклона. Реализация управления происходит следующим способом. Измеряют расход пульпы в сливе и песках гидроциклона 1 расходомерами 2 и 3. Данные в виде электрических сигналов поступают в регулирующий микроконтроллер 4. В микроконтроллере

Результаты испытаний гидроциклона

Показатель гидроциклона	Выход, %	Содержание, %		Извлечение, %	
		Зола	Сера общая	Зола	Сера общая
Плоская верхняя крышка					
Хвосты	45,2	65,60	1,42	76,98	66,50
Концентрат	54,8	16,18	0,59	23,02	33,50
Итого:	100,0	38,52	0,97	100,00	100,00
Параболическая верхняя крышка					
Хвосты	45,9	66,61	1,61	79,26	76,06
Концентрат	54,1	14,79	0,43	20,74	23,94
Итого:	100,0	38,58	0,97	100,00	100,00
Плоская верхняя крышка (с автоматическим управлением)					
Хвосты	46,1	69,32	1,72	82,50	83,53
Концентрат	53,9	12,58	0,29	17,50	16,47
Итого:	100,0	38,74	0,95	100,00	100,00
Параболическая верхняя крышка (с автоматическим управлением)					
Хвосты	46,9	71,22	1,81	86,27	88,39
Концентрат	53,1	10,01	0,21	13,73	11,61
Итого:	100,0	38,72	0,96	100,00	100,00

они сравниваются с заданной величиной соотношения измеренных расходов, которые определяются при тарировке системы в зависимости от типа руд. При разбалансе с учетом знака полученного рассогласования вырабатывается управляющий импульс, который через исполнительный механизм 5 воздействует на регулирующий орган 6, изменяя сечение песковой насадки, чтобы убрать возникший разбаланс (при увеличении соотношения разбаланса дается команда на увеличение песковой насадки и наоборот). Для управления песковой насадкой предлагается резиновая насадка – тор\*, управляемая с помощью пневматического исполнительного механизма.

Применение данного способа автоматического управления гидроциклоном позволяет улучшить качество разделения и поддержать заданную крупность углей, что сказывается на технико-экономических показателях обогащения.

Предварительные испытания велись на угольных шламах крупностью – 1 мм (см. таблицу). Основные параметры гидроцилона: диаметр и высота цилиндрической части 100 мм, высота нижней параболической части 60 мм.

Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

---

\* Поваров А.М. Способ автоматического регулирования гидроциклоном / А.М.Поваров, М.Г.Забиров // Обогащение руд. 1958. № 3.

*Povarov A.M., Zabirov M.G. A way of automatic control by a hydrocyclone // Enrichment of ores. 1958. N 3.*

**С.А.МИРВАЛИЕВ**, аспирант, *sergey\_sl\_85@mail.ru*  
**А.Н.ТЕЛЯКОВ**, канд. техн. наук, ассистент, *9418960@mail.ru*  
**В.В.НАПСИКОВ**, аспирант, *luxorient@mail.ru*  
**С.Н.САЛТЫКОВА**, канд. техн. наук, доцент, *ssn\_58@mail.ru*  
**Н.М.ТЕЛЯКОВ**, д-р техн. наук, профессор, *ptpe\_spmi@bk.ru*  
Санкт-Петербургский государственный горный университет

**S.A.MIRVALIEV**, post-graduate student, *sergey\_sl\_85@mail.ru*  
**A.N.TELYAKOV**, PhD in eng. sc., assistant lecturer, *9418960@mail.ru*  
**V.V.NAPSIKOV**, post-graduate student, *luxorient@mail.ru*  
**S.N.SALTYKOVA**, PhD in eng. sc., associate professor, *ssn\_58@mail.ru*  
**N.M.TELYAKOV**, Dr. in eng. sc., professor, *ptpe\_spmi@bk.ru*  
Saint Petersburg State Mining University

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРА РЕЖИМА ПЛАВКИ СУЛЬФИДНОГО МАТЕРИАЛА В АППАРАТЕ ГАЗОСТРУЙНОГО ВРАЩЕНИЯ

При разработке новых технологий для плавки сульфидных концентратов на штейн и аппаратного оформления к ним особое внимание следует уделять возможности управления степенью окисления расплава в реакционной зоне и равномерности процесса окисления. В связи с этим развитие теории окисления и поведения сульфидов в расплаве имеет большое значение для проектирования аппаратов плавления сульфидных концентратов и выявления возможности управления ими.

**Ключевые слова:** сульфидный концентрат, плавка, автогенный процесс, окисление, штейн, цветные металлы.

## CHARACTER DETERMINATION OF FUSION MODE OF SULPHIDIC MATERIAL IN THE GAS-JET ROTATION DEVICE

By working out of new technologies for fusion of sulphidic concentrates on matte and hardware registration to them special attention it is necessary to give possibilities of management of oxidation degree of malt in a reactionary zone and uniformity of oxidation process. In this connection development of the oxidation theory and behavior of sulfides in malt is of great importance for designing of fusion devices of sulphidic concentrates and revealing of management possibility of them.

**Key words:** sulphidic concentrate, fusion, autogenous process, oxidation, matte, nonferrous metals.

Авторами предложен новый аппарат для переработки сульфидных концентратов с целью повышения извлечения цветных металлов и увеличения производительности переработки в сравнении с аналогичными технологиями. С точки зрения контроля степени окисления расплава рассмотрена проблема точного контроля расхода воздуха, подаваемого в реакционную зону. Также

проводится анализ тепловой работы агрегата на основе создания математической модели для определения границ автогенных режимов работы.

В работе [1] установлено, что окисление пирита – основного сульфидного соединения медно-никелевых концентратов и источника тепла – протекает в две стадии. На первой происходит разложение пирита с об-



разованием элементарной серы, причем сера выделяется с высокой скоростью и полностью, образуя при этом большие концентрации сернистого газа. Поэтому при плавке сульфидных руд, наряду с реакцией окисления сульфидов кислородом воздуха в условиях недостатка кислорода, протекает реакция взаимодействия сульфидов с диоксидом серы. При этом окисление диоксидом серы сульфидов кобальта и никеля происходит в меньшей степени, чем окисление им сульфида железа из-за различий в энергиях активаций реакций. С учетом этого появляется возможность уменьшить предполагаемое переокисление расплава при приближении тепломассообмена к идеальному.

Для создания агрегата с интенсивным тепломассообменом нами предлагается аппарат струйного вращения [2]. Плавка проводится в цилиндрической реакционной камере с продувкой штейно-шлакового расплава газовыми струями высокого давления, направленными под углом к поверхности расплава 15-20° на радиальном расстоянии 0,7-0,8 радиуса ванны. При этом происходит вращение расплава и интенсивное перемешивание. Вследствие тангенциальной направленности струй к поверхности расплава разбрызгивание возможно в меньшей степени [3]. Продувка проводится строго дозированно с расходом дутья, близким к стехиометрически необходимому, что при интенсивном тепломассообмене предупреждает возможное переокисление и повышает степень извлечения цветных металлов.

Загрузка измельченной шихты производится сверху, после чего вновь поступившая шихта затягивается в центральную часть расплава. Слив осуществляется через сливной порог в электротермический коллектор, где при поддержании электричеством необходимой температуры расплав разделяется на шлак и штейн.

Для определения расхода воздуха при постоянной температуре (20 °С) использовали следующую методику. Герметичный резервуар объемом 40 л с закрытой заслонкой заполняли водой, далее включали подачу воздуха в резервуар через шланг, задавая необходимое избыточное давление в систе-

ме подвода воздуха, при этом избыточное давление в резервуаре увеличивалось. Затем открывали заслонку и через отверстие  $D = 100$  мм сливали воду с расходом, определяемым по «нулевому» показанию дифманометра системы, когда расход воздуха равен расходу воды. С помощью секундомера и шкалы на резервуаре определяли расход воды, равный расходу воздуха. Простота и наглядность устройства позволяют не сомневаться в достоверности эксперимента.

Обработка результатов эксперимента позволила получить эмпирическую формулу для определения удельного расхода воздуха с целью точного контроля расхода воздуха и степени окисления расплава ( $R = 0,99$ ):

$$Q_{\text{об}} = 4,99D^2 \exp \times \left[ -\frac{\left(\frac{D-3,72}{1,211}\right)^2 + \left(\frac{P_{\text{изб}} - 4,218}{2,364}\right)^2}{2} \right], \quad (1)$$

где  $D$  – диаметр отверстия, мм;  $P_{\text{изб}}$  – избыточное давление воздуха в насадке, Па.

Глубина проникновения струи в расплав  $H_{\text{пр}}$  по формуле, предложенной В.И.Баптизманским [4],

$$H_{\text{ю}} = \left[ k \frac{P^{0,5} d^{0,6}}{\left(1 + \frac{H_{\delta}}{dB}\right) \gamma_{\text{ж}}^{0,4}} + H_{\delta} \right] \cos \alpha - H_{\delta}, \quad (2)$$

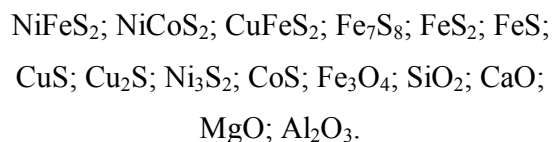
где  $k$  – коэффициент, зависящий от свойств газа, для воздуха  $k = 40$ ;  $P$  – избыточное давление в фурме, Па;  $d$  – диаметр отверстия истечения, мм;  $H_{\delta}$  – высота фурмы над расплавом, мм;  $B$  – коэффициент, зависящий от вязкости жидкости, для штейно-шлакового расплава  $B = 40$ ;  $\gamma_{\text{ж}}$  – плотность расплава, для штейно-шлакового расплава  $\gamma_{\text{ж}} = 4 \text{ г/см}^3$ ;  $\alpha$  – угол наклона фурм.

Высота фурмы над расплавом  $H_{\text{ф}}$ , определяемая на основании условия безопасности ее эксплуатации и достаточной энергии струи при встрече с поверхностью расплава,

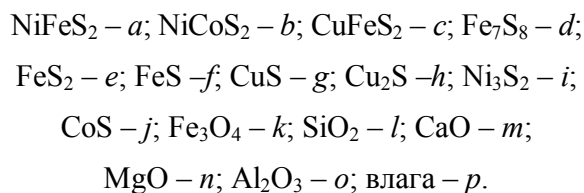
составляет 10-20 диаметров. Высота слоя, который не пробивает струя воздуха  $H_{\text{без}}$ , задается для предотвращения прогорания футеровки.

Предложенная технология может быть использована для переработки различных видов сульфидного сырья. В зависимости от его состава возможны различные режимы тепловой работы агрегата. Однако при малом содержании серы в сырье недостаточно тепла для обеспечения автогенного режима работы агрегата. В этом случае возможна подача в расплав вместе с кислородом дутья необходимого количества горючего топлива через дополнительные отверстия в фурмах распылением в струю воздушного дутья. Для определения режима плавки по основным параметрам предложена математическая модель.

Сульфидный концентрат может поступать на плавку до получения штейна и шлака в следующем вещественном составе:



Обозначим процентный состав концентрата следующим образом:



Примем, что

$$a + b + c + d + e + f + g + h + i + j + k + l + m + n + o + p = 100 \text{ \%}.$$

Тепловая работа аппарата газоструйного вращения в зависимости от параметров  $\beta$ ,  $\delta$ ,  $\gamma$ ,  $\varepsilon$ ,  $\sigma$ ,  $\alpha_n$ ,  $q$ ,  $X$  распределяется следующим образом:

$$\begin{aligned} & (1 - \sigma)(\beta(2585,931a + 2517,587c + \\ & + 4998,393d + 3852,596 + 5255,924f)) + \\ & + \gamma(1067,126c + 2045,727g + 2458,815h) + \\ & + \delta(2075,139a + 2038,082b + 4632,007i) + \\ & + \varepsilon(1931,253b + 3854,816j) + 675,556a + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + 664,297b + 979,557c + 551,704d + \\ & + 3006,226e + 1891,558g - 656,44k - 26,25l + \\ & + 2625 + 26 \frac{\alpha_n}{q} Z + 43540X = \\ & = \beta(854,352a + 796,068c + 1583,532d + \\ & + 1219,248e + 1662,96f) + \\ & + \gamma(508,344c + 974,568g + 1172,844h) + \\ & + \beta(721,656a + 707,088b + 1609,428i) + \\ & + \varepsilon(825,096b + 1644,084j) + \\ & + 1716 \frac{\alpha_n}{q} (1 - q)Z + 1812(\alpha_n - 1)Z + \\ & + 1141,049a + 1154,315b + 1230,704c + \\ & + 1102,532d + 2294,834e + 816f + 1567,157g + \\ & + 916,98h + 951,66i + 839,46j + 1155,542k + \\ & + 1560m + 1560n + 1560o + Z = \\ & = \beta(0,188a + 0,183c + 0,363d + \\ & + 0,280e + 0,382f) - 0,048k + \\ & + \gamma(0,091c + 0,175g + 0,211h) + \\ & + \delta(0,146a + 0,143b + 0,326i) + \\ & + \varepsilon(0,185b + 0,369j) + 0,042a + 0,041b + \\ & + 0,061c + 0,034d + 0,186e + 0,117g, \end{aligned}$$

где  $\beta$  – степень окисления  $\text{FeS}$ ;  $\delta$  – степень окисления  $\text{Cu}_2\text{S}$ ;  $\gamma$  – степень окисления  $\text{Ni}_3\text{S}_2$ ;  $\varepsilon$  – степень окисления  $\text{CoS}$ ;  $\sigma$  – доля потерь тепла в окружающей среде;  $\alpha_n$  – коэффициент избытка кислорода;  $q$  – доля кислорода в дутье;  $X$  – количество керосина, кг на 100 кг сырья.

На основании описанной модели в среде MS Excel составлен алгоритм выражений, позволяющий при указанных исходных значениях, в том числе и состава концентрата, вычислить конечные параметры процесса. С целью проверки модели на адекватность была проведена серия экспериментов по плавке Соколово-Сарбайского пиритного концентрата, в результате экзотермических реакций выделяемого тепла было достаточно для проведения процесса плавки в авто-

генном режиме, что также подтверждает и математическая модель.

Также модель была построена по сульфидному медно-никелевому концентрату комбината «Печенганикель». Тепла экзотермических реакций, согласно модели, недостаточно и необходимо либо подогревать воздух дутья до температуры 600 °С, либо дополнительно через фурмы подавать в реакционную зону печи топливо. При использовании в качестве топлива керосина на 100 кг концентрата необходимо 1,2 кг при температуре дутья 25 °С.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бумажнов Ф.Т. Исследование физико-химических закономерностей сульфатизирующего обжига // Записки Ленинградского горного института. 1966. Т.16. Вып.3.
2. Баптизманский В.И. Механизм и кинетика процессов в конвертерной ванне // М.: Metallurgizdat, 1960.

3. Пат. № 2236474 РФ. C22B15/06. Способ конвертирования медных и медно-никелевых штейнов / Л.М.Шалыгин, Н.М.Теляков, Г.В.Коновалов. Оpubл. 20.09.2004. Бюл.№ 22.

4. Шалыгин Л.М. Условия подачи дутья в расплавы и разработка средств интенсификации дутьевого режима / Л.М.Шалыгин, Г.В.Коновалов, Т.Р.Косовцева // Записки Горного института. 2006. Т.169.

#### REFERENCES

1. *Bumazhnov F.T.* Research of physicochemical laws of sulphatization burning // *Proceedings of LMI.* 1966. Vol.16. Is.3.
2. *Baptizmansky V.I.* Mechanism and kinetics of processes in the converter bath. Moscow: Metallurgizd, 1960.
3. Pat. N 2236474 RF, WPC C22B15/06. Method of converting copper and copper-nickel matte / Shalygin L.M., Telyakov N.M., Kononov G.V. Publ. 20.09.2004. Bul. N 22.
4. *Shalygin L.M., Kononov G.V., Kosovceva T.R.* The terms of the blast in the melt and the development of an intensification of the blast regime // *Proceedings of Mining Institute.* 2006. Vol.169.

**Г.В.ПЕТРОВ**, *д-р техн. наук, профессор, kafmetall@mail.ru*  
**В.Н.КОВАЛЕВ**, *аспирант, kafmetall@mail.ru*  
*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

**G.V.PETROV**, *Dr. in eng. sc, professor, kafmetall@mail.ru*  
**V.N.KOVALEV**, *post-graduate student, kafmetall@mail.ru*  
*Saint Petersburg State Mining University*

## СУЛЬФАТИЗАЦИОННОЕ ВСКРЫТИЕ ПРОДУКТОВ ПИРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ТЕХНОГЕННЫХ ПЛАТИНОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ

Приведены результаты исследований по сульфатизационному вскрытию платинометалльных штейнов. Обоснована перспективность применения технологии концентрирования платиновых металлов из продуктов переработки техногенных отходов по схеме «плавка на штейн – сульфатизация».

**Ключевые слова:** платиновые металлы, вскрытие, синтетический штейн, сульфатизация, обжиг, концентрат.

## SULPHATIZATION REFINEMENT OF PRODUCTS FROM PYROMETALLURGICAL PROCESSING OF TECHNOGENIC WASTE CONTAINING PLATINUM METALS

The results of studies on sulphatization refinement of mattes, containing platinum metals, it. The perspective of technology concentration of platinum metals from the products of processing man-made waste on a scheme «smelting matte – sulphatization» are justify.

**Key words:** platinum metals, refinement, synthetic matte, sulphatization, firing, concentrate.

Применение при обогащении техногенных отходов, образующихся при переработке медно-никелевых и малосульфидных руд, гравитационно-флотационной схемы концентрирования металлов платиновой группы (МПГ) позволяет выделять платинометалльные продукты, в которых содержание суммы платиновых металлов может достигать 100-500 г/т [2]. Для дополнительного концентрирования МПГ может быть использована электроплавка с получением сульфидного платиносодержащего штейна, широко применяемая при переработке продуктов обогащения хромитовых руд.

Ключевым моментом при создании технологии переработки штейнов является способ их вскрытия либо для перевода МПГ в раствор, откуда благородные металлы из-

влекаются известными методами (например, сорбцией или цементацией), либо для удаления в раствор подавляющей части примесей (цветные металлы и железо) и получения богатого коллективного концентрата МПГ. Учитывая значительный опыт отечественных предприятий по использованию жидкофазной низкотемпературной сульфатизации для удаления цветных металлов из шламов электролиза меди и никеля [1, 3], целесообразно рассмотреть возможность ее применения для рафинирования платиносодержащих штейнов.

Изучение закономерностей поведения цветных и платиновых металлов при сульфатизации осуществлялось на синтетических штейнах следующего состава, %: № 1 – 27,6 Cu; 44,1 Ni; 5,24 Co; 4,3 Fe; 1,25 Pd;

0,26 Pt; 0,04 Rh; 0,03 Ru; №2 – 8,6 Cu; 35,6 Ni; 4,85 Co; 26,6 Fe; 0,77 Pd; 0,17 Pt; 0,035 Rh; 0,026 Ru.

При синтезе штейнов выполнялась плавка шихт, содержащих соответствующие расчетные количества цветных, платиновых металлов и железа. В качестве сульфидизатора использовалась элементарная сера, которая вводилась с большим избытком. Плавка штейна №1 осуществлялась без введения восстановителя. При получении штейна №2 дополнительно вводился древесный уголь. Плавка осуществлялась в алундовых тиглях в муфельной печи при температуре 1600 °С. Полученные синтетические штейны дробили и измельчали до крупности –50 мкм. Сульфатизация синтетических штейнов проводилась в жидкофазном режиме при 180-200 °С в течение 1-6 ч при Ж:Т = 3-5. Выбранные параметры соответствуют режиму переработки электролитных шламов на АО «Комбинат Североникель», при котором обеспечивается полное удаление из них цветных металлов. Продукт сульфатизации выщелачивали водой 2 ч при 80-90 °С. Полученные кеки подвергались прокаливанию в течение 5 ч при 600 °С для удаления селена и серы.

Для проверки выявленных закономерностей использовался экспериментальный сильнометаллизированный штейн (№3) после плавки сульфидного никелевого концентрата, полученный при 1400 °С и расходе

восстановителя (угля) 12 %. Выход сильнометаллизированного штейна составил 42,5 %. Состав штейна №3, %: 7,5 Cu; 41,6 Ni; 7,82 Co; 18,2 Fe; 0,42 SiO<sub>2</sub>; 0,05 Te; 0,1 Se; 1,56 Pd; 0,26 Pt; 0,033 Rh; 0,012 Ru; 0,004 Ir.

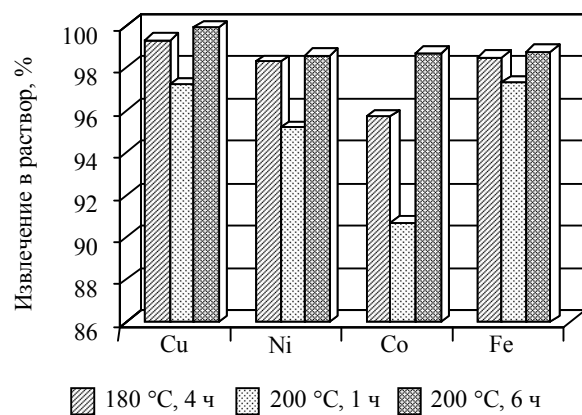
Глубокое извлечение цветных металлов в раствор при сульфатизационной обработке штейнов №1 и 2 достигается при 200 °С за 4 ч. Полное извлечение цветных металлов в раствор обеспечивается при температуре сульфатизации более 250 °С или при увеличении продолжительности процесса.

Содержание МПГ в концентрате в обоих вариантах обеспечивается высокое: примерно 30 % для штейна №1 и более 50 % для штейна №2. Это различие определяется, главным образом, способом получения штейнов, так как металлизированные штейны вскрываются лучше. Полученные богатые концентраты пригодны для аффинажа.

В процессе сульфатизации МПГ количественно остаются в кеке. При переработке штейна №1, полученного плавкой без введения восстановителя, сумма платиновых металлов в конечном концентрате (после обжига кека сульфатизации) достигает 31,3 %, при переработке металлизированного штейна №2 концентрат значительно богаче – 59,1 %.

При сульфатизации экспериментального штейна №3 при температуре 180-200 °С степень извлечения цветных металлов и железа в раствор выщелачивания зависит от продолжительности процесса сульфатизации. Проведение сульфатизации не менее 4-6 ч при температуре 200 °С обеспечивает практически полное удаление меди, никеля, кобальта и железа в серно-кислый раствор, %: 99,9 Cu; 98,6 Ni; 98,7 Co; 98,8 Fe. Заметного перехода в раствор платиновых металлов в этих условиях не зафиксировано (см. рисунок).

Прокаливание на воздухе (700 °С, 8 ч) кеков сульфатизации позволяет удалить остатки серы и селена, а также получить богатые платинометалльные концентраты. Выход концентрата, полученного после сульфатизации штейна при 200 °С в течение 4-6 ч и последующего прокаливания, составил 4,51 % при содержании в нем 35,9 % Pd и 4,69 Pt.



Переход цветных металлов и железа в раствор выщелачивания в зависимости от условий сульфатизации штейна №3

Суммарное расчетное содержание МПГ в богатом платинометалльном концентрате, полученном при сульфатизации штейна № 3 при 200 °С в течение 6 ч, достигает 41,68 % (после прокаливания при 700 °С в течение 8 ч – 47 %). Остаточное суммарное содержание цветных металлов и железа в концентрате не превышает 15-16 %, содержание кремнекислоты 9,3 %.

Реализация в промышленных условиях варианта переработки штейна с получением коллективного концентрата МПГ в режиме одностадийной сульфатизации позволит достичь практически полного извлечения в раствор цветных металлов и железа при увеличении продолжительности сульфатизационного процесса.

### Выводы

1. Установлено, что применение низкотемпературной сульфатизации богатого платинометалльного штейна, получаемого при электроплавке сульфидных продуктов переработки техногенных платиносодержащих отходов, обеспечивает практически полный перевод цветных металлов в сульфатный раствор.

2. Использование обжига кека для удаления халькогенов обеспечивает получение богатого платинометалльного продукта, необходимого для аффинажа.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гинсбург С.И. Химия платиновых металлов в процессах сернокислотной переработки сырья / С.И.Гинсбург, Ю.С.Шориков, А.М.Орлов. М.: Гиредмет, 1979. 48 с.
2. Петров Г.В. Современное состояние и технологические перспективы производства платиновых металлов при переработке хромитовых руд / Г.В.Петров, Т.Н.Грейвер, В.Г.Лазаренков. СПб: Недра, 2001. 200 с.
3. Современные технологии переработки медь-электролитных шламов / А.А.Чернышев, Г.В.Петров, А.М.Беленький, В.Н.Ковалев // Цветная металлургия. 2009. № 4. С.20-24.

### REFERENCES

1. Ginsburg S.I., Shorikov Y.S., Orlov A.M. Chemistry of platinum metals in the process of sulfuric acid refining. Moscow: Giredmet, 1979. 48 p.
2. Petrov G.V., Graver T.N., Lazarenkov V.G. Current state and prospects of production technology of platinum metals in chromite ore processing. Saint Petersburg: Nedra, 2001. 200 p.
3. Chernyshev A.A., Petrov G.V., Belenky A.M., Kovalev V.N. Modern technologies for processing copper electrolyte slurry // Non-ferrous metallurgy. 2009. N 4. P.20-24.



**В.Ю.БАЖИН**, канд. техн. наук, доцент (812) 328-84-59

**Д.В.МАКУШИН**, аспирант, (812) 328-84-59

*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

**V.Y.BAZHIN**, PhD in eng. sc., associate professor (812) 328-84-59

**D.V.MAKYSHIN**, post-graduate student (812) 328-84-59

*Saint Petersburg State Mining University*

## **ВЛИЯНИЕ МГД-СТАБИЛЬНОСТИ МОЩНОГО АЛЮМИНИЕВОГО ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА НА ВЫХОД ПО ТОКУ**

Рассматривается проблема повышения эффективности работы мощных алюминиевых электролизеров при компенсации потерь металла во время магнитодинамических волнений. Разработана схема асимметричной ошиновки для повышения производительности за счет МГД-стабильности электролизеров.

**Ключевые слова:** алюминиевый электролизер, выход по току, магнитодинамическая стабильность.

## **INFLUENCE OF MGD-STABILITY AT THE CURRENT EFFICIENCY OF POWERFUL ALUMINIUM POT**

The problem of increase of overall performance of powerful aluminum reduction pots at indemnification of metal losses is discussed during of magnet-dynamic movements. The scheme of asymmetric busbar is developed for increase of electrolysis productivity at the expense of MGD-stability.

**Key words:** aluminium reduction pot, current efficiency, magnet-dynamic stability.

В настоящее время основной тенденцией интенсификации электролиза алюминия является увеличение единичных мощностей и размеров агрегатов. Одно из направлений в решении вопроса ресурсосберегающего управления процессом электролитического получения алюминия на электролизерах с силой тока более 300 кА – это повышение стабильности поверхности катодного алюминия. Влияние электромагнитных возмущений (МГД-нестабильности) при определенных соотношениях силы тока, технологических параметров в сочетании с изменениями геометрии и конструкции электролизеров приводит к технологическим отклонениям и неустойчивой работе оборудования.

Магнитная динамика расплава одна из актуальных составляющих задач процесса электролиза алюминия. В электролизерах с

высокой силой тока (более 300 кА) процесс протекает при воздействии на расплав электромагнитных полей, которые в рабочем пространстве вызывают магнитодинамические эффекты расплава (МГД-эффекты): перекос металла, циркуляцию металла и электролита. Основными направлениями работ, которые способствуют устранению МГД-нестабильности являются:

- снижение стационарных МГД-эффектов путем рационального распределения тока в катодной и анодной ошиновке;

- исключение взаимного отрицательного влияния электролизеров, выражающееся в переходе электромагнитных возмущений с электролизера на электролизер, за счет размещения уравнивающих шин и перемычек;

- создание компенсирующего магнитного поля на крайних серийных электроли-

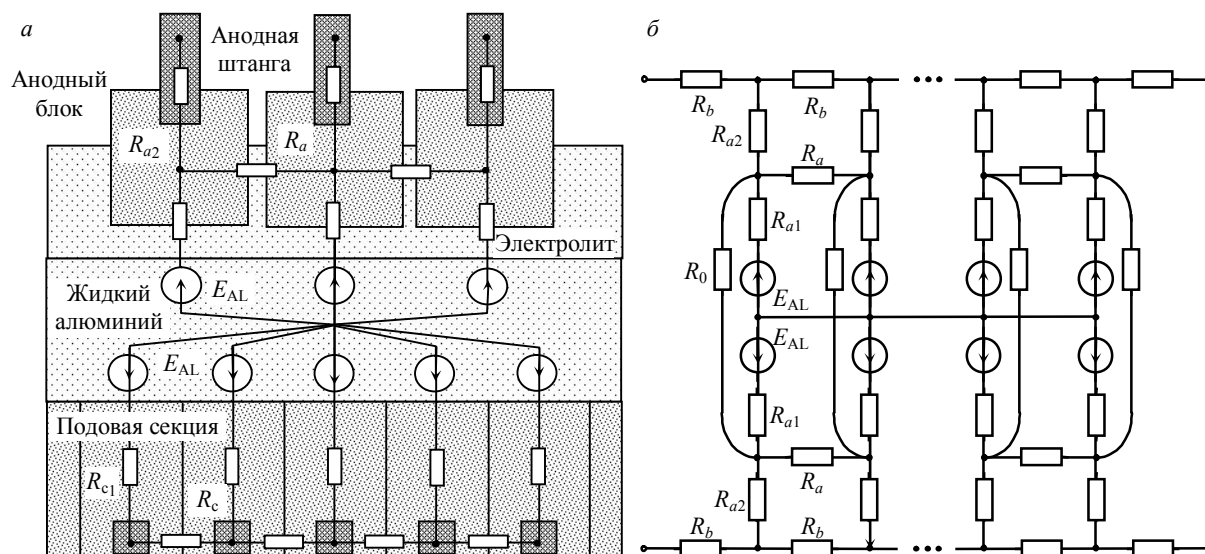


Рис.1. Фрагмент продольного сечения электролизера (а) и схема замещения анодного узла (б)

зерах с помощью межкорпусной асимметричной ошиновки.

Моделирование магнитной гидродинамики выполняется для оценки контуров и скоростей циркуляции в электролите и алюминии, волнообразования на границе металл-электролит, которые существенно влияют на такие технико-экономические показатели, как расход электроэнергии и производительность электролизера. При расчете магнитного поля в расплаве учитываются ферромагнетики, магнитное поле соседних электролизеров, электролизеров соседнего ряда и соседних электролизных корпусов. Расчеты магнитной гидродинамики выполняются как по теории «мелкой» воды, так и по трехмерным моделям ряда сопротивлений (рис.1).

Расчеты МГД-состояния электролизера заканчиваются оценкой МГД-стабильности электролизера. Для решения проблемы устойчивости поверхности расплава от воздействия магнитного поля на электролизере устанавливаются дополнительные анодные стояки, которые снижают  $B_x$ - и  $B_z$ -составляющие магнитного поля в основном в зоне действия электролизера, но не снимают воздействие соседних электролизных ванн. Наиболее часто МГД-воздействие  $B_y$ -составляющей проявляется на крайних электролизерах, когда дополнительно накладыва-

ются магнитные поля серийной ошиновки. Передача МГД-эффекта с электролизера на электролизер объясняется тем, что в конструкции ошиновок отечественных алюминиевых электролизеров отсутствуют перемыкающие элементы с достаточно малым электросопротивлением. Внесение компенсационных элементов и узлов в ошиновку мощных электролизеров позволяет увеличить МГД-устойчивость и стабилизировать технологический режим алюминиевого электролизера, что подтверждается промышленными испытаниями [1-3].

Техническим результатом является достижение высокой степени компенсации электромагнитных сил в расплаве за счет оптимизации конфигурации магнитного поля на катоде  $B_x$  и снижения величины вертикального магнитного поля  $B_z$  с учетом магнитного поля соседнего ряда электролизеров  $B_y$ .

Компенсация влияния  $B_y$  соседнего ряда электролизеров обеспечивается специальными эквипотенциальными перемычками, которые передают часть тока с катодных стержней от соседнего ряда электролизеров на противоположную сторону электролизера шиной, которая устанавливается под днищем катодного кожуха.

В мировой практике для устранения МГД- неустойчивости в ошиновке мощных

алюминиевых электролизеров при их продольном расположении в корпусе известны и используются следующие технические решения:

- установка дополнительных стояков на анодной ошиновке;
- изменение расстояния между стояками анодной ошиновки;
- изменение положения катодной ошиновки по высоте;
- увеличение сечения шин катодной и анодной ошиновок;
- установка компенсационных и обводных шин.

Увеличение МГД-стабильности за счет применения уравнильных шин и перемычек повышает выход по току на 0,3-0,5 %. Выявлена положительная роль перемычек и эквипотенциальных узлов как фактора снижения дисперсии тока, которая способствует стабилизации процесса электролиза алюминия.

Следует отметить, что все технические разработки по модернизации ошиновки направлены на устранение МГД-нестабильности, которая в конечном итоге косвенно приводит к увеличению выхода по току, и как следствие – производительности электролизера. Проблему снижения МГД-нестабильности в целом можно решить учитывая все факторы влияния, используя математические модели и применяя комплексные технические решения.

Максимальный выход по току (приближенный к теоретически возможному) на электролизерах с обожженными анодами (ОА) составляет 96,0-96,5 %. Потери металла на угольном катоде (выход по току) 3,0-3,5 % безвозвратные за счет обратных реакций, анодных эффектов и т.д. Величина выхода по току в процессе электролитического получения алюминия зависит от следующих факторов:

- обратных реакций (рекомбинационные процессы);
- распределения и состава основных примесей в сырье (глиноземе);
- качества глинозема (песчаного типа с минимальным содержанием  $\alpha$ - глинозема);
- величины электропроводности электролита;

- времени и продолжительности анодных эффектов;
- утечек тока;
- испарения компонентов электролита и окисления;
- абсорбционных реакций во время контакта с технологическим инструментом;
- физических потерь;
- формы рабочего пространства;
- МГД-стабильности;
- коротких замыканий.

Таким образом, снижение магнитогидродинамической составляющей в зоне расплава электролизера способствует стабилизации процесса электролитического получения алюминия – увеличения производительности, что в целом не позволяет дать конкретной оценки влияния на величину выхода по току. Поскольку выход по току функционально зависит от любого текущего параметра, который находится во временном поле, производительность может быть учтена только после определенного срока службы электролизера, например, через производительность серии электролиза (ванно-сутки) за месяц, отнесенной к количеству работающих электролизеров. За любой контролируемый временной период на качество оценки внедрения того или иного инновационного решения может повлиять любой из перечисленных факторов. Проблему снижения погрешности результатов решает метод многофакторных экспертных оценок.

Комплексная модернизация ошиновки электролизной ванны с учетом всех перечисленных факторов может привести к увеличению выхода по току, но не более 0,5 %, что также подтверждается рядом научно-технических изысканий.

Потери выхода по току за счет увеличения дисперсии анодного токораспределения

$$\Delta\eta = 0,008 + 0,75V_a^{1,27},$$

где  $V_a$  – коэффициент вариации массива измерений анодного токораспределения.

Влияние различных технологических параметров алюминиевых электролизеров разных типов обуславливает возможность применения данной методики расчета, так как она изменяется в зависимости от рас-

смаатриваемых типов электролизеров. Согласно данным, полученным при исследовании электролизеров типа ОА,

$$\eta = 0,96 - \Delta\eta V_i,$$

где 0,96 – теоретически максимально достижимый уровень выхода по току, %;  $\Delta\eta V_i$  – изменение выхода по току за счет дисперсии анодного токораспределения в ошиновке.

МГД-составляющая на электролизерах разного типа существенно отличается и поэтому применение методик расчета невозможно механически перенести на другие типы электролизеров. В этом случае используют эмпирические коэффициенты на базе математического анализа взаимовлияния МГД-нестабильности и технологических параметров.

В последнее десятилетие ведущие алюминиевые компании мира увеличивают производство алюминия, повышают технико-экономические показатели процесса электролиза [4, 5]. Варьирование основных технических показателей процесса электролиза алюминия, силы тока и количества электролизеров наряду с инновационными решениями приводит к ежегодному увеличению выхода по току.

Таким образом, основываясь на производственных показателях и научно-технической составляющей процесса электролиза, перемикающие элементы в ошиновках выполняют роль стабилизирующего фактора в зоне металл-электролит и оказывают косвенное влияние на выход по току, которое составляет 0,3-0,5 % (рис.2).

Усовершенствованная схема ошиновки для электролизеров с обожженными анодами предполагает замыкание электрических ветвей электролизера в определенных точках ошиновки, что позволяет стабилизировать технологический режим за счет исклю-

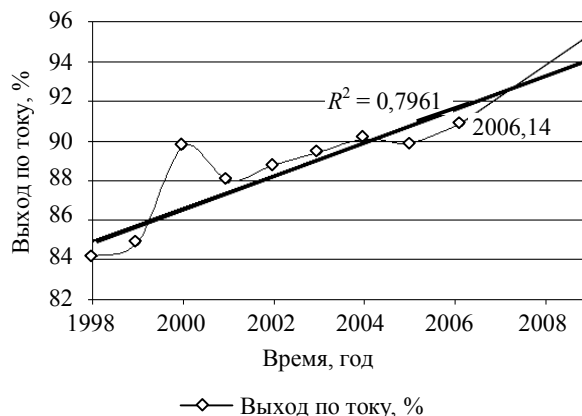


Рис.2. Зависимость выхода по току от времени

чения взаимного влияния электролизеров друг на друга.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Поляков П.В. Вторые высшие российские алюминиевые курсы. Красноярск: Версо, 1999.
2. Ullebuen B., Mellerud T., Wallevik O. Current Efficiency Measurements in High Amperage Cells at Low Alumina Concentrations // Paper A86-44, presented at the AIME Annual Meeting in New Orleans, USA, 1986.
3. Li M., Zhou J. Numerical Study of Busbar Configuration of 600 kA Aluminum Electrolysis Cell // Light Metals. 2007.
4. Tabereaux A. Aluminum industry upgrade set in motion by new wave of high amperage prebakes // Light Metals. 2007.
5. Benkhala B., Martin O., Tomasino T. AP50 performances and new development // Light Metals. 2009.

## REFERENCES

1. Polyakov P.A. Second Higher Russian Aluminium Courses // Krasnoyarsk: Verso. 1999.
2. Ullebuen B., Mellerud T., Wallevik O. Current Efficiency Measurements in High Amperage Cells at Low Alumina Concentrations // Paper A86-44, presented at the AIME Annual Meeting in New Orleans, USA, 1986.
3. Li M., Zhou J. Numerical Study of Busbar Configuration of 600 kA Aluminum Electrolysis Cell // Light Metals. 2007.
4. Tabereaux A. Aluminum industry upgrade set in motion by new wave of high amperage prebakes // Light Metals. 2007.
5. Benkhala B., Martin O., Tomasino T. AP50 performances and new development // Light Metals. 2009.

**В.Н.БРИЧКИН**, д-р техн. наук, профессор, (812) 328-84-59

**Н.А.НОВИКОВ**, аспирант, (812) 328-84-59

**В.В.РАДЬКО**, аспирант, (812) 328-84-59

**В.В.ВАСИЛЬЕВ**, аспирант, (812) 328-84-59

*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

**V.N.BRICHKIN**, Dr. in eng. sc., professor, (812) 328-84-59

**N.A.NOVIKOV**, post-graduate student, (812) 328-84-59

**V.V.RADKO**, post-graduate student, (812) 328-84-59

**V.V.VASILYEV**, post-graduate student, (812) 328-84-59

*Saint Petersburg State Mining University*

## **ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ МЕТАСТАБИЛЬНОСТИ РАСТВОРОВ НА КИНЕТИКУ МАССОВОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ**

Представлены материалы экспериментального исследования, устанавливающего зависимость кинетики массовой кристаллизации гидроксида алюминия от степени метастабильности щелочных алюминатных растворов. Показано, что изменение уровня метастабильности среды кристаллизации имеет отставание во времени от изменения параметров состояния физико-химической системы. Предложено теоретическое обоснование перехода системы от одного уровня метастабильного состояния к другому в связи с временными ограничениями изменения структуры лабильных растворов.

**Ключевые слова:** кинетика, осаждение, гидроксид алюминия, метастабильность.

## **THE EFFECT OF DEGREE OF METASTABLE SOLUTIONS ON MASS CRYSTALLIZATION KINETICS**

The materials of the pilot study, which establishes the dependence of the kinetics of mass crystallization of aluminum hydroxide on the extent of metastable alkaline aluminate solutions. Shown that changes in the level of metastability of the environment of crystallization is the lag in time from changes in state parameters of physico-chemical system. The theoretical a justification of the transition from one level of the metastable state to another due to time constraints, changing the structure of unstable solutions.

**Key words:** kinetics, precipitation, aluminum hydroxide, metastability.

Метастабильное состояние физико-химических систем является весьма распространенным явлением, которое достаточно широко используется на практике. Особую роль это состояние играет при осаждении кристаллических продуктов на затравке, что делает возможным получение продуктов с заданными свойствами. Внешним проявлением и характерным признаком метастабильной устойчивости системы является наличие индукционного или латентного периода неопределенной длительности. При этом

процессы, протекающие в индукционном периоде, не сопровождаются заметными изменениями состава среды кристаллизации и, как правило, скрыты от непосредственного наблюдения при использовании традиционных методов анализа. Несмотря на внешнее разнообразие процессов, имеющих индукционный период кристаллизации, всех их объединяет единая термодинамическая основа, заключающаяся в необходимости совершения дополнительной работы, связанной с образованием поверхности раздела фаз [3].

В меньшей степени, чем термодинамические аспекты, разработаны вопросы кинетики метастабильных систем из-за низкой доступности протекающих в них процессов для экспериментального исследования. Физико-химическая природа индукционного периода позволяет использовать этот параметр в качестве одной из немногих характеристик латентного периода, доступных для лабораторного наблюдения. Наиболее хорошо экспериментально полученные результаты описываются зависимостью индукционного периода от условий кристаллизации по уравнению М.Л.Чепелевского, представляющего аналитическое развитие теории флуктуаций М.Фольмера [2, 3].

В практическом смысле чаще приходится иметь дело с последствиями проявления этих закономерностей, чем с их непосредственным наблюдением и исследованием. Характерным примером процессов, зависящих от условий метастабильного существования технологических систем, является получение глинозема щелочными способами. В производственной практике это обеспечивает возможность снижения потерь полезных компонентов с отвальными продуктами и селективного осаждения на затравках индивидуальных фаз, среди которых необходимо отметить гидроалюмосиликаты щелочных и щелочно-земельных металлов, гидроксид алюминия, оксалат натрия и ряд других соединений, присутствующих в алюминатном растворе в метастабильном состоянии.

Преодоление термодинамического сопротивления системы для осаждения компонента раствора в виде самостоятельной фазы производится с использованием хорошо отработанного приема введения затравки, основанного на исключении затрат работы кристаллообразующей среды на образование новой поверхности. Проявлению кинетических факторов метастабильности в этом случае не придается значение. В то же время современная теория алюминатных растворов исходит из факта стадийности процессов, протекающих при осаждении из раствора гидроксида алюминия [1, 2]. Очевидно, что процессы, сопровождающие эти

изменения, должны подчиняться закономерностям химической кинетики и при относительно низкой концентрации кластеров и ассоциатов могут быть значительно растянуты во времени. Таким образом, вполне вероятно запаздывание, связанное с образованием равновесной структуры и состава метастабильной системы относительно физико-химических условий ее существования по кинетическим причинам. Влияние этого запаздывания на показатели процесса осаждения гидроксида алюминия незаметно и при неразвитости кинетики метастабильного состояния подлежит в первую очередь экспериментальной оценке.

Проведенные нами экспериментальные исследования выполнялись применительно к условиям производства глинозема способом Байера. При этом в лабораторном масштабе моделировался не только процесс разложения алюминатных растворов, но и условия состояния физико-химической системы, отвечающие предшествующей технологической операции, – сгущению красных шламов. Последний этап в отличие от декомпозиции проводится при более высокой температуре [1]. В связи с этим растворы, подготовленные к разложению, подвергались нагреву и выдержке при температуре 100 °С в течение 2 ч. Затем интенсивно охлаждались до температуры декомпозиции и выдерживались при этой температуре установленное время, а с момента введения затравки начиналось кинетическое исследование разложения алюминатных растворов. Таким образом, возникала возможность оценки влияния кинетических факторов предшествующих процессов на показатели осаждения гидроксида алюминия. Все опыты проводились в однотипных условиях, что позволяет делать корректную оценку влияния изменяемых факторов, к которым кроме продолжительности выдержки раствора без затравки также относится состав примесей в растворе, обусловленный использованием различных исходных материалов. На рис.1 приведена зависимость степени разложения алюминатных растворов, приготовленных путем щелочного растворения продукционного гидроксида алюминия, от длительно-



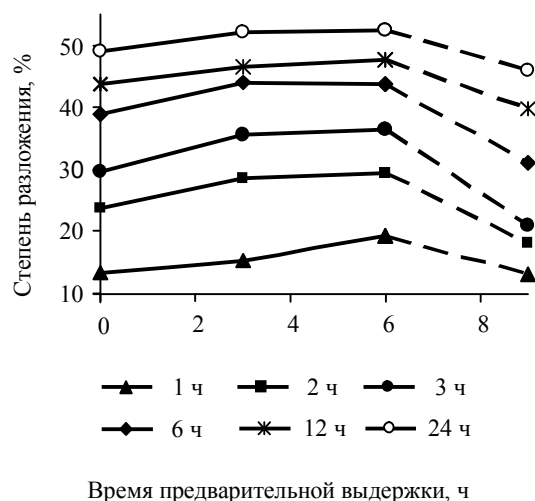


Рис.1. Зависимость степени разложения алюминатных растворов, приготовленных растворением продукционного гидроксида алюминия, от длительности предварительной выдержки и времени декомпозиции

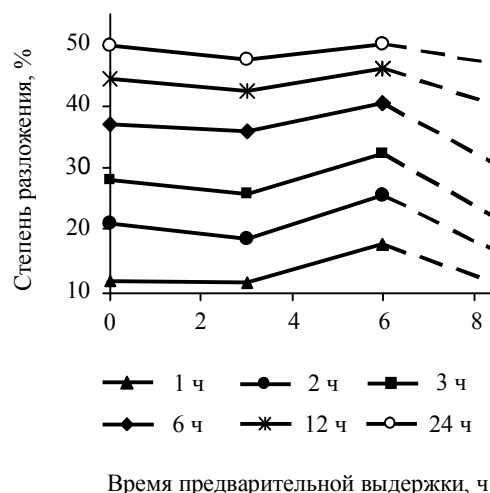


Рис.2. Зависимость степени разложения алюминатных растворов, приготовленных на основе заводских материалов, от операции декомпозиции

сти предварительной выдержки. На рис.2 приведена аналогичная зависимость для растворов, синтезированных с использованием заводского алюминатного раствора, от операции декомпозиции, а на рис.3 эта зависимость получена для растворов, приготовленных путем щелочного растворения гранулированного металлического алюминия марки Ч.

Полученные результаты наглядно иллюстрируют влияние продолжительности предварительной выдержки на показатели процесса декомпозиции растворов. Необходимо отметить, что для сравнения на рис.1 и 2 приведены данные о разложении растворов, не подвергнутых предварительному нагреву до температуры 100 °С. Более того, в соответствии с известной отраслевой методикой приготовление алюминатных растворов производится в области термодинамически устойчивых составов, обеспечивающих возможность длительного хранения растворов при температуре лаборатории.

Следовательно, показатели, отнесенные к использованию таких материалов, можно расценивать, как результаты, отвечающие длительной (бесконечно большой) выдержке растворов при температуре значительно ниже принятой при выделении гидроксида алюминия на затравке. Именно поэтому ли-

ния, соединяющая точки, отвечающие предварительной выдержке длительностью 6 ч с последующими по времени, выделена пунктиром как отнесенная к неопределенной длительности этого события и продолжительному нахождению таких растворов в переохлажденном состоянии по отношению к условиям декомпозиции. При этом можно отметить существенное отставание показателей разложения растворов, подготовленных по данной методике, по сравнению с

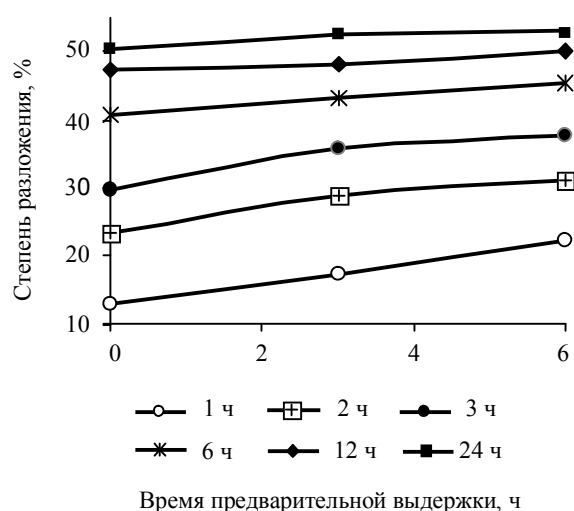


Рис.3. Зависимость степени разложения алюминатных растворов, приготовленных методом щелочного растворения металлического алюминия

растворами, прошедшими предварительный нагрев. В этом смысле для достижения повышенных технологических показателей реальные заводские условия более благоприятны по сравнению с лабораторными. Понятно, что здесь оценивается лишь один фактор из тех, которые могут быть существенными на производстве.

Таким образом, приведенные материалы достаточно убедительно иллюстрируют временную ограниченность перехода системы от одного уровня метастабильности системы к другому и влияние связанных с этим структурных изменений кристаллообразующей среды на показатели последующих процессов. Заметный интерес представляет оценка влияния комплекса примесей, переходящих в раствор, на кинетику процессов скрытого периода кристаллизации. При этом достаточно хорошо известно влияние комплексобразующего взаимодействия кремнезема, растворенного в щелочных алюминатных растворах, на его метастабильную устойчивость [1].

В выполненной экспериментальной работе использовался подход рейтинговой оценки влияния примесей, накопление которых в растворе связано с особенностями методики их приготовления и используемыми при этом материалами. По этому показателю представленные материалы могут быть выстроены в порядке возрастания количества примесей: растворы из металлического алюминия и каустика (рис.3); растворы из продукционного гидроксида и каустика (см. рис.1); растворы из заводских оборотов и продукционного гидроксида (рис.2).

Анализ представленных материалов обращает внимание на минимальную стойкость наиболее чистых растворов (см. рис.1), которые к концу предварительной выдержки длительностью 6 ч самопроизвольно разлагаются на 11 %, тем самым значительно опережая разложение растворов с большим содержанием примесей. Только наличием примесей можно объяснить и другие кинетические особенности декомпозиции растворов (рис.1-3).

Таким образом, можно констатировать экспериментально установленный факт влияния кинетики процессов индукционного периода, протекающих в метастабильных системах, на показатели последующих взаимодействий, что необходимо учитывать в практике последовательно реализуемых технологических операций.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Абрамов В.Я.* Физико-химические основы комплексной переработки алюминиевого сырья (щелочным способом) / В.Я.Абрамов, Г.Д.Степленова, И.В.Николаев. М.: Металлургия, 1985. 288 с.
2. *Бричкин В.Н.* Элементарные процессы при осаждении гидроксида алюминия / В.Н.Бричкин, А.В.Цыбизов // Записки Горного института. 2006. Т.169. С.84-88.
3. *Мейер К.* Физико-химическая кристаллография. М.: Металлургия, 1972. 480 с.

#### REFERENCES

1. *Abramov V.Y., Stelmenova G.D., Nikolaev I.V.* Physicochemical basis of complex processing of aluminum raw materials (alkali method). Moscow: Metallurgiya, 1985. 288 p
2. *Brichkin V.N., Tsybizov A.V.* Elementary processes during the precipitation of aluminum hydroxide // Notes of the Mining Institute. 2006.V.169. P.84-88.
3. *Meyer K.* Physicochemical Crystallography. Moscow: Metallurgiya, 1972. 480 p.

**В.В.НАПСИКОВ**, аспирант, luxorient@mail.ru  
**С.А.МИРВАЛИЕВ**, аспирант, sergey\_sl\_85@mail.ru  
**С.Н.САЛТЫКОВА**, канд. техн. наук, доцент, ssn\_58@mail.ru  
**Н.М.ТЕЛЯКОВ**, д-р техн. наук, профессор, ptpe\_spmi@bk.ru  
Санкт-Петербургский государственный горный университет

**V.V.NAPSIKOV**, post-graduate student, luxorient@mail.ru  
**S.A.MIRVALIEV**, post-graduate student, sergey\_sl\_85@mail.ru  
**S.N.SALTYKOVA**, PhD in eng. sc., associate professor, ssn\_58@mail.ru  
**N.M.TELYAKOV**, Dr. in eng. sc., professor, ptpe\_spmi@bk.ru  
Saint Petersburg State Mining University

## ОБЖИГ СУЛЬФИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ В КИПАЮЩЕМ СЛОЕ

Развитие теории обжига сульфидных материалов имеет большое значение для понимания физической и химической природы обжига и возможностью управления им.

**Ключевые слова:** обжиг, управление, сульфид железа.

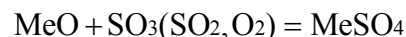
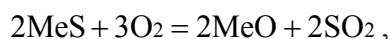
## SULPHIDIC MATERIALS ROASTING IN A FLUIDIZED BED

Development of the oxidation theory of iron sulphide has great importance for understanding the physical and chemical nature of roasting and revealing possibility of its management.

**Key words:** roasting, handling, iron sulphide.

Известно, что при высоких температурах и недостатке кислорода устойчивой конечной фазой обжига сульфида железа является магнетит. В работе [3] отмечается, что при окислении сульфида железа воздухом порядок реакции по кислороду равен нулю, а лимитирующей стадией процесса является стадия образования метастабильных комплексов.

Авторы [1, 2] предложили теорию образования окисульфидных комплексов. Согласно этой теории первичными продуктами окисления сульфидов являются оксиды соответствующих металлов, которые при определенных условиях могут сульфатизироваться серным ангидридом, превращаясь во вторичные сульфаты. По этой теории процесс обжига протекает по следующей схеме:



Исследования, проведенные в «кипящем слое», показали, что возможной реакцией является  $3\text{FeS} + 2\text{SO}_{2г} = \text{Fe}_3\text{O}_4 + 2,5\text{S}_2$ . Эта реакция протекает автогенно за счет тепла от сжигания образовавшейся серы по реакции  $\text{S} + \text{O}_2 = \text{SO}_2$ . Все исследования проводились при крупности материала  $-0,25 - +0,1$ . Другой особенностью протекания этой реакции является нагретая газовая сплошная фаза, которая предохраняет конденсацию газообразной серы в сплошной или дисперсной фазе. Последнее может быть причиной снижения скорости реакции или даже ее остановки в связи с блокированием сульфида конденсированной серой.

В литературе отсутствуют термодинамические данные по окислению сульфидов металлов в зависимости от агрегатного состояния продуктов реакции. Поэтому нами

была предпринята попытка термодинамических расчетов и определения скорости реакций в зависимости от агрегатного состояния продуктов реакции (табл.1).

В ходе расчета энергии Гиббса с учетом теплоемкости установлено, что реакции № 2,3,5 протекают только при условии предварительного нагрева газа.

Таблица 1

Характеристика термодинамического анализа

№ п/п	Реакция	T, К	$\Delta G$ , кДж/моль	$K_p$
1.	$3\text{FeS} + 2\text{SO}_{2\text{r}} = \text{Fe}_3\text{O}_4 + 2,5\text{S}_{2\text{r}}$	873	83765	9,72449E-06
		973	89301	1,60597E-05
		1073	97042	1,88682E-05
		1173	107067	1,70623E-05
		1273	119444	1,25515E-05
		1373	134230	7,81882E-06
		1473	151472	4,24991E-06
2.	$2\text{ZnS} + \text{SO}_2 = 2\text{ZnO} + 1,5\text{S}_{2\text{r}}$	873	-55494,6	2091,9
		973	-85259,7	37779,6
		1073	-115029,1	398042,1
		1173	-144797,4	2806600,3
		1273	-174559,8	14551934,5
		1373	-204312	59314762,4
		1473	-234050,5	199553472,7
3.	$2\text{NiS} + \text{SO}_2 = 2\text{NiO} + 1,5\text{S}_{2\text{r}}$	873	104027,9	5,96238E-07
		973	92521,6	1,07865E-05
		1073	79574,9	0,0001
		1173	65090,7	0,001
		1473	11651,3	0,38
		1573	-9693,7	2,09
		1773	-57969,6	51,04
4.	$2\text{Cu}_2\text{S} + \text{SO}_2 = 2\text{CuO} + 1,5\text{S}_{2\text{r}}$	873	26114,81	0,000387
		973	35495,89	0,000195
		1073	46934,89	8,16E-05
		1173	60456,67	3,06E-05
		1273	76085,9	1,07E-05
		1373	93844,25	3,55E-06
		1473	113750,1	1,14E-06
5.	$2\text{CoS} + \text{SO}_2 = 2\text{CoO} + 1,5\text{S}_2$	873	376528,01	2,95255E-23
		973	342808,1	3,94444E-19
		1073	301810,9	2,02783E-15
		1273	196675,1	8,50343E-09
		1473	59037,1	0,008
		1573	-22450,5	5,56
		1673	-112588,06	3276,17

На основании проведенных термодинамических расчетов энергия Гиббса в реак-

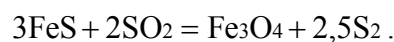
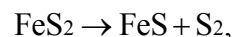
циях № 1, 4 положительная. Но согласно исследованиям, проведенным в неравновесных условиях, все реакции, за исключением № 4, проходят с высокой скоростью.

При исследовании процессов обжига сульфидных материалов в кипящем слое особо подчеркивается необходимость проведения исследований в изотермических условиях. Нами было показано, что по мере прохождения сплошной фазы в слое дисперсного материала температура газа повышается по экспоненциальной зависимости, составляя 293 К на выходе, и достигает температуры частицы на высоте 0,3-0,5 м (в условиях изучения реакции в кипящем слое).

Была предпринята попытка изучения реакции взаимодействия пирита с диоксидом серы в условиях, когда температура сплошной фазы приближается к температуре дисперсной фазы. Для этого была разработана методика и выполнена лабораторная печь кипящего слоя с камерой для предварительного нагрева газа.

Изучение влияния температуры на степень десульфуризации показало, что пирит активно взаимодействует с диоксидом серы уже при 873 К, причем в первые минуты процесс характеризуется высокой скоростью удаления серы. После удаления 45-48 % S скорость десульфуризации падает. При подаче термоуравновешенной сплошной фазы процесс взаимодействия пирита с диоксидом серы отличается более высокой скоростью и полнотой удаления серы. Результаты исследования представлены в табл.2.

Согласно проведенным исследованиям процесс идет последовательно по двум реакциям. Это подтвердилось рентгеноструктурным и микроскопическим анализом конечных фаз, взятых при разных температурах на всем протяжении обжига:



Изучение влияния концентрации диоксида серы на степень десульфуризации пирита при температуре 1023 К показало, что в неизотермических условиях увеличение концентрации  $\text{SO}_2$  с 10 до 100 % не

## Результаты окисления пирита диоксидом серы

Температура в зоне реакции, °C	Температура сплошной фазы –20 °C			Термоуравновешенная сплошная фаза		
	Вес огарка, г	Содержание S в огарке, %	Степень превращения, %	Вес огарка, г	Содержание S в огарке, %	Степень превращения, %
600	2,27	36,01	45,5	1,97	33,53	55,95
650	2,10	33,95	52,47	1,93	31,78	59,11
700	1,93	30,02	61,37	1,76	25,39	70,20
750	1,92	27,32	85,03	1,70	19,80	77,60
800	1,88	21,93	72,51	1,44	16,28	84,33

Примечание. Продолжительность обжига 120 мин; концентрация SO<sub>2</sub> – 10 %, расход 2 л/мин.

приводит к увеличению скорости десульфуризации процесса. Отсутствие повышения степени десульфуризации с ростом концентрации SO<sub>2</sub> свидетельствует о том, что активные центры дисперсной фазы полностью заполнены адсорбированным диоксидом серы. При подаче термоуравновешенной сплошной фазы повышение концентрации диоксида серы до 100 % приводит к значительному увеличению скорости процесса.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ванюков А.В., Чжюу Чжун-хуа. Кинетика окисления сульфидов железа // Цветная металлургия. 1959. № 2. С.72-77.

2. Маргулис Е.В. Металлургия свинца и цинка. М.: Metallurgizdat, 1962. С.134.

3. Пискунов И.И. О некоторых закономерностях окисления сернистого железа // Цветная металлургия. 1961. № 1. С.63-68.

4. Теляков Н.М. Изучение кинетики десульфуризации пирита диоксидом серы / Н.М.Теляков, И.А.Федоров // Цветные металлы. 1994. № 2. С.17-19.

## REFERENCES

1. Vanyukov A.V., Chjou Chjun-hua. Iron sulphide oxidation kinetics // Non-Ferrous Metallurgy. 1959. P.72-77.

2. Margulis E.V. Lead and zinc metallurgy. Moscow: Metallurgizdat, 1962. P.134.

3. Piskunov I.I. Sulfur iron oxidation // Nonferrous Metallurgy. 1961. № 1. P.63-68.

4. Telyakov N.M., Fedorov I.A. Studying desulphuration kinetics of pyrite with sulphur dioxide // Nonferrous Metals. 1994. № 2. P.17-19.

**А.Я.БОДУЭН**, канд. техн. наук, доцент, (812) 328-8459

**Б.С.ИВАНОВ**, студент, (812) 328-84-59

**Г.В.КОНОВАЛОВ**, канд. техн. наук, доцент, (812) 328-8459

*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

**A.J.BODUEN**, PhD in eng. sc., associate professor, (812) 328-8459

**B.S.IVANOV**, student, (812) 328-84-59

**G.V.KONOVALOV**, PhD in eng. sc., associate professor, (812) 328-8459

*Saint Petersburg State Mining University*

## **ВЛИЯНИЕ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА МЕДНЫХ КОНЦЕНТРАТОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИХ ПЕРЕРАБОТКИ**

На сегодняшний день в нашей стране, также как практически во всех странах мира, вследствие интенсивной разработки месторождений цветных металлов в значительной степени отработаны запасы богатых и легкообогащаемых руд. В переработку вовлекают рудное сырье со сравнительно низким содержанием ценных компонентов, тонковкрапленное и соответственно трудно поддающееся обогащению. Кроме того, после распада Советского Союза за рубежом оказались более легкообогащаемые руды и основными источниками получения медных и цинковых концентратов в России стали колчеданные медно-цинковые, комплексные руды, которые обогащаются с более низкими показателями. В то же время металлургическое производство с каждым годом предъявляет все более высокие требования к качеству концентратов, удовлетворить которые можно только с применением комбинированных обогатительных, химических, гидро- и пирометаллургических технологий.

**Ключевые слова:** медно-цинковые руды, медный концентрат, гидрометаллургическая технология.

## **INFLUENCE OF IMPROVEMENT OF QUALITY OF COPPER CONCENTRATES ON EFFICIENCY OF THEIR PROCESSING**

At present time high grade and free-milling ore reserves have been exhausted in our country as well as in nearly all other countries in consequence of intensive development of nonferrous metal deposits. Relatively low-grade crude ore, which is deaf and therefore rebellious, is involved into processing. Moreover, after the collapse of the Soviet Union the more free-milling ores turned out to be abroad and so sulphide copper-zinc complex ores which are dressed with lower grade became the major sources of copper and zinc concentrate production in Russia. At the same time the metallurgical production is making higher and higher requirements to concentrate quality every year, and it is possible to meet the requirements only by application of mixed dressing, chemical, hydro- and pyrometallurgical technologies.

**Key words:** dressing, copper-zinc ores, copper concentrate, hydrometallurgical technologies.

К наиболее труднообогащаемым рудам относятся медно-цинковые руды Урала, при переработке которых цинковые концентраты получают достаточно высокого качества, а применяемая на фабриках технология селекции с сульфидом натрия и цинковым

купоросом способствует активной флотации сульфидов меди, железа и части сфалерита. Проблемой остается получение качественного медного концентрата. Практически в медном концентрате содержится до 50 % пирита, в том числе и в виде тончайших



сростков с халькопиритом, разрушить которые механическими методами не представляется возможным. Требуется процесс, связанные с частичным или полным разрушением кристаллической решетки минералов (кристаллитов).

В этих условиях, по мере обеднения руд, перспективным направлением развития цветной металлургии в XXI в. может стать постепенное ограничение роли обогатительного передела и перенос проблемы разделения минеральных комплексов на металлургический передел, использующий химические способы вскрытия минералов.

В связи с этим СП ЗАО «ИВС» была разработана и совместно с Санкт-Петербургским государственным горным университетом опробована в полупромышленном масштабе технология гидрометаллургического обесцинкования концентрата, включающая следующие операции:

- 1) автоклавное обесцинкование медного концентрата;
- 2) гидротермальное осаждение перешедшей в раствор меди;
- 3) очистка загрязненного цинкового раствора от примесей;
- 4) получение товарного цинкового полупродукта.

Результатом применения разработанной технологии обесцинкования медного концентрата является выпуск следующей продукции: дополнительный объем рафинированной меди; цинк в цинковом купоросе; цинк в гидрокарбонате, индий и кадмий в полупродуктах.

В свою очередь Институтом металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова было проведено определение экономической эффективности переработки медных концентратов повышенного качества на медеплавильных заводах Урала\*. В данном исследовании сравнивались концентраты рядового и повышенного качества, составы которых приведены в таблице.

\* Ванюков А.В. Плавка в жидкой ванне / А.В.Ванюков, В.П.Быстров, В.Н.Брузк и др. М.: Металлургия, 1988. 208 с.

Vanukov A.V., Bystrov V.P., Bruek V.N. et. al. Bath smelting. Moscow: Metallurgy, 1988. 208 p.

**Состав медных концентратов рядового и повышенного качества**

Элемент	Медный концентрат, %	
	рядового качества	повышенного качества
Cu	19,5	25,3
Fe	31,9	29,4
S	38,9	39,5
Zn	4,8	0,6
Pb	1,33	1,73
As	0,32	0,002
Объем переработки концентратов, т/год	350 000	268 627

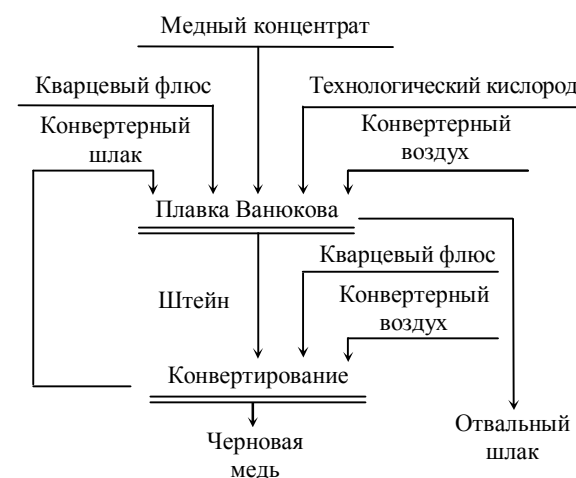
Для расчета была принята технология переработки медных концентратов, применяемая на Среднеуральском медеплавильном заводе (СУМЗ) и предусматривающая следующие операции:

- плавку концентрата на штейн в печи Ванюкова;
- конвертирование штейна с получением черновой меди.

Технологическая схема процесса плавки и конвертирования медного концентрат приведена на рисунке.

В результате расчетов установлено, что перевод медеплавильного производства на переработку концентратов повышенного качества дает следующие преимущества:

- увеличение производительности плавильного и конвертерного переделов на 49,2 % по меди;



Технологическая схема основных пирометаллургических операций на СУМЗ

- увеличение сквозного извлечения по меди в черновую медь с 92,5 до 98,2 %;

- выведение из переработки на сернокислотном производстве около 1100 т мышьяка и сурьмы;

- сокращение расхода вспомогательных материалов (технологический кислород, конвертерный воздух, кварцевый флюс);

- снижение затрат на переработку и транспортировку концентрата.

Общий экономический эффект на металлургическом производстве в результате такого перехода составит примерно 20 млн долларов, а простой срок окупаемости 3,2 г., который может корректироваться при более детальном расчете всех затрат и стоимости товарной продукции.

**О.А.ДУБОВИКОВ**, канд. техн. наук, доцент, *ptpe\_spmi@bk.ru*  
**Н.В.НИКОЛАЕВА**, канд. техн. наук, ассистент, *ptpe\_spmi@bk.ru*  
Санкт-Петербургский государственный горный университет

**O.A.DUBOVIKOV**, PhD in eng. sc., associate professor, *ptpe\_spmi@bk.ru*  
**N.V.NIKOLAEVA**, PhD in eng. sc., assistant, *ptpe\_spmi@bk.ru*  
Saint Petersburg State Mining University

## ПОВЕДЕНИЕ ШАМОЗИТА В ПРОЦЕССЕ ХИМИЧЕСКОГО И ТЕРМОХИМИЧЕСКОГО КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ БОКСИТОВ

Представлены результаты выщелачивания шамозитизированных бокситов щелоче-содержащими растворами. Показано, что поведение шамозитов при взаимодействии со щелочными растворами зависит от соотношения ортогональной и моноклинной модификаций и степени окисленности. Однако предварительный обжиг в слабоокислительной среде эти различия сглаживает за счет практически полного разложения шамозитов с образованием аморфных оксидов алюминия и кремния.

**Ключевые слова:** термохимическое кондиционирование, выщелачивание, бокситы, шамозит, обжиг.

## BEHAVIOUR CHAMOISITE WHEN IN USE OF CHEMICAL AND THERMOCHEMICAL CONDITIONING OF BAUXITES

Results of desalination extraction chamoisite minerals alkali-containing are presented by solutions. It is shown that the behavior chamoisite at interaction with alkaline solutions depends on a parity orthogonal and monoclinic updatings and degree oxidation. However, prebaking in oxidizing medium these distinctions at the expense of almost complete decomposition chamoisite with formation amorphous aluminum and silicon oxides.

**Key words:** thermochemical conditioning, extraction, thermoactivation, bauxites, chamoisite, burning.

В настоящее время актуальной задачей является вовлечение в сферу производства глинозема низкачественного, высококремнистого бокситового сырья. Способы переработки бокситов зависят от их качества, которое определяется содержанием оксида алюминия и кремневым модулем –  $\mu_{Si}$ . Кремневый модуль позволяет приблизительно определить теоретически возможное извлечение глинозема по способу Байера:

$$\frac{\mu_{Si} - 1}{\mu_{Si}} 100 \%,$$

исходя из образования гидроалюмосиликата натрия  $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 1,7SiO_2 \cdot 2H_2O$ . Чем выше кремневый модуль, тем экономичнее

производство, а бокситы, содержащие более 7 % диоксида кремния, принято относить к высококремнистым. За рубежом перерабатывают бокситы с содержанием кремнезема не более 5 %, что соответствует кремневому модулю не менее 9-11. Дальнейшее развитие производства глинозема в России будет связано с промышленным использованием больших запасов высококремнистых бокситов новых месторождений Северной Онеги и Среднего Тимана. Кремневый модуль этих бокситов 3-5. Известные промышленные способы переработки такого сырья – последовательный способ Байер-спекания и способ спекания – характеризуются сложностью, громоздкостью и высокими капитальными,

Вещественный состав шамозитов

Номер пробы	Содержание, %							$\frac{\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{FeO}}{\text{Fe}_2\text{O}_3}$	Соотношение модификаций*
	ППП	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	R <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>		
1	9,10	37,74	20,20	30,46	24,01	1,05	1,86	0,21	3/1
2	15,58	31,75	26,00	21,40	8,43	0,25	1,96	0,61	2/1
3	10,08	21,70	12,53	52,24	24,17	0,15	1,02	0,54	2/1
4	8,08	18,26	15,30	54,56	29,61	0,16	1,19	0,46	7/4
5	7,24	19,17	18,32	49,40	27,70	0,32	1,19	0,44	4/1
6	10,52	23,72	22,40	39,10	23,30	0,20	0,61	0,40	9/1

Примечание. В числителе – ортогональная, в знаменателе – моноклиная.

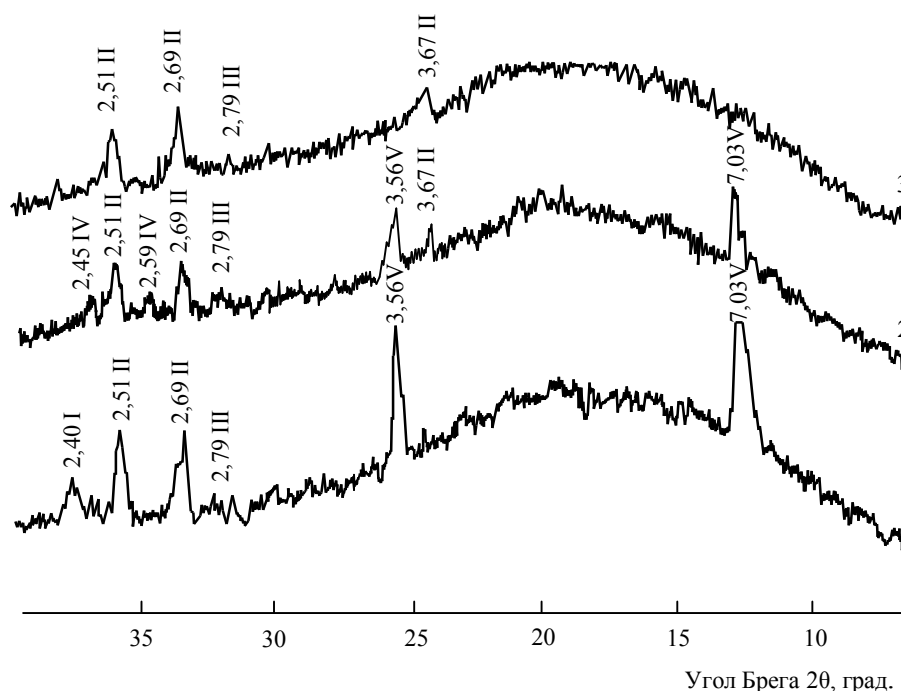


Рис.1. Дифрактограммы шамозита и продуктов его обжига

1 – исходный образец; температура обжига, °С: 2 – 400, 3 – 600.

Продукт: I – шамозит моноклиный, II – гематит, III – сидерит, IV – гидрогетит.

Цифры у кривых – длина волны, Å

энергетическими и эксплуатационными затратами. С момента разработки этих способов прошло много времени, и на современном этапе они нерациональны.

В последнее время уделяется много внимания вопросам переработки на глинозем по способу Байера предварительно обогащенного высококремнистого бокситового сырья. Одно из направлений технологии обогащения заключается в химической или термохимической обработке сырья с получением бокситового концентрата.

Предварительный обжиг шамозитизированных бокситов при температуре 450-650 °С повышает извлечение глинозема и увеличивает потери щелочи при последующем автоклавном выщелачивании [3, 4]. Изучение природы превращений шамозита – одного из основных кремнесодержащих минералов отечественных бокситов – позволит более рационально организовать технологию обогащения.

Исследования проводились на различных разновидностях шамозитов КМА (табл.1).

## Состав продуктов выщелачивания

Обжиг, °С	Условия выщелачивания: температура °С, Na <sub>2</sub> O (г/л) и α <sub>к</sub>	Содержание в остатке от выщелачивания, %						Na <sub>2</sub> O / SiO <sub>2</sub> , моль*
		П.П.П	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Na <sub>2</sub> O	
Проба № 1								
Нет	80 °С, 150 г/л	—	34,51	20,50	35,85	24,79	0,16	0,008
»	80 °С, 150 г/л и 3,5	—	33,05	20,90	30,90	21,90	0,26	0,012
»	180 °С, 260 г/л	—	23,86	20,30	34,04	21,55	5,52	0,260
»	180 °С, 260 г/л и 3,5	—	36,55	20,00	36,55	24,79	4,50	0,220
»	210 °С, 260 г/л	—	18,80	20,10	34,39	14,10	11,90	0,570
»	210 °С, 260 г/л и 3,5	—	20,30	20,10	35,60	19,49	4,7	0,226
»	240 °С, 260 г/л	—	19,27	20,10	34,04	13,21	12,00	0,580
»	240 °С, 260 г/л и 3,5	—	24,64	20,70	34,30	22,10	4,5	0,210
Проба № 2								
Нет	80 °С, 150 г/л	—	28,00	26,40	22,50	15,10	1,40	0,051
»	80 °С, 150 г/л и 3,5	—	28,70	27,00	23,20	15,43	1,00	0,001
»	95 °С, 150 г/л	11,96	27,56	26,20	21,58	14,36	6,30	0,230
400	95 °С, 150 г/л	12,20	27,75	26,00	21,70	7,90	6,30	0,230
600	95 °С, 150 г/л	13,06	21,93	24,40	20,58	2,88	12,00	0,480
Нет	180 °С, 150 г/л	—	25,20	26,01	21,84	12,40	10,80	0,402
»	180 °С, 150 г/л и 3,5	—	27,44	25,90	22,01	10,80	12,00	0,448
»	210 °С, 150 г/л	—	27,60	27,00	20,87	13,66	12,10	0,434
»	210 °С, 150 г/л и 3,5	—	24,51	26,50	20,87	13,50	12,20	0,446
»	240 °С, 150 г/л	—	24,20	26,00	21,68	10,78	12,90	0,446
»	240 °С, 150 г/л и 3,5	—	27,74	26,00	20,87	13,66	12,8	0,476
Проба № 3								
Нет	80 °С, 150 г/л	—	21,45	14,70	53,85	21,40	0,50	0,033
»	80 °С, 150 г/л и 3,5	—	21,80	14,20	52,60	21,40	0,51	0,035
Проба № 4								
Нет	95 °С, 150 г/л	8,80	17,51	14,60	53,55	20,64	1,25	0,080
400	95 °С, 150 г/л	4,75	18,83	16,00	59,02	9,12	1,30	0,080
600	95 °С, 150 г/л	8,11	15,12	14,40	56,54	1,68	5,80	0,39
Проба № 5								
Нет	80 °С, 150 г/л	—	17,80	18,60	54,00	25,00	0,41	0,021
»	80 °С, 150 г/л и 3,5	—	17,80	17,70	54,00	25,00	0,41	0,022
Проба № 6								
Нет	95 °С, 150 г/л	6,56	22,14	22,40	40,55	25,75	0,65	0,030
400	95 °С, 150 г/л	8,22	23,12	23,40	41,30	11,52	2,56	0,100
600	95 °С, 150 г/л	11,10	21,65	20,00	36,08	3,84	8,00	0,39

\*При полном разложении шамозита и образовании ГАСНа с молекулярным соотношением Na<sub>2</sub>O:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: SiO<sub>2</sub> = 1:1:2,4 отношение Na<sub>2</sub>O:SiO<sub>2</sub> = 0,43.

Порошковые рентгенограммы шамозита весьма разнообразны. Г.В.Бриндли [1] объясняет это наличием в структуре как ортогональной, так и моноклинной формы

наложения слоев. Поскольку истинная симметрия структуры неясна, термин ортогональный здесь более приемлем, чем ромбический [5]. В большинстве случаев

ортогональная форма преобладает, моноклинная разновидность проявляется лишь в немногих линиях слабой и средней интенсивности.

Фазовый состав проб исследовался на рентгеновской установке ДРОН-0,5. Отношение интенсивностей рефлексов с  $d = 25$  и  $24$  нм использовалось для оценки соотношения соответственно ортогональной и моноклинной модификаций шамозита. Учитывая изложенное, был проведен рентгеноструктурный анализ проб исходных шамозитов и продуктов их переработки. Отсутствие первого базального отражения  $d = 140$  нм убедительно доказывает, что исследованные шамозиты следует отнести не к хлоритам, а к минералам каолининовой группы. Парал-

лельно рентгеноструктурному анализу проводился кристаллооптический.

Пробы шамозитов измельчались до крупности  $-0,147$  мм. Далее часть из них подвергалась обжигу. Как видно из дифрактограмм (рис.1), обжиг шамозитов сопровождался его разложением. Измерения удельной поверхности образцов газохроматографическим способом тепловой десорбции аргона и суммарного объема пор от  $300$  до  $6 \cdot 10^5$  нм методом ртутной порометрии показали, что в результате разложения удельная поверхность увеличивается:  $6,51 \text{ м}^2/\text{г}$  у исходных образцов и  $12,27 \text{ м}^2/\text{г}$  после обжига при  $600^\circ\text{C}$ . Аналогично увеличивается пористость по всем эквивалентным радиусам.

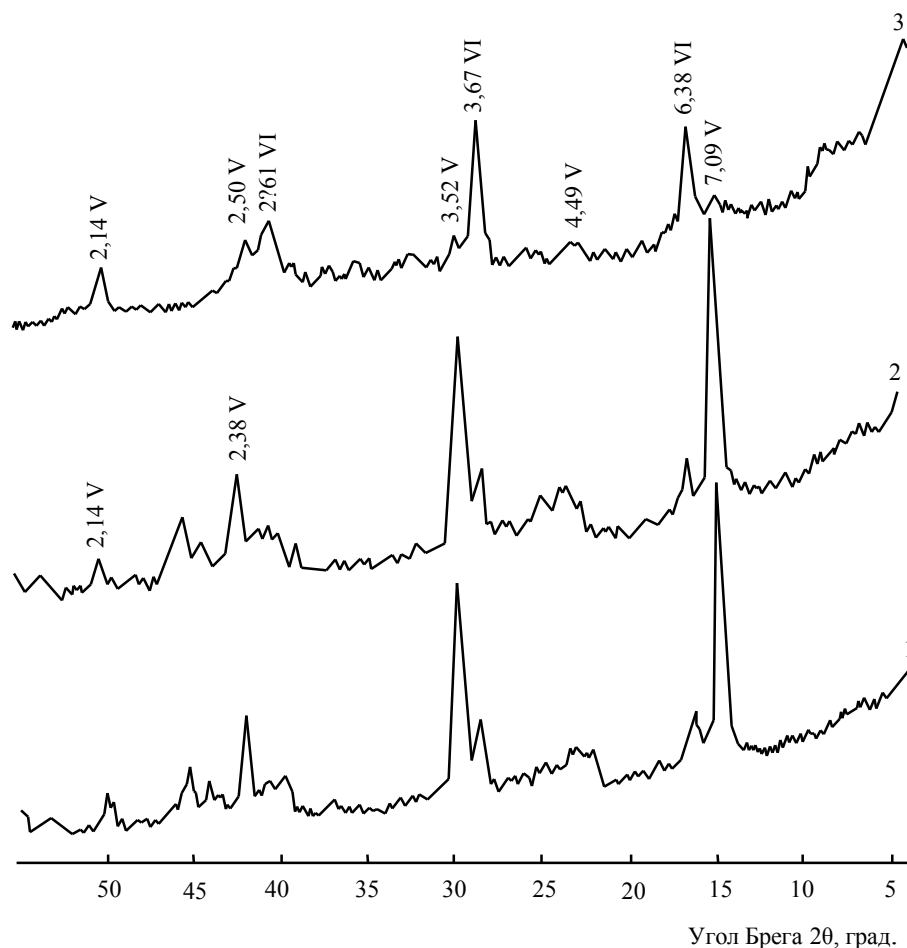


Рис.2. Дифрактограммы шамозита и продуктов его обжига после щелочной обработки

1 – исходный образец; температура обжига,  $^\circ\text{C}$ : 2 – 400, 3 – 600.

Продукт: V – шамозит, VI – ГАСН.

Цифры у кривых – длина волны, Å

Далее образцы исходных и обожженных шамозитов обрабатывались в течение 1 ч щелочными или алюминатными растворами при температуре 80-240 °С и отношении Ж:Т = 10:1 (табл.2, рис.2).

Исследования показали, что поведение шамозитов при взаимодействии со щелочными растворами зависит от соотношения ортогональной и моноклинной модификаций и степени окисленности. Окисление увеличивает неупорядоченность структуры шамозита [1]. Однако предварительный обжиг в слабоокислительной среде, начиная с температуры 600 °С, эти различия сглаживает за счет практически полного разложения шамозитов с образованием аморфных оксидов алюминия и кремния. Это подтверждается общеизвестным фактом практически полного их растворения в каустической щелочи [3].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бриндли Г.В. Рентгеновские методы изучения и структура глинистых минералов. М.: Мир, 1965. 599 с.

2. Дубовиков О.А. Поведение бокситов Среднего Тимана в процессе обжига / О.А.Дубовиков, Н.И.Еремин, А.Н.Наумчик // Цветная металлургия. 1980. № 4. С.50-52.

3. Еремин Н.И. Исследование превращений каолина химическим методом / Н.И.Еремин, М.И.Ерусалимский // ЖПХ. 1969. Т.42. Вып.3. С.1064-1068.

4. Обжиг бокситов Курской магнитной аномалии / А.И.Иванов, Ю.К.Талько-Побыванец, В.Н.Клекль, Н.И.Голливкин // Цветная металлургия. 1977. № 2. С.27-30.

5. Симакова Л.Г. О поведении шамозита в процессе Байера / Л.Г.Симакова, Г.Г.Гончаров, В.И.Паукер // Цветные металлы. 1975. № 12. С.36-39.

#### REFERENCES

1. Brindly G.V. X-ray methods of studying and structure of clay minerals. Moscow: The World, 1965. 599 p.

2. Dubovikov O.A., Naumchik A.N., Eryomin N.I. Behavior of bauxites of Srednego Timan in the course of roasting // Nonferrous metallurgy. 1980. N 4. P.50-52.

3. Eryomin N.I., Erusalimsky M.I. The research of kaolin transformations by a chemical method // MAC. 1969. V.42. Issue 3. P.1064-1068.

4. Ivanov A.I., Talko-Pobyvanez J.K., Klekl V.N., Golivkin N.I. The burning roasting of bauxites of Kursk magnetic anomaly // Nonferrous metallurgy. 1977. N 2. P.27-30.

5. Simakova L.G., Goncharov G.G., Pauker V.I. About behavior chamoisite when in use of Bayer // Nonferrous materials. 1975. N 12. P.36-39.



**Н.М.ТЕЛЯКОВ**, д-р техн. наук, профессор, *ptpe\_spmi@bk.ru*  
**С.Н.САЛТЫКОВА**, канд. техн. наук, доцент, *ssn\_58@mail.ru*  
**М.ПУРЭВДАШ**, аспирант, *moogi@mail.ru*  
*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

**N.M.TELYAKOV**, Dr. in eng. sc., professor, *ptpe\_spmi@bk.ru*  
**S.N.SALTYKOVA**, PhD in eng. sc., associate professor, *ssn\_58@mail.ru*  
**M.PUREVDASH**, post-graduate student, *moogi@mail.ru*  
*Saint Petersburg State Mining University*

## ИЗУЧЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ БАКТЕРИАЛЬНОГО РАСТВОРА НА СУЛЬФИДНЫЕ МЕДНО-МОЛИБДЕНОВЫЕ РУДЫ

Изучено воздействие бактериального раствора на сульфидные медно-молибденовые руды. Проведены исследования по измельчению, изменению плотности медно-молибденовой сульфидной руды исходной и после обработки бактериальным раствором.

**Ключевые слова:** медно-молибденовая руда, бактериальное окисление, бактериальный раствор, измельчение, плотность.

## STUDY OF INFLUENCE OF THE BACTERIAL SOLUTION ON COPPER MOLYBDENUM SULPHIDE ORES

It is studied influences of bacterial solution on the copper-molybdenum sulfide ore. The studies on crushing and on changes in density of copper-molybdenum sulfide ore before treatment and after treatment of the bacterial solution.

**Key words:** copper-molybdenum ore, biooxidation, bacterial solution, crushing, density.

С конца 80-х – начала 90-х гг. XX в. важными направлениями в области переработки труднообогатимых медных руд являются разработка и применение процессов выщелачивания и извлечения меди из растворов методом жидкостной экстракции.

Основными сульфидными минералами, входящими в состав медно-молибденовых руд, являются халькозин, ковеллин, молибденит, пирит и халькопирит. По мере разработки месторождения содержание простых сульфидов меди уменьшается, а содержание халькопирита увеличивается.

Халькозин и ковеллин выщелачиваются серно-кислотным раствором значительно быстрее, чем халькопирит, поэтому со временем устойчивость руды к выщелачиванию возрастает.

Проблема выщелачивания халькопирита является предметом исследования многих ученых. Растворимость медных минералов определяется уровнем энергии их кристаллической решетки, поэтому первичные медные минералы, обладая наиболее высокой энергией кристаллической решетки, относятся к труднорастворимым. В связи с этим для выщелачивания первичных медных минералов, таких как халькопирит, борнит, энергит, используются различные хлориды и требуются высокие температура и давление в автоклавах при их растворении. Данная технология слишком затратна и экологически опасна. Значительные успехи достигнуты в окислении халькопирита в области биоготехнологий (Ж.Баатархуу, 2006).

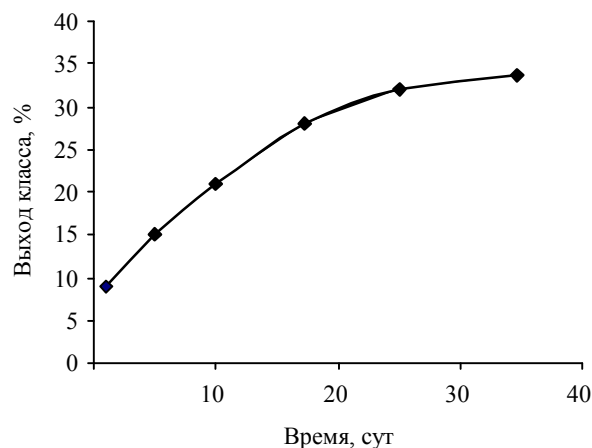


Рис. 1. Кинетика измельчения медно-молибденовой сульфидной руды

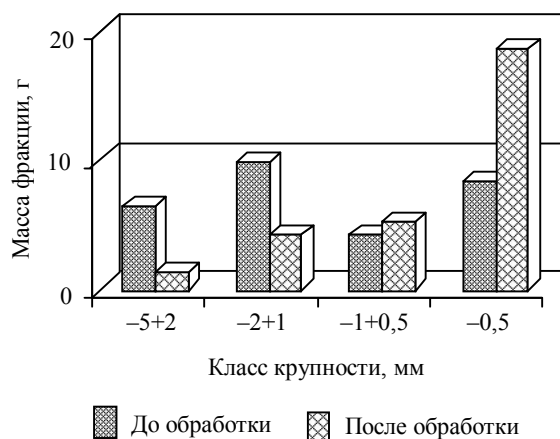
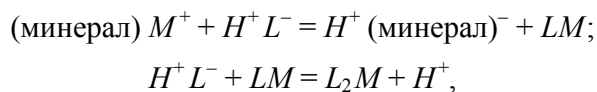


Рис. 2. Результаты измельчения медно-молибденовой руды

В настоящее время биохимическое выщелачивание для извлечения меди и урана из бедных и забалансовых руд и вскрышных пород в промышленных масштабах применяется на предприятиях США, Канады, Франции, Австралии, Японии, Болгарии, некоторых стран Южной Африки [3].

При биоокислении кварцсодержащих материалов силикатные бактерии (*Bacillus mucilagenosus*) разрушают кристаллическую решетку минерала, обеспечивая реагентам доступ к вкраплениям минерала. Дegradaция силикатных минералов происходит благодаря образованию комплексов или хелатов при взаимодействии органических соединений микробного синтеза с катионами, входящими в состав минералов:



где  $L$  – органические лиганды.

Большинство исследователей считают, что процесс бактериального разрушения силикатов происходит под воздействием активных продуктов жизнедеятельности микроорганизмов – энзимов (ферментов), органических и неорганических кислот, а также формирующихся при этом кислых или щелочных растворов [2].

Целью исследовательской работы является изучение влияния бактериальных культур (силикатных бактерий) на труднообогатимые сульфидные руды.

Для исследования из рудника открытых работ месторождения «Эрдэнэтийн Овоо» взяты сульфидные руды. Среднее содержание меди в рудах составляет 0,55 %. Содержание меди в окисленной руде составляет 2,53 %, вторичных сульфидов – 40,4 %, первичных сульфидов – 54,5 %. Медь в основном представлена халькопиритом.

В эксперименте использовались бактериальные культуры (силикатные бактерии, *Bacillus mucilagenosus*). Оптимальной для развития культуры силикатных бактерий является температура питательной среды 28-32 °С и pH = 5÷8. Для поддержания жизнедеятельности бактерий необходим углерод, источником которого являлась сахароза, входящая в состав питательной среды (2,5 г/л). Постоянная аэрация осуществлялась в питательной среде А27 [1]. Исследуемые руды помещали в питательную среду в течение 60 дней.

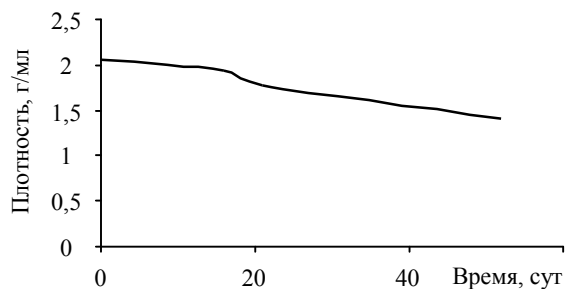


Рис. 3. Зависимость бактериального раствора от плотности медно-молибденовой сульфидной руды

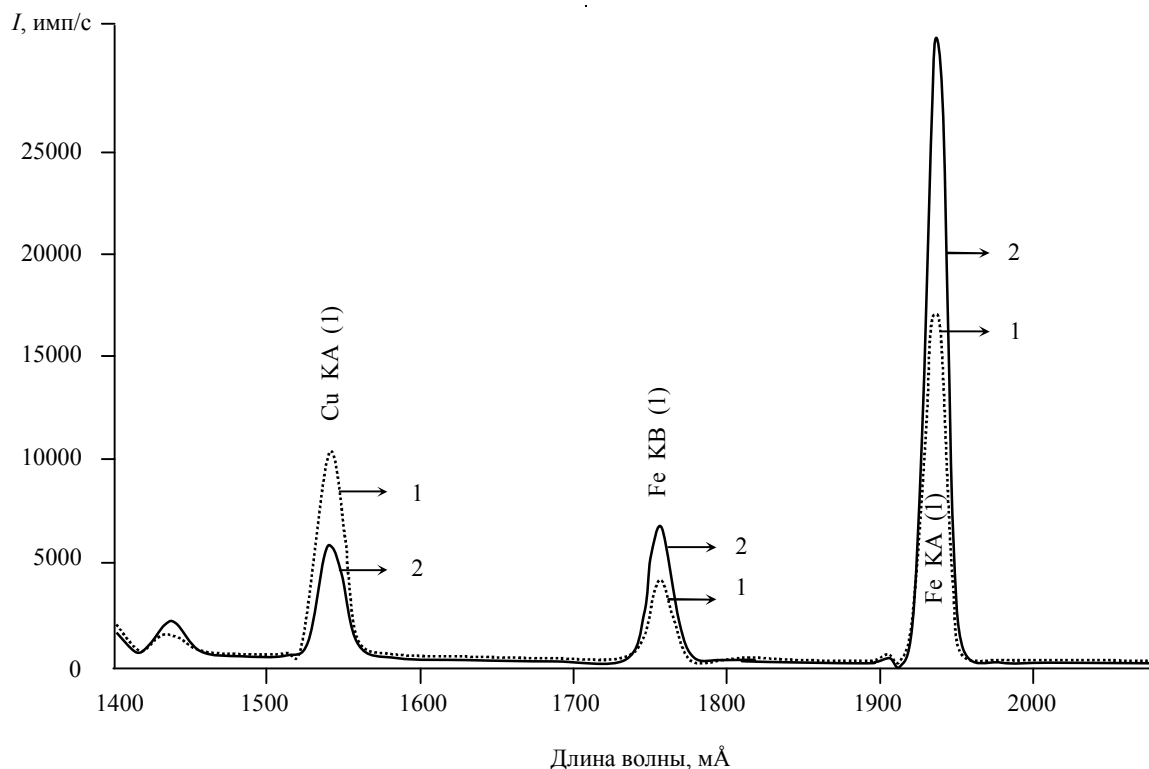


Рис.4. Спектры меди и железа сульфидной медно-молибденовой руды при выщелачивании по  $H_2SO_4$  (6 %) 1 – спектр исходной руды (твердая фаза); 2 – спектр руды после обработки бактериям (твердая фаза)

По завершении эксперимента были проведены исследования по измельчению медно-молибденовой сульфидной руды с содержанием  $SiO_2$  около 65 %, предварительно обработанной бактериальным раствором (рис.1).

Обработка руды бактериальным раствором осуществлялась от 2 до 36 сут. Для каждой пробы обработанной руды время измельчения 5 с. Как видно из рисунка, наибольший выход фракции после 35-суточного воздействия бактериальным раствором составлял менее 0,5 мм.

На рис.2 приведены результаты исследования по измельчению сульфидной медно-молибденовой руды исходной и после обработки бактериальным раствором. Время измельчения материала 5 с, обработка бактериальным раствором 60 дней. Общая масса исходной и обработанной пробы 30 г.

Как видно из рисунка, количество фракции менее 0,5 мм после обработки материала увеличилось в 2 раза.

В ходе исследования была определена истинная плотность для сульфидной медно-молибденовой руды после обработки бактериальным раствором, которая определялась по стандартной методике (рис.3).

Как видно из представленного графика, уменьшение плотности руды происходит на всем интервале воздействия бактериальным раствором. После обработки бактериальным раствором сульфидные руды подвергли выщелачиванию серно-кислотным раствором.

Обработанный материал находился в выщелачиваемом растворе в течение двух недель. По окончании выщелачивания спектры меди и железа снимали на спектроскане и сравнивали с исходной рудой.

Таким образом, проведенные нами экспериментальные исследования показали возможность перехода меди из твердой фазы в жидкую (рис.4).

Как видно из представленных спектров, содержание меди в твердой фазе после обработки уменьшается примерно в 2 раза.

### Выводы

1. В медно-молибденовой руде после обработки ее бактериальным раствором истинная плотность уменьшается от 2,05 до 1,41.

2. Скорость измельчения исследуемой руды, обработанной бактериальным раствором, увеличивается в 2 раза.

3. Проведенный эксперимент показал возможность перехода меди из халькопирита в раствор.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Александров В.Г. К вопросу об энергетическом источнике жизнедеятельности силикатных бактерий //

Материалы научной конференции по агрономии. Одесса, 1970.

2. Александров В.Г. Силикатные бактерии. М.: Сельхозгиз, 1953.

3. Таужнянская З.А. Новое в технологии бактериального выщелачивания за рубежом. М., 1977.

### REFERENCES

1. Aleksandrov B.G. To a question about the energy source of life of silicate bacteria // Material of the conference on agronomy. Odessa, 1970.

2. Aleksandrov B.G. Silicate bacteria. Moscow: Selhonzgiz, 1953.

3. Taujnyanskaya Z.A. New in the bacterial leaching technology abroad. Moscow, 1977.

**Г.В.ПЕТРОВ**, д-р техн. наук, профессор, *kafmetall@mail.ru*  
**А.А.ЧЕРНЫШЕВ**, аспирант, *kafmetall@mail.ru*  
**В.Н.КОВАЛЕВ**, аспирант, *kafmetall@mail.ru*  
*Санкт-Петербургский государственный горный университет*  
**Ю.В.АНДРЕЕВ**, д-р техн. наук, профессор, *kafmetall@mail.ru*  
*Санкт-Петербургский государственный политехнический университет*

**G.V.PETROV**, Dr. in eng. sc, professor, *kafmetall@mail.ru*  
**A.A.CHERNYSHEV**, post-graduate student, *kafmetall@mail.ru*  
**V.N.KOVALEV**, post-graduate student, *kafmetall@mail.ru*  
*Saint Petersburg State Mining University*  
**Y.V.ANDREEV**, Dr. in eng. sc, professor, *kafmetall@mail.ru*  
*Saint Petersburg State Polytechnical University*

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОПУТНОГО ПОЛУЧЕНИЯ СЕЛЕНА ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ АНОДНЫХ ШЛАМОВ ЭЛЕКТРОЛИЗА МЕДИ

Показаны недостатки традиционной обжиговоселенидной технологии извлечения селена. Приведены результаты исследований по разработке безреагентного электрохимического способа его извлечения. Предложена принципиальная технологическая схема получения технического селена на основе электроэкстракции.

**Ключевые слова:** селен, обжиговоселенидная технология, безреагентный электрохимический способ, селенистый раствор, электроэкстракция.

## IMPROVEMENT OF THE TECHNOLOGY ASSOCIATED PRODUCTION OF SELENIUM IN RECYCLING SLUDGE ANODIC ELECTROLYSIS OF COPPER

Shows the shortcomings of traditional roasting-selenide technology of extraction of selenium. The results of studies on the development of reagentless electrochemical method of removing it. A basic technological scheme of obtaining technical selenium in terms of electroextraction was offer.

**Key words:** selenium, roasting-selenide technology, reagentless electrochemical method, selenide solution, electroextraction.

В последнее десятилетие возросла потребность в селене во многом благодаря увеличению спроса на него в марганцевой, стекольной и других отраслях промышленности Китая. Анализ данных по производству селена свидетельствует, что на долю РФ приходится до 8-10 % мирового рынка. Производство селена осуществляется при переработке сульфидного полиметаллического сырья, преимущественно из шламов

электролиза меди, которые являются концентраторами благородных металлов и редких халькогенов. Учитывая чрезвычайную актуальность комплексного использования минерально-сырьевых ресурсов, более широкого внедрения безотходных технологических процессов, повышения эффективности мер по охране природы принципиально важно совершенствование технологии переработки медеэлектролитных шламов с более

эффективным использованием гидрометаллургических процессов как в части отдельных переделов, так и технологии в целом.

До недавнего времени в России для извлечения селена применялась исключительно обжиговоселенидная технология, которая была внедрена в 70-х гг. на Норильском и Алмалыкском ГМК и комбинате «Уралэлектромедь». В условиях резкого сокращения потребления селена в 80-90-х гг. и соответственно падения цен на селен сохранение селеновых переделов представлялось нецелесообразным. На комбинате «Уралэлектромедь», где наблюдалось также снижение содержания селена в анодных шлаках, обжиговоселенидная технология была упразднена и обезмеженные шламы направлялись непосредственно в плавку на сплав Доре.

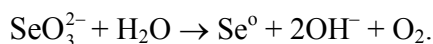
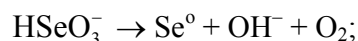
Резкий рост цен на селен в начале века и необходимость формирования канала вывода селена изменил ситуацию – в 2000-2003 гг. специалистами ОАО «Уралэлектромедь» были разработаны и внедрены технологии извлечения редких халькогенов из полупродуктов отделения пылеулавливания и газоочистки: селена из кислых селенистых растворов и селена и теллура из плавильных свинецсодержащих пылей и шлаков методом выщелачивания.

Обжиговоселенидная технология в настоящее время сохранена на НГМК и АГМК (Узбекистан), где основными стадиями являются: окислительный обжиг шлама, улавливание диоксида селена из печных газов в системе мокрой газоочистки оборотными содощелочными растворами, восстановление селенит-иона гидразин-гидратом (либо алюминиевым порошком), аэрационное выделение кристаллического селена из селенидного раствора. При всех очевидных достоинствах (малооперационность, высокое извлечение селена и др.) она связана с использованием дорогостоящих реагентов и сопровождается накоплением в сбросных и оборотных растворах селеносульфата натрия, устойчивого на восстановительных и аэрационных операциях [2].

Одним из направлений совершенствования обжиговоселенидной технологии является разработка безреагентного электро-

химического способа извлечения селена из растворов газопылеулавливания обжигового передела.

Термодинамический анализ системы  $\text{Se} - \text{H}_2\text{O}$  показывает, что особенности электрохимического поведения селена зависят от условий равновесия его свободных и протонизированных ионов в электролите. Суммарные электродные реакции при осуществлении процесса без разделения катодного и анодного пространства в зависимости от исходной формы селена с учетом анодного выделения кислорода имеют вид



Поскольку возрастание концентрации гидроксильных ионов в селенитном электролите происходит в 2 раза быстрее, чем в биселенитном, для обеспечения высокого одностадийного извлечения селена целесообразна электроэкстракция селена из биселенитных растворов при начальном  $\text{pH} = 2,5-3$ .

На основе анализа поляризационных кривых, полученных с помощью потенциостата IPC Pro L, установлено, что изменение параметров электролиза в диапазоне катодной плотности тока  $300-1000 \text{ A/m}^2$  и  $\text{pH} = 3-8$  практически не влияет на механизм катодного процесса выделения элементарного селена. При электроэкстракции селена из селенистых растворов для устранения сложностей при выборе устойчивого материала анода и предотвращения анодного окисления  $\text{Se}(\text{IV})$  до инертного  $\text{Se}(\text{VI})$  в качестве материала анода следует использовать рутенированный титан, обладающий высокими электрохимическими и эксплуатационными свойствами [3].

Экспериментальные исследования катодного электроосаждения селена осуществлялись с использованием синтетических селенит-биселенитных растворов на лабораторных электролизерах, обеспечивающих возможность проведения процесса с разделением и без разделения электродного пространства.

Осаждение селена на титановом катоде протекает с высоким выходом по току,

близким к 95-97 %. Выход по току селена с ростом катодной плотности тока незначительно уменьшается. Его величина не зависит от конечной концентрации Se (IV) в электролите вплоть до  $\leq 0,5$  г/л. Извлечение селена за одну стадию электролиза при  $D_k = 500$  А/м<sup>2</sup>,  $D_a = 400$  А/м<sup>2</sup>,  $pH_{исх} = 3$  и продолжительности 7 ч составляет 77,2 %, что существенно выше показателей электроосаждения из бикарбонатных растворов (30-50 %) [4]. Выход по току селена составляет 94,1 %, содержание селена в катодном продукте более 98 %.

На аноде из рутенированного титана протекают два конкурирующих процесса – выделение кислорода и образование Se (VI). Окисление селена до шестивалентного состояния протекает в незначительной степени:



С увеличением извлечения селена образование Se (VI) на рутенированном титане достигает определенного постоянного значения (около 10 %). Возможно, в электролите устанавливается равновесие между образованием Se (VI) и его химическим восстановлением при каталитическом действии ионов титана [1].

При электроэкстракции селена с разделением электродного пространства ионообменной мембраной МК 40 при  $D_k = 350$  А/м<sup>2</sup>,  $D_a = 500$  А/м<sup>2</sup>,  $pH_{исх}$  католита 2,5-3 и продолжительности процесса 5 ч катодное извлечение селена находится на уровне 77-80 % за один цикл электролиза при высоком выходе по току. Благодаря разделению электродного пространства удается снизить образование инертного Se (VI) до 2 %.

Селеносодержащие растворы, поступающие на электроэкстракцию, содержат тяжелые цветные металлы, железо и теллур. В процессе электролиза эти примеси не удаляются, и при последующем обороте обедненных растворов в цикл газоочистки на абсорбцию селена накапливаются, вызывая загрязнение товарного селена. Использование ионообменной очистки селенистых растворов с комбинированным сорбентом, представляющим смесь 1:1 иони-

тов АН-105-12-П и АН-31, обеспечивает удаление четырехвалентного Те (коэффициент распределения  $K_p = 140$ ), Си ( $K_p = 380$ ), в меньшей степени Fe ( $K_p = 70$ ) и обеспечивает в дальнейшем получение технического селена.

Результаты исследований по извлечению селена из полупродуктов медного производства позволяют рекомендовать принципиальную технологическую схему, включающую обжиг обезмеженного шлама, ионообменную очистку селеносодержащих поглощительных растворов и электроэкстракцию селена из биселенитного электролита с получением технического селена. Преимуществами электроэкстракционной технологии получения селена из поглощительных растворов шламового производства являются отсутствие отвальных продуктов, замкнутая схема регенерации электролита, уменьшение количества технологических операций для получения конечного продукта.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Букетов Е.А. Гидрохимическое окисление халькогенов и халькогенидов / Е.А.Букетов, М.З.Угорец. Алма-Ата: Наука, 1975.
2. Грейвер Т.Н. Селен и теллур / Т.Н.Грейвер, И.Г.Зайцева, В.М.Косов. М.: Металлургия, 1977.
3. Пат. 2393256 РФ. Способ извлечения селена при переработке шламов электролиза меди / Т.Н.Грейвер, Г.В.Петров, А.А.Чернышев, В.Н.Ковалев; Опубл. 27.06.2010.
4. Козырева Т.А. Исследование электроосаждения селена и теллура и разработка рациональных схем извлечения их из медьэлектролитных шламов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1975.

## REFERENCES

1. Buketov E.A., Ugorets M.Z. Hydrochemical oxidation of chalcogens and chalcogenides. Alma-Ata: Nauka, 1975.
2. Graver T.N., Zaitseva I.G., Kosover V.M. Selenium and tellurium. M.: Metallurgy, 1977.
3. Patent 2393256 RF. Method of extraction of selenium in the treatment of sludge of copper electrolysis / T.N.Graver, G.V.Petrov, A.A.Chernyshev, V.N.Kovalev; Publ. 27.06.2010.
4. Kozyreva T.A. Investigation of electrodeposition of selenium and tellurium, and the development of rational schemes of extracting them from the copper electrolyte slurry: Diss. on receipt extent of candidate of technical science. Leningrad, 1975.

**Е.Е.АНДРЕЕВ**, канд. техн. наук, доцент, (812) 328-82-85

**Н.В.НИКОЛАЕВА**, канд. техн. наук, ассистент, (812) 328-82-85

**В.В.ЛВОВ**, канд. техн. наук, ассистент, (812) 328-82-85

*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

**E.E.ANDREEV**, PhD in eng. sc., associate professor, (812) 328-82-85

**N.V.NIKOLAEVA**, PhD in eng. sc., assistant lecturer (812)328-82-85

**V.V.LVOV**, PhD in eng. sc., assistant lecturer, (812)328-82-85

*Saint Petersburg State Mining University*

## СПОСОБ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ МЕЛЬНИЦЫ САМОИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Разработан способ автоматического управления работой мельницы самоизмельчения, позволяющий повысить производительность по выходу товарного класса – 30 + 0,2 мм, а также снизить расход электроэнергии на тонну перерабатываемого сырья.

**Ключевые слова:** автоматизация, измельчение, оптимизация, управление.

## METHOD OF AUTOMATIC CONTROL OVER AUTOGENOUS MILL OPERATION

The method of automatic control over autogenous mill operation, allowing to raise productivity on an exit of a commodity class – 30 + 0,2 mm, and also to lower the expense of the electric power on ton of processed raw materials.

**Key words:** automation, milling, optimization, control.

Подготовка руд к обогащению – один из самых энергоемких процессов, направленных на получение конструкционных материалов, без которых невозможно существование технократического общества\*. За время существования промышленной переработки полезных ископаемых в мире накоплен значительный опыт совершенствования отдельных типов оборудования рудоподготовки. В зависимости от поставленных задач на разных этапах принимались различные критерии его совершенствования. Для начального периода становления отрасли характерен поиск технологических схем и создание

необходимого оборудования для них. Во второй половине XIX в. и первой половине XX в. на первый план выходит задача повышения производительности рудоподготовительных комплексов, зачастую в ущерб таким показателям, как качество извлечения и удельные энергетические затраты.

Несравнимые с предыдущими периодами объемы использования, а соответственно и производства металлов, и агрессивная политика общества по отношению к недрам наглядно продемонстрировала их ограниченность. Истощение многих месторождений полезных ископаемых в XX в. заставляет человечество кардинально пересмотреть свое отношение не только к расходованию и правильному использованию богатств, получаемых из недр, но и к выбору основополагающих критериев при организации их производства.

\* Баранов В.Ф. Современная мировая практика в области рудоподготовки (зарубежный опыт) // Обогащение руд. 2004. № 3. С.41-47.

Baranov V.F. Modern world practice in area of ore pretreatment (foreign experience) // Mineral Processing Journal. 2004. N 3. P.41-47.



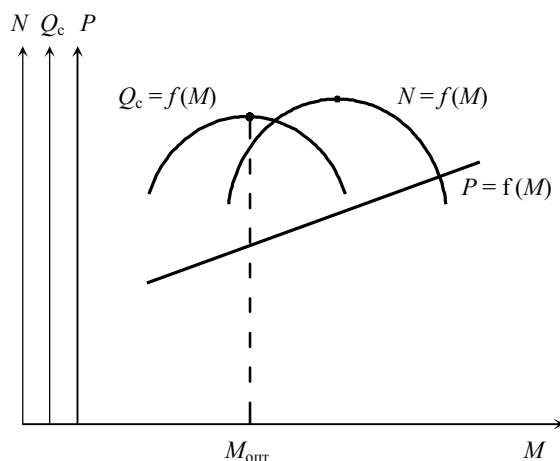


Рис. 1. Типовые статические характеристики замкнутого цикла

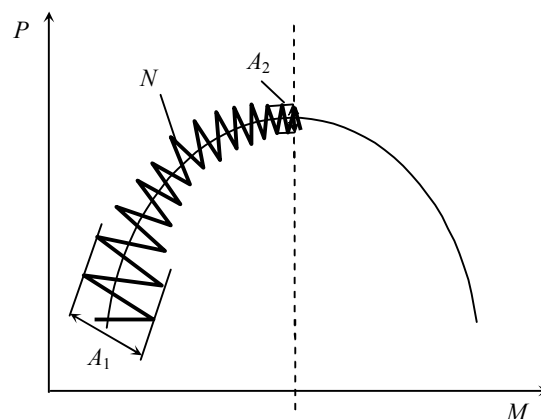


Рис. 2. Зависимость амплитуды высокочастотной составляющей мощности от запаса материала в мельнице

Технический прогресс и современные достижения науки уже сегодня позволяют значительно уменьшить металлоемкость оборудования различных технологических процессов и снизить их энергоемкость. Важное место в решении этих задач следует отводить процессам автоматизации.

Критическим моментом при работе измельчительного агрегата замкнутого цикла\*\* является опасность его спонтанного перехода в режим, соответствующий попаданию на правую (неустойчивую) ветвь статической характеристики  $Q_c = f(M)$  (рис. 1).

Это может произойти в результате дрейфа статических характеристик агрегата при изменении физико-механических или минералогических характеристик исходного питания измельчительного агрегата (крупность, твердость, плотность, измельчаемость руды) или его режимных параметров (заполнение мелющими телами, износ футеровки и т.д.). Этот режим характеризуется лавинообразным нарастанием циркуляции с резким снижением выдачи готового продукта и последующей перегрузкой мельницы с переходом в аварийный режим. Для избежа-

ния такой ситуации на каждом шаге корректировки заданий контурам стабилизации в системе автоматического управления фиксируется амплитуда высокочастотной составляющей мощности и сравнивается с пороговой величиной (рис. 2). Пороговая величина амплитуды определяется индивидуально для каждого объекта управления. В качестве первого приближения можно взять эту величину примерно равной половине значения амплитуды высокочастотной составляющей при нормальном режиме работы системы автоматического управления.

Работа системы осуществляется следующим образом (рис. 3). Система автоматизации работой мельницы мокрого самоизмельчения содержит четыре основных контура стабилизации. Первый контур стабилизации подачи руды включает датчик веса 4 руды, регулятор стабилизации подачи 5 руды и исполнительный орган 6 запаса материала в мельнице 1. Второй и третий контуры стабилизации запаса материала в мельнице содержат датчик веса 7 мельницы, регулятор стабилизации запаса 8 материала, датчик мощности 13 мельницы и исполнительный орган 6. В четвертый контур стабилизации плотности готового продукта входят датчик плотности 12 готового продукта, регулятор стабилизации плотности 10 готового продукта и исполнительный орган подачи 11 воды. В установившемся режиме контуры стабилизации подачи руды под-

\*\* Андреев Е.Е. Дробление, измельчение и подготовка сырья к обогащению: Учебник для вузов / Е.Е.Андреев, О.Н.Тихонов; СПбГИ. СПб, 2007. 440 с.

Andreev E.E., Tihonov O.N. Crushing, grinding and preparation of raw materials for enrichment: the Textbook for High schools; Saint Petersburg State Mining Institute. Saint Petersburg, 2007. 400 p.

держивают требуемые заданные значения регулируемых параметров, обеспечивая оптимальное заполнение мельницы пульпой и оптимальную плотность готового продукта. При отсутствии возмущений по качественным показателям исходного питания (крупность, твердость, измельчаемость) контур стабилизации исходного питания 4-5-6 поддерживает постоянное (заданное) значение производительности. При этом в стабилизируемом контуре запаса в мельнице 7-8-6 соотношение исходная руда – циркулирующая нагрузка не изменяется и регулятор 8 не выдает никаких корректирующих воздействий в систему стабилизации исходного питания 4-5-6. Также еще один стабилизируемый контур запаса в мельнице 13-8-6 сравнивает амплитуды высокочастотной составляющей мощности с пороговой величиной, и если пороговая величина еще не достигнута, то регулятор 8 не выдает никаких корректирующих воздействий в систему стабилизации исходного питания 4-5-6.

При изменении условий на входе в агрегат (плотности и твердости руды) уменьшается циркулирующая нагрузка и, следовательно, весовое заполнение мельницы (запас материала в ней), что немедленно отражается в показаниях датчиков 7 и 13. Снижение сигнала с датчиков 7 и 13 компенсируется регулятором 8, который увеличивает задание контуру 4-5-6 до тех пор, пока не установится равновесие в контурах 7-8-6 и 13-8-6, т.е. величина запаса материала не примет прежнее заданное значение. В стабилизирующих контурах запаса материала в мельнице 7-8-6 и 13-8-6 после переходного процесса в соотношении исходная руда – циркулирующая нагрузка увеличивается доля исходного питания за счет циркулирующей нагрузки. Это значит, что стабилизирующий контур 4-5-6 будет поддерживать новое (увеличенное) заданное значение производительности. В случае поступления более твердых или трудноизмельчаемых руд картина процессов в системе регулирования будет иметь качественно обратный характер.

Очевидно, что при изменении свойств исходного питания необходима корректировка заданных значений контурам стабили-

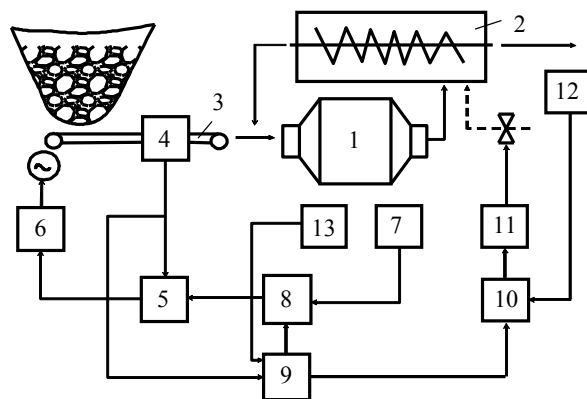


Рис.3. Блок-схема системы управления

зации, чтобы привести в соответствие изменившиеся условия в агрегате с его возможностями и требованиями технологии. Поиск новых оптимальных заданий осуществляется контурами 4-9-8 и 10-9-8.

Увеличение задания в контуре 4-5-6 служит сигналом к включению оптимизатора 9, который на некоторую установленную постоянную величину увеличивает задание в контуре 7-8-6 и уменьшает в контуре 12-10-11. После переходного процесса оптимизатором 9 осуществляется анализ реакции агрегата на это увеличение. Если получено увеличение производительности в контуре 4-5-6, а в контуре 13-8-6 амплитуда высокочастотной составляющей мощности уменьшается, то направление корректировки заданных значений (в сторону увеличения контуров 7-8-6 и уменьшения контуров 12-10-11) сохраняется; в противном случае осуществляется реверс. Рост производительности агрегата при увеличении задания по запасу материала  $M$  отвечает нахождению агрегата на левой части ветви статической характеристики  $Q_c = f(M)$ . Получение первого отрицательного приращения производительности свидетельствует о переходе в неустойчивую область. Поэтому оптимальными будут задания, полученные на шаге, предшествующем получению отрицательного приращения производительности, что отвечает нахождению агрегата в окрестностях оптимума производительности.

Таким образом, система регулирования (рис.3) включает четыре контура стабилизации 4-5-6, 7-8-6, 13-8-6 и 12-10-11, рабо-

тающих непрерывно и поддерживающих оптимальные задания по заполнению мельницы пульпой и плотности готового продукта, и контуры поиска и выдачи оптимальных заданий 4-9-8, 4-9-10 и 13-9-8, эпизодически (по мере надобности) корректирующих заданные значения контурам 7-8-6, 13-8-6 и 12-10-11 при изменении входных величин агрегата (твёрдость, крупность, измельчаемость исходной руды).

Этот способ обеспечивает повышение устойчивости, точности и качества регулирования работы мельниц самоизмельчения, что, в конечном счете, сказывается на повышении технико-экономических показателей процесса измельчения.

Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг.

**А.К.ОРЛОВ**, канд. техн. наук, доцент, (812)328-84-59

**Г.В.КОНОВАЛОВ**, канд. техн. наук, доцент, (812)328-84-59

**А.Я.БОДУЭН**, канд. техн. наук, доцент, (812)328-84-59

*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

**A.K.ORLOV**, PhD in eng. sc., associate professor, (812) 328-84-59

**G.V.KONOVALOV**, PhD in eng. sc., associate professor, (812) 328-8459

**A.J.BODUEN**, PhD in eng. sc., associate professor, (812) 328-8459

*Saint Petersburg State Mining University*

## ПИРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ СЕЛЕКЦИЯ МЕДНО-ЦИНКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

В статье рассматривается совместная пирометаллургическая переработка медных штейнов и медно-цинковых материалов сложного состава. Дана термодинамическая оценка этого процесса. Предложен новый способ переработки медно-цинковых материалов и его аппаратное оформление.

**Ключевые слова:** пирометаллургия, медь, цинк, концентрат, аппарат, возгонка.

## PYROMETALLURGICAL SELECTION OF COPPER-ZINC MATERIALS

The article says about complex processing copper matte and copper-zinc materials are considered. The thermodynamic estimation this process is given. The new way of processing of copper-zinc materials and new metallurgical aggregate is offered.

**Key words:** pyrometallurgy, copper zinc, concentrate, apparatus, sublimation

Относительно невысокое содержание тяжелых цветных металлов в сульфидном сырье сложного состава и трудной обогатимости, а также сложность их химического и минералогического состава, практически исключают возможность их переработки традиционными методами, что определяет применение специальных процессов и комбинированных технологических схем. Примером материалов подобного типа является медно-цинковый промпродукт, состав которого широко варьируется, %: 1-10 Cu, 6-30 Zn, 16-39 Fe, 30-47 S. Проблеме переработки таких промпродуктов посвящено большое число научно-исследовательских работ, на основе которых предложены и описаны в технической литературе [2-4, 8] различные варианты возможной переработки с применением как гидрометаллургических, так и

пиро процессов. Некоторые из предложенных технологий испытаны в полупромышленном масштабе, но пока промышленного применения в значительных масштабах по разным причинам не нашли [1, 5, 9].

В основу разработки нового способа пирометаллургической селекции сульфидных медно-цинковых материалов положена термодинамическая оценка реакций 1-19 (см. таблицу) с участием ZnS и ZnO, при которых в качестве одного из продуктов плавки получается цинк в газообразном состоянии, а также ряд окислительных и восстановительных реакций с участием сульфидов и оксидов Cu и Fe.

Расчетные значения изменения энергии Гиббса с учетом теплоемкостей и фазовых превращений в системе Zn-Me-S-O приведены в таблице.

**Изменение энергии Гиббса (кДж/моль) в зависимости от температуры**

№ п/п	Реакции	Температура, К				
		1200	1400	1600	1800	2000
	<b>Окислительные</b>					
1.	$\text{ZnS} + \text{O}_2 = \text{Zn}_{(\text{r})} + \text{SO}_2$	-129,7	-154,6	-179,1	-203,2	-226,9
2.	$\text{ZnS} + 1/2 \text{O}_2 = \text{ZnO} + 1/2 \text{S}_2$	-80,3	-79,2	-78,2	-77,1	-76,1
3.	$2/3 \text{ZnS} + \text{O}_2 = 2/3 \text{ZnO} + 2/3 \text{SO}_2$	-236,2	-225,8	-215,3	-204,9	-194,5
4.	$2/3 \text{Cu}_2\text{S} + \text{O}_2 = 2/3 \text{Cu}_2\text{O} + 2/3 \text{SO}_2$	-180,8	-165,7	-151,9	-141,6	-131,5
5.	$\text{Cu}_2\text{S} + \text{O}_2 = 2\text{Cu} + \text{SO}_2$	-187,3	-179,5	-172,9	-166,3	-159,5
6.	$2/3 \text{FeS} + \text{O}_2 = 2/3 \text{FeO} + 2/3 \text{SO}_2$	-250,0	-239,7	-227,3	-215,6	-204,4
7.	$\text{FeS} + \text{O}_2 = \text{Fe} + \text{SO}_2$	-188,7	-186,0	-180,0	-172,5	-166,6
8.	$\text{Cu}_2\text{S} + 2 \text{Cu}_2\text{O} = 6 \text{Cu} + \text{SO}_2$	-19,5	-41,5	-63,3	-74,1	-84,2
	<b>Восстановительные</b>					
9.	$\text{ZnS} + 2 \text{Cu} = \text{Zn}_{(\text{r})} + \text{Cu}_2\text{S}$	57,6	4,9	-6,2	-36,9	-67,4
10.	$\text{ZnO} + 2 \text{Cu} = \text{Zn}_{(\text{r})} + \text{Cu}_2\text{O}$	140,8	115,0	89,0	58,0	27,1
11.	$\text{ZnO} + \text{CO} = \text{Zn}_{(\text{r})} + \text{CO}_2$	46,4	22,9	-0,2	-23,1	-45,6
12.	$\text{ZnS} + \text{CO} = \text{Zn}_{(\text{r})} + \text{COS}$	144,3	120,0	96,1	72,5	49,2
	<b>Обменного взаимодействия</b>					
13.	$\text{ZnS} + 2 \text{ZnO} = 3 \text{Zn}_{(\text{r})} + \text{SO}_2$	319,7	213,5	108,6	5,0	-97,3
14.	$\text{ZnO} + 1/3 \text{FeS} = \text{Zn}_{(\text{r})} + 1/3 \text{FeO} + 1/3 \text{SO}_2$	99,7	64,2	30,2	-3,667	-37,402
15.	$\text{ZnO} + 1/2 \text{Cu}_2\text{S} = \text{Zn}_{(\text{r})} + \text{Cu} + 1/2 \text{SO}_2$	131,0	94,3	57,4	21,0	-15,0
16.	$\text{ZnS} + 2/3 \text{Cu}_2\text{O} = \text{Zn}_{(\text{r})} + 2/3 \text{Cu}_2\text{S} + 1/3 \text{SO}_2$	51,1	11,0	-27,3	-95,5	-61,7
17.	$\text{ZnS} + 2 \text{Cu}_2\text{O} = \text{Zn}_{(\text{r})} + 4 \text{Cu} + \text{SO}_2$	38,1	-16,6	-69,5	-151,6	-111,1
18.	$2\text{Cu} + \text{FeS} = \text{Cu}_2\text{S} + \text{Fe}$	-1,5	-6,5	-7,0	-6,2	-7,0
19.	$\text{ZnS} + \text{Fe} = \text{Zn}_{(\text{r})} + \text{FeS}$	59,1	31,4	0,8	-30,7	-60,4

Термодинамика окислительного процесса показывает более вероятное протекание традиционного конвертирования медных штейнов (реакции 1-8) и, с другой стороны, маловероятное получение цинкового возгона в границе температур до 1500 °С (реакция 14).

В восстановительной и близкой к ней атмосфере наиболее возможны реакции удаления цинка в возгоны за счет взаимодействия оксисульфидного расплава и металлической меди с промпродуктом цинкового производства по реакциям 9,11,16,17. Необходимо отметить равноценность реакций 9 и 11. С этой позиции наиболее благоприятные условия для удаления цинка в возгоны возникают в атмосфере, близкой к нейтральной, во втором периоде конвертирования медных штейнов, когда после удаление шлака освобождается поверхность белого матта с появившимися первыми порциями металлической меди. В этом варианте, в отличие от способа предложенного А.А.Бабаджаном [1], представляется необходимой подача медно-цинковых материа-

лов на второй стадии конвертирования, исключая их загрузку на первой стадии.

При загрузке медно-цинковых материалов на второй стадии конвертирования в окислительной атмосфере часть цинка сублимируется, а остальная часть цинка окисляется и переходит в шлаковую фазу, восстановление цинка из которой нецелесообразно. Ведение процесса в атмосфере восстановительной или близкой к нейтральной при загрузке цинкосодержащих материалов в начало второй стадии конвертирования с появлением первых порций металлической меди без удаленного шлака первой стадии приводит к непосредственному контакту загружаемого материала с расплавом сульфидной и металлической меди, что определяет наиболее выгодные термодинамические условия прямого восстановления соединений цинка.

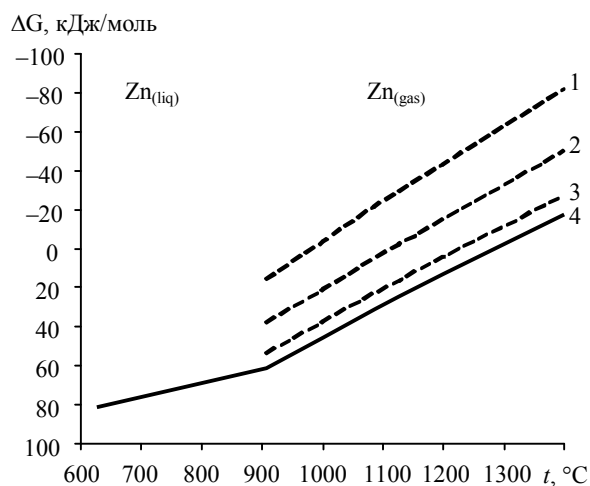
Снижение металлизации расплава железом (реакция 18) возможно при температуре выше 1300 °С, о чем свидетельствует величина изменения энергии Гиббса реакции 19.

Для поддержания требуемого температурного режима жидкой ванны 1300-1400 °С, ликвидации дефицита тепла и создания нейтрально восстановительного характера газовой фазы в конвертер вместе с дутьем нужно подавать газообразное топливо (попутный газ от других производств, природный газ и др.)

Снижение содержания кислорода в дутье на стадии загрузки в конвертер медно-цинкового промпродукта может быть разбавлено азотом, получаемым попутно при производстве кислорода из воздуха.

Поскольку особый интерес представляет реакция 9 (см. таблицу) прямого восстановления сульфида цинка металлической медью, то приведенные термодинамические данные (см. рисунок) свидетельствуют, что при равновесном соотношении фаз протекание этой реакции становится термодинамически вероятно при температуре около 1300 °С, а в условиях, удаленных от теоретического равновесия, присущих большинству металлургических процессов, протекание реакции возможно при температуре немногим выше 1100 °С ( $P_{Zn} = 0,1$  атм). Это принципиально подтверждает целесообразность предлагаемого пути ведения процесса.

Недостатки горизонтальных конвертеров хорошо изучены специалистами-металлургами, поэтому в качестве альтернативного и более приемлемого варианта аппаратного оформления для совместной переработки медно-цинкового промпродукта и медного штейна предлагается применить «аппарат струйного вращения» (АСВ), предложенный проф. Л.М.Шалыгиным [6]. При использовании АСВ могут быть устранены многие недостатки, присущие горизонтальным конвертерам. В АСВ реализуется принципиально новый способ подачи дутья. Сущность этого способа заключается в том, что взаимодействие газовой струи с жидкой средой резко изменяется при отклонении от вертикали. Возникает горизонтальная составляющая динамической силы струи, за счет которой в жидкой среде поднимается «отгонная» волна. Скорость движения волны в векторе струи зависит от скорости истечения и расстояния от насадки



Зависимость изменения энергии Гиббса  
(реакция  $ZnS + 2 Cu = Zn_{(l)} + Cu_2S$ )  
в условиях равновесного и неравновесного  
парциального давления паров цинка  $P_{Zn}$ , атм  
1 – 0,01; 2 – 0,1; 3 – 0,5; 4 – 1,0

до ванны и угла встречи струи с поверхностью жидкости. При «набегании» волны по касательной на цилиндрическую поверхность сосуда жидкость направляется по образующей цилиндра. Наложение на круговую поверхность расплава нескольких таких пространственно-ориентированных струй возбуждает вращение верхнего слоя расплава со скоростью, отвечающей энергетическим характеристикам струй и их ориентации. За счет действия сил вязкости во вращательное движение вовлекается вся масса расплава с закономерным распределением скоростей по глубине и радиальному простиранию ванны.

Регулярный, упорядоченный массоперенос обуславливает однородность теплового и химического полей в объеме расплава, что должно обеспечить наиболее благоприятные условия протекания технологического процесса. Основные закономерности такого массообмена интерпретированы математической моделью на основе анализа дифференциального уравнения Навье – Стокса о движении вязкой жидкости при наложении «касательных напряжений».

В Горном институте была разработана новая конструкция водоохлаждаемых фурм для АСВ [7]. Фурма получила название радиально-осевой. Экспериментальная надеж-

ность радиально-осевых фурм определялась длительными огневыми испытаниями малых образцов при температуре дутьевого кратера 3000 °С. Это достигалось подачей кислорода совместно с жидким топливом. Все использовавшиеся фурмы полностью сохранились без каких-либо изъятий.

Стационарный аппарат струйного вращения в наибольшей степени пригоден для осуществления пирометаллургической селекции. В этом случае аппарат оборудуется шлакоотводящим каналом, тангенциально примыкающим к цилиндрическому корпусу аппарата. В результате продувки расплава шлаковая фаза смещается в этот шлаковый карман, освобождая штейновую поверхность, что обуславливает оптимальные термодинамические, кинетические и эксплуатационные условия пирометаллургической селекции.

## Выводы

1. Проведена термодинамическая оценка процесса пирометаллургической селекции медных цинкосодержащих материалов, которая показала наиболее выгодные условия ведения плавки, совмещенной с конвертированием медных штейнов при загрузке цинкового сырья на второй стадии конвертирования во время появления в расплаве первых порций металлической меди. Таким образом, участие металлической меди в отгонке цинка позволит снизить расход дорогостоящего восстановителя.

2. В качестве аппаратного оформления процесса пирометаллургической селекции выбран агрегат новой конструкции, удовлетворяющий технологическим, энергетическим, экологическим и экономическим требованиям, предъявляемым к современным пирометаллургическим процессам.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бабаджан А.А. Пирометаллургическая селекция. М.: Металлургия, 1968.

2. Лебедь Б.В. Повышение использования комплексности сырья в медеплавильном производстве / Б.В.Лебедь, Г.М.Харитади, Г.В.Скопов // Цветные металлы. 1979. № 12.

3. Набойченко С.С. Автоклавная переработка медно-цинковых и цинковых концентратов. М.: Металлургия, 1989.

4. Набойченко С.С. Автоклавная гидрометаллургия цветных металлов. / С.С.Набойченко, Я.П.Шнеерсон, Л.В.Чугаев. Екатеринбург, 2002.

5. Орлов А.К. Селективный окислительный обжиг медно-цинкового промпродукта как основа для комбинированной технологии его переработки // Обогащение руд. 1999. № 4.

6. Пат. 2236474 РФ, МПК C22B15/06. Способ переработки радиоэлектронного лома / Л.М.Шалыгин, Н.М.Теляков, Г.В.Коновалов. Опубл. 20.09.2004.

7. Пат. 2349648 РФ, МПК C21C5/48. Способ конвертирования медно-никелевых штейнов / Л.М.Шалыгин, Г.В.Коновалов, Т.Р.Косовцева. Опубл. 20.03.2009.

8. Промышленные испытания по получению и переработке медно-цинковых промпродуктов Райской обогатительной фабрики / Б.В.Лебедь, Р.С.Гузайров, Г.И.Аржанников и др. // Комплексное использование минерального сырья. 1983. № 1.

9. Рациональные способы переработки медно-цинковых руд Казахстана и перспективы автогенной кивцетной технологии / А.М.Кунаев, С.М.Кожамметов, Л.С.Гецкин и др. // Вестник АН КазССР. 1976. № 4.

## REFERENCES

1. Babadzan A.A. Pyrometallurgical selection. Moscow: Metallurgy, 1968.

2. Lebed B.V., Haritadi G.M., Skopov G.V. Increase of use of integrated approach of raw material in copper-smelting manufacture // Nonferrous metals. 1979. N 12.

3. Naboychenko S.S. Autoclaved processing of cooper-zinc and zinc concentrates. Moscow: Metallurgy, 1989.

4. Autoclaved hydrometallurgy of nonferrous metals / S.S.Naboychenko, Y.P.Shneerson, L.V.Chugaev. Ekaterinburg, 2002.

5. Orlov A.K. Selective oxidizing roasting cooper-zinc materials on a basis for the combined technology of his(its) processing // Enrichment of ores. 1999. N 4.

6. Pat. 2236474 RF, МПК C22B15/06. A way of treatment electronic waste / L.M.Shalygin, N.M.Teljakov, G.V.Konovalev. From 20.09.2004.

7. Pat. 2349648 RF, МПК C21C5/48. A way of conversion cooper-nikel matte / L.M.Shalygin, G.V.Konovalev, T.R.Kosovtseva. From 20.03.2009.

8. Industrial tests on reception and processing cooper-zinc middlingses of Paradise concentrating factory / B.V.Lebed, R.S.Gusairow, G.I.Arzhannikov et al. // Complex use of mineral raw material. 1983

9. Rational ways of processing of cooper-zinc ores of Kazakhstan and prospect autogenous technologies / A.M.Kunaev, S.M.Kozhahmetov et al. // Bulletin KasSSR. 1976. N 4.

**В.Н.БРИЧКИН**, *д-р техн. наук, профессор, kafmetall@mail.ru*  
**Н.В.НИКОЛАЕВА**, *канд. техн. наук, ассистент, (812)328-82-85*  
**А.А.БЕСЕДИН**, *студент, kafmetall@mail.ru*  
**Е.Е.ГОРДЮШЕНКОВ**, *студент, kafmetall@mail.ru*  
*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

**V.N.BRICHKIN**, *Dr. in eng. sc., professor, kafmetall@mail.ru*  
**N.V.NIKOLAEVA**, *PhD in eng. sc., assistant lecturer, opiopi@bk.ru*  
**A.A.BESEDIN**, *student, kafmetall@mail.ru*  
**E.E.GORDJUSHENKOV**, *student, kafmetall@mail.ru*  
*Saint Petersburg State Mining University*

## **КИНЕТИКА И МЕХАНИЗМ АВТОКЛАВНОГО ОСАЖДЕНИЯ КРИСТАЛЛОГИДРАТОВ**

Изложены экспериментальные результаты термического осаждения кристаллогидратов сульфата магния из растворов, содержащих сульфаты щелочных металлов. Установлены показатели процесса как функции кинетически значимых факторов. Показана возможность описания кристаллизации сульфата магния уравнением кинетики топохимических процессов и определены его характеристики.

**Ключевые слова:** кинетика, сульфаты, автоклавная кристаллизация, топохимия.

## **KINETICS AND MECHANISM OF AUTOCLAVE PRECIPITATION OF CRYSTALLINE**

Experimental results of thermal deposition of crystal hydrates of magnesium sulfate from a solution containing sulphates of alkali metals. Set of indicators as a function of the kinetically relevant factors. It was shown possible to describe the crystallization kinetics equation of magnesium sulphate topochemical processes and identify its characteristics.

**Key words:** kinetics, sulfates, autoclave crystallization topochemistry.

Осаждение кристаллогидратов является важной технической задачей, решение которой в химико-металлургических технологиях обеспечивает очистку растворов от примесей и выделение продуктов заданного качества. При этом существенное значение имеет не только полнота выделения компонента в твердую фазу, но и количество кристаллогидратной влаги, подлежащей в последующем удалению в процессе кальцинирующего обжига. В металлургии легких металлов такие технологии применяются для производства фтористых солей и криолита, выделения продукционной соды и ее примесей в алюминатных растворах, поташа, вана-

датов, оксалатов, сульфатов и значительного количества других химических соединений. Заметное место в технологии осаждения этих соединений занимают изогидрические и полигидрические процессы, обеспечивающие их безреагентное выделение из раствора. В полной мере такой подход касается сульфата магния, играющего заметную роль в металлургии и химической технологии и накапливающегося в растворах различного производственного назначения [3]. В то же время для выделения из раствора магния традиционно используют процессы осаждения малорастворимых солей и оснований [2], заметно проигрывающие безреагентным



способам. Как известно, сульфат магния обладает обратной зависимостью растворимости от температуры в интервале 75-200 °С и выше, что используется, например, при его выделении из боратных маточников [3]. Для металлургии легких металлов заметный интерес представляет возможность селективного выделения сульфата магния в присутствии сульфатов щелочных металлов, что создает новые подходы для комплексной переработки низкокачественного алюминиевого сырья [1].

Исследование термической кристаллизации сульфата магния в присутствии сульфатов лития проводилось с использованием синтетических растворов постоянного состава, содержащих 70,0 г/л MgO и 3,0 г/л Li<sub>2</sub>O. Отдельная серия опытов проводилась с использованием растворов, дополнительно содержащих фоновую концентрацию сульфата калия, которая в пересчете на K<sub>2</sub>O составляла 10 г/л. При выполнении лабораторных исследований использовали автоклавы объемом 75 и 1000 мл. Рентгенодифрактометрический анализ осадков позволил установить, что первичная кристаллизация сульфата магния происходит в виде гексагидрата, а затем он обезвоживается с переходом в моноводный сульфат. Таким образом, осаждение сульфата магния дополнительно связано с его термической дегидратацией. По результатам анализа растворов установлено, что потери лития и калия слабо коррелируют с извлечением сульфата магния в осадок и в среднем составляют 2-5 % от их содержания в исходном растворе. Это, скорее всего, связано с увлечением щелочей в составе маточного раствора на поверхности кристаллического осадка. Понятно, что объем увлеченного раствора является сложной функцией не только количества образовавшейся твердой фазы, но также функцией ее пористости, поверхности и морфологии.

На рис.1 приведены кинетические кривые осаждения сульфата магния в пересчете на концентрацию его оксида и кинетические кривые по степени выделения из раствора. Для оценки относительных показателей по степени завершения процесса от теоретиче-

ски возможной величины необходимо определить равновесные значения концентрации сульфата магния в использованных системах, содержащих сульфаты щелочных металлов. За основу их расчета были приняты известные равновесные концентрации сульфата магния в воде при температуре, соответствующей условиям проводимых исследований. Влияние ионной силы на растворимость сульфата магния в растворах, содержащих щелочные металлы, учитывалось при расчете коэффициентов активности ионов по эмпирическому уравнению Дэвиса и определении искомой растворимости из соотношения [2]

$$S_I/S_{II} = (\gamma_{\pm})_{II}/(\gamma_{\pm})_I,$$

где  $S_I$  и  $S_{II}$  – растворимость соли в первом и втором растворах;  $(\gamma_{\pm})_I$  и  $(\gamma_{\pm})_{II}$  – средние коэффициенты активности соли соответственно в двух растворах.

Результаты расчета растворимости (см. таблицу) позволяют представить показатели по осаждению сульфата магния в процентах от теоретически возможной величины, т.е. оценить степень подхода системы к равновесному состоянию. Наличие различных участков индукционного периода в начале и диффузионного ограничения в конце процесса, а также интенсивного развития кристаллизации в основном периоде осаждения, является основанием для описания кинетики этого процесса во всем временном интервале с помощью уравнения Колмогорова – Ерофеева. Полученный объем экспериментальных данных позволяет рассчитать кинетические параметры процесса с использованием приема двойного логарифмирования и известной связи между кинетическими параметрами уравнения Колмогорова – Ерофеева и Аррениуса [2]:

$$\ln K = \ln K_0 - \frac{E_a}{RT} \ln[-\ln(1-\alpha)] = \ln n + \frac{1}{n} \ln \tau,$$

где  $\alpha$  – степень завершения процесса;  $\tau$  – время;  $n$  – постоянный кинетический параметр из уравнения Г.В.Саковича;  $K$  – константа скорости реакции;  $E_a$  и  $K_0$  – соответственно энергия активации и постоянная уравнения Аррениуса.

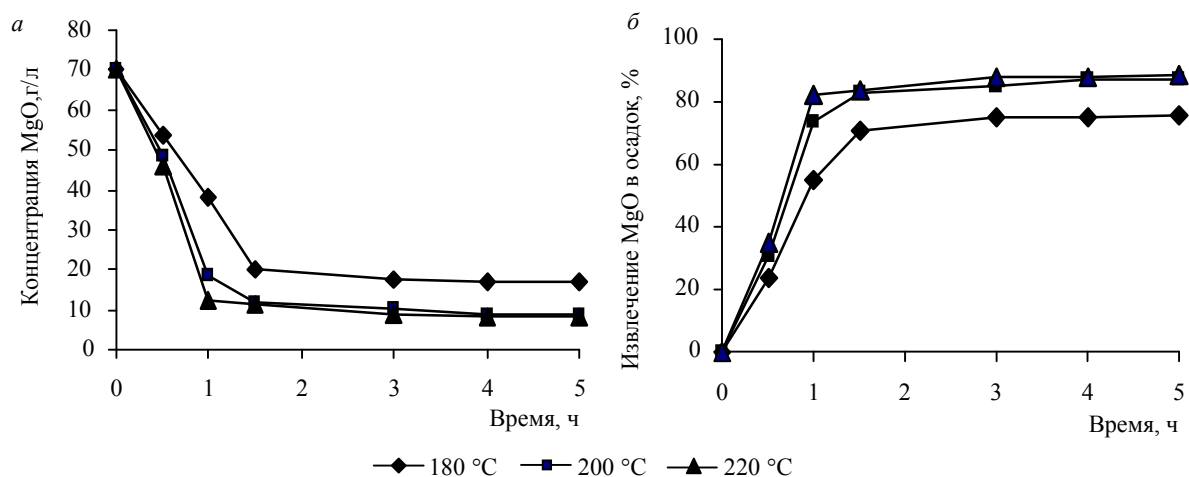


Рис.1. Кинетика термической кристаллизации  $\text{MgSO}_4$  по концентрации  $\text{MgO}$  в сульфатных растворах (а) и степени осаждения  $\text{MgO}$  из сульфатных растворов (б), содержащих  $\text{Li}_2\text{SO}_4$

**Параметры равновесных растворов, содержащих сульфат магния и сульфаты щелочных металлов**

Физико-химическая система	Параметры равновесного раствора								
	$T = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$			$T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$			$T = 220\text{ }^{\circ}\text{C}$		
	$I$	$\gamma_{\pm}$	$S_{\text{MgO}}, \text{г/л}$	$I$	$\gamma_{\pm}$	$S_{\text{MgO}}, \text{г/л}$	$I$	$\gamma_{\pm}$	$S_{\text{MgO}}, \text{г/л}$
$\text{MgSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$	1,7	0,347	17,0	0,496	0,230	4,796	0,255	0,263	2,551
$\text{MgSO}_4 - \text{Li}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}$	1,795	0,368	16,0	0,672	0,227	4,866	0,441	0,233	2,903
$\text{MgSO}_4 - \text{Li}_2\text{SO}_4 - \text{K}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}$	—	—	—	0,783	0,231	4,788	0,542	0,228	2,953

Примечание.  $I$  – ионная сила;  $\gamma_{\pm}$  – средний коэффициент активности;  $S_{\text{MgO}}$  – растворимость в пересчете на оксид магния.

Вид полученных линеаризованных кривых при обработке данных рис.1, б позволяет разбить весь временной интервал на два смысловых участка с выраженным изменением кинетических параметров, в результате чего стало возможно определение констант кристаллизации сульфата магния для соответствующих температур и временных отрезков. Затем проводилось построение в координатах линеаризованного уравнения Аррениуса для определения энергии активации (рис.2). Результаты расчетов показали, что при кристаллизации сульфата магния в условиях естественной конвекции лимитирующая стадия сохраняется во всем временном промежутке. При этом величина энергии активации для первой стадии составляет 16,6 кДж/моль, а для второй соответственно 17,9 кДж/моль. Экспериментальные исследования в системе  $\text{MgSO}_4 - \text{Li}_2\text{SO}_4 - \text{K}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}$  выполнялись в условиях вынужден-

ной конвекции раствора при введении затравки оксида магния марки ЧДА. Количество затравки в данной серии опытов составляло 50 % от содержания  $\text{MgO}$  в исходном растворе, что предпочтительнее для достижения наиболее высоких показателей по извлечению сульфата магния в осадок (рис.3).

На рис.4 приведены кинетические кривые кристаллизации сульфата магния с представлением результатов соответственно по концентрации оксида магния в растворе и степени его осаждения. Обработка полученных материалов производилась в соответствии с уравнением кинетики топочимических процессов по ранее изложенной методике. По результатам расчетов энергия активации процесса в этих условиях составляет 130 кДж/моль и отражает отсутствие сопротивлений, имеющих физическую природу.

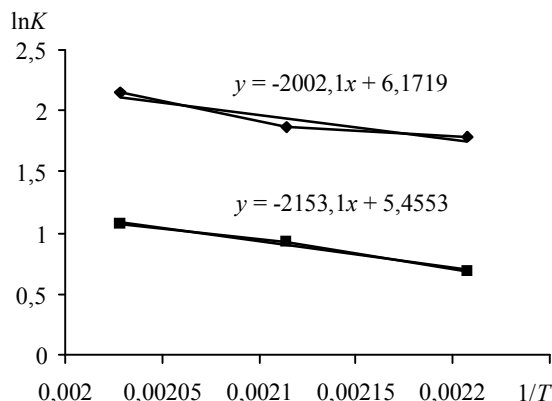


Рис.2. Линеаризованная зависимость уравнения Аррениуса применительно к осаждению  $\text{MgSO}_4$  в системе  $\text{MgSO}_4 - \text{Li}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}$  с разбивкой на I и II стадию

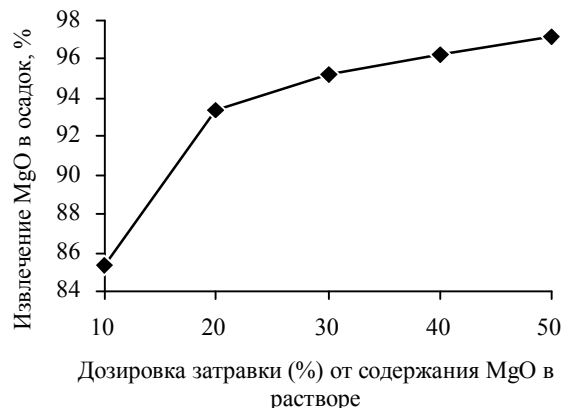


Рис.3. Влияние дозировки затравочного оксида магния на извлечение сульфата магния в осадок при температуре 220 °С и продолжительности кристаллизации 1,5 ч

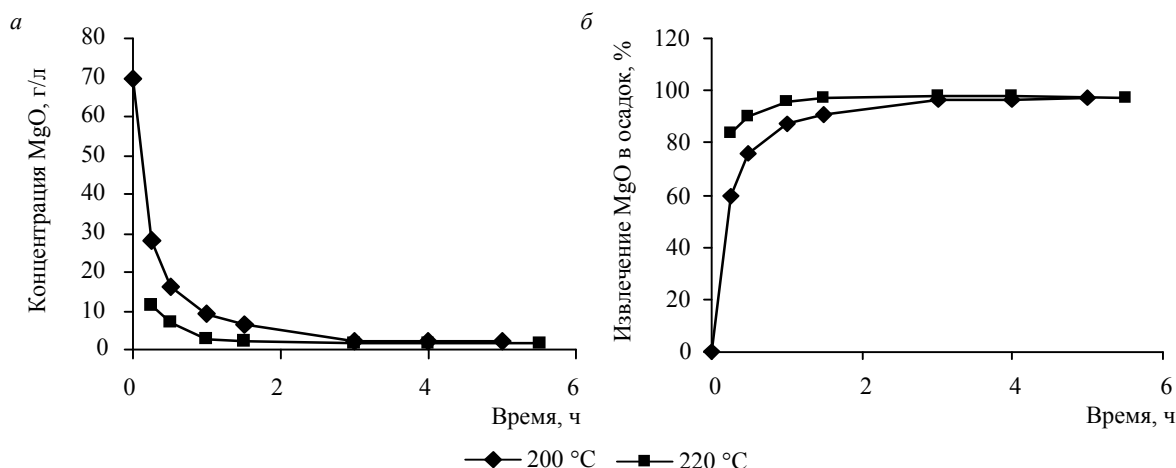


Рис.4. Кинетика термической кристаллизации  $\text{MgSO}_4$  по концентрации  $\text{MgO}$  (а) и степени осаждения  $\text{MgO}$  из сульфатных растворов (б) в системе  $\text{MgSO}_4 - \text{Li}_2\text{SO}_4 - \text{K}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}$

Комплекс представленных результатов позволяет говорить о возможности селективного осаждения сульфата магния с высокими показателями по извлечению из раствора, содержащего щелочные металлы. При этом кинетическое описание процесса термической кристаллизации сульфата магния возможно с помощью уравнения Колмогорова – Ерофеева независимо от природы лимитирующей стадии, которая в данной системе является высокочувствительной к условиям осаждения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бричкин В.Н. Поведение алюминия в сульфатно-фторидных растворах / В.Н.Бричкин, Э.И.Яскеляинен,

М.Д.Вилюгина // Цветная металлургия, 1987. № 2. С.115-117.

2. Зеликман А.Н. Теория гидрометаллургических процессов / А.Н.Зеликман, Г.М.Вольдман, Л.В.Беляевская. М.: Металлургия, 1975. 504 с.

3. Позин М.Е. Технология минеральных солей. Л.: Химия, 1974. Ч.1. 791 с.

#### REFERENCES

1. Brichkin V.N., Yaskelyaynen E.I., Vilyugina M.D. Behavior of aluminum sulfate-fluoride solutions // Non-ferrous metallurgy, 1987. N 2. P.115-117.

2. Zelikman A.N., Voldman G.M., Belyaevskaya L.V. Theory of hydrometallurgical processes. Moscow: Metallurgiya. 1975. 504 p.

3. Posin M.E. The technology of mineral salts. Leningrad: Chemistry, 1974. Part 1. 791 p.

**О.А.ДУБОВИКОВ** канд. техн. наук, доцент, (812)328-86-60

**Н.В.НИКОЛАЕВА**, канд. техн. наук, ассистент, (812)328-82-85

*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

**O.A.DUBOVIKOV**, PhD in eng. sc., associate professor, ((812)328-86-60

**N.V.NIKOLAEVA**, PhD in eng. sc., assistant lecturer (812)328-82-85

*Saint Petersburg State Mining University*

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗЛОЖЕНИЯ КАОЛИНИТА ЩЕЛОЧНЫМИ РАСТВОРАМИ

Представлены результаты выщелачивания кремнесодержащих минералов щелочесодержащими растворами. Показано, что разложение каолинита происходит в толще твердой фазы, покрытой коркой ГАСНа, не нарушая основной ее структуры и без избытка растворителя. Растворяющаяся поверхность остается постоянной, что является одним из условий применимости уравнения Дроздова – Ротиняна.

**Ключевые слова:** выщелачивание, каолинит, бокситы, обескремнивание.

## THE MATHEMATICAL FORMULATION OF PROCESS OF DECOMPOSITION ALKALINE SOLUTION KAOLIN

Results of desilication siliceous minerals alkali-containing are presented by solutions. Testify that that decomposition kaolin occurs in thickness of the firm phase covered with crust hydroalumosilicate of sodium, without breaking its basic structure and without surplus of solvent. The dissolved surface remains to a constant that is one of conditions of applicability of the equation of Drozdova – Rotinjana.

**Key words:** extraction, kaolin, bauxites, desiliconization.

Как известно, бокситы представляют собой полиминеральную горную породу, содержащую в качестве полезных глиноземсодержащих минералов гиббсит, бемит и диаспор, которые в разных количественных соотношениях содержат алюмосиликаты, железосодержащие минералы, минералы титана и кальция. Кроме того, бокситы многих месторождений содержат карбонаты, сульфаты, сульфиды, соединения хрома, органические вещества и другие компоненты. Соотношение минералов весьма разнообразно и колеблется даже в пределах одного месторождения. В основном минералы представлены тонкодисперсными, часто аморфными или скрытокристаллическими частицами. Нередко наблюдается взаимное прорастванение минералов.

Условно все бокситообразующие минералы можно разделить на три группы: алюминийсодержащие минералы, минералы, затрудняющие или нарушающие ведение технологического процесса, и балластные соединения. Однако алюмосиликаты являются одновременно алюминий- и кремнийсодержащими минералами (табл.1) [4]. Согласно данным [2, 3, 6] предварительный обжиг шамозитизированных бокситов при последующей гидрохимической переработке по способу Байера повышает извлечение глинозема и увеличивает потери щелочи при последующем автоклавном выщелачивании. Это объясняется тем, что разложение алюмосиликата сопровождается кристаллизацией гидроалюмосиликата натрия ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1,7\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Поло-

Таблица 1

## Алюмосиликаты бокситов

Минерал	Формула	Содержание, % (по массе)		Отношение Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub>
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	
Андалузит (кианит, силлиманит)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·SiO <sub>2</sub>	63,0	37,0	1,70
Дистен	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·SiO <sub>2</sub>	63,0	37,0	1,70
Каолинит (накрит, диксит, галлуазит)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2SiO <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	39,5	46,4	0,85
Гидрослюда (мусковит)	K <sub>2</sub> O·3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·6SiO <sub>2</sub>	38,5	45,2	0,85
Альбит	Na <sub>2</sub> O·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·6SiO <sub>2</sub>	19,4	68,8	0,28
Ортоклаз	K <sub>2</sub> O·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·6SiO <sub>2</sub>	18,4	65,0	0,28
Лейцит	K <sub>2</sub> O·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·4SiO <sub>2</sub>	23,5	55,1	0,43
Серицит	K <sub>2</sub> O·3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·6SiO <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	38,4	45,2	0,85
Анальцит	Na <sub>2</sub> O·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·6SiO <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	18,2	64,3	0,28
Берилл	3BeO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·6SiO <sub>2</sub>	19,0	66,9	0,28
Шамозиты	(Fe <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup> ) <sub>3</sub> [AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> ](OH) <sub>2</sub> (Fe, Mg) <sub>3</sub> (O, OH) <sub>6</sub>	20,6-30,0	18,0-33,0	0,62-1,67
Хлориты	(Mg, Al, Fe <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup> ) <sub>6</sub> (Si, Al) <sub>4</sub> (O, OH) <sub>4</sub>	21,1-27,7	16-30	0,70-1,73

Таблица 2

Условия разложения каолинита и значения коэффициентов  $M$  и  $\beta$ 

Параметры щелочной обработки				$M \cdot 10^5$	$\beta$
Температура, °C	Na <sub>2</sub> O <sub>к</sub> , г/л	$\alpha_k$	Ж:Т		
105	150	—	10:1	92600	1,016
205	150	—	10:1	476600	1,184
240	150	—	10:1	123600	4,301
105	150	3,5	10:1	199400	0,471
205	150	3,5	10:1	1264700	1,451
240	150	3,5	10:1	772000	2,639
105	300	3,5	3:1	31300	1,732
205	300	3,5	3:1	729900	1,380
240	300	3,5	3:1	939700	3,585

жительный баланс по оксиду алюминия возможен, если в исходном алюмосиликате весовое отношение оксида алюминия к диоксиду кремния больше единицы. Процесс разложения каолинита будет сопровождаться потерей щелочи и глинозема.

Исходным материалом служил измельченный до крупности –0,053 мм каолинит следующего состава, % (по массе): 13,88 ППП; 38,02 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 47,40 SiO<sub>2</sub>; 0,50 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 0,10 TiO<sub>2</sub>; 0,22 (MgO + CaO); 0,30 Na<sub>2</sub>O. Для определения влияния температуры и состава раствора на степень разложения каолинита были сняты кинетические характеристики при температуре 105, 205 и 240 °C. При этом навеска помещалась в стаканчик, укреплен-

ный на крышке автоклава, что исключало ее контакт с раствором до достижения заданной температуры. Степень разложения рассчитывалась на основании анализа раствора и остатка от выщелачивания. Рассчитанная энергия активации указывает на то, что в начальный период скорость процесса лимитируется скоростью протекания химического процесса. Переход в раствор оксида алюминия и диоксида кремния сопровождается вторичным процессом – образованием гидроалюмосиликата натрия, который осаждается на частицах твердой фазы. Происходит снижение контакта каолинита с раствором. С увеличением глубины взаимодействия растет толщина этого слоя, обволакивающего частицы, и как след-

ствие растёт влияние диффузионной составляющей скорости процесса.

Подобные процессы относятся к самотормозящимся и описываются уравнением Дроздова – Ротиняна [1, 6]

$$\frac{1}{\tau} \ln \frac{1}{1-\alpha_1} - \beta \frac{\alpha_1}{\tau} = M,$$

где  $\tau$  – продолжительность взаимодействия;  $\alpha_1$  – степень разложения;  $\beta$ ,  $\dot{I}$  – коэффициенты соответственно торможения и суммарной скорости,

$$\beta = \frac{mKV}{DSB\mu + KV}; M = \frac{KDSB\mu}{DSB\mu + KV},$$

где  $D$  – средний коэффициент диффузии реагента сквозь корку;  $S$  – поверхность раздела фаз;  $K$  – константа скорости реакции первого порядка;  $V$  – объем реагента;  $B$  – количество реагента на единицу объема твердой фазы;  $\mu$  – коэффициент, учитывающий переход от поверхностной концентрации к объемной;  $m$  – количество молей реагирующего твердого вещества, приходящегося на 1 моль реагента.

Для идентификации математического описания модели были проведены технологические опыты. В каждом отдельном случае изучали распределение во времени диоксида кремния и определяли входящие в уравнения коэффициенты (табл.2).

Расположение расчетных и экспериментальных точек на одной прямой линии на графике в координатах  $\left( \frac{\alpha_1}{\tau} - \frac{1}{\tau} \ln \frac{1}{1-\alpha_1} \right)$

подтверждает возможность аппроксимации процесса разложения каолинита уравнением Дроздова – Ротиняна (рис.1).

Только в начальный период скорость процесса лимитируется скоростью химического процесса. Если принять, что  $D \rightarrow \infty$ , то  $DSB\mu \gg KV$ ;  $\beta \rightarrow 0$  и  $\dot{I} \rightarrow K$ . Уравнение Дроздова – Ротиняна превращается в уравнение скорости реакции первого порядка. Затем разложение каолинита происходит в толще твердой фазы, покрытой коркой ГАСНа, не нарушая основной ее структуры и без избытка растворителя. Растворяющая-

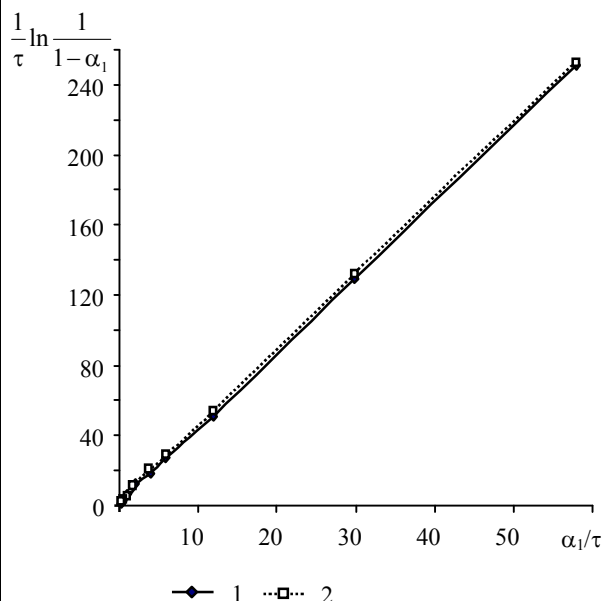


Рис.1. Описание процесса разложения каолинита щелочным раствором 150 г/л  $\text{Na}_2\text{O}_k$  и Ж:Т = 10:1 уравнением Дроздова – Ротиняна

1 и 2 – экспериментальные и теоретические данные соответственно

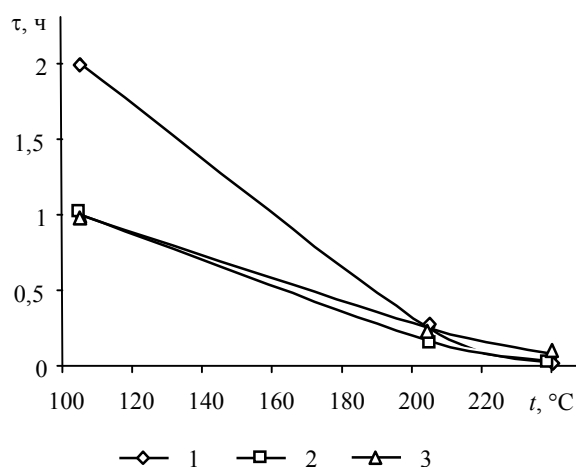


Рис.2. Зависимость времени полного разложения от условий выщелачивания

1 – щелочной раствор; 2 – алюминатный раствор Ж:Т = 10:1; 3 – алюминатный раствор Ж:Т = 3:1  
 ся поверхность остается постоянной, что является одним из условий применимости уравнения. Если принять, что  $D \rightarrow 0$ , то  $DSB\mu \ll KV$ ;  $\dot{I} \rightarrow \frac{DSB\mu}{V}$  и в пределе  $\beta \rightarrow m$ .

По уравнению рассчитывалось время, необходимое для полного разложения каолинита ( $\alpha_1 \geq 0,99$ ).

Если при 105 °С для чистого щелочного раствора время составляет 2 ч (рис.2), а для алюминатных 1 ч, то с возрастанием температуры эта разница уменьшается. При 240 °С разница нивелируется и составляет всего 1-5 мин.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дроздов Б.В. Кинетика процесса цементации // Труды 2-й Всесоюзной конференции по теоретической и прикладной химии. Киев, 1949. С.106-107.
2. Дубовиков О.А. Поведение бокситов Среднего Тимана в процессе обжига / О.А.Дубовиков, Н.И.Еремин, А.Н.Наумчик // Цветная металлургия. 1980. № 4. С.50-52.
3. Исследование термических превращений шамозита при обжиге / Н.И.Еремин, А.Н.Белова, О.А.Дубовиков, А.Н.Наумчик // ЖПХ. 1984. № 4. С.932-934.
4. Наумчик А.Н. Производство глинозема: Учеб. пособие / А.Н.Наумчик, О.А.Дубовиков; ЛГИ. Л., 1987. 99 с.

5. Обжиг бокситов Курской магнитной аномалии / А.И.Иванов, Ю.К.Талько-Побыванец, В.Н.Клекль, Н.И.Голивкин // Цветная металлургия. 1977. № 2. С.27-30.

6. Ротинян А.Л. Кинетика процесса обжига, выщелачивания, промывки и цементации / А.Л.Ротинян, Б.В.Дроздов // ЖОХ. 1949. Т.19. Вып.10. С.1843-1852.

#### REFERENCES

1. Drozdov B.V. Kinetics of process cementations // Works 2 All-Union conferences on theoretical and applied chemistry. Kiev, 1949. P.106-107.
2. Dubovikov O.A., Naumchik A.N., Eryomin N.I. Behavior of bauxites of Srednego Timan in the course of roasting // Nonferrous metallurgy. 1980. N 4. P.50-52
3. Eryomin N.I., Belova A.N., Dubovikov O.A., Naumchik A.N. The research of thermal transformations chamoisite at roasting // MAC. 1984. N 4. P.932-934.
4. Naumchik A.N., Dubovikov O.A. Alumina manufacture: The tutorial. Leningrad, 1987. 99 p.
5. Ivanov A.I., Talko-Pobyvanez J.K., Klekl V.N., Golivkin N.I. The burning roasting of bauxites of Kursk magnetic anomaly // Nonferrous metallurgy. 1977. N 2. P.27-30.
6. Rotinjan A.L., Drozdov B.V. Kinetics of process of burning, extraction, washings and cementations // MGC. 1949. Vol.19. Issue 10. P.1843-1852.

**Г.В.ПЕТРОВ**, *д-р техн. наук, профессор, kafmetall@mail.ru*  
**А.А.ЧЕРНЫШЕВ**, *аспирант, kafmetall@mail.ru*  
**В.Н.КОВАЛЕВ**, *аспирант, kafmetall@mail.ru*  
**А.Ю.СПИНУ**, *студент, kafmetall@mail.ru*  
*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

**G.V.PETROV**, *Dr. in eng. sc, professor, kafmetall@mail.ru*  
**A.A.CHERNYSHE**, *post-graduate student, kafmetall@mail.ru*  
**V.N.KOVALEV**, *post-graduate student, kafmetall@mail.ru*  
**A.Y.SPINU**, *student, kafmetall@mail.ru*  
*Saint Petersburg State Mining University*

## ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ СЕЛЕНА В БИСЕЛЕНИТНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТАХ

Проведен термодинамический анализ системы  $\text{Se} - \text{H}_2\text{O}$ . Построены зависимости концентраций оксианионов селена от pH-раствора и поляризационные кривые для различных материалов анода. Сделаны выводы о закономерностях процесса электроэкстракции селена из селенистых растворов.

**Ключевые слова:** селен, безреагентный электрохимический способ, селенистый раствор, термодинамический анализ, поляризационные кривые, электроэкстракция.

## STUDY OF THE ELECTROCHEMICAL BEHAVIOUR OF SELENIUM IN BIASELENIUM ELECTROLYTES

A thermodynamic analysis of the system  $\text{Se} - \text{H}_2\text{O}$  was prospect. Plotted dependences the concentrations of selenium oxyanions from the pH of the solution and polarization graphs for various materials of the anode. Draw conclusions about the regularities of selenium electroextraction from selenium solutions.

**Key words:** selenium, reagentless electrochemical method, selenium solution, thermodynamic analysis, polarization graph, electroextraction.

Одним из перспективных направлений совершенствования обжиговоселенидной технологии получения селена при переработке медеелектролитных шламов может рассматриваться электрохимическое выделение селена из растворов газоочистки обжигового передела [1-3].

Термодинамический анализ системы  $\text{Se} - \text{H}_2\text{O}$  показывает, что особенности электрохимического поведения селена зависят от условий равновесия его свободных и протонизированных ионов в электролите. Константы диссоциации селенистой кислоты можно записать в виде



$$k_1 = \frac{[\text{HSeO}_3^-][\text{H}^+]}{[\text{H}_2\text{SeO}_3]} = 3,5 \cdot 10^{-3};$$



$$k_2 = \frac{[\text{SeO}_3^{2-}][\text{H}^+]}{[\text{HSeO}_3^-]} = 5,8 \cdot 10^{-8}.$$

Равновесие представим в виде системы уравнений:

$$\alpha_0 = \frac{[\text{H}^+]^2}{[\text{H}^+]^2 + k_1[\text{H}^+] + k_1k_2} = \frac{[\text{H}_2\text{SeO}_3]}{C_{\text{H}_2\text{SeO}_3}};$$



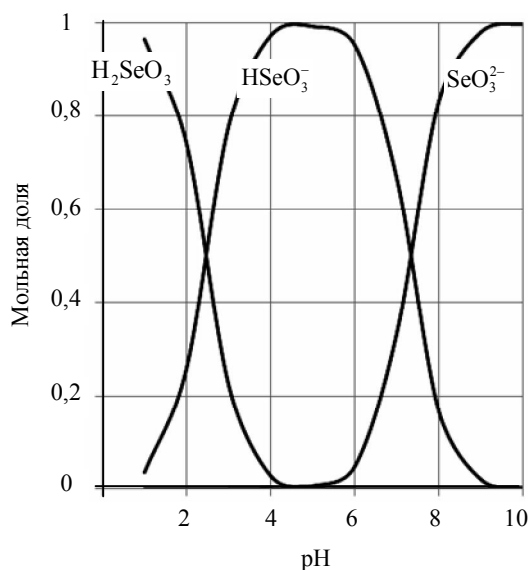


Рис. 1. Зависимость концентрации ионов Se от pH-раствора

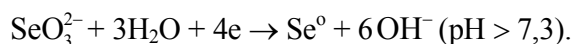
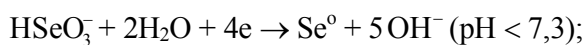
$$\alpha_1 = \frac{k_1 \alpha_0}{[H^+]} = \frac{[HSeO_3^-]}{C_{H_2SeO_3}};$$

$$\alpha_2 = \frac{k_1 k_2 \alpha_0}{[H^+]^2} = \frac{[SeO_3^{2-}]}{C_{H_2SeO_3}}.$$

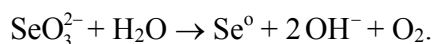
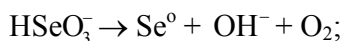
где  $\alpha_n$  — мольная доля аниона в растворе.

На основании расчета значений термодинамических потенциалов, характеризующих состояние оксианионов селена в водных растворах, построены зависимости концентраций ионов Se от pH-раствора (рис.1).

В зависимости от формы существования селена в растворе катодные реакции могут быть представлены в виде



Суммарные электродные реакции без разделения катодного и анодного пространства в зависимости от исходной формы селена с учетом анодного выделения кислорода:



Возрастание концентрации гидроксильных ионов в селенитном электролите будет

происходить в 2 раза быстрее, чем в биселенитном. Уменьшение буферной емкости при возрастании начального pH-электролита обуславливает начало процесса выделения селена при pH = 2,5-3.

Для изучения поведения селена в водных растворах по стандартным методикам были построены поляризационные кривые с использованием потенциостата IPC-Pro и стандартной электрохимической ячейки (рис.2, 3).

Вид поляризационных кривых заметно зависит от материала анода. Основные сложности осуществления электроэкстракции селена из селенистых растворов связаны с выбором устойчивого материала анода и предотвращением анодного окисления Se (IV) до кинетически инертного Se (VI).

Наибольшее перенапряжение выделения кислорода наблюдается на свинцовом и платиновом анодах, а также на аноде из рутенированного титана. Однако, если на Pb- и Pt-анодах процесс окисления селенит-иона до селената протекает в значительной мере, то на Ti<sub>(Ru)</sub>-аноде выход по току Se (VI) при электролизе заметно меньше. По условиям получения рутенированного титана токопроводящая пленка занимает только часть поверхности, поэтому фактическая плотность тока на токопроводящих участках намного выше кажущейся. По-видимому, в этих условиях перенапряжение окисления Se (IV) до Se (VI) выше, чем перенапряжение выделения кислорода.

Нежелательно также использование в качестве материала анодов нержавеющей стали, отличающейся низкой коррозионной устойчивостью, и графита, обладающего невысокой механической прочностью.

Учитывая, что материал катода слабо влияет на величину окислительно-восстановительного потенциала, целесообразно применение титана, обладающего высокими эксплуатационными характеристиками в кислых селенистых средах.

Характер поляризационных кривых указывает на то, что изменение параметров электрохимического процесса в диапазоне катодной плотности тока 300-1000 А/м<sup>2</sup> и pH = 3-8 заметно не влияет на катодный

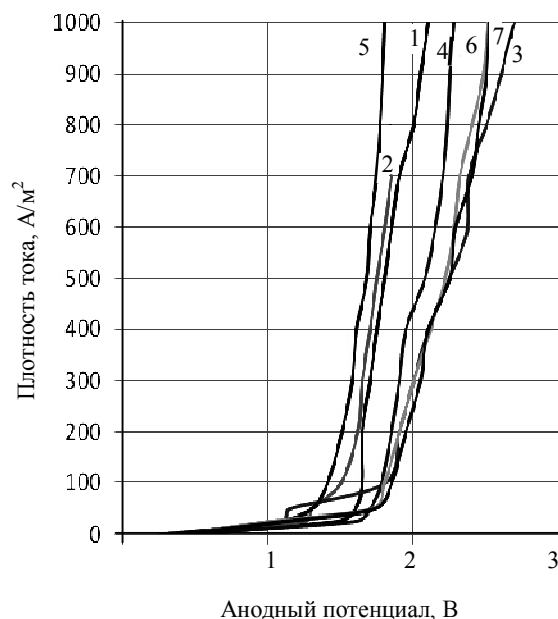


Рис.2. Анодные поляризационные кривые

1 – Se 77 г/л, pH – 4,6, материал анода – нержавеющая сталь; 2 – Se 75 г/л, pH – 4,6, никель; 3 – Se 87 г/л, pH – 3,0, свинец; 4 – Se 87 г/л, pH – 3,0, нержавеющая сталь; 5 – Se 79 г/л, pH – 3,0, свинец; 6 – Se 80 г/л, pH – 3,0, платина; 7 – Se 85 г/л, pH – 3,0, рутенированный титан

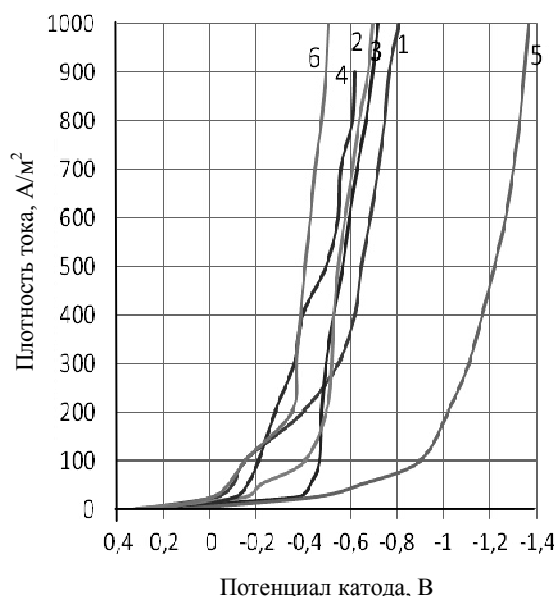


Рис.3. Катодные поляризационные кривые

1 – Se 132 г/л, pH – 4,9, материал катода – нержавеющая сталь; 2 – Se 77 г/л, pH – 4,6, нержавеющая сталь; 3 – Se 75 г/л, pH – 4,6, никель; 4 – Se 70 г/л, pH – 4,6, титан; 5 – Se 0 г/л, pH – 4,7, нержавеющая сталь; 6 – Se 77 г/л, pH – 4,6, графит

процесс выделения элементарного селена. Снижение pH-электролита  $< 2,5$  сопровождается резким ростом напряжения на ванне. Повышение агрессивности среды способствует ускорению коррозии электродов. Увеличение pH ( $> 9$ ) в процессе электролиза сопровождается уменьшением перенапряжения водорода и сдвигом равновесного потенциала системы Se (IV) / Se в электроотрицательную область, а также оказывает негативное воздействие на выход по току селена.

## Выводы

1. Зависимости выделения селена в электрохимических процессах обусловлены условиями равновесия свободных и протонизированных анионов селена в растворе; проведение электроэкстракции в биселенитном электролите с начальным pH = 2,5 обеспечивает высокую степень катодного осаждения селена.

2. На основе анализа поляризационных кривых установлено, что изменение парамет-

ров электроэкстракции в диапазоне катодной плотности тока 300-1000 А/м<sup>2</sup> и pH = 3-8 практически не влияет на механизм катодного процесса выделения элементарного селена.

3. При осуществлении электроэкстракции селена из селенистых растворов для устранения сложностей при выборе устойчивого материала анода и предотвращения анодного окисления Se (IV) до Se (VI) в качестве материала анода следует использовать рутенированный титан, обладающий высокими электрохимическими и эксплуатационными свойствами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 2393256 РФ, МПК C22B61/00. Способ извлечения селена при переработке шламов электролиза меди / Т.Н.Грейвер, Г.В.Петров, А.А.Чернышев, В.Н.Ковалев. Заявл. 29.12.2008; Оpubл. 27.06.2010.
2. Современные технологии переработки медно-электролитных шламов / А.А.Чернышев, Г.В.Петров, А.М.Беленький, В.Н.Ковалев // Цветная металлургия. 2009. № 4. С.20-24.
3. Chernyshev A.A., Petrov G.V. Researching of regularity of electrochemical selenium abstraction in redesigning of cuprum electrolysis muds // Freiburger Forschung-

shefte Innovations in Geoscience, Geoengineering and Metallurgy. Freiberg. 2008. P.158-160.

#### REFERENCES

1. Patent 2393256 RF. MPK C221361/00. Method of extraction of selenium in the treatment of sludge of copper electrolysis / T.N.Graver, G.V.Petrov, A.A.Chernyshev, V.N.Kovalev. Publ. 27.06.2010.

2. Chernyshev A.A., Petrov G.V., Belenky A.M., Kovalev V.N. Modern technologies for processing copper electrolyte slurry // Nonferrous metallurgy. 2009. № 4. P.20-24.

3. Chernyshev A.A., Petrov G.V. Researching of regularitys of electrochemical selenium abstraction in re-designing of cuprum electrolysis muds // Freiburger Forschungshefte Innovations in Geoscience, Geoengineering and Mettallurgy. Freiberg. 2008. P.158-160.

**А.Н.ТЕЛЯКОВ**, канд. техн. наук, ассистент, *ptpe\_spmi@bk.ru*

**Т.А.АЛЕКСАНДРОВА**, аспирантка, *ptpe\_spmi@bk.ru*

**С.А.РУБИС**, аспирант, *ptpe\_spmi@bk.ru*

*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

**A.N.TELYAKOV**, PhD in eng. sc., assistant lecturer, *ptpe\_spmi@bk.ru*

**T.A.ALEXANDROVA**, post-graduate student, *ptpe\_spmi@bk.ru*

**S.A.RUBIS**, post-graduate student, *ptpe\_spmi@bk.ru*

*Saint Petersburg State Mining University*

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ РАЗЛИЧНЫХ ПО СОСТАВУ КОНЦЕНТРАТОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ЛОМА

Проведено исследование вещественного состава радиоэлектронного лома. Селективно получены концентраты различного состава. Проведено исследование по отдельной переработке медно-серебряных и железоникелькобальтовых концентратов.

**Ключевые слова:** радиоэлектронный лом, благородные металлы, переработка, электролит, вторичная металлургия.

## DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR PROCESSING DIFFERENT ELECTRONIC SCRAP COMPOSITION CONCENTRATES

In the given work research of material structure of a radio-electronic breakage is conducted. Concentrates of various structure are received selectively A study of the separate processing of copper-silver and iron-nickel cobalt concentrates is conducted.

**Key words:** radio-electronic breakage, precious metals, processing, electrolyte, secondary metallurgy.

Мировой прогресс немислим без использования электронной техники, которая находит все большее применение как в народном хозяйстве, так и в военно-промышленном комплексе. В связи с этим растет количество морально и физически устаревшего оборудования и отходов, в том числе и в виде радиоэлектронного лома. Сюда следует добавить и технологический лом, который образуется при изготовлении электронной продукции и промышленной переработки драгоценных металлов, содержание последних в радиоэлектронном и технологическом ломе весьма велико и его переработка в настоящее время – серьезный источник пополнения запасов драгоценных металлов. Это особенно актуально вследствие постепенного истощения природных

запасов драгоценных металлов и соответственно удорожания их извлечения [4].

В настоящее время в связи с развитием электронной промышленности и военной техники увеличилось количество технологических отходов радиоэлектронного лома и отработавших свой срок электронных машин. В связи с этим требуется их переработка с целью извлечения драгоценных составляющих [3].

Поступающее с предприятий сырье направляется на предварительную разборку. На этой стадии из электронно-вычислительных машин и другого электронного оборудования извлекаются узлы, содержащие драгоценные металлы. Обогащенный материал направляют на плавку, в результате которой получают аноды, содержащие цветные

и драгоценные металлы. При электролизе окислительной плавки бедного радиоэлектронного лома состав электролита переменный, так как окисляемый в условиях плавки никель остается в анодах и переходит при электролизе в электролит. Это осложняет технологию очистки электролита, делает ее громоздкой и с точки зрения экономики требует затрат, соразмерных для проведения головных операций. Анализ поступающего на плавку сырья показал, что основным поставщиком никеля являются железоникель-кобальтовые концентраты. Исходя из этого, нами был рассмотрен вариант отдельной переработки медно-серебряных и железоникелькобальтовых концентратов. После переработки радиоэлектронного лома получается значительное количество шлама, в котором содержатся драгоценные металлы.

Плавка на аноды медно-серебряных и железоникелькобальтовых концентратов проводится в условиях продувки расплава концентрата благородных металлов кислородом воздуха. Подобная обработка позволяет регулировать составы получаемых анодов [2].

Полученные аноды погружают в электролиты ванн, где они под действием постоянного электрического тока плотностью 200 А/м<sup>2</sup> растворяются при температуре 40 °С и напряжении на ванне 0,5 В. Электрохимический потенциал анода 0,3-0,35 В. Исходный электролит содержит 40 г/л меди и 35 г/л H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> [1].

При электролитическом растворении железоникелькобальтовых анодов, содержащих 21,8 % Ni; 21,5 % Co; 36,3 % Fe и 2 % благородных металлов, создают такие условия, при которых никель и примеси

растворяются и полностью переходят в электролит. В процессе электролиза 98 % благородных металлов концентрируются в нерастворимом остатке – шламе.

В результате растворения медно-серебряных анодов, содержащих 64,7 % Cu; 21,4 % Zn и 4 % благородных металлов, в электролит переходит часть меди, шламы благородных металлов и катодная медь.

Таким образом, при отдельной переработке медно-серебряных и железоникелькобальтовых концентратов достигается снижение потоков электролитов и многократное их использование.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Лебель И.* Проблемы и возможности утилизации вторичного сырья, содержащего благородные металлы. Теория и практика процессов цветной металлургии: Пер. с немец. / И.Лебель, Г.Цигенбалт, Л.Шлоссер. М.: Металлургия, 1968.
2. *Меретуков М.А.* Металлургия благородных металлов (зарубежный опыт) / М.А.Меретуков, А.Г.Орлов. М.: Металлургия, 1992.
3. *Уткин Н.И.* Металлургия цветных металлов. М.: Металлургия, 1985.
4. *Чугаев Л.В.* Металлургия благородных металлов. М.: Металлургия, 1987.

#### REFERENCES

1. *Lebel I., Tsigenbalt G., Shlosser L.* Problems and possibility of recycling of the secondary raw materials containing precious metals. The theory and practice of processes of nonferrous metallurgy. Moscow: Metallurgy, 1968.
2. *Meretukov M.A., Orlov A.G.* Metallurgy of precious metals (foreign experience)/ Moscow: Metallurgy, 1992.
3. *Utkin N.I.* Metallurgy of nonferrous metals. Moscow: Metallurgy, 1985.
4. *Chugaev L.V.* Metallurgy of precious metals. Moscow: Metallurgy, 1987.

**А.А.ЛЕОНОВ**, аспирант, *ptpe\_spmi@bk.ru*

**Н.С.ИЗОТОВА**, аспирантка, *izotovanatalia@yandex.ru*

**А.В.СМИРНОВ**, канд. техн. наук, ассистент, *ptpe\_spmi@bk.ru*

**Н.М.ТЕЛЯКОВ**, д-р техн. наук, профессор, *ptpe\_spmi@bk.ru*

*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

**A.A.LEONOV**, post-graduate student, *ptpe\_spmi@bk.ru*

**N.S.IZOTOVA**, post-graduate student, *izotovanatalia@yandex.ru*

**A.V.SMIRNOV**, PhD in eng. sc., assistant lecturer, *ptpe\_spmi@bk.ru*

**N.M.TELIAKOV**, Dr. in eng. sc., professor, *ptpe\_spmi@bk.ru*

*Saint Petersburg State Mining University*

## СПОСОБ МОКРОЙ ОЧИСТКИ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАРГАНЕЦСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Разработана и проверена в укрупненно-лабораторном масштабе технология очистки газов, содержащих диоксид серы. При разработке способа использованы изученные в лабораторном масштабе закономерности сорбции диоксида серы с помощью марганцевых соединений. Предлагаемый способ имеет значительные экономические преимущества по капитальным затратам и эксплуатационным расходам.

**Ключевые слова:** марганцевый концентрат, диоксид серы, очистка, сорбция, осаждение.

## THE WAY OF WASTE GASES WET PURIFICATION OF METALLURGICAL FURNACE USING MANGANESE MATERIALS

In this article the technology of purification from sulfur dioxide is described. This technology was tested in semi-industrial scale. During developing this method it was used regularities of the sorption of sulfur dioxide by manganese nodule in the laboratory scale. This technology has economical significant advantages in building and maintaining costs.

**Key words:** manganese concentrate, sulfur dioxide, purification, sorption, chemical precipitation.

Истощение запасов минерального сырья приводит к вовлечению в производство нетрадиционных источников черных и цветных металлов\*. Применительно к марганецсодержащим материалам одним из наиболее пер-

спективных источников марганца для металлургической и химической промышленности являются подводные железомарганцевые конкреции (ЖМК), добываемые со дна Балтийского моря с помощью специализированных судов.

Данный способ очистки газов от диоксида серы осуществляется следующим образом.

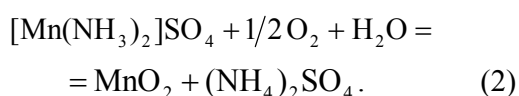
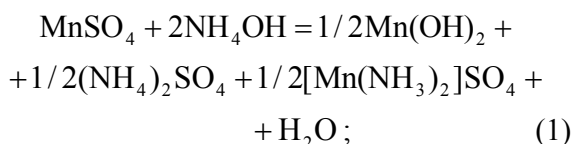
Поглощение сернистого газа марганцевой суспензией проводится свежесоздаваемым марганцевым концентратом при температуре 40-70 °С, что увеличивает скорость процесса и обеспечивает полную очистку газа от диоксида серы.

\* Шарков А.А. Оценка марганцеворудной базы России и перспективы ее развития // Материалы 2-й Всероссийской науч.-техн. конференции «Состояние марганцеворудной базы России и вопросы обеспечения промышленности марганцем». Екатеринбург: АМБ, 2001. С.13-19.

Sharkov A.A. The analysis of Russian manganese base and the prospects of its development // The material Proceedings of the second All-Russian Scientific conference «Position of manganese base of Russia and the key questions of issues of industrial manganese». Ekaterinburg: AMB, 2001. P.13-19.

Марганцевый концентрат получают осаждением раствора сульфата марганца гидроксидом аммония и воздухом при pH = 8,0-8,5 и температуре 40-50 °С. Применение гидроксида аммония обуславливается его достаточно низкой рыночной стоимостью и широкой доступностью.

Процесс осаждения описывается следующими суммарными уравнениями:



В результате применения воздуха при осаждении марганца из раствора аммиачный комплекс марганца разрушается, и процесс осаждения смещается в сторону образования диоксида марганца по реакции (2).

Экспериментальные исследования по химическому осаждению марганца и сорбции сернистого газа были проведены из растворов с концентрацией  $\text{Mn}^{2+}$  30-35 г/л, при этом концентрация  $\text{Mn}^{2+}$  соответствует концентрации растворов, близких по своему составу в промышленных технологических растворах\*\*. На стадии осаждения степень извлечения марганца из раствора в осадок составила 99 %.

При pH = 8,0-8,5 и  $t = 40-50$  °С в присутствии кислорода воздуха в качестве окислителя извлечение марганца в осадок составляет более 99 %. Свежеосажденный марганцевый концентрат поглощает диоксид серы из отходящих газов более чем на 99 %. Эта закономерность может быть использована для очистки отходящих газов металлургических печей от  $\text{SO}_2$ . Степень поглощения диоксида серы следующая:

Температура процесса, °С	20	30	40	50	60	70
Степень поглощения $\text{SO}_2$ , %	97,5	98,8	99,7	99,8	99,8	99,8

\*\* Позин М.Е. Технология минеральных солей. Ч. I-II. Л.: Химия, 1974. 546 с.

Pozin M.E. The technology of mineral salts. Part I-II. Himija, 1974. 546 p.

Срок старения осадка оказывает существенное влияние на сорбционные свойства марганцевого концентрата:

Срок старения осадка	Степень поглощения $\text{SO}_2$ , %
Свежеосажденный концентрат	99,99
1 сут	89,60
3 сут	84,60
5 сут	78,94
Марганцевый концентрат (порошкообразный реактив марки Ч)	55,00

Оптимальным является свежеосажденный концентрат, сразу направляемый на поглощение диоксида серы.

Основные технологические показатели процесса:

- концентрация  $\text{SO}_2$  в газах, направляемых на очистку, – 8-9 % (по объему);
- остаточная концентрация – 0,01-0,02 % (по объему);
- температура процесса поглощения – 40-70 °С;
- время контакта сплошной и дисперсной фазы – 0,1-0,5 с.

Данный способ опробован в укрупненном-лабораторном масштабе на предприятии «Североникель». Для извлечения диоксида серы из газовой смеси получают свежеосажденный марганцевый концентрат осаждением раствора сульфата марганца аммиаком в присутствии кислорода при pH = 8-8,5 и температуре 45 °С. Полученную пульпу заливали в реактор, снабженный барботером, и пропускали через нее очищаемый газ ~40 л/мин концентрацией  $\text{SO}_2 = 8-9$  % (по объему). Степень очистки газа за 30 мин составила 98,7 %. Концентрация диоксида серы на выходе из барботера составила 0,016 мг/м<sup>3</sup>, что соответствует санитарно-гигиеническим нормам.

Данный способ реализуется с помощью стандартного оборудования.

Таким образом, использование данного способа создает экологический эффект, снижая количество диоксида серы с 8-9 % (по объему) в отходящих газах металлургических производств до санитарных норм. Применение предлагаемого способа позволит улучшить экологические показатели и санитарные условия металлургического производства.





**Н.С.ИЗОТОВА**, аспирантка, *izotovanatalia@yandex.ru*

**А.А.ЛЕОНОВ**, аспирант, *ptpe\_spmi@bk.ru*

**А.В.СМИРНОВ**, канд. техн. наук, ассистент, *ptpe\_spmi@bk.ru*

**А.А.ДАРЬИН**, канд. техн. наук, ассистент, *darinbox@mail.ru*

*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

**N.S.IZOTOVA**, post-graduate student, *izotovanatalia@yandex.ru*

**A.A.LEONOV**, post-graduate student, *ptpe\_spmi@bk.ru*

**A.V.SMIRNOV**, PhD in eng. sc., assistant lecturer, *ptpe\_spmi@bk.ru*

**A.A.DARIN**, PhD in eng. sc., assistant lecturer, *darinbox@mail.ru*

*Saint Petersburg State Mining University*

## ОЧИСТКА ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА ОТ СЕРОСОДЕРЖАЩИХ КОМПОНЕНТОВ

Рассмотрена проблема очистки отходящих газов металлургического производства. Предложены технологические решения по оптимизации процесса переработки отходящих газов и доочистке хвостовых газов с возможностью полного извлечения серосодержащих компонентов.

**Ключевые слова:** очистка серосодержащих газов, оптимизация, печь дожига, сорбция, железомарганцевые конкреции.

## SULFUR-CONTAINING ELEMENTS PURIFICATION OF WASTE GASES OF METALLURGICAL PRODUCTION

In the given work the problem of gas purification of metallurgical industry is considered. Technology of waste gases recycling process with advanced treatment of tail gases with possibility of full recovery of sulfur containing components is conducted.

**Key words:** purification of sulfur-containing gases, optimization, furnace afterburner, sorption, iron-manganese nodules.

На металлургических заводах в результате пирометаллургической переработки сульфидного сырья (в печах Ванюкова, конвертерах и др.) образуются отходящие газы, содержащие соединения серы [3]. В целях экологической безопасности серосодержащие газы подвергаются переработке.

Переработка отходящего газа осуществляется по технологии высокотемпературного восстановления кислородсодержащего сернистого газа метаном (природным газом) с последующим охлаждением и каталитической конверсией восстановленного газа, с извлечением образовавшейся элементарной серы в конденсаторе и сероуловителе и до-

жигом токсичных и горючих ( $\text{COS}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ) компонентов хвостового газа перед выбросом в атмосферу [1].

Ужесточение экологических требований к выбрасываемым газам производств ведет к необходимости совершенствования процессов переработки отходящих газов и разработке новых технологических решений по снижению выбросов серосодержащих компонентов в атмосферу.

Предлагаемый вариант увеличения степени очистки отходящих газов включает в себя оптимизацию процесса переработки серосодержащих газов на этапе сжигания в печи дожига и адсорбцию остаточного количества

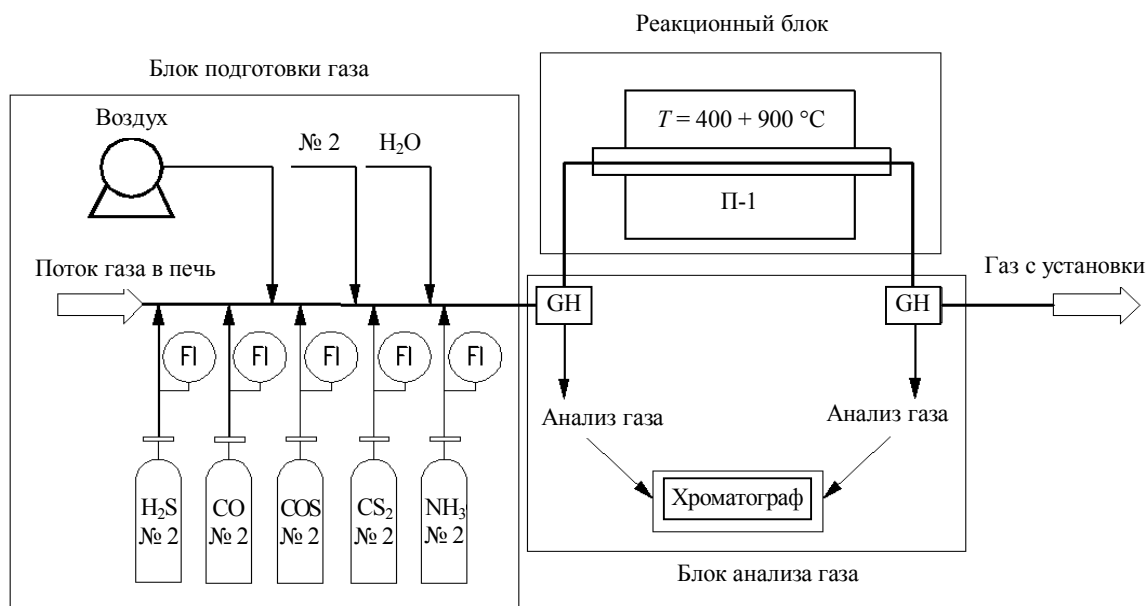


Схема экспериментальной установки

FI – датчики расхода газа; GH – отбор проб газа на входе и выходе из печи для анализа состава хроматографом; H<sub>2</sub>S, N<sub>2</sub>, COS, CS<sub>2</sub>, CO, NH<sub>3</sub> – компоненты исследуемых смесей газов; П-1 – электрическая трубчатая печь

серосодержащих компонентов хвостовых газов железомарганцевыми конкрециями.

Дожиг хвостового газа является неотъемлемой частью процесса переработки серосодержащего газа [2]. Основная задача этой стадии – окисление сернистых примесей (H<sub>2</sub>S, COS, CS<sub>2</sub>, пары элементарной серы) в менее токсичное соединение серы – SO<sub>2</sub>, а также прочих нежелательных составляющих (CO, H<sub>2</sub>) в безвредные продукты. Правильно разработанная печь дожига обеспечивает длительную и бесперебойную работу самого аппарата, а следовательно, всего производства в целом.

Одной из основных задач при технологическом проектировании печей дожига является создание наиболее благоприятных условий для эффективного сжигания серосодержащих компонентов хвостового газа. Данные условия определяются температурой нагрева дожигаемого газа и временем выдержки газов в печи. Эти параметры являются кинетическими и аналитическим способом их получить невозможно. В общем случае концентрации различных загрязняющих веществ в уходящих газах отличаются от величин, рассчитанных в предположении химического равновесия. Слож-

ность и неизученность протекающих процессов до конца, своеобразное их течение, трудности при установлении распределения температур не позволяют во многих случаях дать математическое описание процессов горения в печи дожига, поэтому приходится ориентироваться на данные эксплуатируемых промышленных аналогов. Однако подобный метод зачастую приводит к серьезным погрешностям, следствием которых является превышение допустимых концентраций серы в выбрасываемых газах, перерасход дорогостоящего топлива при эксплуатации печи и необоснованная громоздкость конструкций аппаратов.

Для определения оптимальных параметров сжигания серосодержащих газов в печи дожига планируется проведение экспериментальной работы, направленной на изучение кинетики реакций горения, протекающих в печи, в зависимости от концентраций исходных компонентов, температуры нагрева и времени выдержки газов в печи. На рисунке представлена схема экспериментальной установки. По выполняемым функциям установка (стенд) условно может быть разделена на блоки подготовки газа, реакционный и аналитический.

Блок подготовки газа включает газовые баллоны с индивидуальными газами, воздушную, сатуратор и датчики расхода газов. Назначение данного блока – подготовка смеси газов необходимого состава и расхода.

Назначение реакционного блока – обеспечение необходимых условий для протекания изучаемых реакций. Блок состоит из электрической трубчатой печи со сменными кварцевыми трубками различного диаметра (2-20 мм) в качестве реактора. Печь оборудована системой автоматического изменения и поддержания на требуемом уровне температуры реакционной зоны.

Блок анализа газов включает отбор проб во входном и выходном газовых потоках и последующий хроматографический анализ состава. Назначение этого блока – качественная и количественная оценка изменений состава газовой смеси, связанной с прохождением реакций в реакционном блоке.

По результатам эксперимента будут установлены кинетические закономерности сжигания серосодержащих компонентов отходящих газов металлургического производства, смоделированы на этой основе различные аэродинамические режимы работы печи, разработана методика инженерного расчета печей дожига и рекомендации по выбору оптимальных параметров работы печи как с точки зрения проектирования новых агрегатов, так и для оптимизации действующего оборудования. Таким образом, полученные результаты позволят увеличить эффективность сжигания серосодержащих компонентов в печи дожига до менее токсичного диоксида серы.

Как правило,  $\text{SO}_2$ -содержащие газы после печи дожига направляются в дымовую трубу и выбрасываются в атмосферу. С целью снижения влияния производственного процесса на экологическую обстановку предлагается сорбционная очистка отходящих газов печи дожига от  $\text{SO}_2$  железомарганцевыми конкрециями.

Исследования адсорбционных свойств ЖМК, проведенные на кафедре печных технологий и переработки энергоносителей Санкт-Петербургского горного университета

на лабораторной установке кипящего слоя, подтверждают возможность использования конкреций в качестве сорбента диоксида серы [2]. Об адсорбционных способностях ЖМК судили по увеличению содержания серы в огарке после обжига. Опыты проводили при расходе дутья, исключающем влияние внешней диффузионной области.

Исследования на непрерывной укрупненно-лабораторной установке кипящего слоя показали, что при температуре 100-200 °C содержание серы в огарке увеличивается от 0,15 % в исходной пробе ЖМК до 3,05-3,5 % при постоянном расходе ЖМК и газовой смеси, а с увеличением влажности ЖМК от 1,0 до 16,7 % содержание серы в огарке при тех же параметрах обжига составило более 6 %. Полученная величина адсорбционной емкости диоксида серы железомарганцевыми конкрециями существенно превышает величину сорбционной емкости данного компонента на промышленных сорбентах, что подтверждает целесообразность использования ЖМК для очистки отходящих газов металлургического производства от  $\text{SO}_2$ .

Применение описанных способов повышения эффективности процессов очистки отходящих газов металлургического производства позволит сократить влияние производственного процесса на экологическую ситуацию.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Грунвальд В.Р. Технология газовой серы. М.: Химия, 1992.
2. Дарьин А.А. Изучение адсорбционных свойств железомарганцевых конкреций / А.А.Дарьин, А.В.Смирнов, Н.М.Теляков // Черные металлы. № 8. 2009.
3. Плавка в жидкой ванне / Под ред. А.В.Ванюкова. М.: Металлургия, 1988.

## REFERENCES

1. Grunval'd V.R. The technology gaseous sulfur. Moscow: Himija, 1992.
2. Dar'in A.A., Smirnov A.V., Teljakov N.M. The study of adsorption properties of manganese nodules // Ferrous metals. № 8. 2009.
3. Melting in the liquid bath / A.V.Vanjukov. Moscow: Metallurgy, 1988.

**А.Н.ТЕЛЯКОВ**, канд. техн. наук, ассистент, *ptpe\_spmi@bk.ru*

**С.А.РУБИС**, аспирант, *ptpe\_spmi@bk.ru*

**Д.В.ГОРЛЕНКОВ**, канд. техн. наук, ассистент, *ptpe\_spmi@bk.ru*

*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

**A.N.TELIAKOV**, PhD in eng. sc., assistant lecturer, *ptpe\_spmi@bk.ru*

**S.A.RUBIS**, post-graduate student, *ptpe\_spmi@bk.ru*

**D.V.GORLENKOV** PhD in eng. sc., assistant lecturer, *ptpe\_spmi@bk.ru*

*Saint Petersburg State Mining University*

## РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ПРОМЫШЛЕННОГО СЫРЬЯ, СОДЕРЖАЩЕГО БЛАГОРОДНЫЕ МЕТАЛЛЫ

В работе проведена оценка сырья, поступающего на переработку. Селективно получены различные по минералогическому составу концентраты. Проведено исследование по раздельной переработке концентратов с целью повышения извлечения благородных металлов.

**Ключевые слова:** радиоэлектронный лом, концентраты, сепарация, плавка, платина, палладий.

## DEVELOPING AN EFFECTIVE TECHNOLOGY FOR PROCESSING OF INDUSTRIAL RAW MATERIALS CONTAINING NOBLE METALS

In the given work assessment of raw materials is conducted. Concentrates with different mineralogical composition selectively obtained. A study on the separate processing of concentrates is conducted in order to enhance extraction of noble metals.

**Key words:** radio-electronic scrap, concentrates, separation, smelting, platinum and palladium.

Проблема переработки отходов радиоэлектронной промышленности (ОРП), содержащих благородные металлы, постоянно растет. Поэтому поиск новых источников благородных металлов весьма актуален. В настоящее время наблюдается резкое сокращение добычи благородных металлов и в связи с этим возрастает роль вторичного сырья металлургии. Извлечение золота, серебра, платины и палладия из отходов экономически более выгодно, чем из руд. Проблема дефицита благородных металлов обусловила появление комплексов по переработке лома радиоэлектронной промышленности. К комплексам по переработке ОРП предъявляют высокие требования, которые учитывают максимальное извлечение дра-

гоценных металлов из бедного сырья и уменьшение массы хвостов-остатков. Немаловажно также то, что наряду с извлечением драгоценных металлов можно получать дополнительно еще и цветные металлы, например, медь, никель, алюминий и др.

В определенной степени технический уровень переработки вторичного сырья, содержащего благородные металлы, а также полнота его учета и сбора, связаны с проблемой классификации этого сырья. Состав отходов, в частности лом электронной и электротехнической промышленности, очень разнообразен и резко колеблется, вследствие чего классификация такого лома затруднительна. Наряду с благородными, цветными металлами и сплавами в нем присутствуют

включения стали, алюминия и неметаллические составляющие (керамика, резина, стекло, пластик и др.) [1].

Для количественной оценки вещественного состава радиоэлектронного лома были проведены анализы металлизированных фаз с учетом массы радиоэлектронного лома различных производителей электронной промышленности. Пробы были проплавлены при температуре 1450 °С в печи Таммана и проанализированы на рентгеновском анализаторе Philip PW 2400. Отмечено наличие 0,1-0,5 % золота; 0,01-0,02 % платины; 0,05-0,2 % палладия [2].

Благородные металлы могут содержаться в таком материале в виде плакировки, припоя, гальванических покрытий, а сам основной материал может быть металлическим или неметаллическим.

В настоящее время в России и за рубежом не существует единой классификации вторичного сырья, содержащего благородные металлы. Условно весь радиоэлектронный лом можно разделить на две группы:

1) бедный радиоэлектронный лом с содержанием благородных металлов в исходном сырье не более 0,1 %.

2) богатый радиоэлектронный лом с содержанием благородных металлов в исходном сырье более 0,1 % [3].

На рис.1 представлена разработанная нами технологическая схема переработки радиоэлектронного лома.

При переработке радиоэлектронного лома по данной схеме образуются различные по составу концентраты (табл.1). Шлам, полученный в ходе электролиза, пригоден для получения золотосеребряного сплава.

Плавки осуществлялись в печи Таммана при температуре 1250-1450 °С в графитошамотовых тиглях объемом 200 г (по меди). В табл.2 представлены результаты лабораторных плавов различных концентратов и их смесей. Без осложнений расплавились концентраты Л-1 – Л-3. Температура плавления 1200-1250 °С.

В результате исследований выяснилось, что перед измельчением в молотковой дробилке целесообразно выделять конденсаторы, так как платина и палладий, находящиеся в

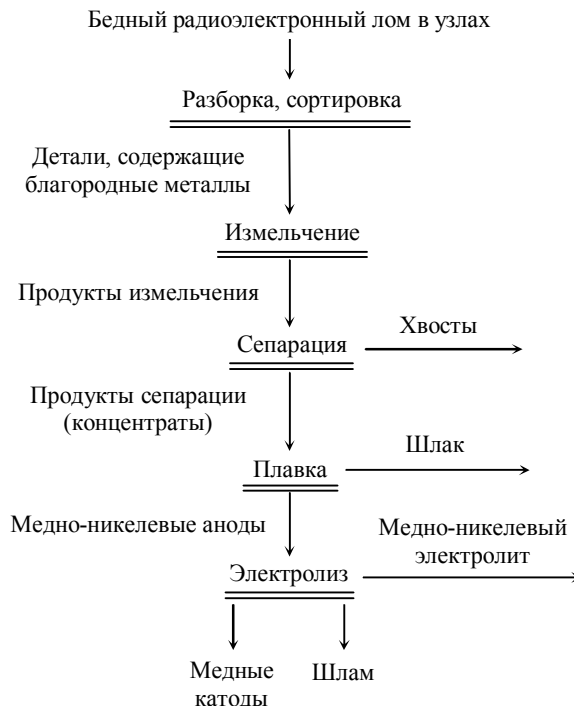


Рис.1. Технологическая схема переработки радиоэлектронного лома

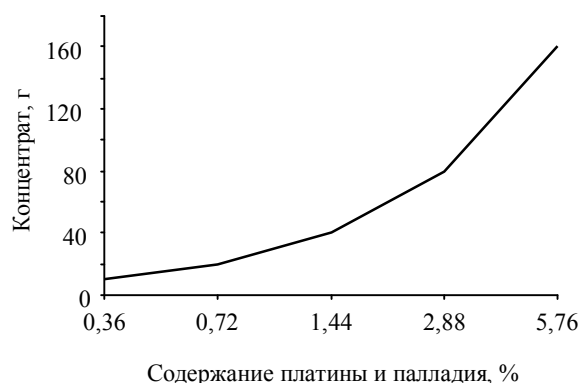


Рис.2. Результаты растворения концентратов из конденсаторов в медном расплаве

сырье при магнитной и электросепарации, извлекаются не полностью. Это приводит к весомой потере (до 25 %) благородных металлов. Кроме того, данные концентраты требуют для расплавления температуры 1400-1450 °С.

Из-за большого содержания платины и палладия в концентратах из конденсаторов разработан способ их отдельной переработки в рамках технологии, позволяющей снизить потери платины и палладия. В общем виде методика растворения платиноидов в расплаве меди выглядит следующим образом.

Таблица 1

## Материальный состав концентратов

Концентрат	Содержание элементов, %									
	Cu	Ni	Co	Zn	Fe	Ag	Au	Pd	Pt	Прочие
Серебряно-палладиевые	64,7	0,02	След	21,4	0,1	2,4	След	0,3	0,01	11,8
Золотосодержащие	77,3	0,7	0,03	4,5	0,7	0,3	1,3	0,5	0,01	19,16
Магнитные	След	21,8	21,5	0,02	36,3	След	0,6	0,05	0,01	19,72
Из конденсаторов	0,2	0,59	0,01	0,05	1	0,2	–	2,8	0,8	14,9 MgO 25,6 CaO 2,3 Sn 2,5 Pb 49,5 R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

Таблица 2

## Результаты плавки радиоэлектронного лома

Номер плавки*	Содержание, % к общему									
	Cu	Ni	Co	Zn	Fe	Ag	Au	Pd	Pt	Прочие
Л-1	79,4	0,02	След	0,06	0,1	3,5	0,01	0,9	0,01	16
Л-2	1,4	44	2,1	0,07	40,4	0,2	0,8	0,05	0,01	10,97
Л-3	77,3	0,7	0,03	4,5	0,7	0,3	1,3	0,5	0,01	19,16
П-1	56,8	7,6	0,4	24,8	6,5	2,7	0,13	0,6	0,007	0,46
П-2	65,4	2,1	0,05	10,8	0,7	7,2	0,06	1,4	0,007	12,28
П-3	58,5	9,2	1,3	10,05	9,7	4,7	0,15	0,9	0,007	5,14

\* Л – лабораторная плавка; П – полупромышленная плавка

Медь загружается в индукционную печь, нагретую до температуры 1100 °С. В расплав меди вводятся конденсаторы радиоэлектронного лома. Затем расплав тщательно перемешивают и выдерживают при температуре 1100 °С в течение 15 мин.

По данной методике был проведен ряд экспериментов с постепенным повышением концентрации платиноидов в расплаве меди (рис.2).

При концентрации платиноидов более 5,76 % в медном расплаве наблюдается расслоение на медный и платинопалладиевый слои. На основе данных экспериментов была установлена предельная совместная растворимость платины и палладия в медном расплаве.

Данная технология позволяет наиболее полно и эффективно извлечь благородные металлы из бедного радиоэлектронного лома. Технология проверена в укрупненно-лабораторном масштабе, а головные агрегаты технологии прошли апробацию в промышленном масштабе. При промышленной реализации технологии с получением кон-

центрата продукта обогащения требуется разрешение территориального органа пробирного надзора. При получении золотосеребряного сплава необходимо получение разрешения от федерального органа надзора.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лебель И. Проблемы и возможности утилизации вторичного сырья, содержащего благородные металлы / И.Лебель, Г.Цигенбальт, Л.Шлоссер // Теория и практика процессов цветной металлургии / Пер. с нем. М.: Металлургия, 1968.
2. Меретуков М.А. Металлургия благородных металлов (зарубежный опыт) / М.А.Меретуков, А.Г.Орлов. М.: Металлургия, 1992.
3. Чугаев Л.В. Металлургия благородных металлов. М.: Металлургия, 1987.

## REFERENCES

1. Lebel I. Tsigenbalt G., Schlosser L. Challenges and opportunities of recycling of secondary raw materials containing precious metals // Theory and Practice of Non-Ferrous Metallurgy / Translated from German. Moscow: Metallurgy, 1968.
2. Meretukov M.A., Orlov A.G. Metallurgy of noble metals (foreign experience). Moscow: Metallurgy, 1992.
3. Chugaev L.V. Metallurgy of precious metals. Moscow: Metallurgy, 1987.

**С.Н.САЛТЫКОВА**, канд. техн. наук, доцент, *ssn\_58@mail.ru*

**Ф.А.ВАСИЛЬЕВ**, студент, *ptpe\_spmi@bk.ru*,

**Г.И.ДОЛИВО-ДОБРОВОЛЬСКАЯ**, д-р техн. наук, профессор, *kafmetall@mail.ru*

*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

**S.N.SALTYKOVA**, PhD in eng. sc., associate professor, *ssn\_58@mail.ru*

**F.A.VASILIEV**, student, *ptpe\_spmi@bk.ru*

**G.I.DOLIVO-DOBROVOLSKEY**, Dr. in eng. sc., professor, *kafmetall@mail.ru*

*Saint Petersburg State Mining University*

## ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ЖЕЛЕЗА НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ СУЛЬФИДНЫХ СПЛАВОВ

В работе рассмотрены сплавы, принадлежащие тройной системе Cu – Co – S. Проведен микроструктурный анализ указанных сплавов, показано влияние железа на эти сплавы.

**Ключевые слова:** сплав, эвтектика, халькозин, модификация, структура.

## THE IMPACT OF IRON CONTENT ON SULPHIDE ALLOYS COMPOUND

This work examined alloys which are belonged to trinary system Cu – Co – S. Macrostructural analysis of the above-referenced alloys was carried out. The impact of ferrum on this alloys was demonstrated.

**Key words:** alloy, eutectic, chalcocite, modification, structure.

При переработке сульфидного медно-никелевого сырья на всех стадиях технологической цепочки происходят потери ценных компонентов. Например, в процессе флотации фаянштейна кобальт теряется, переходя в медный концентрат. Механизм распределения ценных компонентов между фазами описывается в литературе крайне противоречиво. Это связано с недостаточной изученностью изменения состава и свойств фаз во время процесса.

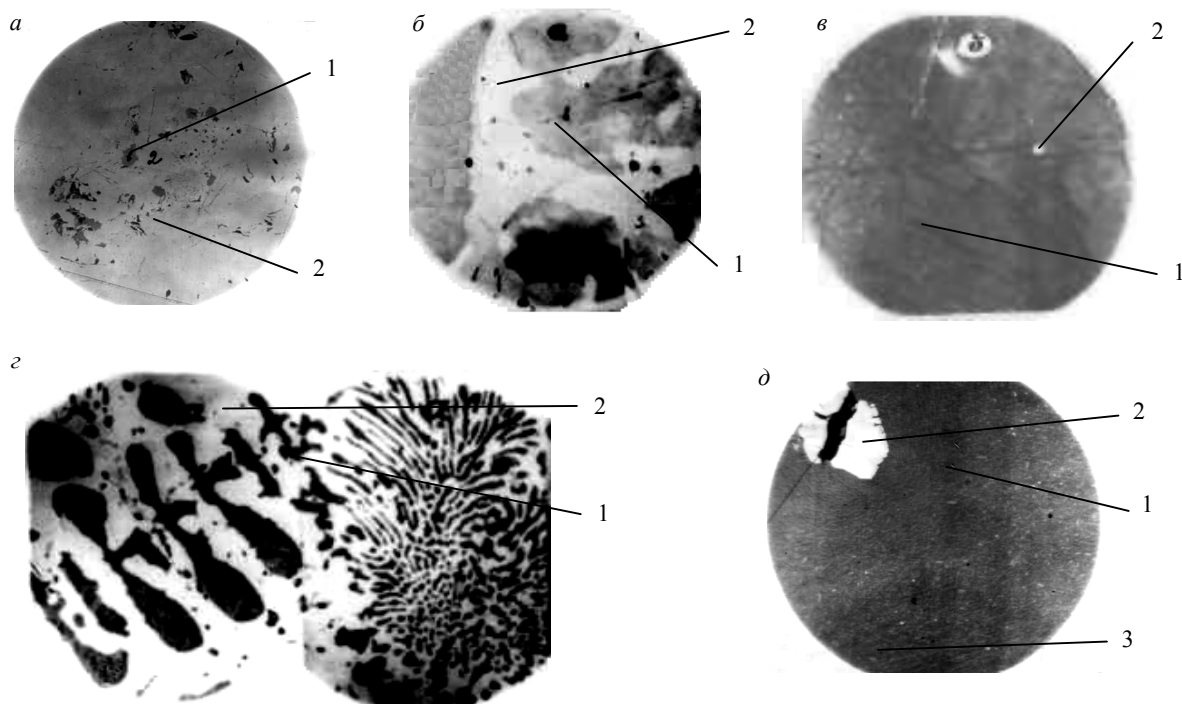
Целью работы явилось изучение закономерностей распределения кобальта между фазами и определение форм нахождения кобальта в этих сплавах.

Исследованию подвергались искусственные сплавы, принадлежащие тройной системе Cu – Co – S. Изучение проводили методами термического, спектрального и микроструктурного анализов [1, 2]. Исход-

ными веществами для приготовления сплавов служили: медь электролитическая, металлургический кобальт и очищенная сера.

Навески элементов брали из расчета на стехиометрический состав соединений Cu<sub>2</sub>S и Co<sub>9</sub>S<sub>8</sub> в различной комбинации. Содержание меди в сплавах менялось от ~ 80 до 0,5 %; кобальта – от 0,3 до 65 %, содержание серы составляло не менее 20 %.

Проведенный микроструктурный анализ показал, что сплавы, принадлежащие разрезу Cu<sub>2</sub>S – Co<sub>9</sub>S<sub>8</sub>, в основном являются двухфазными, причем сульфидная фаза меди представлена двумя полиморфными модификациями – серый и голубой сульфид меди типа халькозина Cu<sub>2</sub>S. С изменением химического состава изменяется и соотношение между фазами. В виде эмульсионной вкрапленности (менее 6 мкм) и точечных прожилок выделяется халькозин (Cu<sub>2</sub>S) в



Микрофункциональный анализ сплавов: *а* – сплав 18: Cu – 3,35 %; Co – 63,85 %; S – 33,84 %; *б* – сплав 9: Cu – 51,36 %; Co – 24,53 %; S – 25,51 %; *в* – сплав 2: Cu – 78,65 %; Co – 0,88 %; S – 21,98 %; *а-б* – 1 – Cu<sub>2</sub>S; 2 – Co<sub>9</sub>S<sub>8</sub>; *г* – сплав 13: Cu – 23,66 %; Co – 47,11 %; S – 28,84 %; 1 – двойная эвтектика (Cu<sub>2</sub>S + Co<sub>9</sub>S<sub>8</sub>); 2 – Co<sub>9</sub>S<sub>8</sub>; *д* – сплав 2: Cu – 73,29 %; Co – 1,04 %; Fe – 3,02 %; S – 22,49 %; 1 – Cu<sub>2</sub>S; 2 – идиоморфный кристалл; 3 – Co<sub>9</sub>S<sub>8</sub>

основной массе сульфида кобальта (Co<sub>9</sub>S<sub>8</sub>) при содержании меди в сплавах менее 3,5 %, при этом сульфид меди распределяется неравномерно в массе Co<sub>9</sub>S<sub>8</sub> (см. рисунок, *а*).

В виде мелких выделений присутствует халькозин при содержании свыше 3 % меди, при этом основу сплавов составляет Co<sub>9</sub>S<sub>8</sub>. В виде крупных агрегатов выделяется халькозин при содержании кобальта в сплавах от 20 до 40 % (см. рисунок, *б*).

В виде сплошной массы халькозин присутствует в тех сплавах, в которых на долю кобальта приходится менее 20 % (см. рисунок, *в*).

Для сплавов, принадлежащих данному разрезу, характерны эвтектоидные выделения различной крупности и формы (см. рисунок, *г*).

Приблизительно в такой же последовательности изменяется крупность и форма выделений сульфидной фазы кобальта (Co<sub>9</sub>S<sub>8</sub>).

Проведенные микроструктурные исследования показали, что фазы крупной и средней величины появляются непосредственно при застывании расплава, а фазы в виде вы-

делений тонкодисперсной и эмульсионной крупности являются продуктом реакций, совершившихся в твердом состоянии, так как выделение их связано с эвтектоидными превращениями. Для всех образцов характерно тесное прорастание сульфида кобальта с халькозином в виде сростков, что не дает возможности их полному раскрытию при измельчении и является одной из причин потери кобальта с медным концентратом, полученным при разделении фэйнштейна [3, 4].

С целью изучения влияния железа на форму нахождения кобальта в сплавах, принадлежащих системе Cu<sub>2</sub>S – Co<sub>9</sub>S<sub>8</sub> были приготовлены и исследованы серия сплавов сульфидов меди, кобальта и железа. Состав их рассчитывался на соединения Cu<sub>2</sub>S, Co<sub>9</sub>S<sub>8</sub> и FeS.

Содержание меди в этих сплавах менялось от 60 до 75 %, кобальта от 0,6 до 4,0 %, а соотношение железа к кобальту от 1,5:1 до 6:1. Проведенные исследования показали, что основу всех сплавов составляет сульфид меди типа халькозина (Cu<sub>2</sub>S), представлен-



ный двумя модификациями, – голубой и серо-коричневый. Серо-коричневая разновидность халькозина характеризуется очень тонкими короткими иглами. По данным рентгенометрического анализа сульфидная фаза меди представлена двумя формами – кубической и ромбической, причем ромбический халькозин имеет достаточно плотный коричневый оттенок, свидетельствующий о присутствии в его кристаллической решетке железа. В качестве примесей сплавы содержат кобальтистый сплав с гранцентрированной кубической решеткой, сульфидную фазу кобальта, белые идиоморфные кристаллы, имеющие бледно-желтоватый оттенок, а также белые эмульсионные вкрапления равномерно распределенные в массе сульфида меди (см. рисунок, д).

Предполагается, что эти кристаллы принадлежат сульфидной фазе кобальта типа каттиерита –  $\text{CoS}_2$ . Для диагностики этих кристаллов сплав 2 был подвергнут микрозондовому рентгеноспектральному анализу на установке «Камека». Сканирование поверхности кристаллов производилось по выбранному направлению в нескольких точках с облучением фазы сульфида кобальта. Математическая обработка регистрограмм показала, что основу кристаллов составляют кобальт и сера, а в качестве растворенных примесей в них содержится медь – 11 % и неизвестный элемент – 8 %, который не анализировался (табл.1).

Таблица 1

Данные микрозондового рентгеноспектрального анализа различных точек кристалла белой фазы из сплава 5 сульфидов меди, кобальта и железа

Точка кристалла	Содержание, %			
	Cu	Co	S	$\Sigma$
1	11,90	42,50	40,80	95,20
2	10,20	40,10	40,60	90,90
3	8,75	39,00	41,00	88,75
4	10,00	40,80	41,50	92,30
5	10,60	39,90	40,60	91,10
Среднее	10,40	40,50	40,90	91,80

Дополнительно была измерена микротвердость сульфидной фазы типа халькозин (табл.2).

Таблица 2

#### Микротвердость сульфидной фазы меди

Номер сплава	Содержание, %					$H_v$ , кг/мм <sup>2</sup>
	Cu	Co	Fe	S	$\Sigma$	
1	73,02	0,73	2,76	22,23	98,74	116
2	73,29	1,04	3,02	22,40	99,84	128
3	72,81	0,60	3,81	22,57	99,79	128
4	72,40	1,16	3,69	22,34	99,59	143-135
5	69,95	1,94	6,00	22,26	100,15	151
6	69,22	3,96	5,26	22,30	100,74	–

Как видно из приведенных данных, присутствие сульфида железа увеличивает твердость кристаллов сульфида меди почти в 2 раза. По литературным данным микротвердость халькозина составляет 73,6 кг/мм<sup>2</sup>, борнита  $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$  – 98,0 кг/мм<sup>2</sup>, халькопирита – 175 кг/мм<sup>2</sup>. Следовательно, образующаяся новая фаза занимает промежуточное положение между борнитом и халькопиритом по твердости.

Таким образом, проведенные исследования показали, что сплавы, принадлежащие разрезу  $\text{Cu}_2\text{S} - \text{Co}_9\text{S}_8$ , в основном являются двухфазными, состоящими из сульфидных фаз меди и кобальта.

Добавка железа (~ 6,0 %) к сплавам изменяет их фазовый состав. В сплавах появляется дополнительная сульфидная фаза типа каттиерита.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бетехтин А.Г. Курс минералогии. М.: Госгеотехиздат, 1961.
2. Бочвар А.А. Металловедение. М.: Metallurgizdat, 1956.
3. Крейг Дж. Рудная микроскопия и рудная петрография / Дж.Крейг, Д.Воган. М.: Мир, 1983.
4. Мотт Б.В. Испытание на твердость микровдавливанием. М., 1960.
5. Файнберг С.Ю. Анализ руд цветных металлов. М.: Metallurgizdat, 1953.

#### REFERENCES

1. Betekhtin A.G. The Course of mineralogy. Moscow: Gosteotekhzdat, 1961.
2. Bochvar A.A. The Physical metallurgy. Moscow: Metallurgizdat, 1956.
3. Kreig Dzh, Vogan D. Ore microscopy. Moscow: Mir, 1973.
4. Mott B.V. The test on solidity by microimpression. Moscow, 1960.
5. Faynberg S.Yu. The Analysis of nonferrous metal ores. Moscow: Metallurgizdat, 1953.

**М.В.МАРТИРОСЯН**, *д-р техн. наук, marmartin@mail.ru*

**Р.Б.ДЖОРУХЯН**, *гл. инженер, marmartin@mail.ru*

*«Мика цемент» Республика Армения, г.Ереван*

**В.А.МАЗМАНЯН**, *начальник ПЦ*

*ОАО «Кольская ГМК», г.Норильск*

**M.V.MARTIROSYAN**, *Dr. in eng. sc., marmartin@mail.ru*

**R.B.JORUKHYAN**, *chief engineer, marmartin@mail.ru*

*«Mika cement» Armenia, Yerevan*

**V.A.MASMANYAN**, *chief of PC*

*«Kolsky MMC» Co, Norilsk*

## **ПОВЕДЕНИЕ НЕРАСТВОРИМЫХ АНОДОВ, ПОЛУЧЕННЫХ НА ОСНОВЕ ВТОРИЧНОГО СВИНЦА, ПРИ ЭЛЕКТРОЭКСТРАКЦИИ МЕДИ ИЗ СЕРНО-КИСЛОГО РАСТВОРА**

Изучено поведение нерастворимых анодов на базе вторичного свинцового сырья, полученного из свинцовых аккумуляторных батарей, отходов в серно-кислом растворе. Показано, что анодные материалы, полученные этим методом, коррозионно долговечны, обладают высокими физико-механическими и технологическими свойствами и оказывают деполаризационное воздействие на реакции окисления. Рекомендуется использовать нерастворимые аноды из этих материалов в процессе электролиза меди.

**Ключевые слова:** нерастворимые аноды, вторичный свинец, коррозионная долговечность, электролиз меди.

## **BAHAVIOR OF INSOLUBLE ANODS OBTAINED ON THE BASE OF SECONDARY LEAD BY ELECTROWINNING COPPER FROM SULFURIC SOLUTION**

The behavior of insoluble anodes on the base of the secondary lead, obtained from lead accumulator batteries, waste, in sulfuric solution has been studied. It has been shown that anodic materials obtained by this method are corrosively durable, possess high physical, mechanical and technological properties and have depolarization action on water oxidation reaction. It is recommended to use insoluble anodes from these materials in copper electrowinning process.

**Key words:** insoluble anodes, secondary lead, corrosive durable, copper electrowinning process.

В последние десятилетия из-за увеличения цен на сырье значительно возрос интерес к использованию вторичных металлов и неорганических соединений из отработанных изделий, а также промышленных и бытовых отходов. Переработка сырья нерудного происхождения различными способами позволяет успешно решать такие важные современ-

ные проблемы, как уменьшение дефицита ряда металлов (особенно благородных, редкоземельных, цветных и т.п.), их экономии, а также охрану окружающей природной среды, к которой предъявляются серьезные санитарно-гигиенические требования. Кроме того, использование отходов способствует сохранению природных ресурсов.

Производство свинца из вторичного свинецсодержащего сырья занимает значительное место в общем объеме его добычи – около 55 %, а в отдельных странах – 85-100 % [4]. Повышенный интерес к переработке этого металла объясняется тем, что, с одной стороны, в мировом масштабе добыча рудного свинцового сырья существенно снизилась, а с другой – интенсивным увеличением количества техногенных свинцовых отходов, особенно в виде отработанных свинцово-кислотных аккумуляторных батарей. Немаловажное значение имеют также низкие энергетические затраты (в несколько раз) при переработке вторичного свинцового сырья по сравнению с переработкой концентратов, а также высокий коэффициент рециклинга свинца. Поэтому в ряде развитых промышленных стран действуют отдельные подотрасли по металлургической переработке свинецсодержащего сырья, где обрабатываемые производственные мощности позволяют выпускать в год 1-120 тыс.т свинца и сплавов на его основе [3].

Вторичное свинцовое сырье преимущественно перерабатывается пирометаллургическим способом, в результате которого получают сплавы на основе свинца, малолегированные сурьмой, оловом и другими элементами [3]. С целью получения «мягкого» свинца высокой марки эти сплавы подвергаются пирометаллургическому или электролитическому рафинированию. Несомненно, что для осуществления рафинирования вторичного или «жесткого» свинца, в зависимости от качества вторичного свинцового сырья и метода выплавки свинца, требуется применить ту или иную технологическую схему и соответствующее ей дорогостоящее, специальное оборудование, в результате чего резко возрастают производственные затраты и, как следствие, себестоимость металла.

С экономической и экологической точек зрения определенным интерес представляет возможность использования сплавов, полученных металлургической переработкой вторичного свинцового сырья, минуя процесс рафинирования. Одно из наиболее целесообразных и перспективных направле-

ний – использование указанных сплавов для изготовления нерастворимых анодов, широко применяемых в области гидроэлектрометаллургии и прикладной электрохимии.

Повышение качества нерастворимых анодов актуально не только с точки зрения увеличения их физико-механических, электрохимических и коррозионных свойств, но и из экономической целесообразности применения дешевых и недефицитных материалов. Это может быть достигнуто использованием свинцовых сплавов, полученных из вторичного сырья и дополнительно легированных *s*-, *p*- или *d*-элементами.

В работе исследовано поведение нерастворимых анодов на основе сурьмянистого свинца, полученного переработкой вторичного свинцового сырья, в серно-кислом растворе меди с целью определения электрохимических и энергетических параметров электроэкстракции меди, а также чистоты катодного осадка.

Исходным материалом служила активная масса – оксидно-сульфатная фракция (ОСФ), извлеченная после удаления из отработанных свинцово-кислотных аккумуляторных батарей. Переработку ОСФ осуществляли пирометаллургическим низкотемпературным способом по разработанной нами технологии [2], в результате которой получили сплав на основе свинца следующего химического состава, %: 0,48 Sb; 0,13 Sn; остальное – Pb. Наличие в сплаве в небольших количествах сурьмы и олова может играть роль модификатора структуры свинца. На наш взгляд, олово, как модификатор, является более подходящим, так как его содержание в сплаве намного меньше, чем сурьмы и, кроме того, оно хорошо растворяется в свинце [5]. Из диаграммы состояния свинец – сурьма следует, что сурьма 3,5 % (по массе) со свинцом образует твердые растворы, обладающие повышенной механической прочностью и хорошим литейным свойством [5]. Следовательно, взяв в качестве базового материала сплав (Pb + 0,48 % Sb + 0,13 % Sn), полученного на основе переработки ОСФ аккумуляторных батарей и, добавляя в него сурьму 3,5 % (по массе), можно формировать трехкомпо-

Таблица 1

## Физико-механические свойства и жидкотекучесть анодных материалов и чистого свинца марки С00

Химический состав анодного материала	Твердость, (НВ), МПа	Удельное электросопротивление, $10^{-7}$ , Ом·м	Жидкотекучесть, мм
Pb + 3,47 % Sb + 0,13 % Sn	93-95	8,99	127
Pb + 0,48 % Sb + 0,13 % Sn	56-58	4,08	84
Pb (C00)	50-52	3,37	75

Таблица 2

## Коррозионностойкость анодных материалов в серно-кислых растворах

Состав электролита, г/л H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Потеря массы анодов, мг/см <sup>2</sup>		
	Pb + 3,47 % Sb + 0,13 % Sn	Pb + 0,48 % Sb + 0,13 % Sn	Pb (C00)
49	42	63	87
98	61	104	115
196	94	130	167

нентную металлическую систему. Это может быть хорошей предпосылкой для разработки нерастворимых анодных материалов, отличающихся высокой коррозионностойкостью (в результате измельчения структуры посредством модификатора), механическими и технологическими свойствами.

Опытные образцы анодных материалов были получены путем переплавления базового сплава в графитовом тигле под древесным углем толщиной 15-20 мм, используя сурьмянисто-свинцовую лигатуру. Для обеспечения гомогенности сплава в процессе плавки и перед литьем расплав подвергался механическому перемешиванию.

Для оценки обобщенных механических свойств опытных образцов измеряли их твердость по Бринелю на твердомере типа ТШ-2, которая в определенной степени коррелируется коррозионной стойкостью металлов [1]. Электросопротивление образцов измеряли на автоматическом цифровом измерителе LCR типа E7-8. Жидкотекучесть сплавов, которую необходимо знать для оценки литейных свойств анодных материалов, определяли с помощью технологических образцов, имеющих форму спирали. Коррозионностойкость образцов рассчитывали по методу потери массы при плотности тока 50 мА/см<sup>2</sup> в серно-кислых электролитах с различными концентрациями в течение 168 ч

при комнатной температуре. Поляризационные измерения проводили в трехэлектродной электрохимической ячейке с помощью потенциостата П-5827М. Для потенциометрических измерений рабочие электроды в качестве анодов были изготовлены из исследуемых сплавов в виде призматических брусков размером 5,0 × 4,0 × 55 мм. Боковые поверхности анодов были изолированы эпоксидной смолой. Катодом служила медная пластинка марки МО. Для измерения анодного потенциала исследуемых образцов применяли насыщенный хлор-серебряный электрод марки ЭВЛ-1М1, потенциал которого относительно стандартного водородного электрода равен 201 ± 0,3 мВ. Потенциометрические измерения осуществляли в условиях, близких к стационарным, поэтому при каждом заданном значении потенциала анода величину тока измеряли после 20-минутной выдержки. В качестве электролита служил раствор, содержащий 25 г/л Cu<sup>2+</sup> и 120 г/л H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Температуру электролита автоматически регулировали термостатом U10 посредством постоянной циркуляции воды по наружному кожуху электрохимической ячейки.

В табл.1 сопоставлены данные физико-механических и технологических свойств анодных материалов различного состава, а также чистого свинца марки С00 (для срав-

нения), из которых следует, что добавка сурьмы приводит к существенному увеличению твердости и жидкотекучести по отношению к базовому сплаву и чистому свинцу. При этом наблюдается небольшое повышение удельного электросопротивления.

Повышение твердости и удельного электросопротивления анодных материалов объясняется в основном изменением их структуры, в частности, измельчением зернистого строения сплавов, благодаря модифицирующему действию олова.

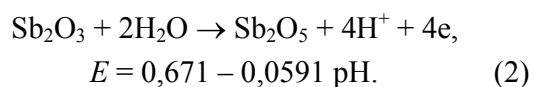
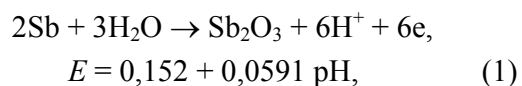
В табл.2 приведены результаты испытаний коррозионной стойкости анодных материалов и чистого свинца, выполненных в условиях поляризации в серно-кислых растворах различной концентрации за 168 ч при  $i = 50 \text{ мА/см}^2$  и  $t = 22^\circ \text{C}$ . Согласно данным, с увеличением концентрации серной кислоты уменьшается коррозионная стойкость как в рассматриваемых анодных материалах, так и в чистом свинце.

Потеря массы анодных материалов связана с ионизацией свинца, легирующих добавок и соединений, образующихся в серно-кислом растворе при поляризации. Скорость ионизации составляющих сплавов на основе свинца, накопление их ионов в растворе, а также защитный эффект по коррозии анодов во многом зависят от физико-химических свойств этих добавок.

Образцы из чистого свинца проявляют наименьшую коррозионную стойкость по сравнению с образцами, полученными из различных сплавов, что обусловлено крупнозернистой структурой свинца после литья. В результате поляризации образующийся фазовый защитный слой из диоксида свинца не полностью покрывает поверхность анода и поэтому ионы свинца с легкостью переходят в раствор из незащищенных участков металла.

Из сопоставления данных табл.2 следует, что образцы из сплава  $\text{Pb} + 3,47\% \text{ Sb} + 0,13\% \text{ Sn}$  обладают наибольшей коррозионной стойкостью по сравнению с образцами, полученными из базового сплава и чистого свинца. Это объясняется тем, что сурьма и в небольшом количестве олово в сплаве способствуют измельчению и образованию од-

нородной структуры, что является одной из важных причин увеличения коррозионной стойкости анодов. Кроме того, при поляризации атомы сурьмы могут образовывать высокоокисленные соединения в защитном фазовом слое диоксида свинца по следующим реакциям [6]:



Эти соединения, по-видимому, способствуют уплотнению защитного слоя из  $\text{PbO}_2$ , в результате чего затрудняется растворение металлического свинца, находящегося под слоем оксида.

Структура и свойства фазового защитного слоя нерастворимых анодов оказывают существенное влияние на перенапряжение выделения кислорода на аноде в процессе электроизвлечения меди из серно-кислых растворов. При этом в результате окисления воды в кислой среде происходит разряд молекул воды с выделением свободного кислорода на аноде электрохимическим путем по реакции



От эффективности реакции (3) в основном зависит протекание сопряженной ей реакции, т.е. осаждение металла на катоде. Чем ниже потенциал анодной реакции (3), тем меньше растворяется анодный материал и, следовательно, меньше загрязняется электролит и соответственно – катодный металл. Уменьшение перенапряжения выделения кислорода приводит к повышению коррозионной стойкости анодов и уменьшению энергетических затрат процесса электроэкстракции металлов.

Потенциометрические измерения в области поляризации  $E > 1,75 \text{ В}$  (рис.1) показали, что при одинаковых температурных условиях наименьший потенциал анодной реакции (3) фиксируется на аноде из сплава  $\text{Pb} + 3,47\% \text{ Sb} + 0,13\% \text{ Sn}$ , а наибольший – на аноде из чистого свинца. С повышением температуры раствора наблюдается сниже-

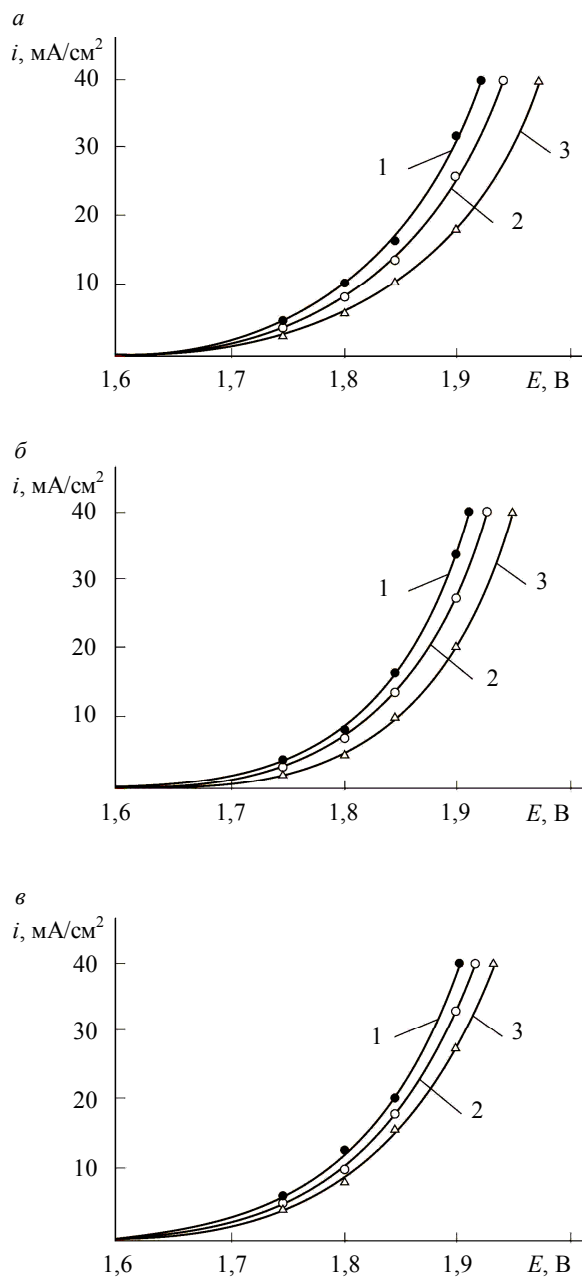


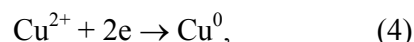
Рис.1. Поляризационные кривые анодов из сплавов Pb + 3,47 % Sb + 0,13% Sn (1), Pb + 0,48% Sb + 0,13% Sn (2) и свинца марки С00 (3) в серно-кислом электролите при температуре, °С: а – 22; б – 32; в – 42

ние потенциала анода вне зависимости от анодных материалов. Так, при температуре 22 °С и плотности тока 35 мА/см<sup>2</sup> разность перенапряжений выделения кислорода по основной электродной реакции выше указанных анодов составляет 45-47 мВ, а при 42 °С – 32-34 мВ.

Снижение потенциала основной анодной реакции при высоких поляризациях (свыше 1,75 В), наблюдаемое на многокомпонентных анодах, по сравнению с анодом из чистого свинца, связано с деполаризующим воздействием легирующих добавок, которые, по-видимому, модифицируют структуру диоксида свинца. При этих условиях на поверхности анода в процессе формирования фазового слоя возможно образуется PbO<sub>2</sub> со сложной конструкцией, состоящей из α- и β-модификаций, что в конечном итоге оказывает влияние на протекание электродных реакций, а также на коррозионные и электрохимические свойства анодов.

При электролизе с  $i = 25 \text{ мА/см}^2$  отмечается нестабильность анодного потенциала, величина которого колеблется в пределах некоторого интервала. Дальнейшее повышение плотности тока увеличивает интервал колебаний потенциала, причем наименьший наблюдается у анода из сплава Pb + 3,47 % Sb + 0,13 % Sn, а наибольший – из свинца марки С00.

Эти колебания, по-видимому, вызваны разрушением и растворением анодов за счет высокой плотности тока, а также низкой концентрации меди в катодите. Последнее обусловлено тем обстоятельством, что при высокой плотности тока (35 мА/см<sup>2</sup> и более) увеличивается скорость восстановления ионов меди по основной катодной реакции



в результате которой катодит обедняется  $\text{Cu}^{2+}$ . Уменьшение ионов меди в прикатодном пространстве способствует концентрационной поляризации на катоде, в результате которой создаются благоприятные условия для растворения анода и перехода в раствор ионов свинца и легирующих добавок. Сплав Pb + 3,47 % Sb + 0,13 % Sn обладает высокой коррозионной стойкостью по сравнению с чистым свинцом (табл.2), и поэтому анод, изготовленный из такого сплава, проявляет большую стабильность в процессе электролиза при высокой поляризации, чем анод из чистого свинца. Немаловажное значение имеет также сравнительно низкое перенапряжение выделения кислорода на много-

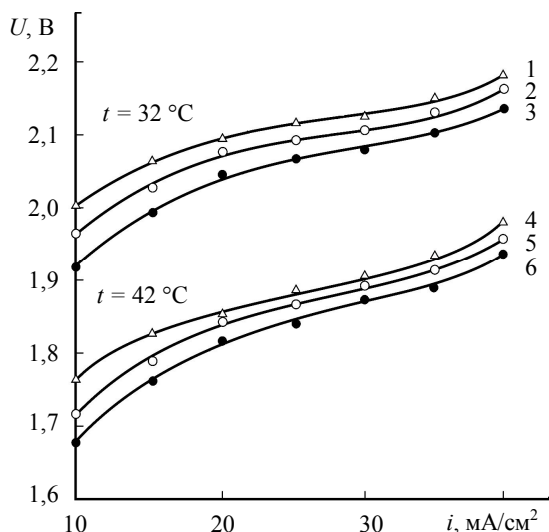


Рис.2. Зависимость напряжения на ванне от плотности тока при электроизвлечении меди анодами из сплавов Pb + 3,47 % Sb + 0,13 % Sn (3,6), Pb + 0,48 % Sb + 0,13 % Sn (2,5) и свинца марки C00 (1,4) в серно-кислом электролите при температуре 32 и 42 °C

компонентном аноде по сравнению с анодом из свинца марки C00.

С увеличением плотности тока электролиза напряжение на ванне повышается, что приводит к увеличению удельного расхода электроэнергии (рис.2). С повышением температуры электролита наблюдается уменьшение напряжения на ванне. В одних и тех же условиях электроизвлечения меди из серно-кислого раствора наименьшее напряжение при применении электродной пары сплав Pb + 3,47 % Sb + 0,13 % Sn в качестве нерастворимого анода и меди – в роли катода.

Проводились испытания анодов из многокомпонентного сплава и из чистого свинца при электроизвлечении меди из серно-кислого раствора с целью определения чистоты металла и его выхода по току. Результаты испытаний показали, что содержание свинца в качестве примеси в катодной меди, полученной при  $i = 35 \text{ mA/cm}^2$ ,  $t = 42 \text{ °C}$  и  $\tau = 48 \text{ ч}$  с применением нерастворимого анода из сплава Pb + 3,47 % Sb + 0,13 % Sn, составляет 0,017 %, а выход по току 95,6 %. С использованием анода из свинца марки C00 эти параметры равны 0,043 и 92,1 % соответственно.

Из полученных данных следует, что анод из сплава Pb + 3,47 % Sb + 0,13 % Sn

обладает большей степенью стойкости в серно-кислом растворе, меньше подвергается ионизации и, следовательно, мало загрязняет электролит и катодную медь по сравнению с анодом из чистого свинца.

Таким образом, установлено, что анодный материал на основе сурьмянистого свинца, полученного переработкой вторичного свинцового сырья, обладает хорошими физико-механическими и технологическими свойствами, а также отличается высокой коррозионной стойкостью при поляризации в серно-кислом растворе по сравнению с чистым свинцом. Получение такого сплава в качестве анодного материала экономически выгодно и может быть рекомендовано для изготовления нерастворимых анодов, применяемых в электроизвлечении тяжелых цветных металлов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гутман Э.М. Механохимия металлов и защита от коррозии. М.: Металлургия, 1981. 272 с.
2. Мартиросян М.В. Технологические особенности окислительно-восстановительной плавки лома свинцовых аккумуляторных батарей / М.В.Мартиросян, Р.Б.Джорухян // Вестник инженерной академии Армении. Ереван, 2010. Т.7. № 2. С.311-314.
3. Металлургическая переработка вторичного свинцового сырья / А.В.Тарасов, А.Д.Бессер, В.И.Мальцев и др. М.: Гинцветмет, 2005. 224 с.
4. Морачевский А.Г. Актуальные проблемы утилизации лома свинцовых аккумуляторов // Журнал прикладной химии. 2003. Т.76. Вып.9. С.1467-1476.
5. Хансен А. Структура двойных сплавов / А.Хансен, К.Андерко. М.: Металлургиздат, 1962. Т.2. 1488 с.
6. Pourbaix M. Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions. Houston, NACE, 1974. P.584.

## REFERENCES

1. Gutman E.M. Mechanochemistry metals and corrosion protection. Moscow: Metallurgiya, 1981. 272 p.
2. Martirosian M.V., Dzhoruhyan R.B. Technological features of the oxidation-reduction smelting of scrap lead-acid batteries // Bulletin of the Engineering Academy of Armenia. Yerevan, 2010. Vol.7. N 2. P.311-314.
3. Tarasov A.V., Besser A.D., Mal'tsev V.I. and other metallurgical processing of secondary lead materials. Moscow: Gintsvetmet, 2005. 224 p.
4. Morachevsky A.G. Actual problems of recycling of scrap batteries svitsovyh // Journal of Applied Chemistry. 2003. Vol.76. Issue 9. P.1467-1476.
5. Hansen A., Anderko K. Constitution of binary alloys. Moscow: Metallurgizdat, 1962. Vol.2. 1488 p.
6. Pourbaix M. Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions. Houston, NACE, 1974. P.584.

# **АВТОМАТИЗАЦИЯ И ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГОРНО-ДОБЫВАЮЩЕЙ И ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

## **AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND MANUFACTURES IN MINING AND PROCESSING INDUSTRIES**

УДК 621.31

**А.Е.КОЗЯРУК**, *д-р техн. наук, профессор, kozjaruk@mail.ru*  
*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

**A.E.KOZYARUK**, *Dr. in eng. sc, professor, kozjaruk@mail.ru*  
*Saint Petersburg State Mining University*

### **СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ**

Выполнен анализ алгоритмов управления и диагностики электромеханического оборудования экскаваторов. Показаны преимущества алгоритма прямого управления моментом и метода ваттметрографии для задач мониторинга и диагностики оборудования.

**Ключевые слова:** управление, диагностика, карьерные экскаваторы.

### **CONTROL SYSTEMS AND DIAGNOSTICS OF THE ELECTROMECHANICAL EQUIPMENT OF CAREER DREDGES**

The analysis of algorithms of management and diagnostics of the electromechanical equipment of dredges is made. Advantages of algorithm of a direct control of the moment and a method wattmetrography for problems of monitoring and equipment diagnostics are shown.

**Key words:** control systems, diagnostics, career dredges.

Анализ состояния и эксплуатации карьерных экскаваторов показывает, что для машин с большим объемом ковша наиболее перспективными системами привода являются электроприводы переменного тока с частотно-регулируемым асинхронным двигателем.

Основные преимущества электроприводов переменного тока:

1. Существенные преимущества привод переменного тока имеет с точки зрения эксплуатации – замена коллекторных двигателей постоянного тока на двигатели пере-



### Характеристика электроприводов

Обозначение	Система	Положительные свойства	Недостатки
ТНПЧ-АД	Тиристорный преобразователь частоты – асинхронный двигатель	Возможность формирования практически любых требуемых характеристик приводов. Высокое быстродействие. Более высокий КПД, чем в системе Г-Д. Исключение электромашинного агрегата и коллекторных двигателей постоянного тока	Низкий коэффициент мощности и наличие высших гармоник в потребляемом от сети токе. Необходимость ФКУ. Сложные полупроводниковые преобразователи, требующие специального обслуживания. Необходимость специальных устройств динамического торможения при отключениях энергии, разработки специальных двигателей
АВ-АИН-АД	Активный выпрямитель – автономный транзисторный инвертор напряжения – асинхронный двигатель	Возможность формирования практически любых требуемых характеристик приводов. Высокое быстродействие. Более высокий КПД, чем в системе Г-Д. Исключение электромашинного агрегата и коллекторных двигателей постоянного тока	Сложные полупроводниковые преобразователи, требующие специального обслуживания. Необходимость дополнительных устройств динамического торможения при отключениях энергии, применения специальных двигателей переменного тока

менного тока существенно снижает затраты на эксплуатацию.

2. Конструктивно двигатели более простые и соответственно более дешевые, чем двигатели постоянного тока.

3. Практически не требуют обслуживания – отсутствие коллекторного узла исключает необходимость контроля и обслуживания коллектора и щеточных узлов.

4. Двигатели переменного тока имеют меньший момент инерции, что обеспечивает снижение динамических нагрузок на механическое оборудование и более высокую максимальную частоту вращения. Контроль за работой двигателя переменного тока существенно проще, чем за двигателем постоянного тока.

5. Система управления с активным выпрямителем (AFE) обеспечивает решение вопроса минимального влияния работы экскаватора на внешнюю сеть без применения специальных устройств.

6. Обеспечивает работу экскаватора в слабых электрических сетях при значительных колебаниях внешнего напряжения.

Сравнительный качественный анализ двух типов возможных схем электропривода переменного тока представлен в таблице.

Сравнительная стоимость основного электропривода для различных типов экскаваторов с использованием различных систем электропривода представлена на рис.1.

Задачу управления экскаваторами с электроприводом можно разделить на две части: создание САУ электроприводом и системы автоматизации управления экскаватором.

Учитывая особо жесткие требования по ограничению динамических моментов и усилий в трансмиссиях экскаватора, система автоматического управления режимами работы электропривода должна реализовать алгоритм «прямого управления моментом» (DTC), обеспечивающий самое высокое быстродействие по контуру момента (тока) двигателя\*.

Разработаны структуры и устройства системы «разрывного» управления частотным электроприводом с реализацией табличных алгоритмов формирования управляющих воздействий на электронные ключи полупроводникового преобразователя частоты.

Задачи системы автоматизации управления экскаватором состоят в получении следующей информации:

- объем выполненных работ и их длительность;

\* Козярук А.Е. Прямое управление моментом в электроприводе переменного тока машин и механизмов горного производства / А.Е.Козярук, В.В.Рудаков / СПГИ. СПб, 2008. 100 с.

Kozyaruk A.E., Rudakov V.V. Direct control of an instant in the electric drive of an alternating current of cars and mechanisms of mountain manufacture / Saint Petersburg, 2008. 100 p.

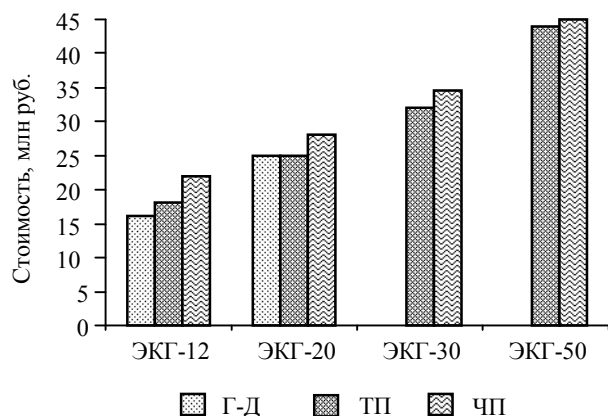


Рис.1. Сравнительная стоимость основного электропривода с учетом двигателей  
Г-Д – генератор-двигатель; ТП – тиристорный преобразователь; ЧП – частотный привод

- использование экскаватора во времени;
- объем (вес) переработанной горной массы;
- энергозатраты на произведенную работу;
- внутрисистемная и итоговая информация по результатам смены.

Системы контроля и учета, как правило, формируют следующую информацию:

- общий расход электроэнергии;
- усилие в механизме подъема (по току двигателя механизма подъема);
- усилие в механизме напора или тяги (по току двигателя механизма напора-тяги);

- угол поворота платформы;
- время рабочего цикла;
- сигнализация о наполнении ковша;
- время поворота;
- энергопотребление за цикл экскавации;
- общее количество перемещенной горной массы;
- общее количество рабочих циклов за смену, сутки, месяц.

На современном уровне особо важную роль в обеспечении эффективности и надежности экскаваторного оборудования играют системы диагностики, мониторинга и оценки остаточного ресурса.

Существующие методы диагностики электрооборудования основаны:

- на анализе вибраций отдельных элементов оборудования;
- на анализе акустических колебаний, создаваемых работающим оборудованием;
- на измерении и анализе магнитного потока в зазоре электрической машины;
- на анализе вторичных электромагнитных полей электрооборудования;
- на измерении и анализе температуры отдельных элементов оборудования;
- на анализе значений электрических параметров электрооборудования.

Для электромеханического оборудования наиболее целесообразным методом функционирования диагностического ком-

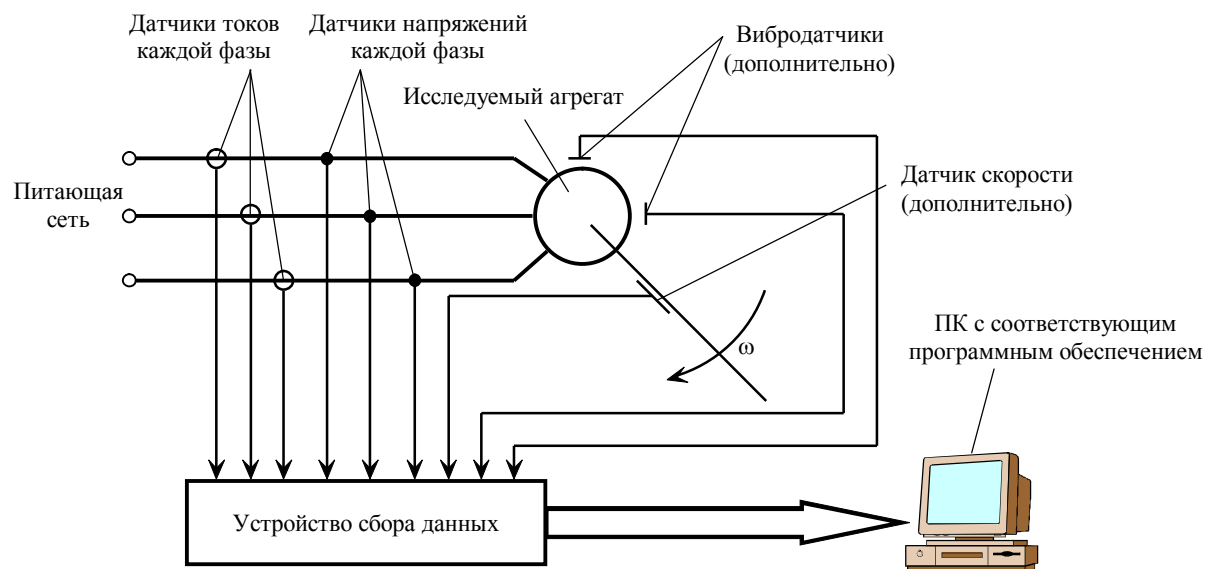


Рис.2. Структура диагностического комплекса на основе ваттметрографии

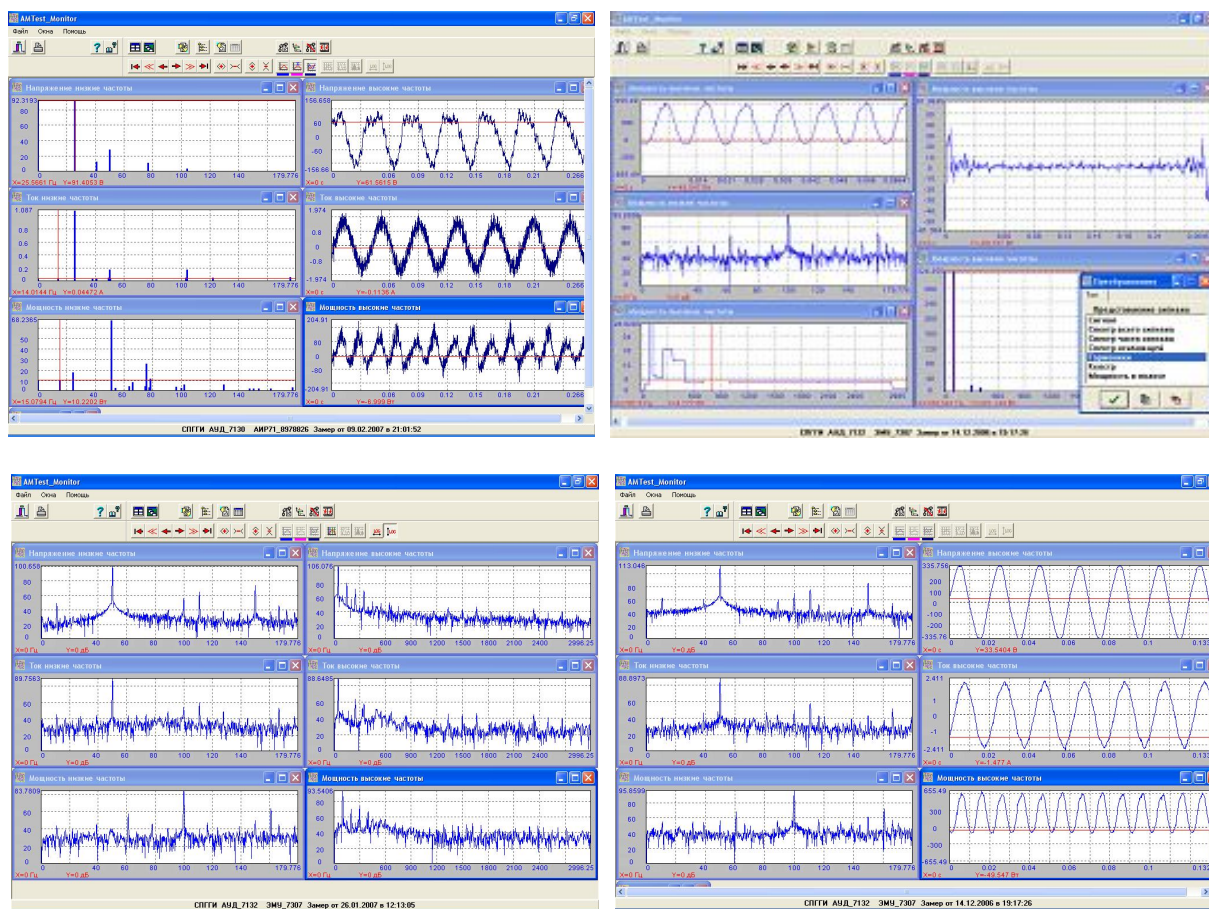


Рис.3. Пример экранов программы AmTest\_Monitor (версия 4.0)

плекса является метод на основе ваттметрографии (измерение, обработка и анализ электрических сигналов) (рис.2).

Созданы и используются приборы защиты, управления и диагностики приводных электродвигателей и механизмов AMTest. На рис.3 показан пример представления информации программой AmTest\_Monitor. Принцип построения системы мониторинга и оценки остаточного ресурса электромеханического оборудования состоит в следующем.

С использованием приборов контроля предварительно производится статистическая обработка сигналов для функционирующего оборудования в различных режимах и при различных сроках эксплуатации. Формируется каталог эталонных сигналов, соответствующих исправному состоянию и различному сроку службы оборудования.

Диагностика состояния и оценка остаточного ресурса производятся по сравнению

реальных сигналов и их определяющих спектральных характеристик с эталонными.

Системы диагностики и оценки остаточного ресурса могут встраиваться в щиты управления электрооборудованием экскаватора или использоваться автономно на карьере для группы экскаваторов по определенному регламенту.

В настоящее время разрабатывается методология определения и оценки эталонных параметров и прорабатываются решения по разработке комплексов диагностики и оценки ресурса для электромеханического оборудования карьеров.

## Выводы

1. Для повышения эффективности работ в карьерах целесообразно создание экскаваторов с объемом ковша 35 и 50 м<sup>3</sup> и

электроприводом переменного тока для главных механизмов.

2. Наиболее перспективным алгоритмом управления электроприводом экскаватора является алгоритм прямого управления моментом (DTC).

3. Задача диагностики, мониторинга и оценки остаточного ресурса электрообору-

дования наилучшим образом решается с использованием принципов и средств ваттметрографии.

4. Создание систем оценки остаточного ресурса требует проведения большой подготовительной работы по созданию каталога эталонных сигналов для различных типов и сроков эксплуатации оборудования.

**Д.А.БОЧЕНКОВ**, аспирант, *yustashinov@yandex.ru*  
**Ю.П.СТАШИНОВ**, канд. техн. наук, доцент, *yustashinov@yandex.ru*  
**В.А.КУРНАКОВ**, канд. техн. наук, доцент, *yustashinov@yandex.ru*  
Шахтинский институт (филиал)  
Южно-Российского государственного технического университета  
(Новочеркасского политехнического института)

**D.A. BOCHENKOV**, post-graduate student, *yustashinov@yandex.ru*  
**Y.P. STASHINOV**, PhD in eng. sc., associate professor, *yustashinov@yandex.ru*  
**V.A. KURNAKOV**, PhD in eng. sc., associate professor, *yustashinov@yandex.ru*  
The Novocherkassk Polytechnical Institute

## РЕАЛИЗАЦИЯ УСТРОЙСТВА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ШАХТНОЙ ВОДООТЛИВНОЙ УСТАНОВКОЙ НА ПРОГРАММИРУЕМОМ ЛОГИЧЕСКОМ КОНТРОЛЛЕРЕ

Приведена информация о разработке устройства автоматического управления водоотливной установкой шахты на базе программируемого логического контроллера.

**Ключевые слова:** водоотливная установка, логический контроллер.

## REALIZATION OF THE ARRANGEMENT OF AUTOMATIC CONTROL MINE WATER-OUTFLOW INSTALLATION ON THE PROGRAMMED LOGICAL CONTROLLER

The information on development of the unit for mine water-removal plant automatic control on the base of a programmable logical controller is given.

**Key words:** mine water-removal, logical controller.

Применяемая на шахтных водоотливных установках аппаратура автоматического управления морально устарела и не соответствует современному уровню развития элементной базы автоматизации.

Учитывая общую тенденцию перехода от аппаратной реализации систем управления технологическими процессами и установками к программной реализации на базе универсальных устройств – программируемых логических контроллеров (ПЛК), была поставлена задача реализации автоматического управления главными водоотливными установками шахт с использованием ПЛК.

С этой целью были изучены технологические особенности шахтных водоотливных установок как объектов автоматического

управления, определен перечень функций, возлагаемых на аппаратуру управления и контроля и необходимое количество входов для подключения воспринимающих элементов (датчиков, переключателей) и выходов для подсоединения исполнительных элементов применительно к стандартной конфигурации главной водоотливной установки с тремя насосными агрегатами. При этом за основу была принята аппаратура автоматизации ВАВ.1.М, серийно выпускаемая Контотопским заводом «Красный металлист»<sup>\*</sup>.

<sup>\*</sup> Шевчук С.П. Повышение эффективности водоотливных установок. Киев: Техника, 1991. 53 с.

Shevchuk S.P. Raise the water-removal plants efficiency. Kiev: Technika, 1991. 53 p.

Большинство используемых на водоотливных установках датчиков (за исключением электродных датчиков уровня) относятся к контактному двухпозиционному, а применяемые исполнительные элементы имеют мало-мощные, как правило, искробезопасные входные цепи, что существенно упрощает подключение тех и других к ПЛК, не требуя разработки специальных узлов сопряжения.

На основании сравнительного анализа выпускаемых различными фирмами ПЛК по показателю цена – качество – функциональные возможности был выбран контроллер серии Melsec FX<sub>IN</sub>-60-MR-DS фирмы «Mitsubishi Electric», имеющий 36 входов и 24 выхода, выполненных на реле.

Для реализации функций управления и контроля на программном уровне разработан алгоритм энергосберегающего управления насосными агрегатами, позволяющий минимизировать их работу в часы максимума нагрузок энергосистемы и в результате существенно снизить плату за заявленную получасовую мощность. Такой режим функционирования водоотливной установки реализован с использованием информации от датчиков промежуточных уровней воды в водосборнике и предусматривает временной сдвиг включения насосного агрегата в рабо-

ту так, чтобы происходило полное освобождение водосборника от воды к началу очередного пика нагрузки в энергосистеме\*\*.

Разработанный алгоритм управления позволяет также осуществлять сглаживание графика электропотребления шахты средствами электропривода насосных агрегатов с использованием электросчетчика с релейным выходом управления нагрузкой.

С использованием указанного алгоритма был разработан релейно-контактный аналог аппаратуры автоматизации водоотлива на базе ПЛК и на его основе – программа работы ПЛК.

Возможность корректировки занесенной в память ПЛК программы позволяет при необходимости учесть характерные особенности, свойственные конкретной водоотливной установке, выявить и использовать скрытые резервы для повышения эффективности ее функционирования.

Применение разработанной аппаратуры, помимо расширения функциональных возможностей, сокращения затрат времени, сил и средств на ее освоение, облегчения и удешевления обслуживания, позволит существенно снизить капитальные затраты по сравнению с аппаратурой, выпускаемой серийно.

---

\*\* Праховник А.В. Энергосберегающие режимы электроснабжения горнодобывающих предприятий / А.В.Праховник, В.П.Розен, В.В.Дегтярев. М.: Недра, 1985. 232 с.  
*Prahovnik A.V., Rozen V.P., Dektyarev V.V. Energy saving schedules of the mining enterprises power supply. Moscow: Nedra, 1985. 232 p.*

**Н.В.ДАНИЛОВА**, канд. техн. наук, ассистент, (812) 328-82-56

**Э.Д.КАДЫРОВ**, канд. техн. наук, доцент, (812) 328-82-56

*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

**N.V.DANILOVA**, PhD in eng. sc., assistant lecturer, (812) 328-82-56

**E.D.KADYROV**, PhD in eng. sc., associate professor, (812) 328-82-56

*Saint Petersburg State Mining University*

## **ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЛАВКИ МЕДНО-НИКЕЛЕВОГО КОНЦЕНТРАТА В ПЕЧИ ВАНЮКОВА**

Разработана методика оценки содержания меди в штейне с использованием теории нечеткой логики. Приведена модификация алгоритмов нечеткой логики – построение базы правил процесса на основе статистических данных работы печи.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, нечеткая логика.

## **APPLICATION OF FUZZY-LOGIC FOR MODELLING OF PROCESS OF FUSION OF THE MEDNO-NICKEL CONCENTRATE IN FURNACE VANJUKOVA**

In work mathematical model of process of fusion of copper-nickel sulphidic raw materials with use of methods of indistinct logic is described. Updating of algorithms fuzzy-logic (formation of base of rules of process on the basis of the statistical data of work of the furnace) is described.

**Key words:** mathematical modeling, fuzzy-logic.

Процесс плавки медно-никелевого сульфидного сырья относится к многофакторным процессам с большим потоком информации, дискретным запаздывающим контролем состава продуктов плавки и трудно формализуемыми возмущениями (например, по содержаниям основных металлов в шихте). Контролировать эти возмущения не представляется возможным, а стабилизация входных материальных потоков не снимает колебаний свойств шихты и не исключает субъективные ошибки операторов-технологов. Это вызывает необходимость создания новых и модернизации существующих систем управления.

Эффективным вариантом решения актуальной проблемы повышения технико-экономических показателей процесса является создание автоматизированной системы

управления технологическим процессом переработки медно-никелевого сульфидного сырья в условиях нехватки информации о ходе процесса на основе математических моделей, построенных с помощью методов нечеткой логики.

Попытки математического описания процесса плавки медно-никелевого сульфидного сырья не дали ожидаемого высокого эффекта при управлении. Эта ситуация соответствует принципу Л.Заде о несовместимости большой сложности и высокой точности математического описания процесса\*. Именно в этом случае для характе-

\* Лукас В.А. Основы фазы-управления; Уральская горно-геологическая академия. Екатеринбург, 2000.

Lukas V.A. Fuzzy-logic bases; The Ural mining-geological academy. Ekaterinburg, 2000.

Таблица 1

## Основные параметры процесса Ванюкова

Показатель	Переменные					
	Входные					Выходные
	Расход шихты, т/ч	Расход кислорода, м <sup>3</sup> /ч	Расход воздуха, м <sup>3</sup> /ч	Расход КВС, м <sup>3</sup> /ч	Содержание кислорода в КВС, %	Содержание меди в штейне, %
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$y$
Минимальное значение	90	17000	1500	24000	62	47
Максимальное значение	196	31000	11000	33500	96	66,7
Среднее значение	146	25200	4460	29480	86	57,9
Дисперсия	480	9438900	4545750	2888900	59	9,4
Среднее квадратическое отклонение	21,9	3072	2132	1700	7,7	3,0

Таблица 2

## Основные параметры процесса Ванюкова, принятые для моделирования

Показатель	Переменные					
	Входные					Выходные
	Расход шихты, т/ч	Расход кислорода, м <sup>3</sup> /ч	Расход воздуха, м <sup>3</sup> /ч	Расход КВС, м <sup>3</sup> /ч	Содержание кислорода в КВС, %	Содержание меди в штейне, %
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$y$
Минимальное значение	90/95	17000/16000	1500/2000	24000/24500	62/62	47/47,45
Максимальное значение	196/190	31000/30500	11000/10500	33500/33000	96/95	66,7/68,74
Среднее значение	146/148	25200/24900	4460/4490	29480/29200	86/85	57,9/58,7
Дисперсия	480/392	$9,4 \cdot 10^6/8,9 \cdot 10^6$	$4,5 \cdot 10^6/4,4 \cdot 10^6$	$2,9 \cdot 10^6/2,4 \cdot 10^6$	59/60,5	9,4/11,2
Среднее квадратическое отклонение	21,9/19,8	3072/2982	2132/2115	1700/1570	7,7/7,8	3,0/3,3

Примечание. В числителе – обучающая выборка, в знаменателе – тестовая.

ристики состояния объекта целесообразно применение лингвистических оценок, которые имеют довольно размытые границы.

Цель работы – разработка имитационной модели процесса Ванюкова на основе нечеткой логики, которая позволит оценить качество целевого продукта (содержание меди в штейне).

Факторное пространство процесса Ванюкова ограничено пятью переменными (табл.1) из-за технической трудности поиска режимов ведения технологического процесса по сравнению с требуемыми значениями переменных.

Согласно предварительным исследованиям\* наибольшее влияние на содержание

меди в штейне  $y$  оказывают следующие факторы: расход шихты, т/ч; расход технического кислорода, м<sup>3</sup>/ч; расход воздуха, м<sup>3</sup>/ч; общий расход кислородно-воздушной смеси (КВС), м<sup>3</sup>/ч; содержание кислорода в КВС, %.

Таким образом, необходимо увязать влияющие на содержание меди в штейне факторы с лингвистическими оценками содержания меди в штейне.

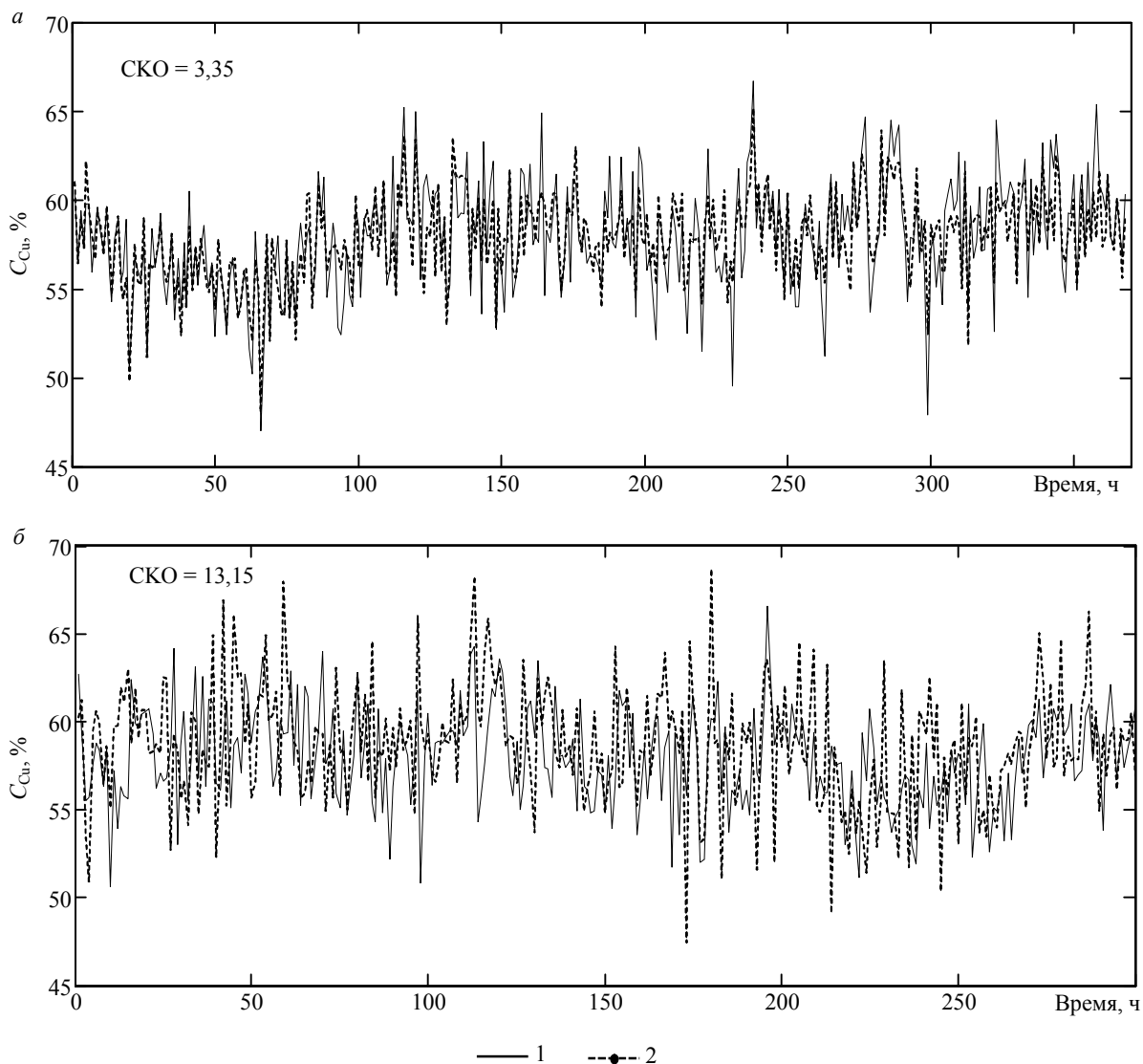
По исходным данным трудно оценить производственные правила, связывающие входы и выходы. Традиционно базу правил формируют на основе экспертной информации. В данном случае ограничением является использование субъективной информации.

В данной работе предложен новый подход к построению функций принадлежности по экспериментальным данным вход – выход. При этом формируется база производственных правил, которая минимизирует отклонения между экспериментальными данными и результатами нечеткого моделиро-

\* Кадыров Э.Д. Оценка технологических параметров автогенных процессов / Э.Д.Кадыров, Н.В.Данилова // Автоматизация в промышленности. 2008. № 5.

Kadyrov E.D., Danilova N.V. Estimation of technological parameters of autogenous processes // Automation in the industry. 2008. N 5.





Результат работы программы на обучающей (а) и тестовой (б) выборке  
1 – фактические значения; 2 – результаты моделирования

вания. Использование такого подхода снижает субъективизм формирования базы правил, однако требует обучающей выборки.

Таким образом, решение задачи сводится к разработке программы для генерации базы продукционных правил непосредственно из обучающей выборки. Методика разработки базы правил заключается в нечетком логическом выводе значения содержания меди в штейне при различных комбинациях независимых переменных ( $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_4$  и  $x_5$ ) на массиве исторических данных оперативного контроля за процессом Ванюкова.

Нечеткий логический вывод – это аппроксимация зависимости вход – выход на основе лингвистических высказываний типа «ЕСЛИ – ТО» и операций над нечеткими множествами. Основные положения теории нечетких множеств, используемые в настоящей статье, приведены в работе В.А.Лукас.

Для решения поставленной задачи было сформировано две выборки (табл.2): обучающая (370 случаев) и тестовая (300 случаев).

Для обучения системы с применением алгоритмов нечеткой логики воспользуемся пакетом Fuzzy Logic Toolbox системы MATLAB для идентификации нелинейных

зависимостей с помощью нечеткого логического вывода. В пакете Fuzzy Logic Toolbox формирование нечеткого вывода по алгоритму Сугено реализовано функцией `genfis2`. Эта функция генерирует систему нечеткого логического вывода типа Сугено из данных с использованием субтрактивной кластеризации. Формирование базы правил в функции `genfis2` происходит в два этапа. Сначала определяется количество правил, затем с помощью метода наименьших квадратов – логический вывод каждого правила. В результате получается система нечеткого логического вывода с базой правил, покрывающих всю область факторного пространства (см. рисунок, *а*).

Для проверки адекватности разработанной базы правил проверим ее работу на тестовой выборке (см. рисунок, *б*).

Анализ полученных результатов показывает, что среднее квадратическое отклонение (СКО) рассчитанного содержания меди в штейне от фактического наблюдается в рамках допустимых производственных погрешностей. Для увеличения точности модели необходимо ее оптимизировать. Это реализуется ее дообучением, уточнением продукционных правил.

Таким образом, изложенная методика формирования правил оценки содержания меди в штейне позволяет наметить переход от лингвистических оценок к численным.

Проведенные исследования подтверждают, что данные оперативного контроля служат неиссякаемым источником различных гипотез, отражающих определенные тенденции производственной практики. Вполне состоятельной оказалась гипотеза формирования базы продукционных правил по выборке довольно большого объема.

Разработана методика оценки содержания меди в штейне с использованием теории нечеткой логики. Показано, что содержание меди в штейне может быть найдено с использованием базы продукционных правил, причем исходной посылкой к присвоению содержания меди в штейне той или иной оценки является совокупность значений пяти параметров: расходов шихты, технического кислорода, воздуха, общего расхода КВС и содержания кислорода в КВС. Погрешность работы модели укладывается в производственные рамки допустимых отклонений.

УДК 621.89.017

**С.Л.ИВАНОВ**, д-р техн. наук, профессор, 328-86-32

**А.С.ФОКИН**, канд. техн. наук, ассистент, 328-86-32

*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

**В.С.ПОТАПЕНКО**, технический директор

*ЗАО «МЕТКАТОМ», Санкт-Петербург*

**С.П.ПОДХАЛЮЗИН**, генеральный директор

*ООО «Техпартнер», Санкт-Петербург*

**S.L.IVANOV**, Dr. in eng. sc, professor, 328-86-32

**A.S.FOKIN**, PhD in eng. sc., assistant lecturer, 328-86-32

*Saint Petersburg State Mining University*

**V.S.POTAPENKO**, technical direktor

*«МЕТКАТОМ» Co, Saint Petersburg*

**S.P.PODKHALYUZIN**, general direktor

*«Techpartner» Co, Saint Petersburg*

## **МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ, ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ПОВЫШЕНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТРАНСМИССИИ И ОПОРНЫХ ПОДШИПНИКОВ ТРУБЧАТЫХ ПЕЧЕЙ**

Причинами аварийной остановки трубчатых печей является разрушение подшипников в опорах печи, подшипников и зубчатых колес в механической трансмиссии, выход из строя приводного электродвигателя, нарушение целостности корпуса печи и ее футеровки. В статье рассмотрены возможности по прогнозированию остаточного ресурса подшипников опор и трансмиссии, предлагаются принципы построения комплекса из системы мониторинга состояния и автоматических систем смазки подшипников.

**Ключевые слова:** диагностика, остаточный ресурс, акустическая эмиссия.

## **MONITORING OF CONDITION, FORECASTING AND INCREASING OF RESIDUAL RESOURCE OF TRANSMISSION AND SUPPORTED BEARINGS OF TUBULAR FURNACES**

The reasons of an emergency stop of tubular furnaces is destruction of bearings in support of the furnace, bearings and cogwheels in mechanical transmission, failure the electric motor, infringement of integrity of the case of the furnace and it brickwork. In article possibilities on forecasting of a residual resource of bearings of support and transmission are considered, principles of construction of a complex from system of monitoring of a condition and automatic systems of greasing of bearings are offered.

**Key words:** diagnostic, residual resource, acoustic emission.

В условиях повышения энергонагруженности оборудования, повышения уровня механизации и автоматизации производства растет количество единиц техники, подлежащее техническому обслуживанию и ремонту. Система планово-предупредительных

ремонтов, широко используемая еще в недавнем прошлом, в настоящее время не позволяет эффективно поддерживать в исправном состоянии оборудование. Когда экономика была плановой, отсутствовали инструменты рыночного регулирования цен

на продукцию горных и перерабатывающих предприятий, главным фактором было выполнение плана по выпуску продукции, а на обслуживание и ремонт оборудования перерабатывающих предприятий стратегического направления, к которым относились в том числе глиноземные и цементные заводы, выделялись значительные ресурсы зачастую без оценки эффективности их использования. В условиях рыночных отношений на первое место при обслуживании машин и оборудования выходит эффективность использования имеющегося парка оборудования при сокращении расходов на его ремонт и обслуживание.

Для повышения эффективности использования ресурса узлов, сокращения вероятности аварийных отказов должна применяться развитая система мониторинга и диагностики, позволяющая оценить состояние контролируемого узла, его остаточный ресурс и спланировать его ремонт в рамках профилактических мероприятий по техническому обслуживанию.

Важное место в производстве глинозема и цемента занимают трубчатые печи. Аварийная остановка трубчатой печи, как элемента технологической цепи, сопряжена со значительными материальными затратами, которые складываются не только из расходов на ремонт и восстановление объекта, но и упущенной выгоды предприятия. По условиям эксплуатации не исключается возможность отказа узла и как следствие – остановка печи. При режиме работы ремонтных бригад по 8-часовому графику пять дней в неделю из 168 ч работы печи ремонтный персонал готов к устранению внезапного отказа только 40 ч. В остальное время (около 76 % времени) на рабочем месте находится лишь дежурный персонал, силами которого в большинстве случаев можно лишь обнаружить неисправность и остановить оборудование.

По условиям эксплуатации печь работает в среднем 3-4 мес. что, в первую очередь, ограничивается сроками службы футеровки. Ремонт печи требует значительных трудозатрат, связанных с разборкой оборудования, оценкой его состояния по внешне-

му виду, а подшипников качения – дополнительно по радиальному биению. Подшипники опор трубчатой печи перед остановкой, как правило, прослушивают и на слух определяется их состояние. Во время ремонта их вскрывают, визуально оценивают техническое состояние, если подшипник не выбраковывается, его набивают смазкой, закрывают и эксплуатируют до выработки ресурса, указанного в ППР, или разрушения.

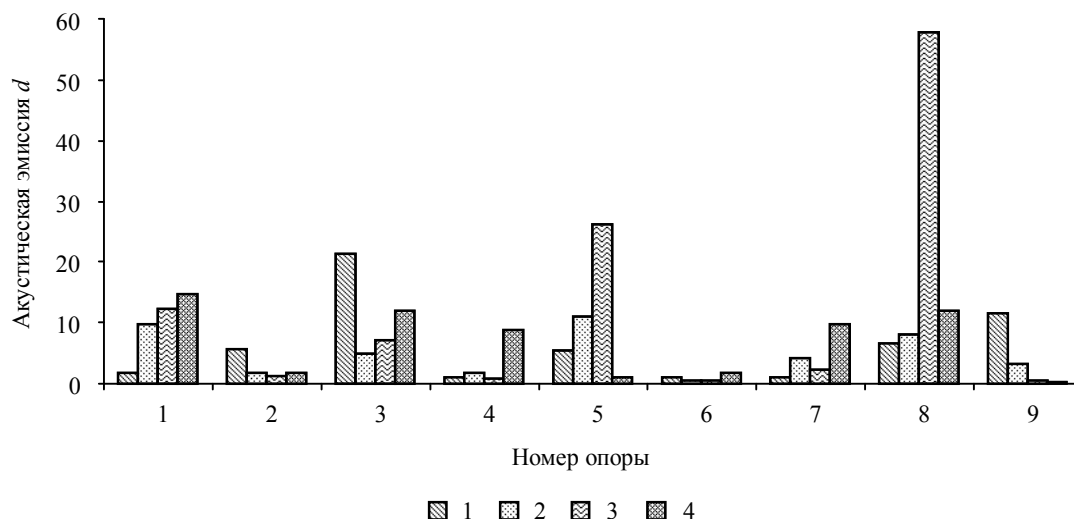
В настоящее время, когда ремонтные службы сокращаются, расходы на запасные части снижаются, а сроки ремонта не позволяют провести полный комплекс работ, важна объективная оценка состояния оборудования. Для этого необходимо повысить использование ресурса узлов, а также уменьшить вероятность аварийных остановок оборудования из-за разрушения подшипников опор и деталей трансмиссий.

Как показал опыт ряда предприятий и проведенные авторами экспериментальные исследования\*, для неразрушающего контроля трансмиссий трубчатых печей и подшипников опор эффективен метод акустико-эмиссионного анализа. Применение данного метода позволяет качественно оценить состояние подшипников качения опорных роликов, скорость вращения которых 5-10 об./мин. Метод акустико-эмиссионного анализа дает возможность оценить состояние подшипника, поскольку основными источниками формирования акустико-эмиссионного сигнала в ультразвуковом диапазоне частот являются: упругие волны от нормальных и касательных напряжений в пятнах контакта в приповерхностных слоях взаимодействующих между собой тел от действующих нагрузок и чисел оборотов; микроудары, которые усиливаются из-за деструкции смазки; гидродинамические эф-

---

\* К вопросу оценки ресурса элементов трансмиссий горных машин / А.А.Артемов, В.С.Потапенко, С.Л.Иванов, Э.А.Кремчеев, А.А.Поддубная, А.С.Фокин // Горные машины и электромеханика. 2007. № 9. С.31-35.

Artemev A.A., Potapenko V.S., Ivanov S.L., Kremcheev E.A., Poddubnaja A.A., Fokin A.C. To a question of an estimation of a resource of elements of transmissions of mountain cars // Mountain cars and electromechanics. 2007. N 9. P.31-35.



Результаты измерений подшипниковых узлов печи спекания № 2 ОАО «ПГЗ»

фекты от смазки в зоне контактных напряжений тел; импульсные сигналы от образования трещин в металле кинематической пары; микроудары и удары от перекачивания дефектных поверхностей (шелушение, сколы и др.); микроперемещения наружного кольца в гнезде корпуса; износ посадочных мест подшипника, сопровождаемый скользящими перемещениями посадочных колец относительно посадочных мест; микропроскальзывание тел вращения по дорожкам качения.

Для подтверждения возможности диагностировать состояние тихоходных тяжелонагруженных подшипников роликоопор печей спекания был проведен промышленный эксперимент (см. рисунок). На каждой опоре было выбрано четыре точки для измерения сигнала акустической эмиссии: в точке 1 измерялся сигнал, излучаемый радиальным подшипником № 1, справа сверху по ходу материала; в точке 2 – радиальным подшипником № 2 слева сверху по ходу материала; в точке 3 – радиальным и упорным подшипниками снизу справа по ходу материала; в точке № 4 – радиальным и упорным подшипниками снизу и слева по ходу материала. Эксперимент показал возможность качественно оценить состояние подшипников по показаниям прибора ИРП-12.

Обобщая результаты эксперимента и сравнивая их с ранее накопленным опытом

на других видах оборудования, были даны следующие предварительные рекомендации: показания сигнала акустической эмиссии до 20 единиц – соответствует нормальному состоянию подшипникового узла (зеленая зона работы подшипника), выше 20 единиц требует особого внимания (желтая зона работы подшипника). Значение акустико-эмиссионного сигнала более 50 как, например, у подшипника № 3 опоры восемь (см. рисунок), требует принятия срочных мер по визуальному осмотру и выбраковке подшипника (красная зона работы подшипника).

Показана возможность оценить состояние смазки в подшипнике и выявить подшипники, в которых смазка не удовлетворяет условиям работы узла\*. Это достигается при оценке сигнала акустической эмиссии не по величине, а по характеру. В узлах, где смазки недостаточно, или смазка под воздействием высокой температуры или агрессивных сред изменила свои физические свойства, сигнал акустической эмиссии

\* Автоматические централизованные системы смазки, опыт применения, проблемы и перспективы использования / С.Л.Иванов, П.П.Дудко, Г.Ю.Дмитриев, С.П.Подхалюзин // Проблемы горно-транспортных систем и электромеханики. СПб, 2008. С.22-26.

Ivanov S.L., Dudko P.P., Dmitriev G.Ju., Podhaluzin S.P. Automatic the centralized systems of greasing. Experience of application, the Problem and use prospect // Problems of mountain-transport systems and electromechanics. Saint Petersburg, 2008. P.22-26.

имеет нестабильный характер в периоде измерения с частыми перепадами его амплитуды. При этом величина сигнала может оставаться в пределах зеленой зоны работы подшипника.

Установка стационарной системы по оценке состояния ответственных узлов трубчатой печи позволяет организовать постоянный и достоверный, не зависящий от человеческого фактора, процесс сбора данных. Оценка изменения уровня сигнала акустической эмиссии позволяет составить прогноз о времени полной выработки ресурса, заблаговременно подготовить необходимые запасные части и в штатном режиме заменить узел до его аварийного выхода из строя.

Мониторинг состояния подшипников роликов опор также позволяет оперативно управлять автоматической системой смазки, подавая смазку именно в тот узел, который испытывает масляное голодание, и необходимое количество для работы узла в режиме жидкостного или полужидкостного трения. Подача смазки в ручном режиме является неэффективным способом смазки подшипников, так как производится нерегулярно, в разных объемах и без учета фактической потребности узла в смазке.

Использование автоматической системы смазки для смазывания подшипников роликов опор с периодичностью, не завися-

щей от фактического состояния подшипника, приводит к минимизации расхода смазки в сравнении с ручной подачей. При использовании комплекса акустико-эмиссионный анализ – автоматическая система смазки возможно сократить расход смазки в сравнении с периодической подачей. Варьирование количества смазки определяется следующими основными причинами: на каждой опоре трубчатой печи находится по шесть подшипников, работающих в различных режимах нагружения; опоры трубчатой печи расположены по всей длине печи в различных ее участках (возле холодильника, участок, имеющий футеровку и без футеровки, начало цепной зоны, цепная зона), которые имеют различную температуру и по-разному воздействуют на смазку подшипников; корпус печи имеет неровности, которые вызывают появление циклической составляющей нагрузки, действующей на опорные ролики.

Создание комплекса совмещенных систем мониторинга и автоматической смазки позволяет не только увеличить ресурс ответственного оборудования, но и предоставляет возможность организовать службу ремонта оборудования по фактическому состоянию. Это, в свою очередь, ведет к повышению эффективности использования ресурса отдельных узлов оборудования в целом и производительности труда.

**Е.Е.АНДРЕЕВ**, канд. техн. наук, доцент, (812) 328-82-85

**В.В.ЛЬВОВ**, канд. техн. наук, ассистент, (812) 328-82-85

**Н.В.НИКОЛАЕВА**, канд. техн. наук, ассистент, (812) 328-82-85

*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

**E.E.ANDREEV**, PhD in eng. sc., associate professor, (812) 328-82-85

**V.V.LVOV**, PhD in eng. sc., assistant lecturer, (812) 328-82-85

**N.V.NIKOLAEVA**, PhD in eng. sc., assistant lecturer, (812) 328-82-85

*Saint Petersburg State Mining University*

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ДВУХСТАДИАЛЬНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ОФ-1 ГМК «ПЕЧЕНГНИКЕЛЬ»**

Разработан алгоритм и система оптимального управления циклом двухстадийного мокрого измельчения для Ждановской обогатительной фабрики ГМК «Печенганикель». Проведено компьютерное моделирование, позволяющее определить оптимальные установки к системам оптимизации, реализующих разработанный алгоритм. Разработана функциональная схема автоматизации, позволяющая внедрить разработанный алгоритм и систему оптимального управления.

**Ключевые слова:** автоматизация, измельчение, оптимизация, управление.

## **AUTOMATION OF TWO STADIAL GRINDING FOR EXAMPLE MINERAL SEPARATION PLANT GMK «PECHENGANICKEL»**

The algorithm and system optimal control of two-cycle by stages for mineral separation plant GMK «Pechenganickel». Computer modeling, which allows to determine the optimal set of optimization systems that implement the developed algorithm. A functional diagram of automation, allows the implementation algorithm and a system of optimal control.

**Key words:** automation, milling, optimization, control.

Одна из причин низких показателей технологического процесса\* (рис.1) на первой секции измельчения ОФ ГМК «Печенганикель» – это отсутствие функционирующих систем стабилизации выходных показателей качества (плотность и гранулометрический состав) готового продукта измельчения.

Для разработки алгоритма управления качеством готового продукта было проведено математическое моделирование процесса

измельчения обеих стадий измельчения с помощью компьютерного пакета JKSImMet\*\* (рис.2, 3). На математических моделях рассчитывались режимные параметры процесса (см. таблицу) при изменении производительности секции с 350 до 420 т/ч с шагом в 10 т/ч. Была выбрана стратегия управления, ориентированная на стабилизацию плотности слива гидроциклонов в I стадии и гранулометрического состава (по расчетному классу крупности –0,074 мм) слива гидроциклонов во II стадии измельчения.

\* Андреев Е.Е. Дробление, измельчение и подготовка сырья к обогащению: Учебник / Е.Е.Андреев, О.Н.Тихонов; СПбГИ. СПб, 2007. 440 с.

Andreev E.E., Tikhonov O.N. Crushing and preparation of raw material for enrichment: the Textbook; SPMI. Saint Petersburg, 2007. 440.

\*\* JKSImMet User Manual and Supplementary Information Manual // JKTech. Indooroopilly, Qld., Australia. 1989. Version 4. Release 1.

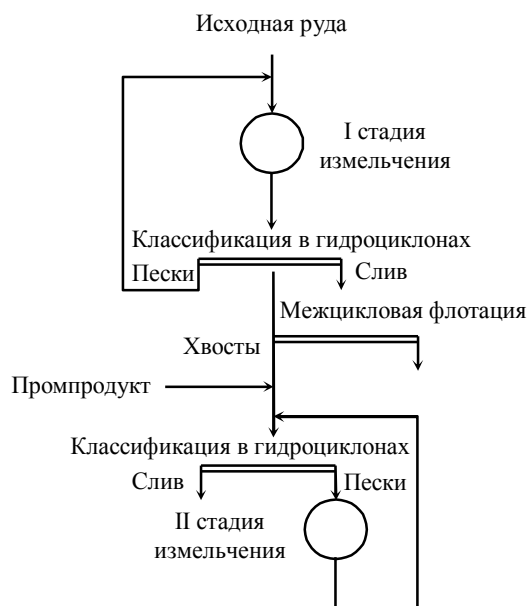


Рис.1. Технологическая схема двухстадийного замкнутого цикла мокрого измельчения

Моделирование проводилось при следующих ограничениях (константах).

Для I стадии измельчения:

1) содержание твердого на сливе мельницы 70 %;

2) содержание твердого в сливе гидроциклонов 38,6 %;

3) число работающих гидроциклонов 4 шт. ( $D = 600$  мм).

Для II стадии измельчения

1) содержание твердого в питании гидроциклонов 50 %;

2) содержание твердого на сливе мельницы 69,5 %;

3) выход промпродукта флотации 20 %;

4) содержание класса  $-0,074$  мм в сливе гидроциклонов 86 %;

5) число работающих гидроциклонов 27 шт. ( $D = 350$  мм).

Остальные параметры работы секции измельчения соответствовали принятым на ОФ режимным значениям.

Цель моделирования – расчет расходов воды в мельницы и зумпфы, давлений на входе в гидроциклоны I и II стадий, а также плотности питания и содержания класса  $-0,074$  мм в сливе гидроциклонов I стадии и плотности слива гидроциклонов II стадии измельчения.

Параметры моделирования представлены в таблице и на рис.3, 4. На рисунках данные приведены в процентах по отношению к базовому варианту  $Q = 350$  т/ч. Эти данные положены в основу разработанного алгоритма.

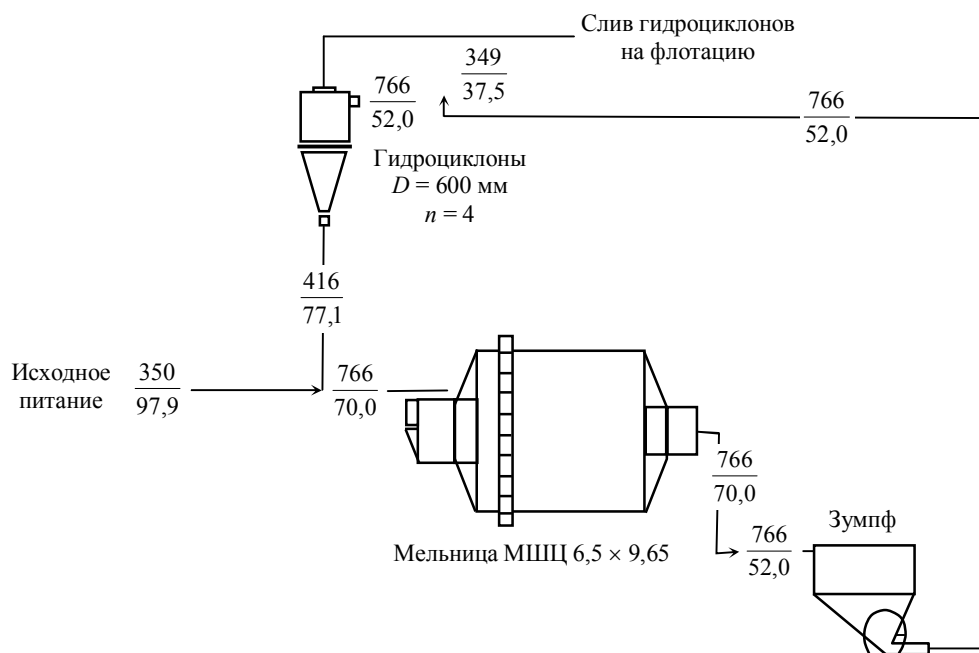


Рис.2. Схема цикла I стадии измельчения.  
В числителе – тонна в час твердого, в знаменателе процент твердого



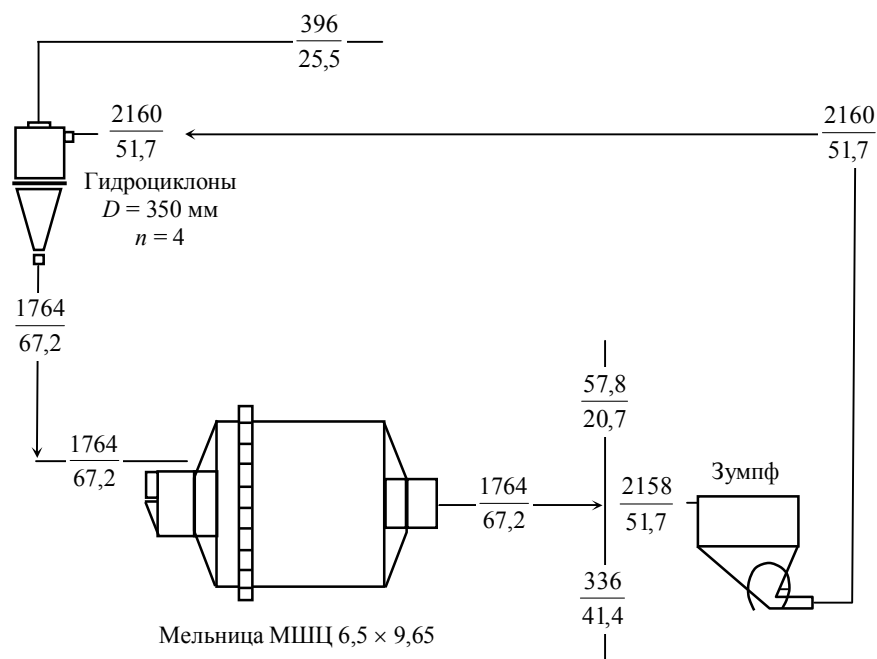


Рис.3. Схема цикла II стадии измельчения  
В числителе – тонна в час твердого, в знаменателе процент твердого

#### Зависимость параметров процесса измельчения от производительности 1-й секции

Параметры	Единица измерения	Производительность 1-й секции, т/ч							
		350	360	370	380	390	400	410	420
I стадия измельчения									
Слив гидроциклона Ø 600 мм	–0,074 мм	48,24	47,77	47,32	46,86	46,41	45,96	45,57	45,17
	% (отн.)	100,0	99,00	98,00	97,10	96,20	95,30	94,50	93,60
Вода в мельницу	м³/ч	211,6	224,6	236,6	249,6	261,6	272,6	285,6	298,6
	м³/мин	3,530	3,740	3,940	4,160	4,360	4,54	4,760	4,980
Вода в зумпф разгрузки мельницы	м³/ч	337,0	340,0	345,0	348,0	351,0	354,0	359,0	362,0
	м³/мин	5,620	5,670	5,750	5,800	5,850	5,900	5,980	6,030
	% (отн.)	100,0	100,9	102,3	103,2	104,1	105,0	106,4	107,3
Давление на входе в гидроциклон	КПа	40,95	43,12	45,39	47,66	50,01	52,26	54,83	57,34
	% (отн.)	100,0	105,3	110,8	116,4	122,1	127,6	133,9	140,0
Питание гидроциклонов	% твердого	53,70	54,00	54,20	54,40	54,70	54,90	55,10	55,30
	% (отн.)	100,0	100,4	100,9	101,3	101,9	102,2	102,6	103,0
II стадия измельчения									
Слив гидроциклона Ø 350 мм	% твердого	28,30	7,90	27,50	26,90	26,10	25,20	24,30	23,23
	г/л	1225	1221	1217	1212	1204	1196	1187	1177
	% (отн.)	100,0	98,50	97,00	95,00	93,00	90,00	86,00	82,00
Вода в мельницу	м³/ч	0,00	0,00	0,00	0,00	40,70	80,30	126,9	182,8
	м³/мин	0,00	0,00	0,00	0,00	0,68	1,34	2,16	3,05
Вода в зумпф разгрузки мельницы	м³/ч	325,0	358,0	393,0	428,0	460,0	498,2	543,9	599,5
	м³/мин	5,41	5,97	6,55	7,13	7,66	8,30	9,07	10,00
	% (отн.)	100,0	110,7	121,3	131,8	141,6	153,4	167,6	184,8
Давление на входе в гидроциклон	КПа	71,20	75,90	80,90	86,70	95,00	104,6	116,2	184,8
	% (отн.)	100,0	106,6	113,6	121,6	133,4	147,0	163,0	230,6

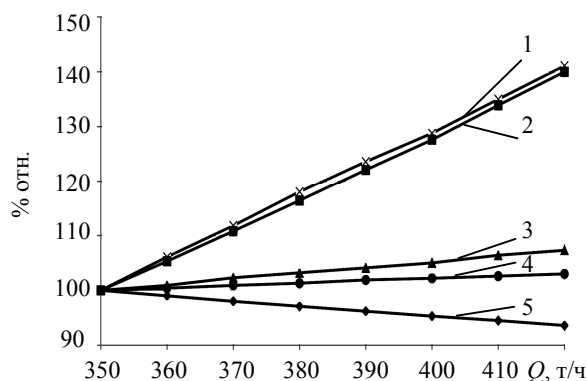


Рис.4. Зависимость параметров процесса измельчения от скорости подачи руды для I стадии

1 – расход воды в мельницу; 2 – давление на входе в гидроциклон; 3 – расход воды в зумпф; 4 – твердого в питании гидроциклона, %; 5 – крупность  $-0,074$  мм на сливе гидроциклона, %

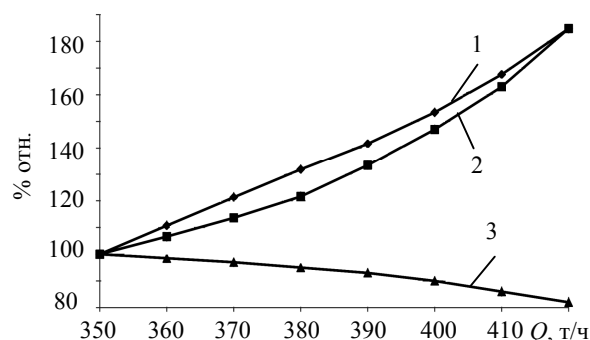


Рис.5. Зависимость параметров процесса измельчения от скорости подачи руды для II стадии

1 – расход воды в зумпф; 2 – давление на входе в гидроциклон; 3 – плотность слива гидроциклона

С учетом технических средств и конфигурации схемы целесообразно стабилизировать плотность слива гидроциклонов I стадии по давлению на входе в гидроциклон (рис.4), а во II стадии – поддерживать заданную крупность помола по классу  $-0,074$  мм (рис.5), стабилизируя требуемую (свою для каждой производительности) плотность пульпы на сливе гидроциклонов II стадии измельчения.

Система реализуется в рамках АСУТП ОФ при трехуровневом управлении. На первом (нижнем) уровне высокочастотные возмущения вызваны колебаниями показателей материальных потоков с периодом в несколько минут. На втором (среднем) уровне стабилизируются среднечастотные колебания показателей качества с периодом в десятки минут. На третьем (верхнем) обычном уровне оптимизации, возмущения обусловлены длительными изменениями технологического режима и показателями качества с периодом часы и более. Согласно алгоритму внутренний контур стабилизации расхода воды в зумпф компенсирует высокочастотные колебания, связанные, в частности, с изменениями напора в водной магистрали. Возмущения средней частоты, связанные с изменениями показателей плотности пульпы, компенсируются в контуре стабилизации плотности слива гидроциклона. Оптимизация качества помола осуществляется на верхнем уровне управления. Показате-

лем качества может быть выбрана циркулирующая нагрузка агрегата, контролируемая, например, по мощности двигателя насоса.

Управляющий сигнал с этого уровня изменяет задание для контура стабилизации плотности. Желательно использование насосов с регулируемым приводом и стабилизация уровня пульпы в зумпфе с воздействием на частоту вращения электродвигателя привода насоса.

В статье описан алгоритм управления гранулометрическим составом продукта измельчения на II стадии; I стадия регулируется аналогично, но стабилизируется не плотность, а давление на входе в гидроциклон. При разработке алгоритма и системы оптимизации управления двухстадийным циклом использовался опыт кафедры обогащения полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета.

Бесперебойная и высокоэффективная работа гидроциклонной установки возможна лишь при наличии адекватной системы автоматического управления процессом классификации. Автоматическое управление должно включать элементы систем автоматического контроля и стабилизации.

Система автоматического контроля:

- уровня пульпы в зумпфе насоса гидроциклона;
- расхода воды в зумпф насоса гидроциклона;

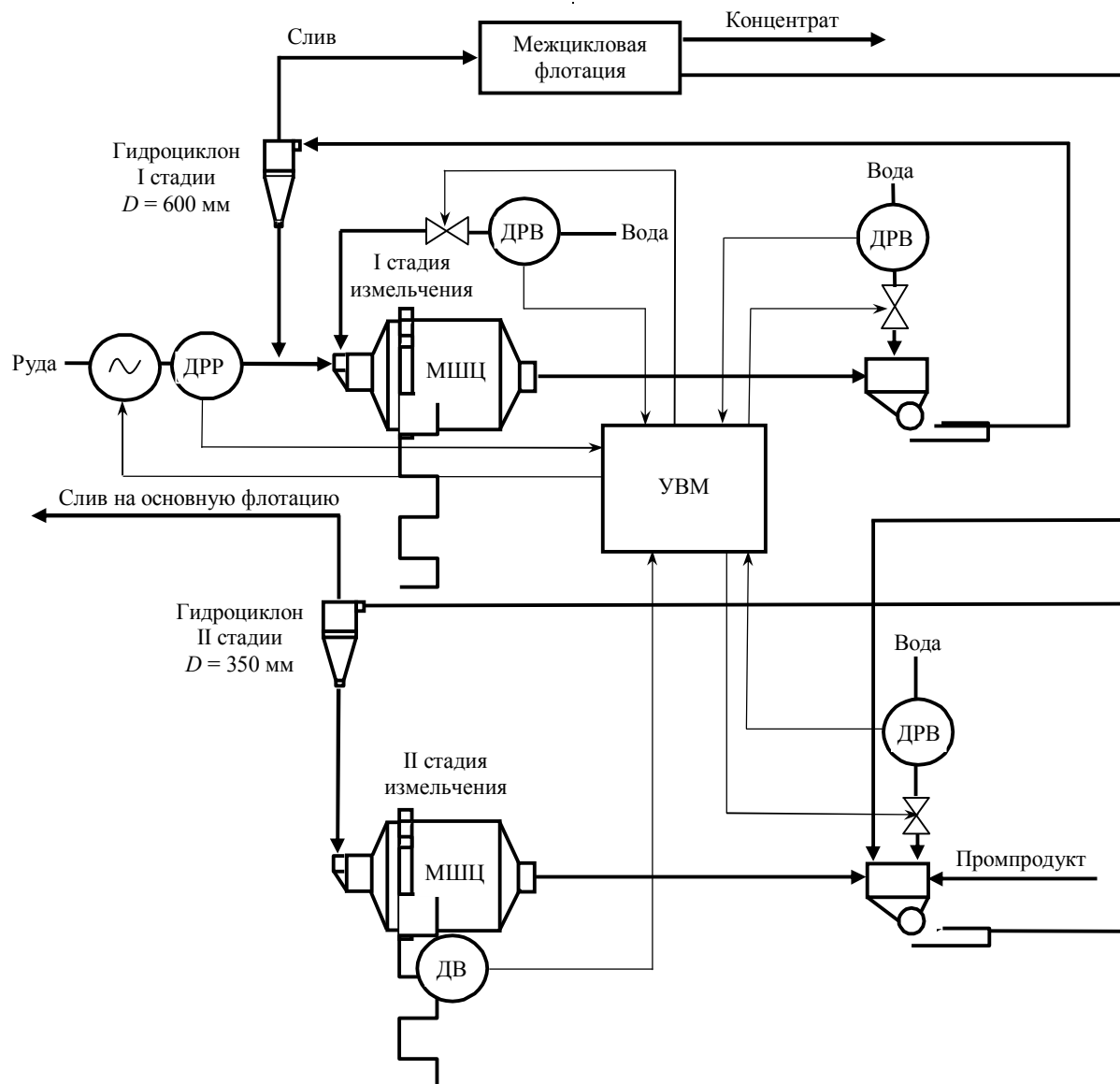


Рис.6. Структурная схема управления качеством готового продукта на I секции измельчения на ОФ-1 ГМК «Печенганикель»  
ДРВ – датчик расхода воды; ДРР – датчик расхода руды; ДВ – датчик веса; УВМ – управляющая вычислительная машина

- плотности слива гидроциклона;
- гранулометрического состава продукта классификации;
- активной потребляемой мощности двигателем насоса;
- давления на входе в гидроциклон.

Система стабилизации:

- расхода воды в зумпф насоса гидроциклона;

- уровня пульпы в зумпфе насоса гидроциклона;
- плотности пульпы на сливе гидроциклона.

На рис.6 представлена схема системы управления двухстадиальной гидроциклонной установкой на примере первой секции измельчения ОФ-1 ГМК «Печенганикель».

**Э.Д.КАДЫРОВ**, канд. техн. наук, доцент, (812)328-82-56  
Санкт-Петербургский государственный горный университет

**E.D.KADYROV**, PhD in eng. sc., associate professor, (812)328-82-56  
Saint Petersburg State Mining University

## КОМПЛЕКСНАЯ АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПИРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМ ПРОИЗВОДСТВОМ МЕДИ

Рассмотрен методологический подход к синтезу комплексной автоматизированной системы управления производством. Описана структура системы, включающая мультимодельный модуль, в котором разработана модель технологического процесса с применением экспертных методов, алгоритмов нечеткой логики и нейронных сетей.

**Ключевые слова:** автоматизация производства, мультимодельная система, интеллектуальные системы управления, экспертные системы, нечеткая логика, нейронные сети.

## INTEGRATED AUTOMATIC PROCESS CONTROL SYSTEM OF PYROMETALLURGICAL COPPER PRODUCTION

The methodological approach to synthesis of the complex automated control system by manufacture is considered. The structure of system including the multimodelling module is described. In the multimodelling module the model of technological process on the basis of expert methods, fuzzy-logic, neural networks is described.

**Key words:** manufacture automation, multimodelling system, intellectual control systems, expert systems, fuzzy-logic, neural networks.

**Введение.** Для современных предприятий металлургии характерна сложная инфраструктура, связанная с многопрофильностью подразделений, их территориальной удаленностью и различным производственным потенциалом. Эти подразделения имеют тесную взаимосвязь производственного и финансового характера.

При постановке задачи комплексной автоматизированной системы управления пирометаллургическим производством, характеризующимся высокотемпературными, многопараметрическими и нелинейными технологическими процессами непрерывного (плавильные агрегаты) и периодического (конвертеры) действия, необходимо учитывать сложность объектов и недостаточность информации о ходе технологического процесса.

Комплексная система управления подразумевает интеграцию систем управления отдельными технологическими процессами и производствами в одно целое с интеллектуализацией модели. Интегрированная система управления призвана сделать производственную картину целостной, структурированной, функционально законченной и адаптировать огромный объем технологической и производственной информации к потребностям каждого конкретного специалиста: диспетчера, инженера, технолога или руководителя.

**Синтез АСУ.** Структурная схема комплексной автоматизированной системы управления (АСУ) пирометаллургическим производством представлена на рис.1.

Переработка сырья пирометаллургическим способом – сложный многостадийный

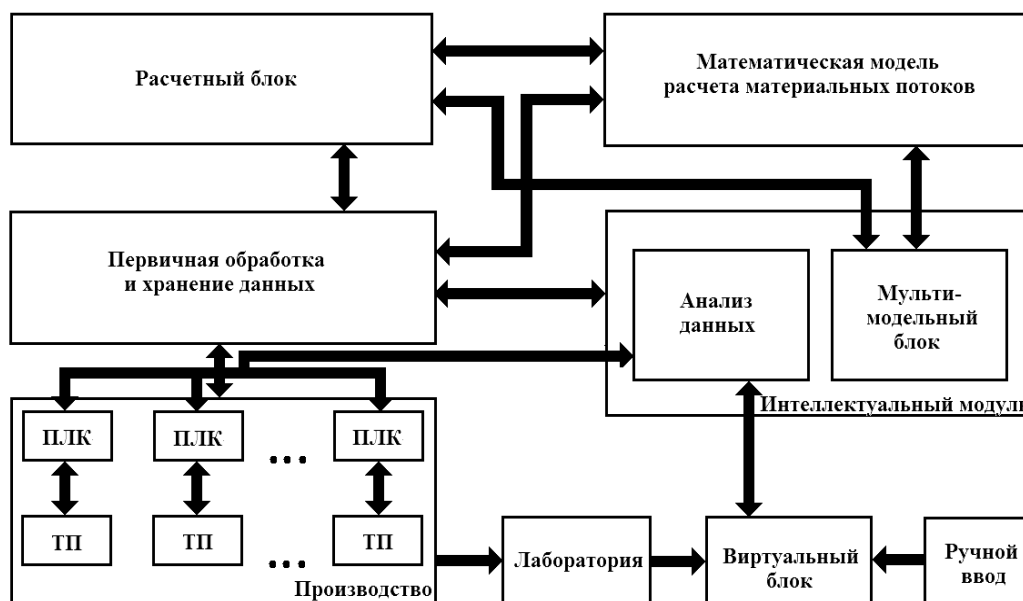


Рис. 1. Структурная схема комплексной автоматизированной системы управления

процесс с нехваткой информации для управления, включающий как непрерывные процессы, так и периодические. Пирометаллургическое производство образуется последовательностью технологических процессов переработки материалов из одного состояния в другое.

Информация с объекта поступает на программируемые логические контроллеры (ПЛК), автоматизированные рабочие места (АРМ) операторов и системы визуализации данных (SCADA-системы). Кроме этого, пробы материалов и продуктов с технологического процесса направляются в лабораторию для химического анализа. Это связано с недостаточностью и дискретностью информации о ходе реального протекания процесса. Задания, уставки на технологический процесс пирометаллургического производства, корректировка коэффициентов устройств управления и другие вводы в систему производятся через блок ручного ввода на виртуальный блок и в интеллектуальный модуль. Далее информация поступает на общий сервер, где хранится в виде графиков, таблиц, трендов и др. Там же производится первичная обработка данных: проверка данных на соответствие реальным значениям, отсев случайных величин, устра-

нение провалов данных и других ошибок\*. Созданная база данных направляется для дальнейшей обработки в блок «Анализ данных». Здесь ведется статистический анализ данных, формируются основные закономерности между параметрами процесса, выдвигаются предварительные гипотезы по применению одной из математических моделей технологического процесса в мультимодельном блоке. Он представляет собой параллельно работающие несколько математических моделей объекта, созданные с применением нейронных сетей, нечеткой логики, экспертных моделей и др.

Расчет себестоимости продукции, оптимальных значений технологического процесса и производства, технико-экономические показатели и другие предварительные расчеты производятся параллельно в расчетном блоке в соответствии с регламентом технологических процессов и производств.

\* Кравченко А.Н. Оценка погрешности информационных каналов систем управления / А.Н.Кравченко, И.Н.Белоглазов, Э.Д.Кадыров // Записки Горного института. 2006, Т.169.

Kravtshenko A.N., Beloglasov I.N., Kadyrov E.D. Estimation of an error of information channels of control systems // Notes of Mining Institute. 2006. Vol.169.

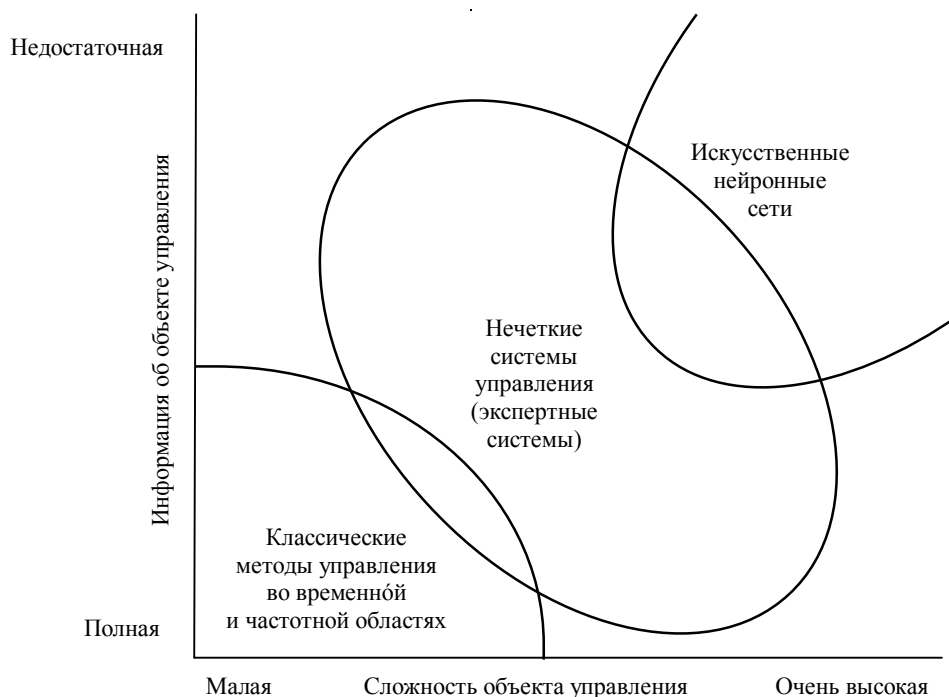


Рис.2. Области наиболее эффективного применения современных технологий управления

С целью интеграции технологического процесса в единое производство в структуру включают параллельно работающую в реальном времени математическую модель материальных потоков. Балансовая модель производства для пирометаллургического процесса была разработана во многих работах специалистов в этой области, в том числе в магистерской работе Н.В.Даниловой. Результаты расчетов были рекомендованы к применению в промышленности.

В данной структурной схеме комплексной АСУ самым важным блоком является мультимодельный блок, который требует выполнения большого объема работы по моделированию технологических систем с применением различных методов.

Применение современных методов моделирования для создания математического аппарата для управления процессом зависит от сложности объекта управления и полноты информации о ходе технологического процесса и производства (рис.2).

**Способы моделирования АСУ.** Классические методы управления хорошо работают при полностью детерминированных

объекте управления и среде, а для систем с неполной информацией и высокой сложностью объекта управления, какими являются пирометаллургические процессы, оптимальными являются нечеткие и нейросетевые методы управления.

Эти методы хороши тем, что для создания математической модели системы управления процессом не нужны все подробности о протекании технологического процесса. Достаточно иметь информацию на входе и выходе системы и приблизительную структурную взаимосвязь технологических параметров процесса и производства. Полученная модель обучается и накапливает знания об объекте, после чего производится проверка адекватности модели технологическому процессу.

Рассмотрим понятие мультимодельности (использования различных способов моделирования АСУ) на примере разработки математической модели процесса Ванюкова.

1. Применение нейронных сетей и нечеткой логики. Применение нейросетевых технологий и нечеткой логики для управления процессом плавки в печи Ванюкова

имеет множество возможных реализаций\*. Это обусловлено гибкостью и универсальностью самих нейронных сетей, которые могут быть использованы для локальных систем управления или стабилизации (хотя в данном случае гораздо дешевле использовать традиционные системы локального регулирования) и для оптимизационного многоконтурного управления всем процессом в целом, а также сложностью и непредсказуемостью самого технологического процесса. При этом наиболее оптимальным образом математический аппарат будет работать именно с комплексом переменных, описывающих текущее состояние процесса, и базой данных переменных процесса, сформированной именно для нужд управления.

Создание системы управления с применением нейронных сетей и нечеткой логики требует несколько больших затрат, чем построение системы управления с использованием традиционных методов. Это связано и с высокой стоимостью аппаратного и математического обеспечения системы, и с более высокими затратами на отладку системы. Тем более, что адекватного или оптимального управления процессом можно добиться не сразу. Для адекватного функционирования таких систем необходимо создание базы данных процесса.

Вариантом создания системы управления может быть и объединенная система, построенная из подсистем управления различными технологическими составляющими процесса и экспертной системы, также созданной на базе нейронной сети. В таком комплексе нейронные сети подсистем реагируют на изменяющуюся ситуацию относительно небольшого набора конкретных параметров, а общая картина технологического процесса передается для рассмотрения экспертной системе. В результате сложные

решения принимаются на более высоком уровне с учетом дополнительных данных и привлечением обслуживающего персонала.

Еще одним вопросом функционирования такой системы управления процессом плавки в печи Ванюкова является надежность такой системы. Некоторые проблемы с анализом надежности нейросетевых систем управления возникают из-за допущения полной безошибочности компьютеров, тогда как искусственные нейронные сети могут быть неточны даже при их правильном функционировании. На самом же деле компьютеры, как и люди, могут ошибаться. Первые – в силу различных технических проблем или ошибок в программах, вторые – из-за невнимательности, усталости или непрофессионализма. Следовательно, для создания надежной системы управления таким сложным процессом, как плавка в печи Ванюкова, необходимо, чтобы эти системы дублировали и страховали друг друга.

2. Применение экспертных систем. Разработан метод построения баз знаний (БЗ) путем формализации экспертных знаний в аналитическом виде, позволяющий использовать и качественную информацию для создания эффективных управляющих моделей металлургических процессов. Согласно алгоритму построения модели эксперт определял факторное пространство, в котором управление процессом наиболее эффективно. Для процесса Ванюкова такими факторами стали:  $x_1$  – скорость подачи концентрата, т/ч;  $x_2$  – скорость подачи флюса, т/ч;  $x_3$  – расход кислорода, м<sup>3</sup>/ч;  $x_4$  – содержание кислорода в кислородно-воздушной смеси, %;  $x_5$  – температура кессонов, °С;  $x_6$  – высота ванны;  $x_7$  – температура шлака в сифоне, °С.

Управляющими переменными, которыми ведут процесс, эксперт выбрал:  $y_1$  – уставку скорости подачи концентрата, т/ч;  $y_2$  – уставку скорости подачи флюса, т/ч.

Отметим, что  $y_1, y_2$  имеют тот же смысл и размерность, что и  $x_1, x_2$ , но разделены временем от предыдущего до последующего измерения, что обуславливает их независимость.

Оценку адекватности полученного алгоритма управления технологическим про-

\* Кравченко А.Н. Нейросетевые технологии в системе управления процессом плавки в печи Ванюкова / А.Н.Кравченко, И.Н.Белоглазов, Э.Д.Кадыров // Записки Горного института. 2006. Т.169.

Kravtishenko A.N., Beloglasov I.N., Kadyrov E.D. Neural network in a control system of fusion process in furnace Vanjukova // Notes of Mining Institute. 2006. Vol.169.

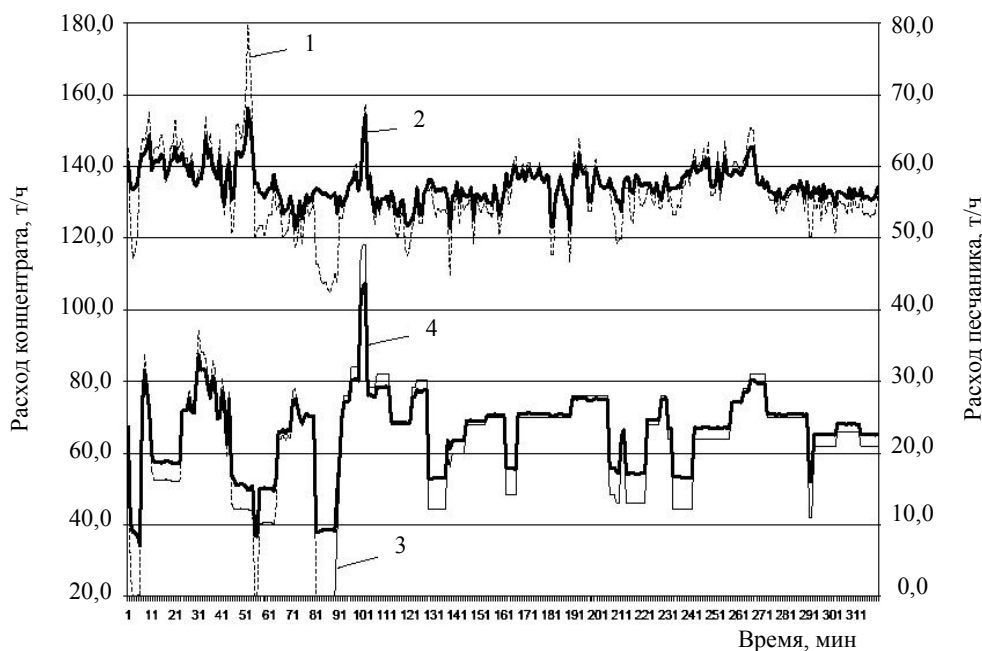


Рис.3. Динамика загрузки концентрата (1, 2) и флюса (3, 4) в течение смены:  
1, 3 – оператор ПВ; 2, 4 – расчет по модели

цессом проводили на массиве данных оперативного контроля целой смены, которую вел оператор в рядовых условиях. Сравнение ведем по обеим переменным. По поведению графиков (рис.3) можно говорить о высокой степени адекватности рассчитанных по модели значений и фактическим данным.

Таким образом, в условиях нечеткости исходной информации оправданным является «интеллектуализация» АСУТП путем создания управляющей модели на основе знаний эксперта. Разработанная эффективная модель обработки входной информации и выработки управляющих воздействий на технологический объект способна стать основой для программной реализации интеллектуальной САУ в реальном масштабе времени. Отметим, что область эффективно применения интеллектуальной САУ охватывает весь диапазон изменения рабочих параметров, регламентируемый технологической инструкцией для процесса плавки сульфидного медного никельсодержащего сырья в печи Ванюкова на медном заводе ОАО ГМК «Норильский никель».

## Выводы

1. Создание комплексной АСУ пирометаллургического производства меди, т.е. управление технологическим процессом с учетом особенностей производства и создание вертикальной системы управления в условиях рынка, актуально и своевременно. Единое общее информационное поле для производства и технологического процесса позволяет оперативно в реальном времени оптимизировать ведение технологического процесса при изменении производственных заданий.

2. Интеллектуальная модель комплексной системы с мультимодельным блоком представляет собой новый подход к проблеме принятия верного решения в ходе ведения технологического процесса.

3. Предложение в реальном времени нескольких вариантов принятия решения позволяет обеспечить надежность работы АСУ.

4. Разработке систем, структура которой представлена в виде отдельных блоков, посвящено много работ. Достаточно успешно проведены исследования отдельных модулей. Создание подобных систем весьма перспективно.



**Э.А.ЗАГРИВНЫЙ**, д-р техн. наук, профессор, Slava19887@yandex.ru

**В.И.МАЛАРЕВ**, канд. техн. наук, доцент, Slava19887@yandex.ru

**В.О.ЗЫРИН**, аспирант, 8(952)249-67-07

*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

**E.A.ZAGRIVNY**, Dr. in eng. sc., professor, Slava19887@yandex.ru

**V.I.MALAREV**, PhD in eng. sc., associate professor, Slava19887@yandex.ru

**V.O.ZYRIN**, post-graduate student, 8(952)249-67-07

*Saint Petersburg State Mining University*

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА С ЗАБОЙНЫМ ПАРОГЕНЕРАТОРОМ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ ПЛАСТОВ С ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТЬЮ**

Рассмотрены электротермический комплекс на основе забойного скважинного электропарогенератора для термического воздействия на продуктивные пласты высоковязкой нефти и система управления этим комплексом. Предложенная система управления позволяет автоматически поддерживать заданные технологические параметры в зависимости от режимов работы комплекса.

**Ключевые слова:** добыча высоковязкой нефти, нефтеотдача, забойный скважинный парогенератор.

## **ELECTROTHERMAL COMPLEX WITH DOWNHOLE ELECTROSTEAM GENERATOR'S AUTOMATION TO AID IN LAYER WITH HIGH VISCOSITY OIL RECOVERY**

The electrothermal complex on a basis of face electrosteam and gas generator for thermal influence on productive layers of high viscosity oil and a control system of this complex is considered. This control system allows to support automatically the set technological parameters depending on operating modes of a complex.

**Key words:** extraction oil of high viscosity, oil recovery, downhole electrosteam generator.

Для повышения нефтеотдачи пластов во всех нефтедобывающих странах используют различные методы увеличения нефтеотдачи (МУН), наиболее перспективными из которых являются тепловые методы [1].

В Санкт-Петербургском государственном горном университете разработаны и запатентованы электротермические комплексы более 1000 кВт, применение которых позволит снизить потери энергии и повысить качество теплоносителей (пара, воды), нагнетаемых в пласт высоковязкой нефти. Комплекс позволяет выполнять технологи-

ческие операции по паротепловому (ПТВ), импульсно-дозированному тепловому (ИДТВ) и термогидродинамическому воздействию. Добычной электротермический участок (рис.1) включает: силовой трансформатор мощностью 10-16 МВ·А с первичным напряжением 35-110 кВ; насос для подачи котловой воды в забой к нагревателю или парогенератору, скважинный электродный нагреватель или прямоточный электропарогенератор, помещенный в обсадную колонну, питание которого осуществляется по погружным кабельным линиям; регулируемый

электропривод насоса и схему управления величиной силы тока нагревателя или парогенератора [2]. Скважинное электротермическое устройство получает питание по схеме фаза – три жилы погружной линии параллельно – НКТ, обсадная колонна – нейтраль.

В состав электротехнического комплекса тепловой обработки призабойной зоны скважин входит скважинный электропарогенератор (ЭПГ), который закреплен на конце колонны насосно-компрессорных труб (НКТ) (рис.2).

Электропарогенератор состоит из металлического корпуса, выполненного в форме цилиндра. Центральный токопровод закреплен в верхней части корпуса через проходной изолятор. Внутри корпуса на токопровод нанизаны диски-электроды. С токопроводом соединены размещенные через интервалы с термостойкими изоляторами фазные электроды. Между фазными электродами находятся с большим центральным отверстием металлические диски-электроды, которые соединены с корпусом устройства. Вода подается с поверхности по трубам, а в парогенератор поступает по центральному отверстию внутри токовода. Электропарогенератор работает следующим образом. По силовому кабелю на фазные электроды подают напряжение, после чего от фазных электродов через воду к нулевым электродам потечет ток, вызывая нагрев воды, кипение и образование пара, который подается в забой, где происходит тепловая обработка призабойной зоны.

При разработке были составлены требования к системе управления. Система управления процессом термического воздействия на пласт должна обеспечить реализацию следующих режимов работы:

1. Ручное задание мощности скважинного электропарогенератора и стабилизацию заданного значения мощности  $P_{\text{зад}}$  с точностью не менее чем  $\pm 2\%$ .

2. Автоматическое задание и поддержание на заданном уровне с точностью не менее  $\pm 3\%$  частоты вращения питательного насоса при изменении производительности  $Q$  (кубический метр в секунду) от нуля до

$Q_{\text{ном}}$ . Регулирование осуществляется посредством преобразователя частоты в цепи статора двигателя.

Скважинный электропарогенератор получает питание от однофазного источника переменного напряжения. Регулирование тока осуществляется с помощью однофазного тиристорного регулятора. Изменение угла открывания двух встречно-параллельно включенных тиристорov осуществляется посредством системы управления (СУ). Величина тока в нагревательном элементе контролируется с помощью внутренней обратной связи по мощности [3]. По исходным и полученным в результате расчета данным в соответствии с функциональной схемой управления термическим комплексом и схемой векторной системы управления электроприводом произведена разработка структурной схемы электротермического комплекса и системы автоматического управления. Разработка проведена в среде Mathlab при помощи пакета программирования Simulink.

Схема работает следующим образом. При подаче напряжения на контакты  $A, B$  тиристорного регулятора тока на его выходе формируются импульсы определенной амплитуды и частоты, которые подаются в силовую часть схемы парогенератора. При помощи блока Discrete RMS Value определяется значение мощности парогенератора  $P_{\text{изм}}$ , которая подается на вход пирегулятора мощности. На основании сигнала ошибки от сумматора пирегулятор отрабатывает отклонение мощности от задания, на выходе блока получаем значение угла открывания тиристорov регулятора тока, которое подается на вход блока управляющих импульсов control. Включение электропривода питательного насоса осуществляется подачей напряжения от источника постоянного тока на контакты плюс, минус инвертора Universal bridge1 и подачей управляющих импульсов с блока pulses на вход инвертора. Формирование задания частоты вращения привода осуществляется при помощи обратной связи по мощности парогенератора. Задание поступает на вход задатчика интенсивности.

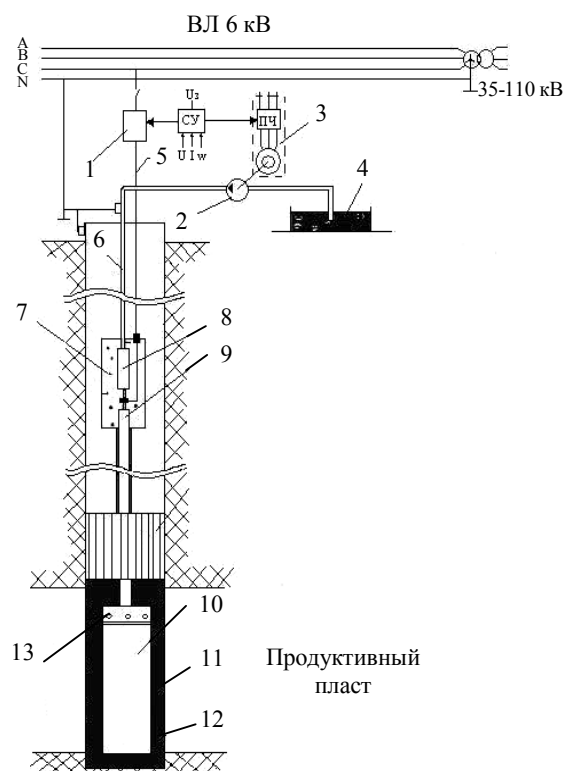


Рис.1. Схема электротермического комплекса

- 1 – регулятор тока; 2 – насос; 3 – регулируемый электропривод; 4 – рабочая жидкость; 5 – силовой кабель; 6 – НКТ; 7 – маслозаполненное вводное устройство; 8 – диэлектрическая вставка; 9 – термостатный пакер; 10 – скважинный электродный нагреватель; 11 – обсадная колонна; 12 – пластовая жидкость; 13 – паровыпускное отверстие

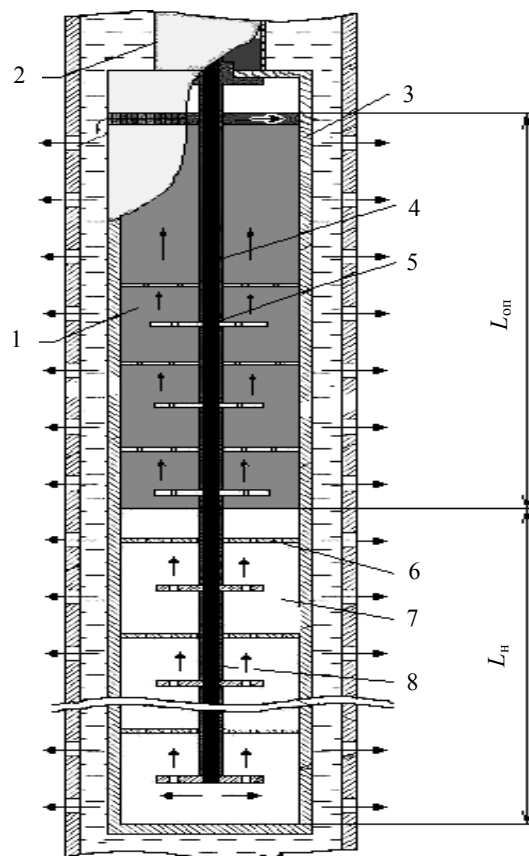


Рис.2. Конструктивная схема ЭПГ

- 1 – пар; 2 – проходной изолятор; 3 – металлический корпус; 4 – токовод; 5 – центральный токопровод; 6 – диски-электроды; 7 – вода; 8 – термостойкие изоляторы

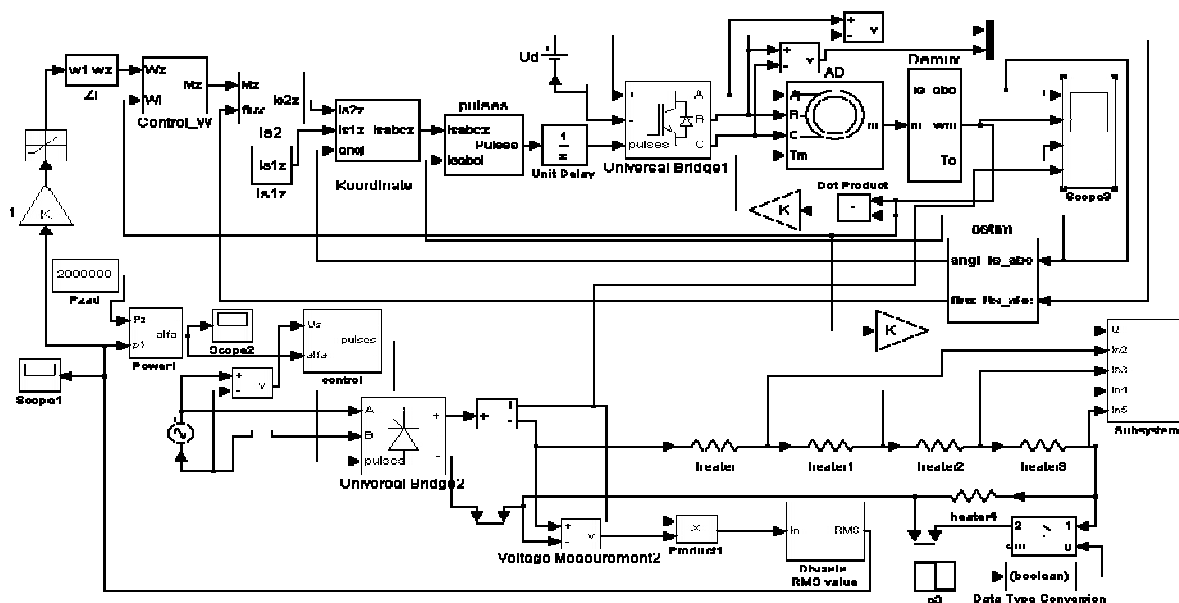


Рис.3. Структурная схема системы управления электротермическим комплексом термического воздействия на пласты высоковязкой нефти

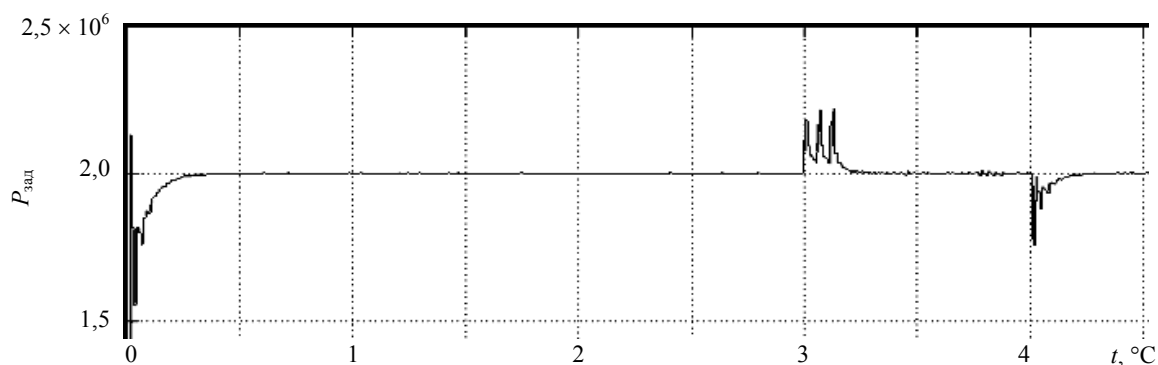


Рис.4. Зависимость мощности скважинного ЭПГ с течением времени от сопротивления котловой воды

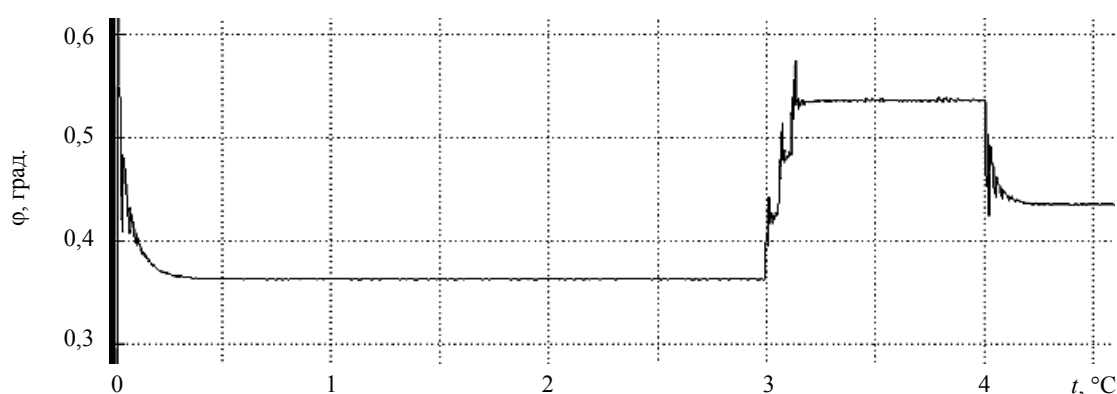


Рис.5. Зависимость угла открывания тиристоров регулятора тока с течением времени от сопротивления ЭПГ

В схеме (рис.3) реализовано внешнее воздействие, выраженное в изменении сопротивления парогенератора (например, при изменении удельного сопротивления котловой воды). Через 4 с после включения в цепь парогенератора размыканием ключа подключается блок heater4, увеличивая общее сопротивление схемы.

Как видно из графиков (рис.4) при изменении сопротивления котловой воды (сопротивления межэлектродного промежутка) система управления отрабатывает отклонение мощности от заданной величины  $P_{зад}$ : при уменьшении сопротивления (нагрев котловой воды, уменьшение ее удельного сопротивления,  $t = 3$  с) мощность возрастает, при этом угол открывания тиристоров увеличивается с 0,37 до 0,54, а мощность уменьшается. При увеличении сопротивления мощность уменьшается, угол открывания уменьшается до 0,44, а мощность увеличивается (рис.5).

Таким образом, система управления отвечает требованиям электромеханического комплекса для термического воздействия на пласты высоковязких нефтей. Она обеспечивает устойчивое регулирование мощности в заданных пределах в начале работы при увеличении температуры котловой воды, что сказывается на общем уменьшении сопротивления электропарогенератора, отрабатывает внешние возмущения, выраженные в изменении удельного сопротивления котловой воды.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Антониади Д.Г. Настольная книга по термическим методам добычи нефти / Д.Г.Антониади, А.Р.Гарушев, В.Г.Ишханов. Краснодар: Советская Кубань, 2000.
2. Загривный Э.А. Электротермический комплекс на основе скважинного электродного нагревателя мощностью более 500 кВт для теплового воздействия на продуктивный пласт высоковязкой нефти / Э.А.Загривный, А.Е.Козярук, С.Н.Батаев // Электротехника. 2003. № 5.

3. Перспективы использования забойных электро-термических комплексов для повышения нефтеотдачи пластов с тяжелой высоковязкой нефтью / Э.А.Загривный, А.Е.Козярук, В.И.Маларев, Е.Е.Мельникова // Электротехника. 2010. № 1.

#### REFERENCES

1. *Antoniadi D.G., Garushev A.R., Ishanow W.G.* Handbook on thermal oil recovery metod. Krasnodar: Sovetskaya Kuban, 2000.

2. *Zagrivny E.A., Kozyaruk A.E., Bataev S.N.* Electro-thermal complex on bases of electrosteam and gas generator power of more than 5000 kW for thermal influence on productive layers of oil with high viscosity // Electrical engineering. 2003. N 5.

3. *Zagrivny E.A., Kozyaruk A.E., Malarev V.I., Melnikova E.E.* Prospects for the use of downhole electrothermal systems for enhanced oil recovery from heavy high-viscosity oil // Electrical. 2010. N 1.

**Н.В.ДАНИЛОВА**, канд. техн. наук, ассистент, (812) 328-82-56

**Э.Д.КАДЫРОВ**, канд. техн. наук, доцент, (812) 328-82-56

*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

**N.V.DANILOVA**, PhD in eng. sc., assistant lecturer, (812) 328-82-56

**E.D.KADYROV**, PhD in eng. sc., associate professor, (812) 328-82-56

*Saint Petersburg State Mining University*

## **АЛГОРИТМЫ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ В УПРАВЛЕНИИ АВТОГЕННОЙ ПЛАВКОЙ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ СУЛЬФИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

В статье приведена структура системы автоматического управления автогенной плавкой медно-никелевых сульфидных материалов. Разработан алгоритм управления процессом с применением алгоритмов нечеткой логики.

**Ключевые слова:** алгоритм управления, нечеткая логика, автоматизация производства.

## **ALGORITHMS OF FUZZY LOGIC IN CONTROL OF AUTOGENOUS FUSION OF COPPER-NICKEL SULPHIDIC MATERIALS**

In work the structure of automatic control system by autogenous fusion of copper-nickel sulphidic materials is resulted. The algorithm of management by process with application of algorithms of fuzzy-logic is developed.

**Key words:** control algorithm, fuzzy-logic, manufacture automation.

**Введение.** На сегодняшний день довольно трудно представить функционирование какого-либо технологического объекта без автоматизированной системы управления, в том числе и процессы автогенной плавки медно-никелевых сульфидных материалов со сложным комплексом объектов автоматизации. В условиях рыночной конкурентной борьбы предприятия вынуждены не только обеспечивать безопасность и устойчивость ведения технологических процессов, но и постоянно повышать их экономическую эффективность. Безусловно, самым очевидным методом повышения эффективности технологических процессов является совершенствование технологических схем, аппаратного оформления технологии и режимов техно-

логических процессов. Однако в рамках такого подхода можно извлечь лишь часть резервов экономии. Наиболее значительный эффект может быть получен за счет совершенствования автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) с включением в структуру системы интеллектуальной составляющей математического аппарата, работающего на основании алгоритмов нечеткой логики, нейронных сетей и др. Для получения блок-схемы алгоритма управления процессом автогенной плавки необходимо провести анализ технологического процесса, определить место математического аппарата в структуре АСУТП и установить ограничения, накладываемые на основные параметры процесса.

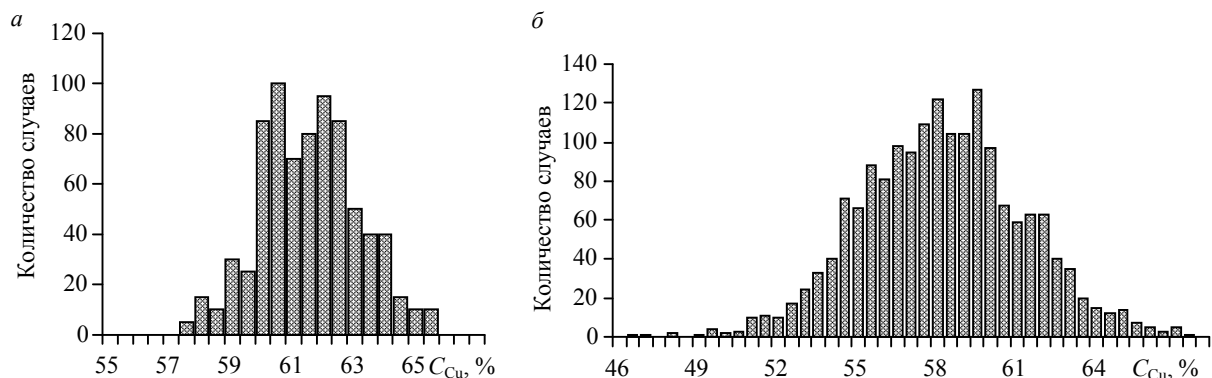


Рис.1. Гистограмма распределения содержания меди в штейне по данным 2006 г. (а) и 2008 г. (б)

**Анализ объекта управления.** Цель управления процессом плавки сульфидного медно-никелевого сырья – получение штейна заданного состава, так как качество штейна, поступившего на дальнейшее конвертирование, влияет на технико-экономические показатели конвертирования: расход дутья, продолжительность продувки, количество использованных флюсов и образующегося конвертерного шлака, тепловой режим процесса и др.

Состав штейна по сумме цветных металлов регулируют изменением соотношения расхода кислорода дутья и количества загружаемой шихты, при постоянном расходе природного газа.

Анализ данных оперативного контроля процесса Ванюкова за 2006 и 2008 гг. показал (рис.1), что содержание меди в штейне составляет 50-68 %. В связи с этим возникла необходимость стабилизации содержания меди в штейне.

Состояние печи непрерывно меняется, поэтому при управлении процессом необходимо избегать нарушений равновесия внутри печи между загружаемыми материалами и давлением отходящих газов. Повышение качества штейна (стабилизация содержания меди в штейне в заданных пределах) возможно путем достаточно жесткой увязки входных массопотоков и дутьевых режимов за счет внедрения автоматизированной системы управления, включающей в контур управления модель количественной оценки содержания меди в штейне, которая позволит до минимума сократить влияние «чело-

веческого фактора»\*. В связи с этим разработана система автоматического управления с применением алгоритмов нечеткой логики – реализации с помощью ЭВМ управления, аналогично тому, которое выполняет квалифицированный оператор, путем представления в виде модели методов его работы с использованием правил управления. Правила управления связывают оценку состояния объекта управления с последовательностью операций с помощью высказываний «ЕСЛИ ... ТО», осуществляют разделение пространства входных переменных на области и указывают последовательность операций в каждой локальной области.

**Структурная схема системы управления.** Для улучшения качества управления процессом плавки разработана структурная схема автоматизированной системы управления содержанием меди в штейне (рис.2), которая включает печь Ванюкова 1, осна-

\* Данилова Н.В. Применение нечеткой логики для разработки модели количественной оценки содержания меди в штейне // Проблемы рудной и химической электротермии: Сб. тр. Всеросс. науч.-техн. конф. с междунар. участием «Электротермия-2010». СПб, 2010.

Danilova N.V. Application of fuzzy-logic for working out of model of a quantitative estimation of the maintenance of copper in stein // Problems of ore and chemical electrothermie. Saint Petersburg, 2010.

Данилова Н.В. Автоматизированная система управления процессом автогенной плавки медно-никелевого сульфидного сырья на основе нечеткой логики: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПбГИ. СПб, 2010.

Danilova N.V. The automated control system of process of autogenous fusion of medno-nickel sulphidic raw materials on the basis of fuzzy-logic: The author's abstract of the dissertation of PhD in eng. sc. Saint Petersburg, 2010.

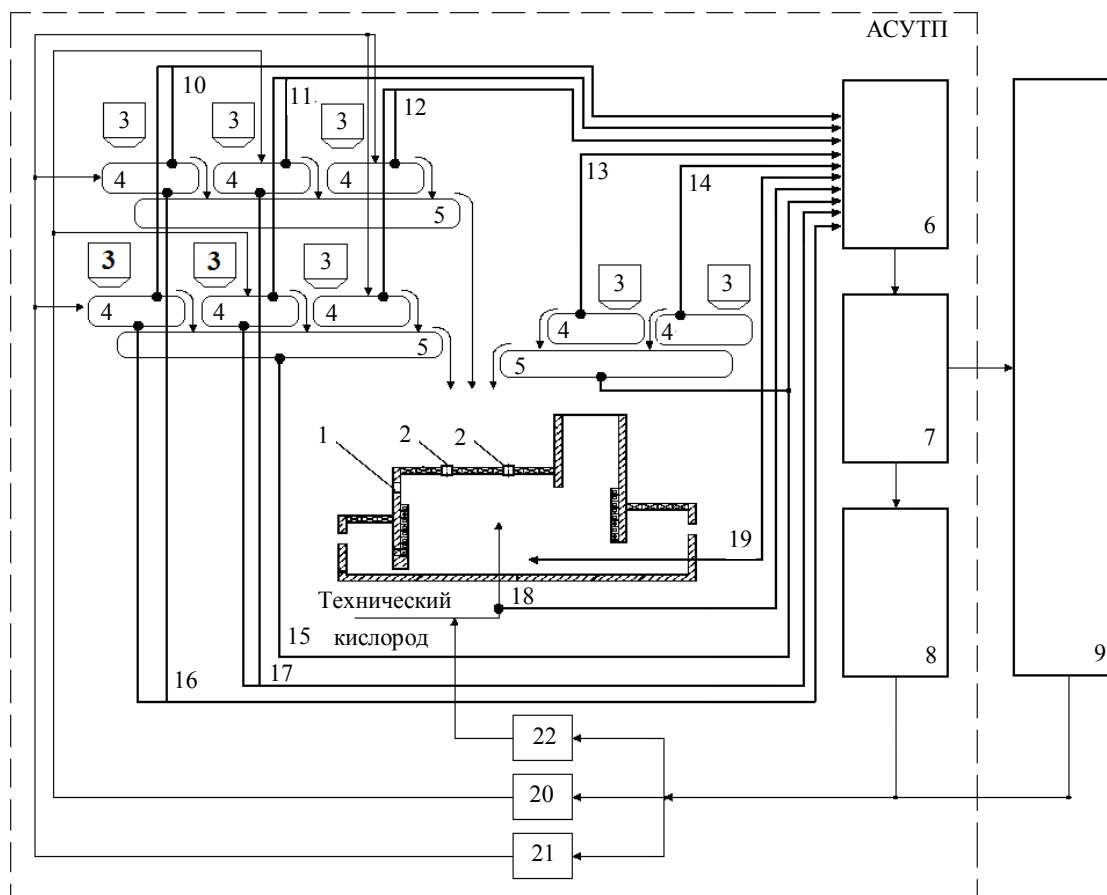


Рис.2. Структурная схема системы автоматического управления

щенную загрузочными воронками 2. В системе загрузки печи Ванюкова установлены бункеры 3 для подачи сыпучих шихтовых материалов (медного концентрата, руды, флюса, угля и оборотных материалов). Под бункерами 3 находятся ленточные питатели 4 для дозирования загружаемых в печь шихтовых материалов. С питателей шихтовые материалы поступают на сборные транспортеры 5, с помощью которых подаются через загрузочные воронки 2 в реакционную зону печи Ванюкова.

Измерительные каналы 10-19 предназначены для получения информации о мгновенных значениях соответствующих параметров (расхода шихтовых материалов, расхода дутья, содержание меди в штейне и шлаке). Измерительные каналы имеют прямой выход на блок 6 сбора и предварительной обработки информации, который связан с переключающим блоком 7, выполняющим

либо включение режима автоматического управления процессом с помощью блока 8 управления по алгоритму, либо его выключение, и перевод всей информации на автоматизированное рабочее место (АРМ) 9 оператора. Блок 8 управления по алгоритму связан с устройствами 20 и 21 выработки управляющего воздействия на расходы шихтовых материалов и с устройством 22 выработки управляющего воздействия на расход технического кислорода. Оператор с помощью АРМ 9 также может воздействовать на расходы шихтовых материалов и технического кислорода посредством прямого ручного управления устройствами 20-22.

Информация о значении измеряемых текущих параметров плавки по каналам передачи информации 10-19 поступает в блок 6 сбора и предварительной обработки информации для расчета основного параметра (общего расхода шихтовых материалов



$G_{ш}$ , т/ч) и отнесения процесса к одной из установленных областей ( $G_{-1}$ ,  $G_0$ ,  $G_{+1}$ ) (рис.3).

Кроме того, дополнительно определяют соотношение расхода технического кислорода дутья на тонну шихтовых материалов (кубические метры на тонну шихты). При градиенте изменения более 10 % от регламентируемого корректируют общий расход шихтовых материалов и технического кислорода в зависимости от того, в какой области находится основной параметр, до достижения области  $G_0$ .

Область  $G_{-1}$  (рис.3) характеризуется недостаточным для протекания реакций окисления сульфидов расходом технического кислорода на тонну загружаемых шихтовых материалов. В соответствии с этим реакции окисления не протекают в полном объеме, а штейн получается с низким содержанием меди. При этом прекращают управление в автоматическом режиме, переходят на ручной режим управления, а процесс ведут с увеличением расхода шихтовых материалов и технического кислорода дутья на тонну шихтовых материалов до достижения области  $G_0$ .

Область  $G_0$  характеризуется наибольшей устойчивостью всех параметров процесса: гидродинамических, энергетических и физико-химических. При этом расплав поддерживается в исходном состоянии, процесс идет без резких скачков и локальных экстремумов, что свидетельствует о плавности протекания всех физико-химических реакций. Таким образом, область  $G_0$  (рис.3) эффективна для получения штейна с высоким содержанием меди и стабильного состава, и к ней нужно стремиться во время ведения процесса плавки. При этом управление ведут в автоматическом режиме по алгоритму (рис.4).

Область  $G_{+1}$  (см. рис.3) характеризуется переокислением сульфидов за счет большого расхода технического кислорода дутья на тонну шихтовых материалов, а также увеличением высоты ванны расплава за счет высокой производительности печи, что может привести к выбросу расплава в аптеик и к расплавлению фурм. При этом прекращают управление в автоматическом режиме, переходят на ручной режим управления, а про-

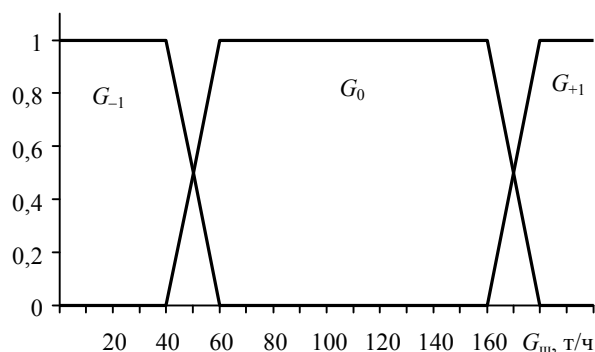


Рис.3. Схема расположения областей основного параметра – общего расхода шихтовых материалов в печь

цесс ведут с уменьшением расхода шихтовых материалов и технического кислорода дутья на тонну шихтовых материалов до достижения области  $G_0$ .

**Алгоритм управления.** Вся полученная информация о величине измеряемых текущих параметрах плавки отображается на автоматизированном рабочем месте 9 оператора (рис.2). Оператор, руководствуясь технологическим регламентом и собственным опытом применительно к текущей производственно-технологической ситуации, выбирает один из двух режимов управления процессом Ванюкова: автоматический или ручной с соответствующим режимом управления в переключающем блоке 7.

При выборе оператором режима управления «автоматический» данные от информационных каналов 10-19 (и других, не рассматриваемых в статье) поступают в модель для количественной оценки содержания меди в штейне, разработанную с применением методов нечеткой логики. Далее в зависимости от того, какое значение содержания меди в штейне будет рассчитано моделью, осуществляется либо ведение процесса без изменения уставок управления, либо пере-счет и изменение уставок управления.

При выборе оператором режима управления «ручной» данные от информационных каналов 10-19 (и других, не рассматриваемых данной работой) поступают на автоматизированное рабочее место 9 оператора. Полученные данные о текущем состоянии процесса Ванюкова служат основой для выбора оператором уставок управляющих воздействий.

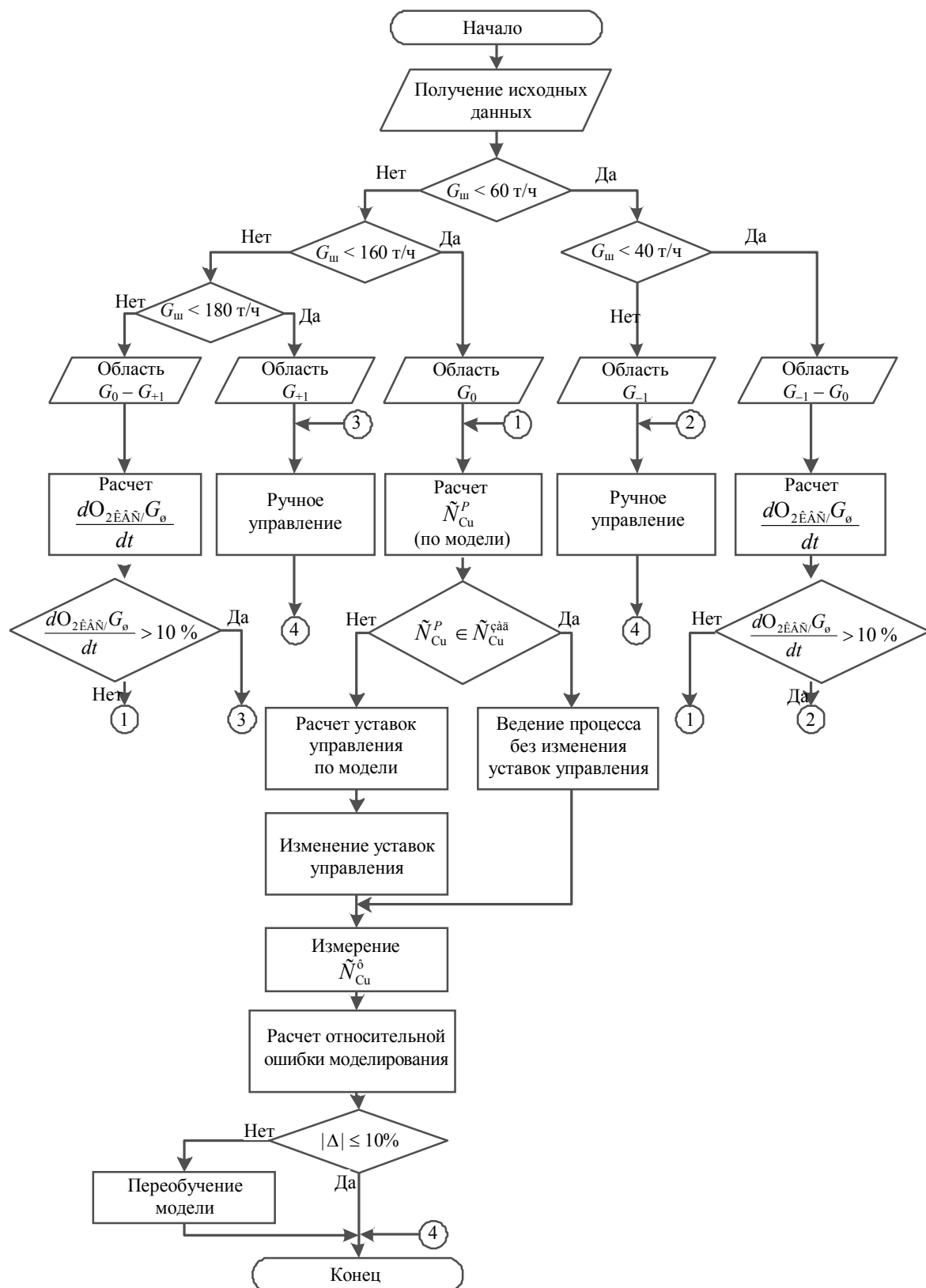


Рис.4. Блок-схема алгоритма управления процессом автогенной плавки медно-никелевого сульфидного сырья в печи Ванюкова

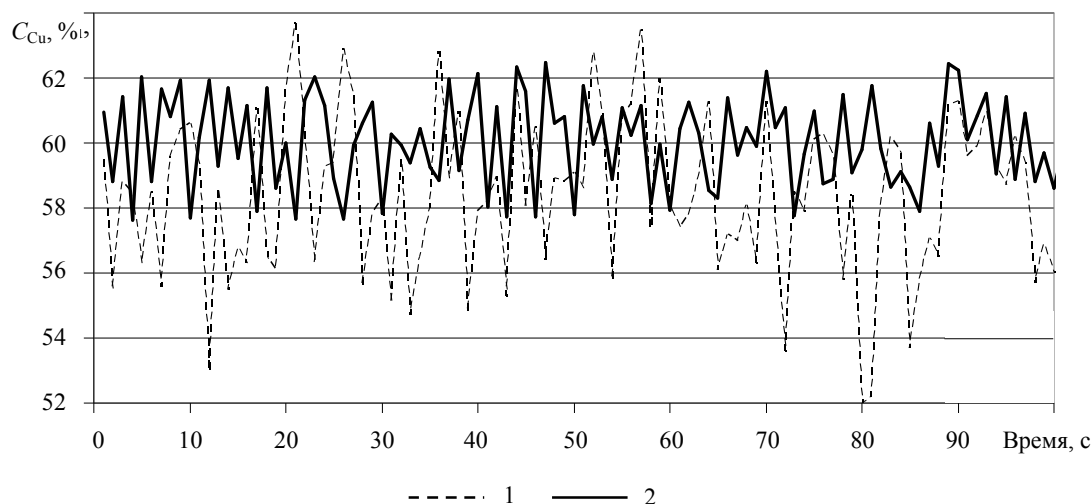


Рис.5. Результаты численного моделирования управления содержанием меди в штейне  
1 – фактические значения; 2 – результаты моделирования

Если погрешность работы системы более 10 %, следует переобучить модель.

Для оценки работоспособности разработанного алгоритма управления процессом плавки медно-никелевого сульфидного сырья в печи Ванюкова был выполнен численный эксперимент на модели. Эксперимент проходил в три этапа:

1) на основе данных оперативного контроля по модели количественной оценки содержания меди в штейне рассчитывалось содержание меди в штейне и сравнивалось с заданным (желаемым);

2) согласно данным оперативного контроля и величины рассогласования рассчитывались уставки расходов шихтовых материалов и технического кислорода;

3) на основе данных оперативного контроля с учетом изменения расхода шихтовых материалов и технического кислорода на тонну шихтовых материалов для этого же момента времени вновь рассчитывалось содержание меди в штейне. На рис.5 представлены результаты численного моделирования.

Изменение уставок расхода шихтовых материалов и технического кислорода на тонну шихты согласно разработанному алгоритму привело к стабилизации содержания меди в штейне в заданных пределах. Таким образом, проведенный эксперимент позволяет рекомендовать систему управления содержанием меди в штейне к применению в промышленных условиях.

**А.М.БЛИНОВ**, канд. экон. наук, доцент, (812)328-82-56  
Санкт-Петербургский государственный горный университет

**A.M.BLINOV**, PhD in ec. sc., associate professor, (812)328-82-56  
Saint Petersburg State Mining University

## НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРЕДПРИЯТИЙ С УЧЕТОМ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Статья посвящена вопросам классификации информационных систем, а также актуальной проблеме обеспечения информационной безопасности в корпоративных информационных системах. Построение различных функциональных подсистем должно быть рассмотрено в сочетании с возможностью использования подсистем защиты.

**Ключевые слова:** информационные системы, информационная безопасность.

## SOME PROBLEMS OF AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF THE ENTERPRISES WITH USING OF INFORMATION SECURITY

The article is devoted to the problem of information systems classification as well as to such an urgent issue as providing information security in corporate information systems. The problem of various functional subsystems creation has to be considered along with the study of the possibility of guarding subsystems use.

**Key words:** information systems, information security.

В современных экономических условиях предприятие должно быть готово к оперативному и точному реагированию на любое изменение ситуации на рынке. На крупных предприятиях циркулируют большие и зачастую весьма запутанные потоки информации. Предприятия и, особенно корпорации, представляющие собой многопрофильные территориально распределенные структуры с распределенным управлением, более других нуждаются в создании единого информационного пространства, устраняющего барьеры между подразделениями. Это и понятно – чем крупнее предприятие, тем дороже обходится неэффективное управление. Единственный способ сделать корпорацию реально и эффективно управляемой – охватить ее информационной системой (ИС).

Информационные системы высокого уровня, позволяющие компании выдвинуться в лидеры в своей области деятельности, должны удовлетворять двум непреложным требованиям: разрабатываться достаточно быстро и быть легко адаптируемыми к постоянно меняющимся требованиям формирующегося рынка.

Потребность в защите данных, циркулирующих в информационных и вычислительных системах, от несанкционированного, случайного или злоумышленного использования, модификации или уничтожения особенно остро проявилась в последнее время в связи с резким ростом количества сетей ЭВМ, предназначенных для работы в режиме разделения ресурсов (времени, данных) между большим числом пользовате-

### Основные признаки классов ИС

Параметры	Классы		
	Малые ИС	Средние ИС	Крупные ИС
Жизненный цикл	Непродолжительный	Длительный	Длительный
Массовость использования	Массовое	Сотни	Десятки
Стоимость	Низкая	Средняя	Высокая
Аналитическая обработка данных	Нет	Есть	Высокая
Возможность модификации СУБД	Только разработчики Настольные СУБД (FoxPro, Clipper, Paradox, Access)	Совместно ORACLE, dBase	Совместно –
Наличие дополнительного программного обеспечения	Нет	Возможность обмена данными	Много
Требования к оборудованию	Невысокое	В зависимости от поставленной задачи	Высокое (жизненный цикл оборудования меньше, чем у системы)
Требование к обслуживающему персоналу	Нет	Для функций администрирования	Администрирование Сопровождение Разработка
Обеспечение безопасности	Нет	Есть	Разнообразное
Предметные области	1	Несколько	Десятки
Решаемые задачи	Узконаправленная	Объединение нескольких параллельных задач	Масштабные и сложные
Распределенность	Локальная	1-5 офисов	Территориальная

лей, т.е. соответственно с ростом числа корпораций (предприятий).

Каждое предприятие по-своему уникально, однако несколько общих принципов, отражающих базовые требования к гибкости и надежности архитектуры создаваемой ИС на нем все-таки можно сформулировать:

- предоставление легкого, прозрачного и защищенного доступа к данным;
- поддержка быстрой разработки (rapid application development-RAD) и инсталляции новых приложений в системе;
- возможность оперативной модификации существующих приложений в системе;
- обеспечение легкой интеграции новых и прежних приложений в системе;
- максимальное сохранение уже сделанных финансовых вложений в компьютеры, сетевую инфраструктуру, разработанные приложения и в квалификацию персонала;
- поддержка существующих технологий и стандартов и возможность легкой модернизации под новые стандарты и технологии;

- максимальное поощрение накопления и повторного использования различных утилит (время, когда каждая задача писалась с нуля, безвозвратно прошло);

- возможность динамической переконфигурации системы или сетевого окружения без потери работоспособности информационной системы. Простой информационной системы может вызвать огромные потери;

- наличие таких свойств, как адаптируемость, переносимость, сопрягаемость с другими системами, управляемость, защищенность информационного наполнения, распределенность, надежность, доступность для удаленных пользователей.

Специфика решаемых с помощью ИС задач, различная сложность их создания, модификации, сопровождения, интеграции с другими ИС и т.п. позволяют разделить информационные системы на классы: малые, средние и крупные (корпоративные) информационные системы (см. таблицу).

Корпоративные информационные системы (КИС) – это, в первую очередь, интегрированные многоплатформенные системы



Рис.1. Структура информационного уровня

на функционально и территориально распределенном предприятии, основанные на углубленном анализе потоков данных и бизнес-процессов, на построении систем поддержки и принятия решений, электронном документообороте и делопроизводстве. КИС призваны объединять бизнес-стратегию предприятия и передовые информационные технологии.

Прежде всего КИС должна охватывать как весь документооборот корпорации с учетом территориальной распределенности, так и обеспечивать внешние связи предприятия при работе с клиентами и партнерами. При этом система должна быть удобна для пользователя, обеспечивать необходимый уровень скорости работы, безопасности и надежности.

В любой КИС можно выделить два уровня: информационный и технологический

Из них ключевое значение для корпоративного управления имеет информационный уровень КИС (рис.1), а технологический уровень является обеспечивающим.

Технологический уровень состоит из следующих компонентов:

- структурированной кабельной системы (розетки, пожарная сигнализация, мониторинг и видеонаблюдение, вентиляция и

кондиционирование, вспомогательное оборудование, АТС, системы жизнеобеспечения здания);

- активного оборудования (шлюзы, маршрутизаторы, концентраторы);
- серверов;
- рабочих станций.

Основной для работоспособности КИС является производственная база данных и документооборот. Согласно этому определяются остальные компоненты информационного уровня, например операционная система и доступ к internet. Исходя из всей информационной составляющей, формируется технологический уровень. На сегодняшний день существует и обратная зависимость: производственную базу данных выбирают в зависимости от стоимости модернизации аппаратного обеспечения и технологический уровень становится первичным.

С другой стороны, КИС можно рассмотреть как набор технического, программного, человеческого и информационного компонентов (объектов).

Рассмотрим безопасность объектов КИС. Концепция построения системы защиты с точки зрения функции управления представлена на рис.2.

Обеспечение безопасности информационных технологий зависит от полноты исследований, характерных особенностей тех изменений в объекте защиты, который вносит научно-технический прогресс. К особенностям современных информационных технологий следует отнести массовость использования информационных систем.

С точки зрения обеспечения безопасности ИТ очень важно непосредственное воздействие на информацию на любом из уровней ее представления, которое возможно только средством ее обработки того же уровня.

Характерной особенностью современной информационной технологии является высокий уровень значимости ИС в их обеспечении. При этом специфика использования ИС заключена в трехуровневой схеме представления информационных техноло-

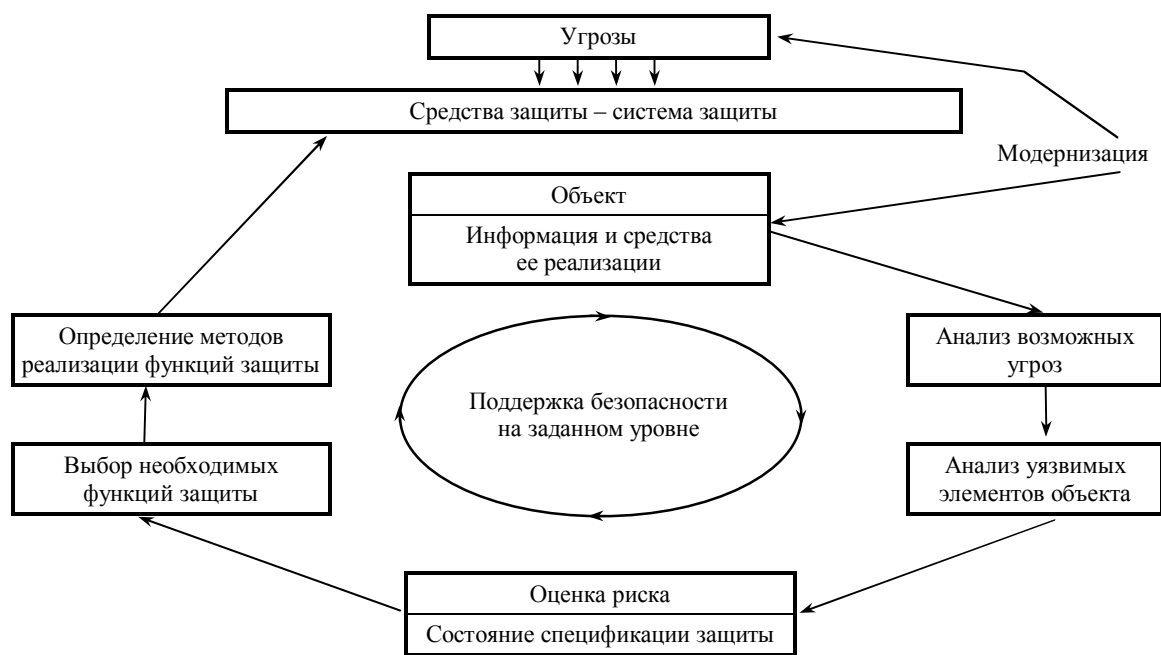


Рис. 2. Концепция построения системы защиты

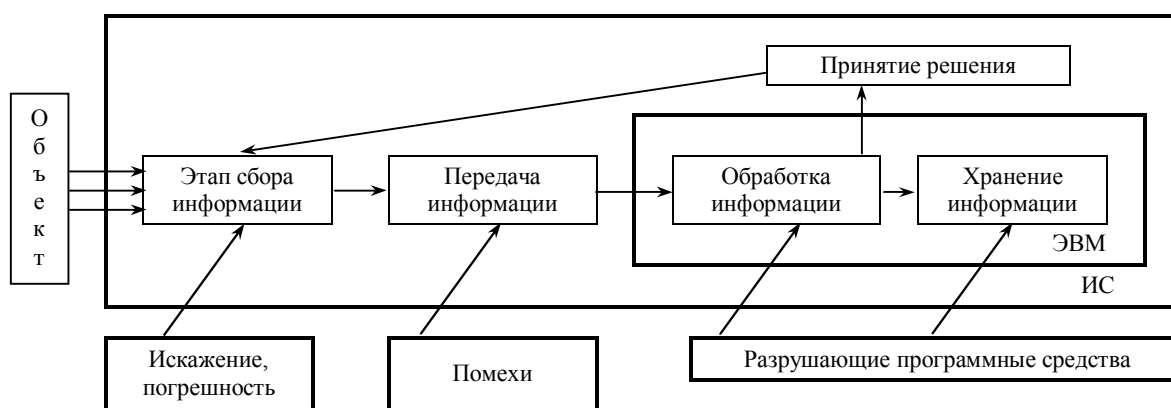


Рис. 3. Трехуровневая схема представления ИТП с внешними разрушающими воздействиями

гических процессов, где каждый уровень характеризуется не только формой представления информации, но и соответствующими ей средствами обработки (рис.3).

Таким образом, создаваемая информационная система, претендующая на звание корпоративной, обязана иметь в своем составе инструментарий обеспечения инфор-

мационной безопасности на всех уровнях представления информации. В случае модернизации уже существующей ИС специалисты, проводящие данную модернизацию с учетом специфики и особенностей технологических процессов, должны предусматривать возможность применения инструментария информационной безопасности.

**В.Ю.БАЖИН**, канд. техн. наук, доцент, (812)328-82-56  
**П.А.ПЕТРОВ**, канд. техн. наук, ассистент, (812)328-82-56  
*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

**V.Y.BAZHIN**, PhD in eng. sc., associate professor, (812)328-82-56  
**P.A.PETROV**, PhD in eng. sc., assistant lecturer, (812)328-82-56  
*Saint Petersburg State Mining University*

## **ДИАГНОСТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА МОЩНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ С ПОМОЩЬЮ ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ**

Рассматривается проблема автоматизированного контроля технологического процесса электролитического процесса алюминия на электролизерах высокой мощности. Разработан алгоритм и система оптимального регулирования технологическими параметрами с помощью автоматизированных систем глинозема. Предложенная компьютерная нейросетевая модель обеспечивает эффективность управления.

**Ключевые слова:** алюминиевый электролизер, глинозем, система питания.

## **DIAGNOSTICS OF TECHNOLOGICAL PROCESS OF POWERFUL ALUMINIUM POTS BY MEANS OF SPECIAL PROGRAMS**

The problem of the automated control of technological process of reduction aluminium process for superpower pots is discussed. The algorithm and system of optimum regulation of technological parameters by means of the alumina automated systems are developed. Offered computer neuron site model provides management efficiency.

**Key words:** reduction pot, alumina, feeding system.

В настоящее время одной из серьезных проблем для российских предприятий по производству первичного алюминия является создание системы контроля и управления технологическими параметрами в течение всего процесса производства, позволяющей обеспечить максимальный выход по току. Автоматизация дает достоверную информацию о ходе протекания процесса, позволяет в целях оперативного управления пользоваться математическими вычислениями и снижает влияние человеческого фактора.

Уровень автоматизации и механизации на российских предприятиях по производству алюминия на протяжении многих лет был значительно ниже, чем в других странах.

Этот разрыв компенсировался путем внедрения систем автоматизации фирмы «SIEMENS», когда при органичном сочетании накопленного отечественного и зарубежного практического опыта были установлены системы СААТ-1, СААТ-2 и Тролль. Тенденция роста уровня автоматизации предприятий может частично решить проблему обеспечения конкурентоспособности выпускаемой продукции. Однако несовершенство таких систем не обеспечивает полный контроль за процессом и прогнозирование последующей ситуации.

Всем перечисленным целям технологического процесса электролиза алюминия служит разработанный автоматизированный технологический нейросетевой комплекс.



Главными достоинствами комплекса являются:

- управление процессом подачи энергии в каждый электролизер;
- контроль концентрации глинозема в электролите для каждого электролизера;
- контроль уровня металла и электролита;
- управление технологическим процессом электролиза алюминия в масштабах корпуса, цеха, завода.

Решение этих задач невозможно без объединения в одном комплексе трех составляющих: технологического оборудования, комплекса управляющих технических средств, современных мощных алгоритмов обработки информации.

В состав автоматизированного технологического комплекса входят:

- комплекс управляющих технических средств – блоки управления электролизерами, сетевое и компьютерное оборудование;
- программное обеспечение управления электролизерами и анализа накопленной информации и подготовки отчетов, системное программное обеспечение;
- запатентованное решение измерения уровня металла и электролита;
- технологическое оборудование подачи глинозема в электролизер оригинальной конструкции.

Сверхмощный алюминиевый электролизер, являясь многофункциональной технической системой с входными и выходными данными, во время эксплуатации нуждается в технологической диагностике. Практика показывает, чтобы достичь максимальной эффективности электролизного производства, недостаточно осуществлять временные корректировки электролита, контролировать содержание глинозема, регулировать напряжение по заданной уставке\*.

На опытных участках с мощными электролизерами реализуются программы с узкой задачей (например, изменение режима

питания фтористого алюминия или управление напряжением в программе) на основе математической теории нечетких множеств и логик (Fuzzy Sets and Fuzzy Logics). Программа 9box позволяет получить лишь рекомендации по целевым значениям напряжения электролизера и периода подачи фтористых солей путем ежедневных замеров температуры процесса электролиза. При этом отмечается неадекватная реакция программ при использовании глинозема различного качества.

В настоящее время возникла необходимость постоянного управления процессом по всем составляющим с учетом текущих технологических изменений с помощью энергетических моделей на базе нейросетевого компьютеринга. Системы АСУТП и управления процессом на каждом предприятии индивидуальны. Научная и практическая деятельность формируют общие признаки этих систем, а также методы, инструменты и принципиальные подходы, которые можно применять в каждой из них.

Специфика технологии электролиза криолит-глиноземных расплавов обуславливает особенность управления процессом получения алюминия, которая состоит в недостаточном уровне информации о параметрах процесса (температура электролита, концентрация глинозема, криолитовое отношение и т.д.), не собираемой системами автоматического управления. Технологические отклонения, в основном, проявляются вследствие выхода за соответствующие рамки заданных технологических параметров (частота анодных эффектов, перегрев электролита, повышенное напряжение, количество «шумов»). Процесс автоматизированного контроля производства алюминия не обеспечивает своевременную корректировку технологических параметров. Для стабильности процесса электролиза необходимо анализировать причины появления отклонений на каждой стадии и давать конкретные рекомендации по их устранению в виде обратных связей.

Алгоритм построения и функционирования диагностической системы использует нейросетевую модель исследуемого процес-

\* Сизяков В.М. Состояние и перспективы развития производства алюминия / В.М.Сизяков, В.Ю.Бажин, А.А.Власов // *Металлург*. 2010. № 7. С.2-6.

*Sizyakov V.M., Bazhin V.Yu., Vlasov A.A. Status and prospects for the production of aluminium // Metallurgist. 2010. N 7. P.2-6.*

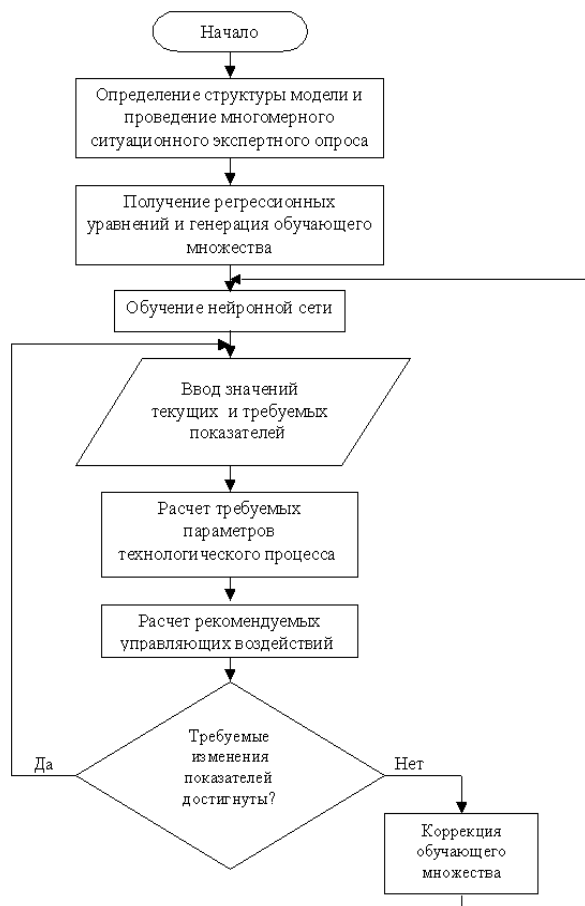


Рис. 1. Блок-схема алгоритма построения и функционирования системы диагностики

са электролиза на мощных алюминиевых электролизерах для определения технологического состояния по значениям показателей измерений, т.е. представляет собой стандартный алгоритм систем нейрокомпьютинга с помощью программы NN Control+\*. Кроме этого, для математического моделирования протекающих в электролизной ванне процессов построения модели системы управления, обработки данных в настоящее время применяются современные компьютерные программы MatLab, Delphi. В качестве обучающей выборки нейронной сети

\* Программа для ЭВМ «NN Control+». № 2007611221. Свидетельство об официальной регистрации / А.Г.Бабенко, Г.Л.Хазан, В.Ю.Бажин, В.Г.Лисиенко. Зарегистр. 22.03.07.

The certificate on official registration of the computer program. N 2007611221. «NN Control+» / A.G.Babenko, G.L.Hazan, V.Yu.Bazhin, V.G.Lislenko. Reg. 22.03.07.

предлагается использовать данные, полученные в результате наблюдения за ходом технологического процесса на мощных алюминиевых электролизерах (свыше 300 кА), что равносильно применению при построении модели технологического процесса данных пассивного эксперимента.

Сравнение вариантов функционирования системы диагностики по критериям точности, требовательности к вычислительным ресурсам, скорости разработки системы, скорости адаптации позволило заключить, что наиболее эффективна комбинация рассмотренных вариантов (рис.1), которая использует нейронную сеть для расчета диагностируемой технологической ситуации. Начальная обучающая выборка нейронной сети формируется в результате проведения многомерного ситуационного обзора, построения регрессионных уравнений и применения методики bootstrap. В ходе эксплуатации системы обучающая выборка изменяется алгоритмом адаптации модели.

Нейронная модель технологического процесса реализована в виде трехслойного персептрона, содержащего девять нейронов во входном слое, пять нейронов в выходном и 25 нейронов в скрытом слое (рис.2). Модель в матричной форме имеет вид

$$x = \tilde{N}_3 f(\tilde{N}_2 \tilde{N}_1 y),$$

Вектор входных сигналов, дополненный единичным сигналом нейронного смещения,

$$y = (1, y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7, y_8, y_9)^T.$$

где  $y_1$  – показатель выхода по току;  $y_2$  – объем металла;  $y_3$  – показатель МПР (межполюсное расстояние между анодом и катодом линейно зависит от напряжения);  $y_4$  – уровень металла;  $y_5$  – расход фторида алюминия;  $y_6$  – содержание натрия в металле;  $y_7$  – расход глинозема;  $y_8$  – частота АЭ;  $y_9$  – содержание железа.

Все параметры взаимно зависимы и вызывают изменение ситуации с  $y$ .

Вектор выходных сигналов

$$x = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)^T.$$

где  $x_1$  – температура электролита (измеряется хромель-алюмелевой термопарой или че-

рез датчик автоматического питания глиноземом – АПГ);  $x_2$ , – концентрация глинозема (датчик концентрации или уровень шумов (градиент текущего напряжения));  $x_3$ , – криолитовое отношение (отбор пробы или спектр);  $x_4$ , – напряжение, В/м;  $x_5$ , – уровень расплава (глубина хода штока пробойника АПГ до касания с электролитом).

Матрица синаптических весов нейронов первого слоя

$$\tilde{N}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}$$

Далее определяются матрицы синаптических весов нейронов 2-го и 3-го слоя.

Функция  $f(x) = \frac{|x|}{0,1+|x|}$  применяется ко

всем компонентам вектора-аргумента за исключением первого (первый компонент вектора обеспечивает смещение нейронов 3-го слоя и должен оставаться равным 1).

Алгоритм адаптации модели в диагностической системе отражает обновление данных обучающей выборки и поступающих в результате наблюдения за ходом технологического процесса, а также повторное обучение сети, если ошибка диагностики технологической ситуации недопустимо велика. После получения диагностики система должна выдавать рекомендации на управление. Инерционность процесса вызывают некоторые параметры (состав электролита и концентрация глинозема в линейной временной зависимости).

Функция диагностики технологического состояния использовалась разработанной системой для выработки рекомендаций по ведению технологического процесса с целью

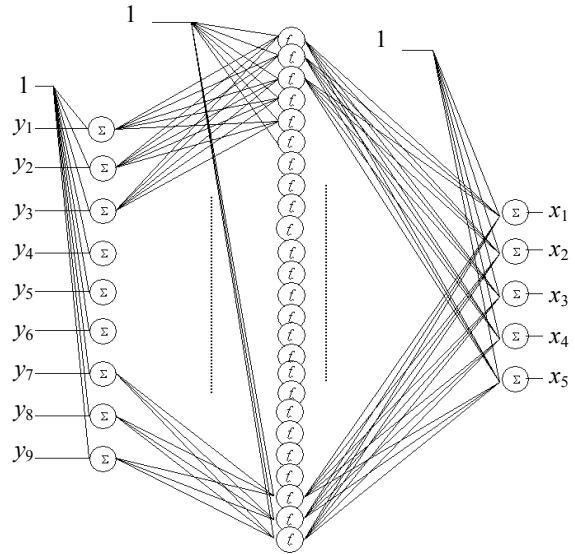


Рис.2 Структура нейросетевой модели технологического процесса в системе диагностики

достижения требуемого качества продукции. Особенность таких рекомендаций заключалась в расчете изменений нескольких технологических параметров, которые должны реализовываться одновременно. Этот способ управления процессом электролиза отличается от широко применяемого (в частности, на Уральском алюминиевом заводе) изменения факторов по одному показателю, который часто приводит к тому, что устранение отклонения одной категории сопровождается ухудшением ситуации из-за возникновения ранее не наблюдавшихся параметров.

Алгоритм расчета рекомендаций по ведению технологического процесса для достижения требуемого результата следующий:

1) на основании замеров определяются значения технологических показателей в текущий момент времени, одновременно с этим измеряются параметры технологического процесса, характеризующие текущее технологическое состояние  $x_{тек}$ ;

2) выходящие параметры задаются по регламентируемым значениям. На основании этих значений, применяя нейросетевую модель, определяются соответствующие значения технологических параметров, т.е. требуемое технологическое состояние  $x_{тр}$ ;

3) вектор рекомендуемых изменений вычисляется по формуле  $\Delta x = k(x_{тр} - x_{тек})$ ,  $k \leq 1$ .

Множитель  $k$  определяет количество шагов изменения технологических параметров для достижения необходимого результата; введен, чтобы уменьшить последствия управления, реализованного на основе ошибочных рекомендаций системы, полученных вследствие возможной неадекватности модели (во время промышленных испытаний системы задавалось  $k = 0,2$ , т.е. достижение требуемого качества за три шага); шаги 1-3 повторяются, пока не достигнут результат.

Проиллюстрируем сказанное примером. Текущее состояние технологического процесса определялось параметрами:  $y_1 = 93,5 \%$ ,  $y_2 = 0,20 \text{ т/м}^2$ ,  $y_3 = 4,80 \text{ см}$ ,  $y_4 = 19 \text{ см}$ ,  $y_5 = 20 \text{ кг/т Al}$ ,  $y_6 = 0,009 \%$  (по массе),  $y_7 = 1925 \text{ кг/т}$ ,  $y_8 = 0,3 \text{ шт./сут}$ ,  $y_9 = 0,08 \%$  (по массе). При этом определены текущие значения технологических параметров:  $x_1 = 961 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $x_2 = 4,8 \%$ ,  $x_3 = 2,49 \text{ ед.}$ ,  $x_4 = 4,458 \text{ В}$ ,  $x_5 = 22/18 \text{ см}$ . По предъявляемым к качеству требованиям необходимо установить  $y_1 = 96,0 \%$ . Расчет требуемого в этом случае технологического состояния дал следующие значения технологических параметров:  $x_1 = 957 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $x_2 = 3,0 \%$ ,  $x_3 = 2,30 \text{ ед.}$ ,  $x_4 = 4,325 \text{ В}$ ,  $x_5 = 20 \text{ см}$ .

Таким образом, нужные параметры достигались в основном изменением  $x_2$ ,  $x_4$  и  $x_1$ , что согласуется с результатами качественного

анализа технологического процесса, т.е. с топологией модели. В результате реализации управления технологическим процессом на основе рекомендаций разработанной системы были получены следующие технологические показатели:  $y_1 = 95,0 \%$ ,  $y_2 = 0,23 \text{ т/м}^2$ ,  $y_3 = 4,67 \text{ см}$ ,  $y_4 = 20 \text{ см}$ ,  $y_5 = 16 \text{ кг/т Al}$ ,  $y_6 = 0,009 \%$  (по массе),  $y_7 = 1918 \text{ кг/т}$ ,  $y_8 = 0,01 \text{ шт./сут}$ ,  $y_9 = 0,07 \%$  (по массе). Отклонение полученных результатов от требуемых значений качества не превысило  $2 \%$ . В более сложных случаях для достижения необходимого качества необходимо одновременное изменение нескольких технологических параметров.

В современном понимании систему диагностики электролиза можно представить как совокупность организационных и технических мер, необходимых для обеспечения гарантий высокой производительности при наименьших затратах. Применение данных алгоритмов в системах управления процессом в электролизерах с обожженными анодами обеспечит повышение качества управления процессом электролитического получения алюминия путем контроля теплового режима, стабилизацию концентрации глинозема и фторидов на заданном оптимальном уровне.

**А.Ю.ФЕОКТИСТОВ**, канд. техн. наук, ассистент, feoktistov.a.u@gmail.com

**А.А.КАМЕНЕЦКИЙ**, студент, laytin@mail.ru

Санкт-Петербургский государственный горный университет

**Л.И.БЛЕХМАН**, старший научный сотрудник, iliya.i.blekhman@gmail.com

**В.Б.ВАСИЛЬКОВ**, ведущий научный сотрудник

Институт проблем машиноведения Российской академии наук

**И.Н.СКРЯБИН**, технический директор, i.skryabin@axis-tech.ru

ООО «Аксистек»

**К.С.ИВАНОВ**, инженер, ivanoff.k.s@gmail.com

ОАО «НПК «Механобр-техника», Санкт-Петербург

**A.J.FEOKTISTOV**, PhD in eng. sc., assistant lecturer, feoktistov.a.u@gmail.com

**A.A.KAMENECKI**, student, laytin@mail.ru

Saint Petersburg State Mining University

**L.I.BLEKHMAN**, senior research assistant, iliya.i.blekhman@gmail.com

**V.B.VASILKOV**, leading research assistant

Institute of problems of mechanical engineering of RAS

**I.N.SKRYABIN**, technical director, i.skryabin@axis-tech.ru

Axistec Co

**K.S.IVANOV**, ingeneur, ivanoff.k.s@gmail.com

“NPK «Mechanobr-technica»” Co, Saint Petersburg

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Рассмотрена возможность использования метода дискретных элементов для моделирования промышленных технологических процессов. Расчеты выполнены применительно к процессам сегрегации, измельчения в шаровых мельницах и загрузки шахтных печей известняковой шихтой. Результаты моделирования сопоставлены с экспериментальными.

**Ключевые слова:** метод дискретных элементов, сыпучий материал, сегрегация, шаровая мельница, шахтная печь, компьютерное моделирование.

## THE APPLICATION OF DISCRETE ELEMENT METHOD TO MINING AND METALLURGY PROCESS MODELING

The capability of the discrete element method (DEM) for the estimation of industrial processes was examined. Estimation evaluated for processes of segregation, grinding in a ball mill and feeding for shaft furnace. Estimated results had compared with experimental work results.

**Key words:** discrete element method, bulk material, segregation, ball mill, shaft furnace, computer modeling.

Метод дискретных элементов (DEM – Discrete Element Method) является обобщением метода конечных элементов (FEM). Распространение метода дискретных эле-

ментов на решение разнообразных задач, встречающихся в горно-металлургической промышленности, связано с развитием вычислительной техники и появлением соот-

ветствующего программного обеспечения. Метод позволяет моделировать поведение большого количества частиц сыпучего вещества в процессе выполнения различных промышленных операций, в том числе горной и металлургической отрасли.

В работе приводятся примеры использования метода дискретных элементов для моделирования поведения сыпучих сред в следующих технологических процессах:

- моделирование загрузки шахтной печи известняковой шихтой с равномерным распределением по всему объему печи;
- моделирование процесса вибрационной сегрегации;
- моделирование движения шаровой загрузки в мельницах с различной формой сечения рабочей камеры.

Компьютерное моделирование процессов проводилось с использованием программного пакета EDEM. Отличительная способность пакета – возможность взаимодействия с другими САПР-приложениями (в частности, с пакетом Fluent компании ANSYS Inc.). Мощная встроенная система визуализации позволяет выявить «слабые места» в элементах оборудования, рассчитать износ оборудования, представить результаты моделирования в виде цветных графиков и гистограмм, отображающих кинематические и динамические характеристики.

Пакет уже получил широкую известность среди представителей фармацевтической, химической и горно-добывающей отраслей, а также сельскохозяйственной сферы. Он активно используется в ряде университетов (Rutgers University, New Jersey Institute of Technology, University of Cape Town, University of Queensland и др.).

**Моделирование загрузки шахтной печи.** При загрузке шахтной печи обжига известняком существует проблема равномерного распределения шихты внутри печи [3]. Шибер в рассматриваемой конструкции печи, открывающий нижний проход шлюза и обеспечивающий тем самым просыпку материала внутрь без разгерметизации, совершает поступательное движение только в одну сторону во время открытия. Шихта начинает сыпаться сначала с одного края и

только спустя некоторое время происходит равномерная выгрузка шихты из шлюза. Это приводит к скоплению большого количества необожженной шихты с одной стороны шахты, что вызывает неравномерный обжиг известняка.

Для обеспечения равномерного распределения известняка по всему объему печи необходимо было разработать модель загрузочного устройства соответствующих геометрических размеров. Проверка эффективности предложенного устройства загрузки шихты осуществляется с использованием программного пакета EDEM. Результаты моделирования представлены на рис.1.

Для равномерного распределения материала используется воронка, концентрирующая шихту по вертикальной оси шахты печи, и конус, который, смещаясь вниз, освобождает проход для материала и осуществляет его равномерное рассеяние

Для моделирования задавались близкие к реальным параметры известняковой шихты (гранулометрический состав, плотность, коэффициент Пуассона и т.д.), а также соответствующие парные коэффициенты трения и восстановления для известняка и шахты печи (сталь 3).

На рис.2 видно, что распределение материала происходит достаточно равномерно и поэтому применение разработанного устройства можно считать обоснованным.

**Моделирование процесса вибрационной сегрегации.** Сегрегационный способ разделения сыпучего материала по крупности основан на следующем. При продвижении по вибрирующей поверхности расслоение материала по высоте слоя происходит таким образом, что крупные частицы «всплывают» вверх, а мелкие оказываются внизу [1]. Экспериментальные исследования по разделению сыпучего материала (отсев щебня) с использованием отсекающей пластины для разделения слоев первоначально проводились на специальном вибрационном стенде [4] “НПК «Механобр-техника»”. Затем был выполнен расчет в программном пакете EDEM и сравнение результатов. В качестве исходных данных был задан гранулометрический состав материала, отвечаю-

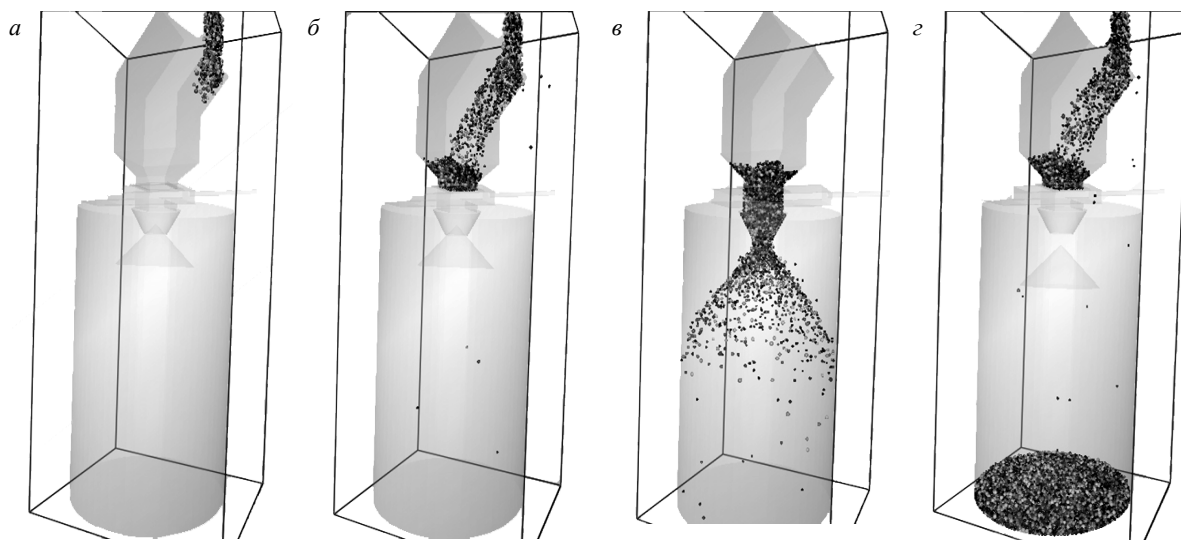


Рис. 1. Моделирование процесса загрузки шахтной печи: *а* – поступление материала в шлюз из виртуальной плоскости, имитирующей скип,  $t = 0,4$  с; *б* – открытие шибера,  $t = 2,5$  с; *в* – материал просыпается внутрь шахты,  $t = 7,5$  с; *г* – первая порция шихты загружена, поступает следующая порция, шибер закрыт,  $t = 11,8$  с

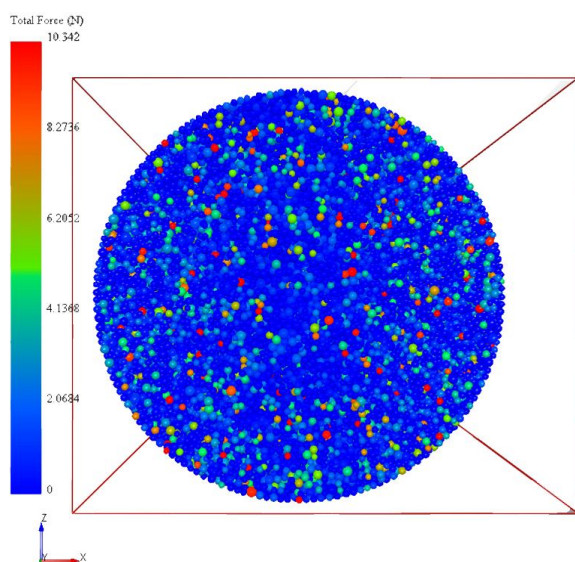


Рис.2. Распределение шихты по ходу шахтной печи

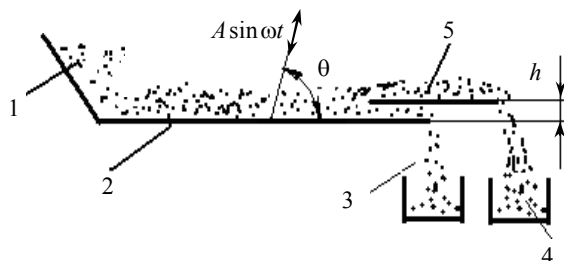


Рис.3. Схема устройства для исследования процесса сегрегации

1 – бункер; 2 – лоток; 3 – нижний продукт; 4 – верхний продукт; 5 – отсекающая пластина

щий экспериментальным исследованиям, геометрические параметры: угол вибрации  $\theta$ , амплитуда  $A$  и частота колебаний  $\omega$ , время  $t$ , высота установки отсекающей пластины  $h$  (рис.3). Контролировался выход мелкой фракции ( $-0,18$  мм) в нижний и верхний продукт. Результаты моделирования показаны на рис.4.

Содержание в исходном материале мелкой фракции ( $-0,18$  мм) в экспериментах

и в модели составляло 11,61 %, крупной фракции  $+0,18$  мм – 88,39 %).

Натурный эксперимент и математическое моделирование дали следующие результаты. Содержание в нижнем продукте мелкой фракции ( $-0,18$  мм): в эксперименте 22,35 %, в модели 24,51 % (соответственно верхней фракции в этом продукте 77,65 и 75,49 %). Содержание в верхнем продукте мелкой фракции: в эксперименте



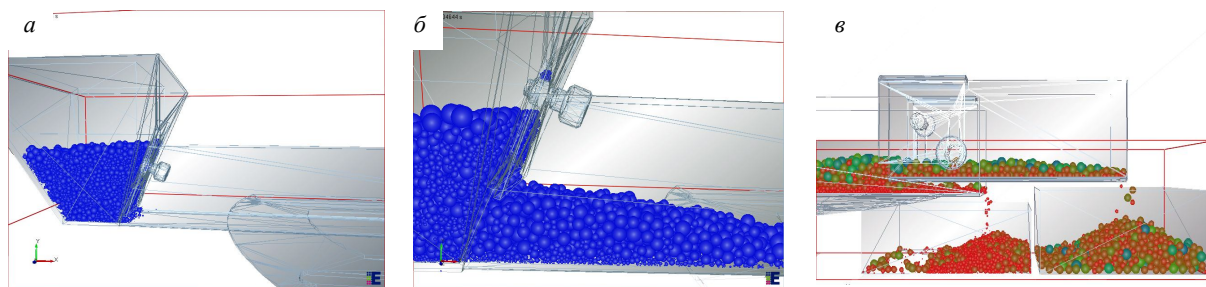


Рис.4. Моделирование работы сегрегационного устройства: *а* – шибер бункера открывается,  $t = 1,24$  с; *б* – шибер открыт (происходит процесс сегрегации),  $t = 4,05$  с; *в* – процесс сегрегации завершился (разделение материала отсекающей плоскостью на верхний и нижний продукты),  $t = 48,9$  с

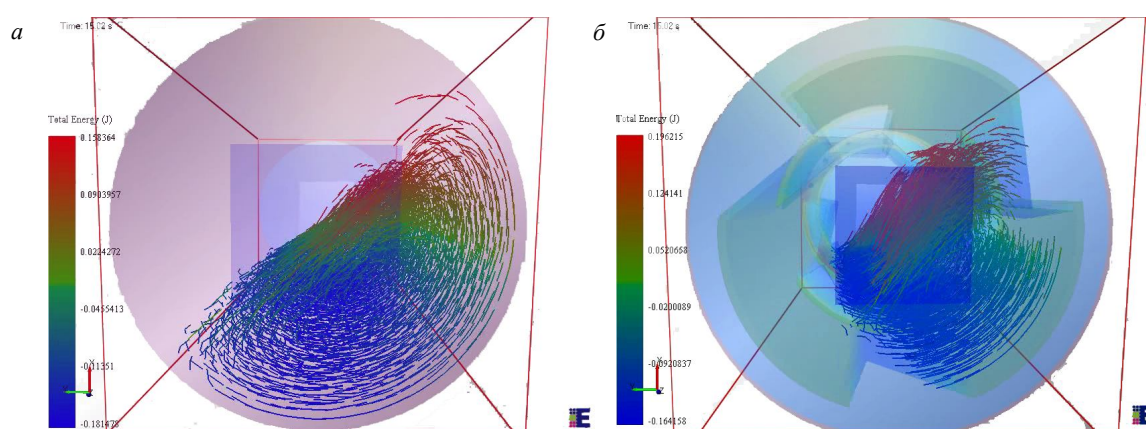


Рис.5. Движение загрузки в мельнице с цилиндрической формой камеры (*а*) и с сечениями некруговой формы (*б*)

4,63 %, в модели 0,07 % (соответственно крупной фракции 95,37 и 99,93 %)

**Моделирование движения шаровой загрузки в мельницах с различной формой рабочих камер.** Барабанные мельницы являются традиционными машинами для измельчения. Тысячи таких машин используются на обогатительных фабриках, на предприятиях по производству строительных материалов и переработке отходов. В то же время измельчение – крайне энергоемкий процесс. На дробление и измельчение расходуется более 10 % всей добываемой в мире электроэнергии. Крупные современные шаровые мельницы имеют барабаны диаметром до 8 м и привод мощностью до 14000 кВт, а мельницы самоизмельчения – барабаны диаметром до 13 м и привод мощностью до 22000 кВт. Поэтому повышение энергоэффективности мельниц является важнейшей технической задачей.

Перспективным направлением значительного снижения энергозатрат на измельчение является использование мельниц с нетрадиционной формой рабочей камеры. Изменение формы камеры в этих мельницах позволяет «турбулизовать» движение загрузки, вовлечь в процесс так называемое малоподвижное ядро. Предложено, в частности, использовать камеры с сечениями в виде неосесимметричной трехлепестковой фигуры, имеющие в продольном направлении форму дискретной спирали [2]. Механика движения загрузки в таких мельницах значительно сложнее, чем в стандартных, где она также весьма сложна.

Использование компьютерного моделирования позволяет исследовать движение загрузки в мельницах разных конструкций с различными формами камеры и типами футеровок, при любых значениях степени заполнения барабана, частоты его вращения и при



любом составе мелющих тел. Это дает возможность при испытаниях новых конструкций и оптимизации работы эксплуатируемых машин заменить значительную часть трудоемких технологических исследований вычислительными экспериментами. При этом такой важный количественный критерий, определяющий эффективность измельчения, как полезная мощность, легко рассчитывается как произведение веса загрузки, горизонтальной координаты ее центра тяжести и частоты вращения барабана. Расчет дает также картину пульсаций мощности, обусловленных некруговой формой сечения или автоколебательными процессами. При усложнении модели можно исследовать непосредственно процесс измельчения, а также износ футеровки и мелющих тел.

Использование программного пакета EDEM и метода дискретных элементов позволяет, «заглянув в мельницу», увидеть то, что недоступно для фотосъемки через прозрачный торец лабораторной модели. Можно, например, наблюдать распределение шаров по крупности вдоль барабана при использовании шаросортирующих футеровок. Программа дает также возможность вывода результатов в наглядном «потокосовом» виде (рис.5). На рисунке приведены результаты первых пробных численных экспериментов. Расчеты подтверждают, что в мельницах с нетрадиционной формой камеры обеспечивается интенсивное перемешивание загрузки и достигается значительное снижение энергозатрат.

Результаты компьютерного моделирования методом дискретных элементов качественно соответствуют данным, получен-

ным в экспериментах. Программный комплекс EDEM зарекомендовал себя как перспективное средство прогнозирования поведения сыпучих сред в установках горно-металлургической промышленности.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 09-08-00745, № 09-08-00620).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вайсберг Л.А. Вибрационное грохочение сыпучих материалов / Л.А.Вайсберг, Д.Г.Рубисов / Механобр. СПб, 1994. 47 с.
2. Блехман Л.И. Интенсификация измельчения: камеры нетрадиционной формы и нерегламентные режимы мельниц самоизмельчения / Л.И.Блехман, Е.Б.Кремер // Научная школа «Вибротехнология-97». Механическая обработка дисперсных (сыпучих) материалов и сред. Одесса, 1997. Ч.4. С.85-90.
3. Тарасов В.П. Загрузочные устройства шахтных печей. М.: Металлургия, 1974. 312 с.
4. Универсальный вибрационный стенд: опыт использования в исследованиях, некоторые результаты / Л.И.Блехман, Л.А.Вайсберг, Б.П.Лавров и др. // Научно-технические ведомости СПбГТУ, 2003. № 3. С.224-227.

## REFERENCES

1. Vaisberg L.A., Rubisov D.G. Vibrational classification of bulk solid materials // Mechanobr. Saint Petersburg, 1994. 47 p.
2. Blekman L.I., Kremer E.B. Grinding Intensification: untraditional shaped linings and irregular conditions for AG mills // Science school «Vibrotechnology-97». Mechanical treatment of dispersed (bulk) materials and mediums. Odessa, 1997. Part 4. P.85-90.
3. Tarasov V.P. Loading devices for shaft furnaces. Moscow: Metalurgy, 1974. 312 p.
4. Blekman L.I., Vaisberg L.A., Lavrov B.P., Vasilkov V.B., Yakimova K.S. Universal vibrational test device: experience of application at research work, some results // Science-technical bulletin. SPbSTU. Saint Petersburg, 2003. N 3. P.224-227.

**Э.Д.КАДЫРОВ**, канд. техн. наук, доцент, (812) 328-82-56

**А.С.СИМАКОВ**, канд. техн. наук, доцент, (812) 328-82-56

**А.Ю.ВОЛОВИКОВ**, студент, (812) 328-82-56

**Е.А.СОКОЛОВА**, студентка, (812) 328-82-56

*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

**E.D.KADYROV**, PhD in eng. sc., associate professor, (812) 328-82-56

**A.S.SIMAKOV**, PhD in eng. sc., associate professor, (812) 328-82-56

**A.J.VOLOVIKOV**, student, (812) 328-82-56

**E.A.SOKOLOVA**, student, (812) 328-82-56

*Saint Petersburg State Mining University*

## **АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО ДИСПЕТЧЕРСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СТАНЦИЕЙ**

В работе описываются особенности автоматизированной системы оперативного диспетчерского управления газораспределительной станцией, созданной на основе программируемого контроллера NI FieldPoint и среды разработки программного обеспечения NI LabView.

**Ключевые слова:** автоматизация, диспетчеризация, контроль.

## **THE AUTOMATED SYSTEM OF OPERATIVE DISPATCHING MANAGEMENT OF GAS DISTRIBUTION STATION**

The features of automated system of operative dispatching management of gas distribution station are described in the paper. System is created on base of programmable automation controller NI FieldPoint and programming environment NI LabView.

**Key words:** automation, scheduling, control.

Газораспределительная станция – совокупность технологического оборудования, обеспечивающая снижение давления, очистки и учета расхода газа перед подачей его в газораспределительную сеть. Она состоит из модулей переключения, очистки, подогрева, модуля редукции и одоризации.

Одним из средств обеспечения эффективности управления процессами на газораспределительных станциях (ГРС) является наличие автоматизированной системы оперативного диспетчерского управления. Такие системы позволяют с высокой точностью задавать различные параметры и поддерживать их в заданных интервалах. В последние годы все большее внимание уделяется именно дис-

петчеризации ГРС. Обычно ГРС рассредоточены на больших территориях малонаселенной местности, что затрудняет обслуживающему и эксплуатирующему персоналу быстро и своевременно устранять неполадки, локализовать аварии и контролировать заданные параметры. При этом необходимо учесть огромные расходы на транспорт, рабочее время сотрудников, обслуживающих данные объекты.

В общем случае диспетчеризация – это процесс централизованного оперативного контроля, мониторинга, управления, координации какого-либо процесса с использованием оперативной передачи информации по каналам связи между объектами диспетчеризации и пунктом управления.

Две основные задачи системы диспетчеризации: централизованный оперативный контроль за режимами работы процессов, происходящих на обслуживаемом объекте, и управление этими процессами.

Автоматизированная система оперативного диспетчерского управления газораспределительной станцией (АСОДУ ГРС) предназначена для управления технологическим процессом очистки, редуцирования, подогрева, одоризации и распределения газа потребителям\*.

Основными функциями АСОДУ ГРС в соответствии с требованиями отраслевых стандартов и руководящих документов РАО «Газпром» являются:

- защита потребителя (автоматический контроль и управление запорной арматурой для предотвращения аварийных ситуаций);
- контроль качественного и количественного состава газа, подаваемого потребителю, включая контроль загрязненности, влажности газа, а также достаточность степени его одоризации;
- учет расхода ресурсов (коммерческий учет расхода газа, включая расход на собственные нужды, технический учет расхода электроэнергии и одоранта).

Соответствие данным функциональным требованиям предполагает тщательный подбор аппаратной основы и технического обеспечения основных процессов автоматизированного управления ГРС\*\*. В настоящее время на рынке приборов контроля и сбора информации представлено много разнообразных средств технического оснащения станций разных производителей, продукция каждого из которых в той или иной степени отличается друг от друга по техническим

характеристикам, аппаратному и функциональному оформлению, что позволяет выбрать соответствующее поставленной задаче оборудование.

В нашем случае при разработке АСОДУ ГРС было принято решение воспользоваться аппаратным и программным обеспечением компании «National Instruments». Для решения поставленных нами задач диспетчеризации были рассмотрены промышленные контроллеры NI CompactRIO и FieldPoint, разработанные для автономного промышленного управления, сбора данных и их передачи по сети.

Сравнительный анализ рассматриваемых платформ показал целесообразность использования обладающую меньшим быстродействием, но более дешевую FieldPoint и среду разработки LabView.

Некоторые модели контроллеров FieldPoint имеют в своем составе интерфейс RS-485, что дает возможность подключить необходимые датчики. Также на базе RS-485 работает много датчиков противопожарной сигнализации, для подключения которой достаточно установить один дополнительный модуль.

В зависимости от количества используемых задвижек и датчиков подбираются соответствующие необходимые релейные, а также аналоговые и цифровые модули ввода/вывода.

В процессе функционирования АСОДУ ГРС действия персонала направлены к работе с графическими мнемосхемами, на которых представлены все необходимые данные и настройки (см. рисунок).

На общей технологической мнемосхеме ГРС отображено все оборудование с текущим состоянием технологических параметров. Отдельная область экрана отведена для индикации аварийных режимов. Навигация между мнемосхемами представлена в привычном виде закладок для удобного и быстрого переключения между картами технологических команд, блоком временных трендов, истории событий и операций, набором уставок и т.д.

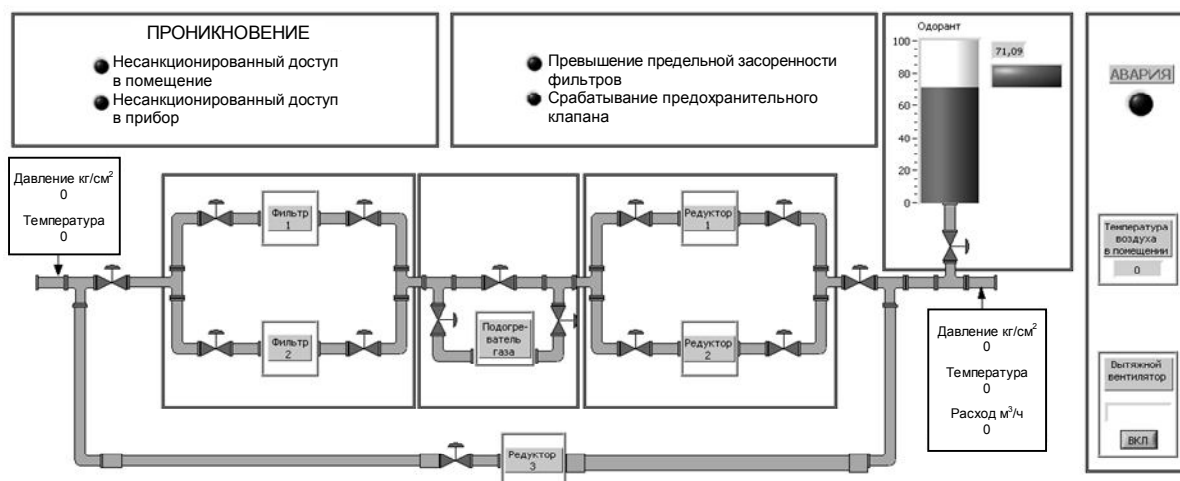
Закладка «Авария» содержит более конкретную информацию о месте фиксации

\* Эксплуатация оборудования и объектов газовой промышленности: Учеб. пособие / Г.Г.Васильев, А.И.Гульков, Ю.Д.Земанков и др. В 2 т. М.: Инфа-Инженерия, 2008. 608 с.

*Vasiljev G.G., Gulkov A.I., Zemenkov J.D.* Operation of the equipment and objects of the gas industry. In 2 parts. Moscow: Infia Ingeneria, 2008. 608 p.

\*\* *Данилов А.А.* Автоматизированные газораспределительные станции: Справочник. СПб: ХимИздат, 2004. 544 с.

*Danilov A.A.* Automated gas distribution station: Directory. Saint Petersburg: Chemizdat, 2004. 544 p.



Интерфейс АСОДУ ГРС (Закладка «Общая схема ГРС»)

датчиками нештатной ситуации, сигналы пожарный или превышения степени загазованности, либо сигнал о выходе за границы установленных пределов давления. Важно, что сигналы аварии привязаны к конкретным блокам, представленным на ГРС, как правило, в виде изолированных друг от друга боксов.

Информация по основным параметрам – давление и температура газа – непрерывно записывается в отдельный файл и отображается в виде графиков на закладке «Временные тренды», что дает возможность в любое время изучить динамику изменения этих параметров за требуемый период.

Закладка «Журнал аварий» содержит информацию о срабатывании аварийных сигнализаций за истекший период времени.

Закладка «Журнал событий» дает наиболее полные сведения о срабатывании запорной арматуры и других механизмов в пределах ГРС.

Все предельно допустимые величины для значений давления, температуры и т.д. управляющие при срабатывании сигнализации указываются на вкладке «Уставка».

Таким образом, мы имеем систему, позволяющую в режиме реального времени отслеживать исправность технологического оборудования ГРС и контролировать протекание процессов очистки, редуцирования и одоризации газа перед поставкой его потребителю. Автоматизированная система оперативного диспетчерского управления за счет своей простоты и надежности позволяет уменьшить количество обслуживающего персонала ГРС, когда выезд на удаленный объект технического персонала производится только в случае аварии. Четкий контроль показаний датчиков позволяет отслеживать возможные потери, что опять же сводится к экономии энергоресурса. А в совокупности введение АСОДУ ГРС значительно повышает надежность работы газораспределительной станции.

Система разработана для вновь проектирующихся газораспределительных станций. Однако возможна и модернизация уже имеющихся ГРС, когда аппаратное обеспечение АСУТП остается неизменным, но обновляется программный комплекс пульта диспетчеризации.

**А.Н.ЛЮБЧИК**, аспирантка, *lyubchik\_anna@mail.ru*

**Е.И.КРАПИВСКИЙ**, д-р техн. наук, профессор

**О.М.БОЛЬШУНОВА**, канд. техн. наук, доцент, *olgabolshunova@rambler.ru*

*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

**A.N.LUBCHIK**, post-graduate student, *lyubchik\_anna@mail.ru*

**E.I.KRAPIVSKY**, Dr. in eng. sc., professor

**O.V.BOLSHUNOVA**, PhD in eng. sc., associate professor, *olgabolshunova@rambler.ru*

*Saint Petersburg State Mining University*

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ**

Только с 1991 по 2000 г. на территории России произошло свыше 300 серьезных аварий. Значительная часть аварий на магистральных трубопроводах связана с электрохимической коррозией, коррозионным растрескиванием под напряжением и микробиологической коррозией. Дать системный анализ причин аварий невозможно без вероятностно-статистического подхода, который предполагает, что причиной аварий является одновременное действие многих факторов. При этом использование многофакторного анализа затруднено из-за большого количества влияющих на аварийность трубопроводов факторов, недостаточной статистики и недостоверной документации причин аварий.

**Ключевые слова:** коррозия, трубопровод, аварийная ситуация, прогноз.

## **PREDICTION OF THE TECHNICAL STATUS OF PIPELINE BASED ON ANALYSIS**

Since 1991 till the year of 2000 more than 300 serious accidents happened in Russia. The significant part of the accidents at main pipelines was connected with electrochemical corrosion, stress corrosion cracking and microbiological corrosion. System analysis of the accident reasons cannot be given without probabilistic and statistical approach, which assumes that the reason of the accident is the combination of many influencing factors. At the same time usage of the multivariate analysis is quite complicated task due to a large amount of factors, influencing the pipelines accident rate, insufficient statistics and unauthentic documentation of the accident causes.

**Key words:** corrosion, pipeline, emergency, prediction.

Изучение более 200 случаев аварий магистральных газопроводов, обусловленных электрохимической коррозией (ЭХК) и коррозионным растрескиванием под напряжением (КРН-SCC), результатов внутритрубной ультразвуковой дефектоскопии, гидравлических испытаний позволяют сделать следующие предварительные выводы [1-10]:

1. Повреждение и последующее разрушение трубопровода высокого давления

вследствие КРН происходит преимущественно (80 % случаев) в нижней части трубы от 4 до 8 ч. ЭХК, главным образом, возникает также в нижней или средней части трубопровода. Однако местоположение коррозионных дефектов в значительной степени зависит от состояния изоляции, наличия пригрузов, посторонних проводников, близости ЛЭП и агрессивности вмещающей среды. Внутритрубная коррозия характерна для

нефтепродуктопроводов и развивается в нижней образующей трубы. Для газопроводов немногочисленные случаи внутритрубной коррозии также связаны с нижней образующей трубы и чаще встречаются в местах понижения рельефа и связанного с этим изгиба трубы в вертикальной плоскости.

2. Аварийные разрывы по трещинам происходят преимущественно (80 % случаев) на незначительном расстоянии (100-300 мм) от продольного сварного шва. По мнению других исследователей [7], это связано с термическим влиянием и напряженным состоянием металла в этой зоне. В процессе изготовления при прогибе листа до нужного радиуса происходит образование микротрещин, практически не обнаруживаемых средствами дефектоскопии. Во многих случаях в местах развития трещин электрохимическая коррозия незначительна. Возможно, это связано с растворением острых краев трещин под действием ЭХК и уменьшением в связи с этим вероятности развития процесса трещинообразования. Электрохимическая коррозия при качественной сварке во многих случаях не связана с местоположением сварного шва, однако встречаются и исключения.

3. Большинство аварий (70 % случаев) трубопроводов высокого давления происходит вблизи компрессионных станций (КС) со стороны нагнетания (на расстоянии до 25 км), что, возможно, связано с высокой температурой газа и вибрациями трубы. В ряде работ отмечается, что КРН иногда происходит и на значительном расстоянии от компрессорной станции со стороны нагнетания, и, очевидно, не связано с температурой газа. Следует отметить, что коррозия, обусловленная воздействием бактерий, может происходить лишь при температуре выше 15 °С. Это даже в летний период нехарактерно для трубопроводов России, за исключением зоны до 10 км от КС со стороны нагнетания. Этот факт при анализе аварий, связанных с ЭХК, практически никогда не учитывается.

4. Наличие переменного уровня грунтовых вод в траншее под трубой способствует как КРН, так и ЭХК. Этот вывод совпадает с данными Американской газовой ассоциа-

ции. Вместе с тем коррозия в этой зоне может быть связана с повышенной вероятностью нарушения изоляции. Согласно наблюдениям для старых трубопроводов характерна высокая вероятность повреждения изоляции в верхней части корнями растений, особенно в случае зарастания просеки лесом (для северных трубопроводов). На этот фактор исследователи почти не обращают внимание. Послеаварийное обследование, как правило, не дает однозначного ответа о целостности изоляционного покрытия, так как при взрыве изоляция срывается.

5. Наличие напряженных состояний, принудительных изгибов труб, вибраций, тектонической активности существенным образом увеличивает вероятность как КРН, так и ЭХК. Этот фактор, к сожалению, не регистрируется при расследовании причин аварий, но также согласуется с выводами Американской газовой ассоциации и данными работ. Существенную роль играет превышение уровня динамических нагрузок при многократном сжатии-растяжении труб в вертикальном направлении под действием одновременного изменения температурного режима труб и изменения давления газа. Возможно поэтому аварии по причине КРН чаще возникают в весенне-осенний период, когда происходит изменение режимов работы трубопровода. Наличие жидкости внутри трубы часто приводит к вибрациям и, как следствие, повышению вероятности КРН.

6. В местах аварий, обусловленных КРН, потенциал поляризации (потенциал отключения) в 2/3 случаев превышает 1 В по медно-сульфатному электроду сравнения. Такие потенциалы имеют место только в первые километры от станций катодной защиты. Поэтому большинство аварий произошло в непосредственной близости (до 3 км) от этих станций. Возможно, этот фактор лишь опосредованно связан с КРН. Более вероятно повышенное выделение атомарного водорода в случае высокого защитного потенциала. Но оно может возникать и при более низком потенциале в щелочных и карбонатных почвах. По нашему мнению, вероятность водородного «охрупчивания» повышается при наличии микротрещин, харак-

терных для больших сроков работы газопровода. Возможно поэтому более 80 % аварий, обусловленных КРН, произошли на газопроводах со сроком службы более 10 лет. Наоборот, вероятность ЭХК существенно возрастает, при снижении абсолютного уровня защитного потенциала (менее 0,8 В) по медно-сульфатному электроду. В связи с этим ЭХК выше на участках между станциями катодной защиты, где, как правило, защитный потенциал понижен.

7. Прокладка газопровода в тяжелых почвах типа глин и суглинков способствует КРН. В легких почвах (пески, супеси) вероятность КРН понижается. Этот фактор отмечается и в работах. Это может быть связано с ограничением степеней свободы газопровода в траншеях с плотными стенками, что приводит к его изгибам только в одном направлении (преимущественно вверх-вниз) при изменении режима работы трубопровода, особенно в весенне-осенний период. Экспертная оценка справедливости такого заключения, проведенная на основании опроса специалистов КС, в большинстве случаев подтверждает этот вывод. Случаи КРН в болотистой местности маловероятны (при этом электрохимическая коррозия существенно возрастает, особенно при низких значениях pH). Возможно, причина этого – разъедание острых краев трещины ЭХК и снижение вероятности развития трещины.

Отмечается роль сжимающих усилий, которые характерны для нижней части трубопровода при изгибе его вверх. К сожалению, при анализе аварий не всегда отмечается местоположение сварного шва относительно очага разрушения при КРН, а также его местоположение относительно земной поверхности.

8. Состояние изоляции в местах аварий чаще всего неудовлетворительное. Иногда защитная пленка практически не нарушена, но всегда не исключаются гофры, карманы, отслоения изоляции. Именно в этом случае такие участки имеют плохую стресс-коррозионную защиту. Отслоившиеся покрытия действуют как барьер для защитного тока, в результате чего возникают разности

потенциалов и, соответственно, инициируется процесс коррозионного растрескивания под напряжением, ускорить который могут следующие факторы:

- высокая коррозионная активность из-за наличия  $\text{SO}_2$  или  $\text{CO}_2$ , а также  $\text{pH} = 6,5 \div 10$  грунта, окружающего трубопровод;
- уровень кольцевых напряжений превышает предельно допустимое для данной стали значение.

При этом коррозионное растрескивание под напряжением наблюдается преимущественно под зонами отслоения длиной более 25 см и длиной по окружности до 20 см.

9. Вероятность как КРН, так и ЭХК существенным образом зависит от коррозионной активности почв. При кислых почвах ( $\text{pH} < 5$ ) пассивирующая магнетитовая пленка на поверхности трубы с нарушенной изоляцией либо отсутствует, либо рыхлая, что увеличивает вероятность ЭХК. При  $\text{pH} > 6$  пассивирующая магнетитовая пленка плотная (особенно в известковых почвах) и предохраняет трубопровод от ЭХК. Особенно опасны по электрохимической коррозии участки трубопровода вблизи от металлургических комбинатов, угольных ТЭЦ, животноводческих комплексов.

10. Наличие продуктов жизнедеятельности сероокисляющих и серовосстанавливающих бактерий – микробиологическая коррозия (МБК) – увеличивает вероятность ЭХК и КРН.

В экспертной системе Прогноз-2 в настоящее время использовано 45 факторов, которые исследованы достаточно тщательно и в течение многих лет обсуждаются в научной литературе.

Многие из этих факторов могут быть достаточно легко исследованы, в том числе и с помощью комплекса дистанционных геофизических методов [7, 10]. По геофизическим данным определяется местоположение трубопровода в плане и в разрезе, коррозионная активность грунта, окружающего трубопровод, потенциал катодной защиты, форма и местоположение нарушений изоляции, местоположение стыков труб, наличие блуждающих токов и наводок от ЛЭП, местоположение пригрузов и др.

Приведенные данные о факторах, влияющих на техническое состояние трубопроводов, неизбежно приводят к выводу о целесообразности вероятностного прогноза локализации поврежденных участков.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ стресс-коррозии на газопроводах / В.Г.Антонов, В.В.Харионовский, Т.Бубеник, И.Нестлерос // Газовая промышленность. 1997. № 4.
2. Выделение коррозионных участков трубопроводов по подвижным формам нахождения химических элементов / С.А.Вешев, А.П.Савицкий, С.Г.Алексеев, С.Г.Сердюков // Геофизический вестник. 1998. № 8.
3. Канайкин В. Анализ причин разрыва труб МП // Газовая промышленность. 1996. № 11-12.
4. Колотовский А.Н. Разрушения газопроводов по причине коррозионного растрескивания под напряжением по предприятию «Севергазпром» / А.Н.Колотовский, Н.Д.Ахтимиров // Материалы семинара «Коррозионное растрескивание под напряжением трубных сталей». Ухта, 1996.
5. Комплекс дистанционных геофизических методов для исследования технического состояния магистральных газопроводов / Е.И.Крапивский, А.И.Кобрунов, С.Г.Алейников и др. // Международная конференция «Вопросы теории и практики интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей». Ухта, 1998.
6. Лисин В.Н. Влияние реальных эксплуатационных факторов на развитие коррозионного растрескивания под напряжением действующих газопроводов / В.Н.Лисин, Е.А.Спиридович // Материалы семинара «Коррозионное растрескивание под напряжением трубных сталей». Ухта, 1996.
7. Омм К.Ф. Стресс-коррозия на газопроводах. Гипотез, аргументы и факты // Газовая промышленность. Обзорная информация. Серия: защита от коррозии оборудования в газовой промышленности. М., 1998.
8. Применение комплекса геофизических методов для оценки экологического риска эксплуатации трубопроводов / Е.И.Крапивский, А.А.Елисеев, Н.П.Демченко, И.А.Румянцева // Международная конференция «Экологическая геофизика и геохимия». Москва-Дубна, 1998.
9. Ульмасвай Ф.С. Геологические условия возникновения зон потенциальной аварийности МГ на севере Западной Сибири // Газовая промышленность. 1997. № 7.

10. Хороших А.В. Стресс-коррозионная повреждаемость трубопроводов на газотранспортной системе ДП «Тюментрансгаз» // Транспорт и подземное хранение газа. 1995. № 3.

#### REFERENCES

1. Antonov V.G., Kharitonovskiy V.V., Bubenik T., Nestleros I. Analysis of stress-corrosion on gas pipelines // Gas industry. Moscow, 1997. N 4.
2. Veschev S.A., Savitskiy A.P., Alexeev S.G., Serdukov S.G. Selection of corrosion parts of pipelines by moving forms of finding chemical elements // Geophysical messenger. 1998. N 8.
3. Kanaykin V. Analysis of causes of pipe rupture MP // Gas industry. 1996. N 11-12.
4. Kotlovskiy A.N., Akhtimirov N.D. Destruction of pipelines by the reason of corrosion cracking under voltage on enterprise «Severgasprom» / Corrosion cracking under voltage of pipe steel. Problems. Solutions // Materials of problems of corrosion cracking under voltage seminar. Ukhta, 1996.
5. Krapivskiy E.I., Kobrunov A.I., Aleinikov S.G. et al. Complex of remote geophysical methods for investigation of technical condition of magistral pipelines // International conference «Questions of theory and practice of interpretation gravitational, magnetic and electrical fields». Ukhta, 1998.
6. Lisin V.N., Spiridovich E.A. Influence of real operational factors on development of under voltage corrosion cracking on operative pipelines / Corrosion cracking under voltage of pipe steel. Problems. Solutions // Materials of problems of corrosion cracking under voltage seminar. Ukhta, 1996.
7. Ott K.F. Stress-corrosion on gas pipelines. Hypotheses, arguments and facts. Gas industry. Review information. Series: protection of equipment in gas industry. Moscow, 1998.
8. Krapivskiy E.I., Eliseev A.A., Demchenko N.P., Rumyantseva I.A. Application of complex of geophysical methods for evaluation of ecological risk of pipeline exploitation // International conference «Ecological geophysics and geochemistry». Moscow-Dubna, 1998.
9. Ulmasvay F.S. Geological conditions of appearance of accident rate areas MG on north of western // Gas industry. 1997. N 7.
10. Choroshich A.B. Stress-corrosion damageability of pipelines on gas-transport system of DP Tumentransgas // Transport and underground storage of gas. 1995. N 3.



**В.В.ВАСИЛЬЕВ**, канд. техн. наук, ст. инженер, 328-84-31  
Санкт-Петербургский государственный горный университет

**V.V.VASILIEV**, PhD in eng. sc., senior engineer, 328-84-31  
Saint Petersburg State Mining University

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РУДНО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТОКА ЭЛЕКТРОДОВ

Рассмотрены особенности электроплавки в рудно-термической печи, а также взаимосвязь электрических и технологических параметров и их влияние на характер протекания процессов в рудно-термической печи. Описан метод определения текущих значений электротехнологических характеристик на основе анализа гармонического состава тока электродов. Показана структура системы управления рудно-термической печи.

**Ключевые слова:** рудно-термическая печь, гармонический анализ тока, электрическая дуга, система управления.

## CONTROL SYSTEM OF ORE-SMELTING FURNACE USING HARMONIC COMPONENTS OF ELECTRODES CURRENT

The features of electric melting in ore-smelting furnace are considered, and the correlation of electrical and technological parameters and their influence on the character of the processes in ore-smelting furnace. The method to determine the current values of electrotechnological characteristics based on the harmonic analysis of electrodes current. The structure and algorithm of control system for ore-smelting furnace is demonstrated.

**Key words:** ore-smelting furnace, harmonic analysis, electrical arc, control system.

Электроплавка – один из важнейших технологических процессов в металлургии черных и цветных металлов. В черной металлургии электроплавка применяется в основном для производства качественных сталей и ферросплавов, в цветной – для производства сплавов и рафинирования металлов, для переработки рудного сырья и шлаков в металлургии никеля, меди, свинца, цинка, олова.

Электропечи обладают рядом преимуществ – в них можно перерабатывать сырье практически любого состава и дисперсности, и недостатков – сложностью автоматизации и утилизации бедных газов, содержащих сернистый ангидрид [4].

Стабильность работы рудно-термической печи (РТП) обусловлена поддержанием

заданного распределения энергии в ванне печи. Его изменение вызывает изменение электрических и технологических параметров технологического процесса. Это предполагает возможность оценки технологических параметров по распределению энергии в ванне печи и оценки распределения энергии, в свою очередь, по электрическим параметрам.

Для управления работой электропечи необходимы следующие условия: изменение напряжения путем переключения ступеней печного трансформатора; изменение тока при неизменном вторичном напряжении за счет перемещения электродов; корректирующая загрузка компонентов шихты. Важно поддерживать с высокой точностью на за-

данном уровне не только мощность, выделяющаяся в печи, но и определенное соотношение ее составляющих, т.е. распределение этой мощности в дуге, шихте и расплаве [1].

Из-за агрессивности среды и высокой температуры невозможно использование многих необходимых датчиков для прямого непрерывного измерения степени развития электрической дуги в рудно-термической печи. Поэтому о развитии электрической дуги предлагается судить по косвенным показателям.

Связь условий возникновения и степени развития дуги с электрическими параметрами печи и свойствами шихты и расплава, появляющаяся в изменении гармонического состава напряжения и тока электродов, предполагает контроль не только степени развития дуги и распределения мощности в печи между дугой и материалами, заполняющими ванну, но и целого ряда технологических параметров, влияющих на работу печи: количество расплава в печи, его состав, степень восстановления целевого продукта и т.п.

Наличие в печи электрической дуги с ее нелинейной и несимметричной характеристикой вызывает в той или иной степени искажение формы кривых тока и напряжения на соответствующих осциллограммах. Для оценки степени развития дуги в этом случае применяется как описательная качественная характеристика осциллограмм, так и их численная расшифровка [3].

Прежде всего, представляют интерес искажения формы кривых тока и фазового напряжения в наиболее характерные моменты того или иного процесса. По этим осциллограммам можно провести общий анализ данного режима, получить сведения о характере и особенностях исследуемого процесса.

Количественная оценка несинусоидальности кривых рабочего тока электрода или фазового напряжения позволяет определить гармонические составляющие в различные периоды технологического процесса. На основании результатов измерения можно выбрать гармоники, которые наиболее точно характеризуют те или иные моменты работы электропечи, с помощью ко-

торых можно идентифицировать технологические факторы, оказывающие влияние на горение дуги.

В ходе исследований, в частности [2], были выяснены основные закономерности, показывающие взаимосвязи относительно содержания 2-й и 3-й гармоник и некоторых технологических параметров, зная которые можно использовать в алгоритмах управления:

$$\left(\frac{I_3}{I_1}\right)^2 = \frac{1}{3} \frac{U_{\delta} - R_0 I_1}{U_{\delta}} \frac{I_{\text{а}}}{I_1}, \quad (1)$$

где  $I_3/I_1$  – относительное содержание 3-й гармоники с частотой 150 Гц;  $U_{\delta}$  – фазное напряжение электрода;  $I_1$  – полный ток электрода,  $I_{\text{а}}$  – ток дуги;  $R_0$  – электросопротивление расплава, на который горит дуга.

Для печей, работающих с открытой дугой ( $I_{\text{а}} = I_1$ ), уравнение (1) позволяет определить сопротивление расплава, на который горит дуга, при известном значении  $I_3/I_1$ . Величина  $R_0$  в этом случае связана при постоянном составе расплава с его уровнем или температурой, или при постоянном уровне с его составом.

Таким образом, знание относительного содержания в токе электрода гармонической составляющей с частотой 150 Гц для рудно-термической печи, эквивалентная схема которой представляет собой сопротивление дуги, соединенное последовательно с сопротивлением расплава, на который она горит, может быть использовано для определения окончания плавки, т.е. достижения заданного уровня расплава при неизменном его составе или, наоборот, – при постоянном уровне. Уравнение (1) может быть также использовано и для определения необходимости корректировки состава расплава или своевременного перехода на другой режим при проведении плавки в несколько стадий.

В рудно-термической печи в определенных условиях дуга переменного тока также может стать причиной появления в токе электрода составляющей с частотой



Структура системы управления рудно-термической печью

100 Гц – 2-й гармоники  $I_2$ . В исследовании [3] дано объяснение природы вентильного эффекта электрической дуги переменного тока. Это вызвано разным характером реакций на электродах и различной плотностью эмиссионных токов из катодных пятен на них, если эти электроды разной природы и находятся в различных тепловых условиях.

Относительное содержание гармонической составляющей с частотой 100 Гц в токе электрода РТП имеет вид

$$\left(\frac{I_2}{I_1}\right)^2 = k_1 \frac{2E_1}{U_{\delta}} \left(1 - \frac{I_{\bar{a}}}{I_1}\right) \pm \frac{E_2 \pm k_2 R_0 I_1}{U_{\delta}} \frac{I_{\bar{a}}}{I_1}, \quad (2)$$

где  $I_2/I_1$  – относительное содержание 2-й гармоники с частотой 100 Гц;  $k_1, k_2$  – коэффициенты пропорциональности;  $E_1$  – изменение изобарного потенциала ( $\Delta Z$ ) той реакции, в которой участвует углерод электрода,  $A_1 = -\frac{\Delta Z}{nF}$ ;  $E_2$  – разница приэлектрод-

ных падений напряжений в соседних полупериодах.

Это уравнение справедливо в диапазоне значений  $I_{\bar{a}}/I_1$  от нуля до единицы, т.е. при работе печи в режиме «сопротивления» и в дуговом, и смешанных режимах. Вместе с (1) уравнение (2) образует систему, решение которой при известных значениях  $I_3/I_1$  и  $I_2/I_1$ , определяемых с помощью анализатора гармонического состава тока, позволяет определить электросопротивление реакционной зоны, распределение тока между дугой и шунтом и связанные с ними технологические параметры.

Величины  $E_1$  и  $E_2$  в уравнении (2) зависят от температуры или состава расплава, на который горит дуга. Поэтому при известных зависимостях этих величин от состава расплава или его температуры уравнения (1) и (2) позволяют не только определить значения  $R_0$  и геометрические размеры реакционной зоны, но и состав расплава. Состав

расплава в рудно-термической печи меняется довольно медленно и в достаточно узких пределах. Поэтому предварительные ориентировочные расчеты значений  $E_1$  и  $E_2$  в дальнейшем при работе печи могут быть легко откорректированы и введены в соответствующие уравнения.

В отличие от методов, использующихся для оценки протекания технологического процесса, анализа состава расплава или отходящих печных газов, которые с большим опозданием отражают изменения, происходящие в ходе технологического процесса, гармонический анализ тока и напряжения дает оперативную картину состояния реакционной зоны и процессов, протекающих в ней.

На основании алгоритмов управления, использующих величины сопротивления расплава, предложена автоматизированная схема управления, позволяющую диагностировать уже в начальной стадии отклонения в ходе технологического процесса и своевременно изменять его электрические параметры: ток – перемещением электродов и напряжение – переключением ступеней напряжения трансформатора (см. рисунок).

Таким образом, комплексное использование электрических характеристик пред-

ставляется обоснованным и более точным, чем используемые в данный момент субъективные методы управления.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вапник М.А. Автоматическое управление рудно-термическими печами / М.А.Вапник, Э.Э.Семенов; НИИТЭХИМ. М., 1977.
2. Влияние гармонической составляющей с частотой 100 Гц в токе электрода на работу рудно-термической печи / А.А.Педро, И.Н.Белоглазов, В.В.Васильев и др. // *Металлург.* 2009. № 5.
3. Сисоян Г.А. Электрическая дуга в электрической печи. М.: *Металлургия*, 1974.
4. Электрохимические процессы химической технологии: Учеб. пособие для вузов / Под. ред. В.А.Ершова. Л.: *Химия*, 1984.

## REFERENCES

1. Vapnik M.A., Semenov E.E. Ore smelting furnaces automatic control; NIITEKHIM. Moscow, 1977.
2. Pedro A.A., Beloglazov I.N., Vasiliev V.V. Influence of harmonic component with frequency of 100 Hz in electrode current for ore-smelting furnace operation // *Metallurg.* 2009. N 5.
3. Sisoyan G.A. The electric arc in an electric furnace. Moscow: *Metallurgiya*, 1974.
4. The electrochemical processes of chemical technology: Studies. manual for high schools / Ed. V.A.Ersho. Leningrad: *Khimiya*, 1984.

**А.Е.КОЗЯРУК**, д-р техн. наук, профессор, (812)328-82-70  
**Ю.Л.ЖУКОВСКИЙ**, канд. техн. наук, доцент, gukovskiy@bk.ru  
**С.В.БАБУРИН**, канд. техн. наук, доцент, 8-921-883-63-19  
**А.А.КОРЖЕВ**, канд. техн. наук, доцент, app@bk.ru  
**А.В.КРИВЕНКО**, канд. техн. наук, доцент, krivenkoav@rambler.ru  
*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

**A.E.KOZYARUK**, Dr. in eng. sc., professor, (812)328-82-70  
**Y.L.SHZUKOVSKY**, PhD in eng. sc., associate professor, gukovskiy@bk.ru  
**S.V.BABURIN**, PhD in eng. sc., associate professor, 8-921-883-63-19  
**A.A.KORSHZEV**, PhD in eng. sc., associate professor, app@bk.ru  
**A.V.KRIVENKO**, PhD in eng. sc., associate professor, krivenkoav@rambler.ru  
*Saint Petersburg State Mining University*

## **ДИАГНОСТИКА И ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ, РАБОТАЮЩЕГО В ТЯЖЕЛЫХ УСЛОВИЯХ, ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ**

Предложен метод диагностики и оценки остаточного ресурса электромеханического оборудования, основанный на анализе электрических параметров. Представлены структурные схемы диагностического комплекса и программы обработки данных. Рассмотрен способ применения искусственных нейронных сетей для обработки данных диагностики и оценки остаточного ресурса, а также приведены уровни влияния повреждений на работоспособность оборудования.

**Ключевые слова:** диагностика, оценка ресурса, электромеханическое оборудование.

## **DIAGNOSTICS AND ESTIMATION OF THE RESIDUAL RESOURCE OF THE ELECTROMECHANICAL EQUIPMENT WORKING, UNDER TRYING CONDITIONS ON ELECTRIC, PARAMETERS**

The method of diagnostics and estimation of a residual resource of the electromechanical equipment, based on the analysis of electric parameters is offered. Block diagram's of a diagnostic complex and the data processing program are presented. The way of application of artificial neural networks for data processing of diagnostics and an estimation of a residual resource is considered, and also levels of influence of damages on working capacity of the equipment are resulted.

**Key words:** diagnostics, resource estimation, the electromechanical equipment.

Прогресс в решении задач эксплуатации электромеханического оборудования во многом определяется качественным уровнем систем оценки его технического состояния. В современных условиях в эксплуатации сочетается состарившееся оборудование и оборудование с новыми материалами и свойствами, для которых традицион-

ные методы выявления дефектов неприемлемы [2]. Кроме того, использование значительного парка оборудования, у которого истек паспортный срок эксплуатации, неизбежно приводит к увеличению затрат на ремонт и техническое обслуживание. В связи с этим весьма важной является проблема поиска новых технических решений диагно-

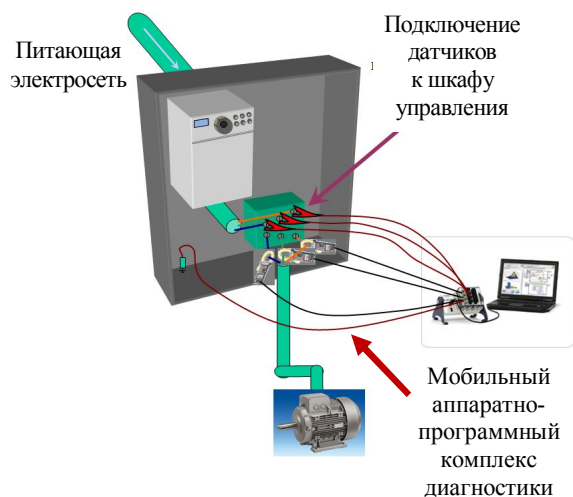


Рис.1. Подключение мобильного аппаратно-программного комплекса диагностики и оценки остаточного ресурса

стики и оценки остаточного ресурса, обеспечивающих более совершенную организацию технического обслуживания. Перспективным считается переход от технического обслуживания по регламенту или по выходу из строя оборудования к обслуживанию по фактическому состоянию. Для организации такого обслуживания необходимы средства, позволяющие оценить состояние оборудования на данный момент времени, проследить изменение его за последнее время и осуществить прогноз на ближайшее будущее. Качественного улучшения системы оценки состояния можно достигнуть, исследуя ее как многофакторную задачу. Многие дефекты и аномальные режимы можно обнаружить только в результате измерения и последующей обработки комплекса первичных признаков. Такие задачи требуют обработки большого объема информации, широкого использования информационных технологий [4].

В настоящее время получили развитие методы диагностики технического состояния электромеханического оборудования, основанные на анализе вибраций отдельных элементов агрегата и акустических колебаний [5]. Существенным недостатком данных методов является необходимость непосредственного доступа к электромеханическому оборудованию, что в условиях предприятий

добычи, переработки и транспортировки полезных ископаемых не всегда возможно. Этого недостатка лишен метод, основанный на анализе электрических параметров электромеханического оборудования, так как датчики, снимающие показания, подключаются прямо к шкафу управления или распределительному щиту (рис.1). Это позволяет диагностировать оборудование, находящееся в труднодоступных местах, без непосредственного доступа к нему и остановки технологического процесса.

Рассматриваемый метод диагностики основан на возникновении электромагнитной несимметрии поля в зазоре поврежденного электродвигателя, в результате чего происходит изменение спектрального состава токов и напряжений [1].

Также в качестве критерия для оценки энергетических процессов в реальной машине используют показатели потерь мощности на характерных для определенных повреждений частотах. Таким образом, анализируя график сигнала тока и мощности за определенный период времени можно обнаружить повреждение электромеханического оборудования и распознать его вид.

Реализация данного способа возможна с помощью программно-аппаратного комплекса (рис.2), состоящего из ЭВМ и устройства преобразования сигнала [3]. Программа, выполняемая на ЭВМ, должна определенным образом обработать входную информацию и определить наиболее вероятный вид повреждения работающего электропривода или сделать заключение о его исправности. Данный способ позволяет формировать базы данных с информацией об отслеживаемой динамике повреждений электропривода с последующим прогнозированием отказов, а также использовать искусственные нейронные сети, нечеткую логику и экспертные системы для обработки результатов и оценки величины остаточного ресурса.

С целью реализации рассмотренного способа диагностики и оценки остаточного ресурса электромеханического оборудования на базе кафедры электротехники и электро-

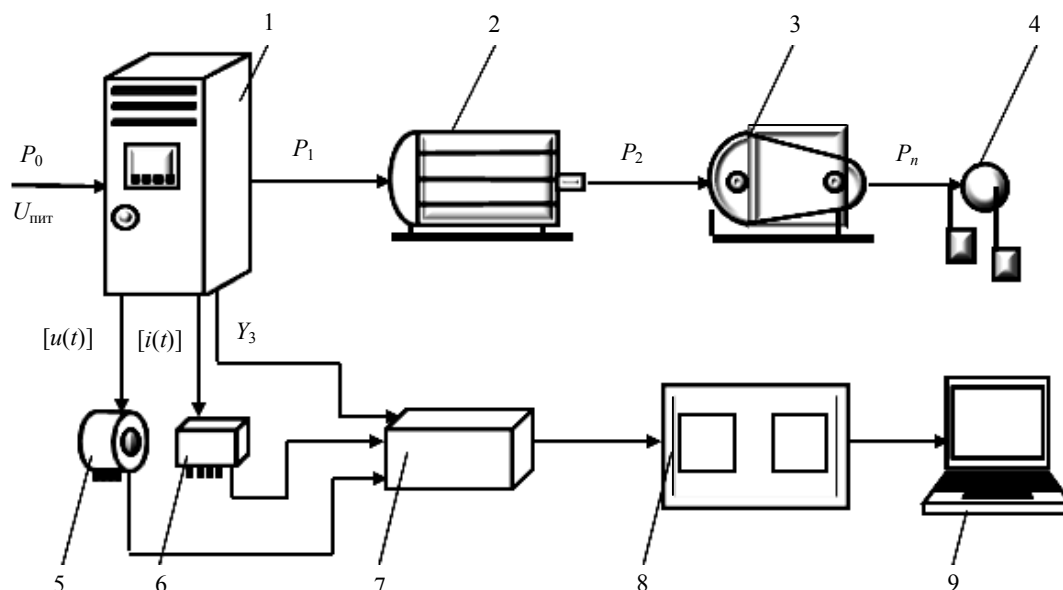


Рис.2. Структурная схема диагностического комплекса

1 – статический силовой преобразователь; 2 – электрический двигатель; 3 – механический преобразователь; 4 – рабочий орган; 5 – датчик тока; 6 – датчик напряжения; 7 – фильтр низких частот; 8 – устройство сбора данных АЦП; 9 – электронно-вычислительная машина

университета созданы лабораторные стенды диагностики электропривода переменного тока.

Использование комплексного подхода к диагностике и оценке остаточного ресурса ограничивается отсутствием методических разработок, которые позволили бы применять измеренные сигналы разной физической природы и размерности. Весьма важно, что состав признаков технического состояния или их весомость может меняться в зависимости от стадии развития дефекта и срока службы оборудования.

Поэтому для расширения возможностей диагностического комплекса и применения многофакторного анализа повреждений и оценки остаточного ресурса планируется создание лабораторного научно-исследовательского измерительного комплекса с применением оборудования компании «National Instruments», а также графического языка программирования LabView. Применение оборудования «National Instruments» позволяет организовать также и стационарную сеть диагностики и оценки остаточного ресурса, которая может осуществлять непрерывный контроль диагностируемых пара-

метров и автоматически сохранять измерения в базе данных. Данный подход удобен на стадии сбора статистики для однотипных агрегатов или наблюдения в режиме реального времени за изменением определенных диагностируемых параметров при изменении режима работы привода или возникновении неисправности. Сохранение измерений при этом может происходить как с заданным интервалом времени, так при определенном условии, например превышение значения коэффициента потерь мощности на заданную величину. При этом должно осуществляться сохранение измеряемых параметров в определенном интервале времени как до наступления условия превышения, так и после. Емкость современных жестких носителей информации позволит сохранять результаты замеров в течение продолжительного времени, что, безусловно, является положительным фактором в вопросе набора статистики и в дальнейшем позволит давать более точные расчеты остаточного ресурса электрооборудования.

При проектировании программного обеспечения в среде LabView используется структурная схема (рис.3). Модуль сбора



Рис.3. Структурная схема программного обеспечения

данных предназначен для чтения сигналов с измерительных датчиков, а остальные модули являются аппаратно-независимыми и выполняют функции обработки, визуализации и регистрации данных.

В блоке настройки эксперимента производится выбор максимального уровня измеряемых сигналов тока и напряжения, ввод номинальных параметров электрооборудования, выбор времени замера и частоты дискретизации. Блок сбора данных осуществляет сбор измеренных сигналов с указанных датчиков и передачу на соответствующие блоки обработки и отображения сигналов.

Показатели с блока обработки и отображения поступают в ячейки хранения базы данных, в которых находится информация о предыдущих измерениях, а также эталонные и критические значения сигналов. В следующем блоке происходит обработка данных и сопоставление измеренных значений с эталонными и критическими. Сопоставленные сигналы поступают на блок расчета остаточ-

ного ресурса, после чего конечный блок выдает информацию о наличии повреждения в электрооборудовании и рекомендации по его дальнейшему использованию.

Блок-схема алгоритма программного обеспечения реализуется с помощью графического языка программирования LabView.

Это позволяет разработать многофункциональный комплекс для исследований и эксплуатационного обслуживания электрооборудования, который может быть легко адаптирован для применения в других отраслях техники, обрабатывать сигналы, полученные с плат сбора данных сторонних фирм-производителей, а также сигналы, записанные на жесткие носители. Все это значительно облегчает задачу технического персонала, так как нет необходимости в перемещении к диагностируемому оборудованию системного блока персонального компьютера, содержащего обширную базу данных. Сигналы могут быть записаны с помощью портативных мобильных устройств



### Влияние уровня сигнала повреждения на работоспособность оборудования

Уровень сигнала, %	Техническое состояние	Допуск к эксплуатации
0-5	Отличное – не влияет на работоспособность	Допускается
5-15	Хорошее – влияние на работоспособность не существенно	»
15-25	Удовлетворительное – вероятность отказа существует (0,4-0,5 %), требуется оценка остаточного ресурса	Допускается при периодическом контроле
25-100	Неудовлетворительное – высокая вероятность отказа (более 0,8 %), остаточный ресурс не оценивается	Не допускается

сбора данных, а затем перенесены на сервер базы данных для последующей обработки.

Принятая структура программного обеспечения позволяет сравнительно просто компоновать программные модули для создания автономных специализированных виртуальных приборов, реализующих сокращенный набор функций, например, осциллографа или анализатора спектра и т.п., модифицировать набор реализуемых виртуальной лабораторией функций, использовать различные технические средства, заменяя только модули, ответственные за взаимодействие с аппаратурой, не изменяя при этом модули обработки и визуализации.

Также в настоящее время достаточно актуально применение адаптивных устройств защиты и диагностики, позволяющих выполнять диагностику электродвигателей независимо от их мощности и конструкции. Искусственные нейронные сети дают возможность эффективно определять причину и виды повреждения асинхронных электродвигателей, работать с зашумленными данными, избавляя от необходимости применения промежуточных электронных фильтров от помех или фильтрации математическими методами, а также адаптироваться к конкретному типу электродвигателя. Кроме этого, искусственные нейронные сети широко применяются в прогнозировании. При обучении нейронной сети на выходе используется определенное значение  $Y_{\text{эт}}$ , соответствующее конкретному виду неисправности электродвигателя, и эталонные экспериментальные значения сигнала опытного электродвигателя. После этого при идентификации сигнала уже обученной сетью производится проверка соответствия значения  $Y$  на выходе сети значению  $Y_{\text{эт}}$ , которое зада-

валось при обучении. Если  $Y = Y_{\text{эт}}$ , значит в электродвигателе неисправность на 100 %, для которой обучалась данная нейронная сеть. В противном случае производится оценка степени соответствия. В качестве обнаруженной неисправности выбирается та, степень соответствия которой наибольшая. По степени соответствия для других неисправностей электродвигателя можно судить о вероятности повреждений. В наиболее сложных случаях, возможно, придется использовать экспертную систему с набором правил нечеткой логики, которые будут определяться в ходе экспериментальных исследований.

Основным преимуществом представленного решения является его гибкость. Использование обычного многоцелевого компьютера, оснащенного рядом аппаратных и программных интерфейсов и платами сбора и согласования сигналов, даст возможность реализации эффективного и быстрого действующего аппаратно-программного комплекса диагностики электропривода переменного тока. Благодаря предложенной структуре приложений, без существенного изменения текущего алгоритма измерений и обработки данных можно добавлять в алгоритм новые функциональные модули с новыми виртуальными инструментами.

Окончательное влияние повреждения на работоспособность следует оценивать по четырем уровням (см. таблицу).

Таким образом, предложенная система диагностики и оценки остаточного ресурса позволит выявлять неисправности на ранней стадии возникновения, отслеживать динамику их развития, определять остаточный ресурс и планировать рациональные сроки проведения ремонтов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аврамчук В.С. Функциональный контроль и диагностика электротехнических и электромеханических систем и устройств по цифровым отсчетам мгновенных значений тока и напряжения / В.С.Аврамчук, Н.Л.Бацева / Томский политехнический университет. Томск, 2003.
2. Биргер И.А. Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978.
3. Современные методы неразрушающего контроля и диагностики технического состояния электроприводов горных машин / Ю.Л.Жуковский, А.А.Коржев, А.В.Кривенко, С.В.Бабуринов // Горное оборудование и электромеханика. 2009. № 9.
4. Таджибаев А.И. Автоматизированные системы распознавания состояний электроустановок. СПб: Энергоатомиздат, 2001.
5. Pöyhönen S., Jover P., Hyötyniemi H. Independent component analysis of vibrations for fault diagnosis of an induction motor: International Conference on Circuits, Signals, and Systems (CSS 2003). Cancun, Mexico, 19-21 may 2003. Vol.1.

## REFERENCES

1. Avramchuk V.S., Batseva N.L. The functional control and diagnostics of electrotechnical and electromechanical systems and devices over digital readout of a current and voltage instant values. Tomsk, 2003.
2. Birger I.A. Technical diagnostics. Moscow: Mechanical engineering, 1978.
3. Zhukovskij J.L., Korzhev A.A., Krivenko A.V., Baburin S.V. Modern not destroying control and diagnostics methods of a mountain machines electric drives technical condition // The mountain equipment and electromechanics. 2009. N 9.
4. Tadgibaev A.I. Recognition automation system of electroinstallations conditions. Saint Petersburg: Energoatomisdat, 2001. Vol.5.
5. Pöyhönen S., Jover P., Hyötyniemi H. Independent component analysis of vibrations for fault diagnosis of an induction motor: International Conference on Circuits, Signals, and Systems (CSS 2003). Cancun, Mexico, 19-21 may 2003. Vol.1.

УДК 658.012.011.56:658.512

**А.В.СПЕСИВЦЕВ**, канд. техн. наук, доцент, ведущий специалист, sav2050@gmail.com

**Ю.В.ГОРШКОВ**, канд. техн. наук, генеральный директор, (812)717-40-96

**М.Л.ДУДОРОВА**, инженер АСУТП, (812)449-99-74

ЗАО «Технолинк», Санкт-Петербург

**В.И.ЛАЗАРЕВ**, канд. техн. наук, начальник ТО

ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель»», Норильск

**A.V.SPESIVTSEV**, PhD in eng. sc., associate professor, leading expert, sav2050@gmail.com

**Y.V.GORSHKOV**, PhD in eng. sc., general director, (812)717-40-96

**M.L.DUDOROVA**, engineer, (812)449-99-74

«Technolink» Co, Saint Petersburg

**V.I.LAZAREV**, PhD in eng. sc., head of department

«Norilsky nickel» Co, Norilsk

## УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ШТЕЙНА ПРОЦЕССА ВАНЮКОВА НА ОСНОВЕ НЕЙРОНЕЧЕТКИХ МОДЕЛЕЙ

Цель настоящего исследования – построение нейронечетких моделей для решения задач управления качеством конечных продуктов плавки в печи Ванюкова при переработке сульфидного медно-никелевого сырья.

**Ключевые слова:** нейронечеткая модель, качество конечных продуктов, пирометаллургический процесс.

## MATTE QUALITY MANAGEMENT OF VANYUKOV'S PROCESS ON THE BASIS OF NEUROFUZZY MODELS

The study presents the use of neurofuzzy sets as a component of multimodel control of final product quality of a high-power pyrometallurgical process.

**Key words:** neurofuzzy model, control quality of final product, pyrometallurgical process.

**Введение.** Эффективность работы процесса Ванюкова (ПВ) характеризуется не только производительностью, но и качеством основных продуктов плавки – содержанием меди в штейне и шлаке. Решение подобной задачи в режиме реального времени возлагается, как правило, на операторов-технологов. Управление ПВ требует от всего коллектива смены, и в первую очередь от оператора, предельной психологической нагрузки, что часто приводит к усталости и непрограммируемым ошибкам в принятии управляющих воздействий. Принятие решений в таких ситуациях осложняется большим количеством влияющих факторов, а

также сложным их взаимодействием. Поэтому разработка «советчика оператора» на базе знаний в виде прогностических моделей с приемлемой степенью адекватности вырабатываемого управляющего воздействия в пирометаллургическом производстве актуальна всегда. В первую очередь такие модели необходимы для стабилизации содержания меди в штейне (60-62 %), что способствовало бы нормальной работе последующих (конвертирование, анодная плавка) переделов пирометаллургического производства [1, 3, 4].

Однако практика работы ПВ показывает существенные различия фактического зна-

чения качества штейна от желаемого. Так, сравнение фактического распределения меди в штейне ПВ с необходимым свидетельствует о том, что работу процесса в целом следует признать статистически неуправляемой: фактическая и желаемая генеральные совокупности существенно различны по центрам распределений (58 и 61 % соответственно), а дисперсии – неоднородны. Согласно выводам статистического анализа, существует, по крайней мере, два альтернативных способа достижения необходимого режима работы: либо пересмотром интервалов варьирования управляющих переменных с их существенным уменьшением (затратный путь на модернизацию всего комплекса шихтоподготовки), либо переходом на принципиально иную тактику управления процессом путем гибкого и согласованного реагирования на изменение входных переменных с помощью адекватных прогностических моделей в рамках автоматической системы управления технологическим процессом (АСУТП).

Цель настоящего исследования – построение нейронечетких моделей для решения задач управления качеством конечных продуктов плавки в ПВ при переработке сульфидного медно-никелевого сырья.

**Построение нейронечеткой модели.** В контексте решения поставленной производством проблемы одним из наиболее перспективных является направление с использованием нейронечетких моделей (ННМ) как «наилучших аппроксиматоров». При этом включение различных нелинейных функций в скрытые нейроны многослойных нейронных сетей обеспечивает возможность реализации нелинейных отображений, что чрезвычайно важно при решении задач управления процессами, которые обладают существенной нелинейностью. К последним можно отнести практически все пирометаллургические процессы.

Построение прогностической модели с помощью пакета инженерных расчетов Matlab достаточно подробно описано в литературе [4]. Однако методологию применения этой процедуры при построении моделей подобного рода конкретных пирометаллур-

гических процессов, учитывая их многофакторность и трудноформализуемость, еще только предстоит разработать.

Для построения ННМ процесса Ванюкова в качестве входных были выбраны 17 переменных, а выходных – содержание меди в штейне и шлаке. Факторное пространство для обеспечения системного подхода к прогнозированию качества работы и ведения процесса в целом включает как непосредственно измеряемые (данными оперативного контроля, снимаемыми с датчиков полевого уровня), так и расчетные входные переменные. Так, например, по принятым в автоматике правилам загрузка ( $X_1$ ,  $X_2$ ) измеряется в процентах от максимальной скорости питателей и не может быть выражена в тоннах в час, как количество подаваемых в печь шихтовых материалов по загрузочным транспортерам, а общий расход кислорода ( $X_8$ ) измеряется в кубических метрах в час и характеризует гидродинамику ванны расплава. К расчетным переменным относится расход кислорода на тонну подаваемой шихты ( $X_{11}$ ) как характеристика физико-химического состояния процесса для обеспечения требуемого содержания меди в штейне. Качество ведения процесса характеризуют такие переменные, как суммарное воздействие оператора на загрузку металлосодержащих ( $X_{12}$ ) и количество его «вмешательств» в процесс загрузки ( $X_{13}$ ) в период между пробоотборами продуктов плавки на химический анализ. Для расчета значений таких переменных созданы локальные мини-модели. Интерпретация остальных переменных по качеству ведения процесса аналогична.

Как видно, входные переменные имеют различную размерность, однако это обстоятельство не препятствует построению нейронечеткой модели, что очень важно с точки зрения методологии.

Согласно методике построения ННМ данные оперативного контроля ПВ за полгода были разделены на две выборки – обучающую и тестовую.

Поскольку построенная на необработанных данных модель показала плохое сходство, необходимо введение обязательного этапа построения ННМ – предвари-

тельной целенаправленной обработки исходного числового материала для повышения репрезентативности выборок, особенно обучающей. Например, все данные оперативного контроля от АСУТП с малым уровнем квантования (1 мин) приведены к единому 2-часовому базису, приуроченному к частоте производства анализа штейна, при этом исключались значения за пределами 95 % доверительного интервала по каждой из переменных. Проведены также специальные исследования по «интеллектуализации» обучающих выборок. Так, применение к анализу структуры информационного потока оперативного контроля с уровнем квантования 1 мин аппарата автокорреляционных функций позволило выявить необходимость сдвига химических анализов штейна относительно времени отбора проб на 2 ч, что существенно повысило степень соответствия данных.

Рассчитанное по модели и фактическое содержание меди в штейне для тестовой выборки показаны на рис.1.

Наглядным критерием степени адекватности расчетов по модели производственным данным служит сравнение фактических и моделируемых данных (рис.2). Обращает внимание расположение точек вдоль теоретической линии регрессии – биссектрисы координатного угла, которое свидетельствует, с одной стороны, об отсутствии

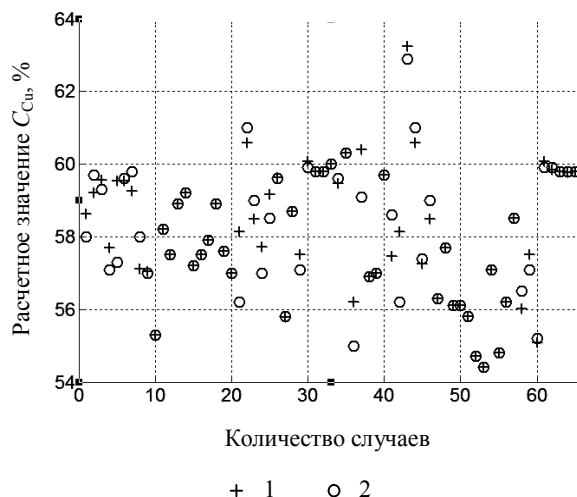


Рис.1. Рассчитанные по модели (1) и фактические (2) значения содержания меди в штейне на тестовой выборке

систематических ошибок, а с другой – о высокой степени адекватности расчетной модели исходным данным. Так, степень соответствия фактического и расчетного содержания меди в штейне оценена коэффициентами корреляции  $r = 0,9-0,94$ . При этом, что особенно важно, построенная модель аппроксимирует качество штейна во всей области изменения входных переменных.

Другим показателем степени адекватности модели производственным данным является значение среднего квадратического отклонения (СКО) расчетного значения от фактического. СКО для обучающей и тесто-

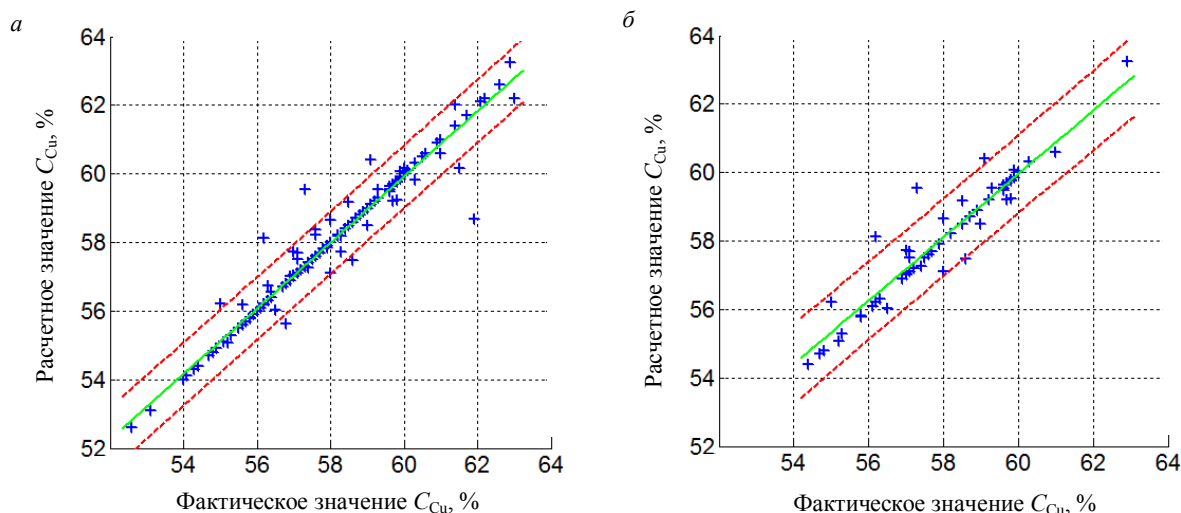


Рис.2. Степень адекватности нейронечеткой модели содержания меди в штейне на этапах обучения (а) и тестирования (б)

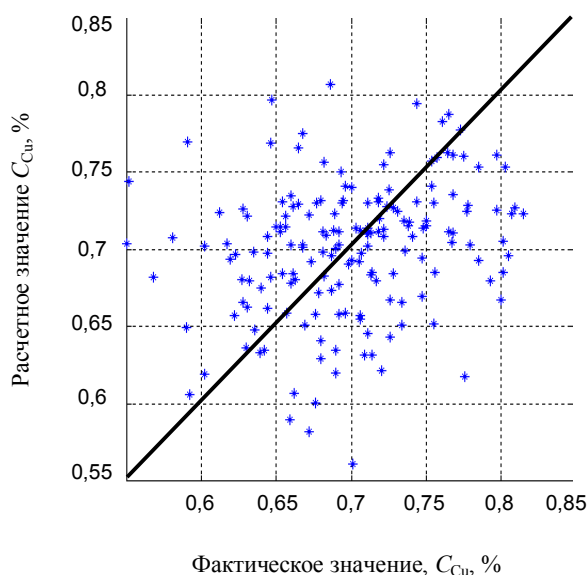


Рис.3. Степень адекватности нейронечеткой модели содержания меди в шлаке на этапе обучения

вой выборки составляет 0,47 и 0,57 % соответственно, что также говорит о высоких прогностических способностях синтезированной ННМ.

Если работа над «штейновыми» моделями внушает оптимизм в эффективности их дальнейшего применения для прогнозирования содержания в нем меди, то со «шлаковыми» – не все так благополучно (рис.3), хотя модель по шлаку синтезировалась на той же выборке. Разброс между расчетными и фактическими значениями оценивается коэффициентом корреляции  $r = 0,61$ , что существенно ниже аппроксимации штейновыми моделями.

Полученная в результате проведенного исследования высокая степень согласия моделей по штейну убедительно свидетельствует о принципиальной возможности использования их в качестве базы знаний в управлении ПВ. В то же время, как следует из требований производства, для достижения статистической управляемости процессом в требуемых пределах изменения содержания меди в штейне (60-62 %) суммарное значение СКО должно быть не более 0,5 %, что сравнимо с ошибкой только расчетов по модели.

Поскольку отсутствует опыт применения моделей подобного рода в практическом

управлении пирометаллургическими процессами, неясными остаются методологические вопросы о влиянии флуктуаций входных переменных на величину суммарного колебания качества штейна. С одной стороны, данные оперативного контроля уже являются носителями такой информации и по логике должны были бы уже быть учтены при построении ННМ как «аппроксиматора», а с другой – вычисления по модели также вносят свой вклад в общую вариацию выходной переменной вместе с ошибками определения входных. Таким образом, требование существенного снижения желаемых диапазонов регулирования качества штейна при существующей технологии ведения процесса на данном этапе представляется сомнительным. Однако можно констатировать, что технология управления качеством штейна при таких налагаемых жестких ограничениях, безусловно, требует соответствующего ужесточения границ интервалов варьирования входных переменных и стабилизации качества ведения ПВ операторами смен.

На наш взгляд, подобная дисгармония в поведении меди в шлаке и штейне вызвана как технологическими, так и методологическими факторами. Так, основной задачей коллектива смены является все-таки высокое содержание меди в штейне, при сохранении содержания в шлаке не выше порогового. Проблема минимизации содержания меди в шлаке на производстве остро не стоит. Кроме этого, методология применения процесса построения моделей подобного рода на производственных данных пока еще не отработана. Основной задачей в методологическом плане выступает выработка методов создания репрезентативных обучающих выборок отдельно для каждой выходной переменной в своем факторном пространстве.

Вопросы одновременного управления качеством штейна и шлака относятся к решению обратной задачи – выработки согласованных управляющих воздействий. При этом часто необходимо решать задачи управления в компромиссном варианте, противоположном решаемому производственниками в настоящее время, например

минимизация содержания меди в шлаке при высоком ее содержании в штейне. При этом блок нейронечеткого расчета управляющих воздействий должен включать в себя как основную составляющую – пакет локальных моделей (статистических, балансовых, экспертных и др.) корректировки состояния процесса для достижения желаемого диапазона изменения качества штейна в реальном масштабе времени. Таким образом, наличие в системе управления такого блока дает возможность оператору-технологу влиять на выработку требуемого качества штейна во всем временном промежутке между получением химических анализов проб конечных продуктов плавки.

Разработанная система может быть использована также для обучения технологического персонала с целью достижения единства характера управления процессом.

### Выводы

1. Первый опыт применения технологии построения моделей на принципиально новой нейронечеткой основе показал ее высокую эффективность и перспективность применительно к сложным пирометаллургическим процессам.

2. Основную трудность представляют не вычислительные, а скорее методологические вопросы использования данных оперативно-го контроля и другой информации для создания эффективных прогностических моделей.

3. При создании методики построения ННМ для каждого конкретного процесса исходная информация требует в качестве обязательного этапа предварительную специализированную ее обработку.

4. Нейронечеткий подход является надежной основой мультимодельного алгоритмического обеспечения автоматизации процесса в целом посредством создания нечетких баз знаний и синтеза нейролингвистических регуляторов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Качество отвальных шлаков ПВ в условиях работы на богатые штейны / В.И.Лазарев, А.В.Спесивцев, В.П.Быстров, А.Н.Ладин, В.И.Зайцев // Цветные металлы. 1999. № 6. С.40-43.
2. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTECH. СПб, 2003. 736 с.
3. Развитие плавки Ванюкова с обеднением шлаков / В.И.Лазарев, А.В.Спесивцев, В.П.Быстров, А.Н.Ладин, В.И.Зайцев // Цветные металлы. 2000. № 6. С.33-36.
4. Спесивцев А.В. Металлургический процесс как объект изучения: новые концепции, системность, практика. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2004. 238 с.

### REFERENCES

1. Lazarev V.I., Spesivtsev A.V., Bystrov V.P., Ladin A.N., Zaitsev B.I. Dump slag quality of Vanyukov's smelting in terms of the rich matte // Nonferrous Metals. 1999. N 6. P.40-43.
2. Leonenkov A.V. Fuzzy modelling using Matlab and fuzzyTECH. Saint Petersburg, 2003. 736 p.
3. Lazarev V.I., Spesivtsev A.V., Bystrov V.P., Ladin A.N., Zaitsev B.I. The development of Vanyukov's smelting with slag depletion // Nonferrous Metals. 2000. N 6. P.33-36.
4. Spesivtsev A.V. A metallurgical process as an object of study: new concepts, system, practice. Saint Petersburg: Polytechnical University Publishers, 2004. 238 p.

**А.А.ПЕДРО**, д-р техн. наук, профессор,  
зав. лабораторией высокотемпературных процессов, [pedro1938@mail.ru](mailto:pedro1938@mail.ru)  
ООО «ЛЕНГИПРОХИМ», Санкт-Петербург  
**И.Н.БЕЛОГЛАЗОВ**, д-р техн. наук, профессор (812)328-82-63  
**И.И.БЕЛОГЛАЗОВ**, аспирант, [filosofem@mail.ru](mailto:filosofem@mail.ru)  
Санкт-Петербургский государственный горный университет

**A.A.PEDRO**, Dr. in eng. sc., professor, head of laboratory, [pedro1938@mail.ru](mailto:pedro1938@mail.ru)  
«LENGIPROCHIM» Co, Saint Petersburg  
**I.N.BELOGLAZOV**, Dr. in eng. sc., professor, (812)328-82-63  
**I.I.BELOGLAZOV**, post-graduate student, [filosofem@mail.ru](mailto:filosofem@mail.ru)  
Saint Petersburg State Mining University

## ХАРАКТЕР ПОВЕДЕНИЯ ГАРМОНИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ С ЧАСТОТОЙ 100 Гц В ТОКЕ ЭЛЕКТРОДА РУДНО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕЧИ

Присутствие в составе тока четных гармоник и, прежде всего, гармонической составляющей с частотой 100 Гц возможно лишь при наличии в электрической цепи элементов, сопротивление которых зависит от направления тока. Такими элементами могут быть контакт электрода с расплавом и электрическая дуга переменного тока. От заглубления электрода в расплав и степени развития электрической дуги зависит изменение относительного содержания в токе электрода гармонической составляющей с частотой 100 Гц.

**Ключевые слова:** рудно-термическая печь, гармоническая составляющая, электрическая дуга, вентильный эффект, постоянная составляющая.

## ABOUT THE NATURE OF HARMONIC COMPONENT WITH FREQUENCY OF 100 Hz IN ELECTRODES CURRENT OF ORE-SMELTING FURNACE

The presence of even harmonic components of current and, above all, the harmonic component with a frequency of 100 Hz is possible only if the electric circuit elements, the resistance of which depends on the direction of current. Such elements may be a contact of electrode with the melt and the electric arc AC. Change the relative content in electrode current harmonic component with a frequency of 100 Hz dependent from the penetration of the electrode in the melt and the degree of electric arc development.

**Key words:** ore-smelting furnace, harmonic component, electrical arc, valve effect, direct component.

Наличие составляющей с частотой 100 Гц в гармоническом составе тока электрода рудно-термической печи вызвано асимметрией осциллограмм напряжения и тока электрода относительно оси абсцисс. Очевидно, что эта асимметрия обусловлена наличием вентильного эффекта в электрической цепи,

что и подтверждается присутствием постоянной составляющей в фазном напряжении рудно-термических печей [2, 3, 5]. Элементом, обладающим полупроводниковым, т.е. вентильным эффектом в рудно-термической печи, могут быть контакт электрода с расплавом и электрическая дуга переменного тока.



Контакт углеродистого электрода с шлаковым расплавом, электропроводность которого носит ионный характер, сопровождается химическим взаимодействием этого электрода с ионами  $(\text{SiO}_3)^{2-}$ ,  $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$ ,  $(\text{Si}_2\text{O}_7)^{6-}$ ,  $(\text{Al}_2\text{O}_5)^{4-}$ ,  $(\text{AlO}_3)^{3-}$ ,  $(\text{AlO}_2)^-$ ,  $(\text{FeO}_2)^-$ ,  $(\text{Fe}_2\text{O}_5)^{4-}$ ,  $(\text{FeO}_3)^{3-}$ ,  $(\text{FeO}_4)^{5-}$  и др.

В полупериод, когда на электроде плюс, в результате химического взаимодействия углеродистого электрода с отрицательными ионами, находящимися в расплаве, падение напряжения в ванне печи ( $U_{\text{эл}}$ ) будет на некоторую величину  $E_1$  меньше. И, наоборот, когда на электроде минус, падение напряжения на ту же величину больше по сравнению с напряжением, когда этого взаимодействия нет:

$$U_{\text{эл}1} = U_{\text{эл}} + E_1; \quad U_{\text{эл}2} = U_{\text{эл}} - E_1,$$

где  $U_{\text{эл}1}$  и  $U_{\text{эл}2}$  – падение напряжения на промежутке электрод-под в соседних полупериодах при наличии химического взаимодействия электрода с компонентами расплава.

В результате в фазном напряжении появляется постоянная составляющая

$$U_{\text{и.н.о}} = (U_{\text{эл}} + E) - (U_{\text{эл}} - E) = 2E_1.$$

Величина  $E$  определяется изменением изобарно-изотермического потенциала ( $\Delta Z$ ) той реакции, в которой участвует углерод электрода:

$$E_1 = -\frac{\Delta Z}{nF},$$

где  $F$  – число Фарадея;  $n$  – заряд ионов-переносчиков тока;

$$\Delta Z = RT \ln K,$$

$R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – температура электрода в месте контакта с расплавом;  $K$  – константа равновесия.

При неизменной температуре и активности компонентов реакционной зоны величина  $E$  постоянна и в соответствии с теорией компенсации можно допустить, что во вторичной цепи существует источник напряжения, т.е. источник электромагнитной энергии, в котором напряжение не зависит от сопротивления приемника. Направление тока этого источника зависит от характера

реакции на электроде. Практически во всех рудно-термических печах такими реакциями являются реакции, в которых находящиеся в расплаве анионы отдают свои электроны и, таким образом, в измерительной цепи направление  $U_{\text{ис}}$  будет от «земли» к электроду, т.е. на последнем будет минус.

Для рудно-термической печи, работающей в режиме «сопротивления» (весь ток проходит через контакт электрода с расплавом), величина гармонической составляющей с частотой 100 Гц – 2-й гармоники

$$J_{2\delta.\hat{a}} = \frac{2E_1}{R_k},$$

где  $R_k$  – электрическое сопротивление печного контура.

Если обе части данного выражения возвести в квадрат и разделить на  $J_1^2$  ( $J_1$  – величина гармонической составляющей с частотой 50 Гц (1-й гармоники), практически равной току электрода), получим

$$\left( \frac{J_{2\delta.\hat{a}}}{J_1} \right)^2 = \frac{4E_1^2}{R_k^2 J_1^2} = \frac{4E_1^2}{U_o^2}$$

или

$$\left( \frac{J_{2\delta.\hat{a}}}{J_1} \right)^2 = \frac{\Delta P_{\delta.\hat{a}}}{P}, \quad (1)$$

где  $\Delta P_{\delta.\hat{a}}$  – разница мощностей, потребляемых печной установкой в соседних полупериодах;  $P$  – полная мощность, потребляемая печной установкой.

Как следует из уравнения (1), относительное содержание 2-й гармоники в токе электрода рудно-термической печи, работающей в режиме «сопротивления», характеризует неравномерность нагрузки в полупериоды. С увеличением фазного напряжения эта неравномерность уменьшается.

Однако в большинстве случаев ток в рудно-термической печи проходит не только через контакт электрода с расплавом, но и через сопротивление электрической дуги и контактное сопротивление электрода с твердыми компонентами шихты.

Ток, проходящий через контакт электрода с расплавом  $J_o$  (ток шунта) в отли-

чие от тока дуги  $J_{\bar{a}}$ , обусловленного химическим взаимодействием электрода с расплавом, определяется выражением

$$J_{2\bar{o},\bar{a}} = \sqrt{\frac{2E_1 J_1}{R_k} \frac{J_{\bar{o}}}{J_1}},$$

а неравномерность нагрузки в полупериоды в результате этого взаимодействия отношением

$$\left( \frac{J_{2\bar{o},\bar{a}}}{J_1} \right)^2 = \frac{2E_1 J_1}{R_k J_1^2} \frac{J_{\bar{o}}}{J_1} = \frac{2E_1}{U_{\bar{o}}} \frac{J_{\bar{o}}}{J_1}, \quad (2)$$

или

$$\left( \frac{J_{2\bar{o},\bar{a}}}{J_1} \right)^2 = \frac{\Delta P_{\bar{o},\bar{a}}}{P}. \quad (3)$$

Как было сказано выше, вторым элементом в рудно-термической печи, обладающим вентильным эффектом, может быть электрическая дуга переменного тока. При работе печи с открытой дугой величина гармонической составляющей с частотой 100 Гц в токе электрода, обусловленная вентильным эффектом электрической дуги переменного тока  $J_{2\bar{a}}$ ,

$$J_{2\bar{a}} = \frac{E_{2\bar{a}} \pm aR_0 J_1}{R_k}. \quad (4)$$

Величина постоянной составляющей фазного напряжения ( $U_{\text{пс.д}}$ ), обусловленной вентильным эффектом электрической дуги переменного тока, при работе печи с открытой дугой,

$$U_{\text{пс.д}} = E_2 \pm aJ_1 R_0, \quad (5)$$

где  $E_2 = U_{\bar{a}\bar{e}1} - U_{\bar{a}\bar{e}}$  – разница прикатодных и прианодных падений напряжения в дуге в соседних полупериодах;  $\bar{a} = \Delta j_{\bar{a}} / j_{\bar{a}}$  – отношение разностей плотностей эмиссионного тока в соседних полупериодах к среднему значению этой плотности;  $R_0$  – электросопротивление расплава, над которым горит дуга;  $J_1$  – ток электрода, в данном случае равный току дуги  $J_{\bar{a}}$ ;  $\bar{a}J_1$  – разница токов электрической дуги в соседних полупериодах.

Величина  $E_2$  определяется работой выхода электронов из электродов, между которыми горит дуга, а также реакциями на их поверхности, т.е. в конечном итоге материалом электродов [1].

Плотность эмиссионного тока, в конечном итоге коэффициент  $a$ , определяется материалом и температурой катодных пятен [4].

Таким образом, в цепи, содержащей электрическую дугу, находятся источник напряжения, т.е. источник, напряжение которого не зависит от нагрузки, –  $E_2$ , и источник тока, т.е. источник электромагнитной энергии, ток которого также не зависит от нагрузки, –  $\bar{a}J_1$ .

Действительно, работа выхода электронов из катодов и изменение изобарно-изотермического потенциала в результате реакции на поверхности катода зависят только от его материала и состава газов, контактирующих с ним. Также при неизменном токе дуги, разница токов дуги в полупериодах не будет зависеть от величины нагрузки.

Произведя, как и в случае с гармонической составляющей, обусловленной химическим взаимодействием электрода с расплавом, те же математические операции, получим

$$\left( \frac{J_{2\bar{o},\bar{a}}}{J_1} \right)^2 = \frac{(E_{2\bar{a}} \pm aR_0 J_1)^2}{R_k^2 J^2} = \frac{U_{\text{пс.д}} \Delta J_{\bar{a}}}{U_{\bar{o}} J_1}$$

или

$$\left( \frac{J_{2\bar{o},\bar{a}}}{J_1} \right)^2 = \frac{\Delta P_{\bar{a}}}{P}. \quad (6)$$

Как и в случае с вентильным эффектом, обусловленным вентильным эффектом контакта электрода с расплавом, в электропечи с открытой дугой относительное содержание в токе электрода гармонической составляющей с частотой 100 Гц отражает неравномерность нагрузки в полупериоды.

Если дуга шунтирована сопротивлением шихты и расплава, то относительное содержание в токе гармонической составляющей с частотой 100 Гц, обусловленное вентильным эффектом дуги переменного тока,

$$\left(\frac{J_{2\ddot{a}}}{J_1}\right)^2 = (E_{2\ddot{a}} \pm aR_0J_1)^2 \frac{1}{U_{\ddot{o}}} \frac{J_{\ddot{a}}}{J_1}, \quad (7)$$

или

$$\left(\frac{J_2}{J_1}\right)^2 = \left(E_{2\ddot{a}} \pm a\frac{R_0}{R_k}\right)^2 \frac{1}{U_{\ddot{o}}} \frac{J_{\ddot{a}}}{J_1}. \quad (8)$$

При существовании в рудно-термической печи обоих вентильных эффектов относительное содержание в токе электрода гармонической составляющей определяется выражением

$$\left(\frac{J_2}{J_1}\right)^2 = \frac{2E_1}{U_{\ddot{o}}} \frac{J_{\ddot{o}}}{J_1} \pm \frac{E_2 \pm aJ_1R_0}{U_{\ddot{o}}} \frac{J_{\ddot{a}}}{J_1}. \quad (9)$$

Подставив в уравнение (9) вместо  $J_{\ddot{o}}/J_1$  равное ему  $\left(1 - \frac{J_{\ddot{a}}}{J_1}\right)$ , после преобразования получим

$$\left(\frac{J_2}{J_1}\right)^2 = \frac{2E_1}{U_{\ddot{o}}} - K(2E_1 \pm E_2 \pm aJ_1R_0), \quad (10)$$

где  $K = \frac{1}{U_{\ddot{o}}} \frac{J_{\ddot{a}}}{J_1}$ ;  $B^{-1}$ .

При работе печи в режиме сопротивления (при отсутствии дуги) уравнение (10) принимает вид (3), так как  $K = 0$ .

При работе печи с открытой дугой уравнение (10) примет вид (6), так как

$$K2E_1 = \frac{2E}{U_{\ddot{o}}} \frac{J_{\ddot{a}}}{J_1},$$

где  $\frac{J_{\ddot{a}}}{J_1} = 1$ .

Таким образом, представляет интерес относительное содержание гармонической составляющей с частотой 100 Гц в токе электрода печи РКЗ-10,5 для плавки нормального электрокорунда.

Процесс плавки нормального электрокорунда носит периодический характер и состоит из стадий наплавления ванны, доводки образовавшегося расплава до заданного содержания в нем  $Al_2O_3$  и перегрева

его до жидкоподвижного состояния и последующего выпуска из печи.

Особенностью плавки нормального электрокорунда является высокая по сравнению с обычными силикатными шлаками электропроводность получаемого расплава. Поэтому для поддержания установленных условиями эксплуатации печного трансформатора и требованиями плавки силы тока и мощности электропечь работает в двух режимах:

1) на стадии расплавления шихты – в режиме сопротивления при погруженных на ту или иную глубину в слой шихты или шлака электродах;

2) на стадии доводки расплава – в дуговом режиме.

В первом случае энергия выделяется в шихте и расплаве, во втором, в расплаве и в дуге.

На стадии расплавления шихты появление в токе электрода 3-й и 5-й гармоник носит случайный и нерегулярный характер, обусловленный нарушениями хода технологического процесса, например, при заисании шихты.

Гармоническая составляющая с частотой 100 Гц в этот период невелика и изменения ее содержания в токе аналогичны изменению самого тока, т.е. с увеличением тока увеличивается относительное содержание 2-й гармоники в нем и, наоборот, с уменьшением тока электрода падает и содержание 2-й гармоники. Ее наличие на данной стадии вызвано вентильным эффектом контакта электрода с расплавом, о чем свидетельствует и постоянная составляющая фазного напряжения, имеющая направление от «земли» к электроду, т.е. на электроде находится минус. Это значит, что на поверхности углеродистого электрода идут реакции восстановления оксидов железа и кремния, находящихся в расплаве.

После проплавления шихты и вскрытия колошника в результате уменьшения электрического сопротивления расплава электроды постепенно выводятся из него для сохранения заданных силы тока и мощности. В определенный момент возникает дуга. С возникновением устойчивой электри-

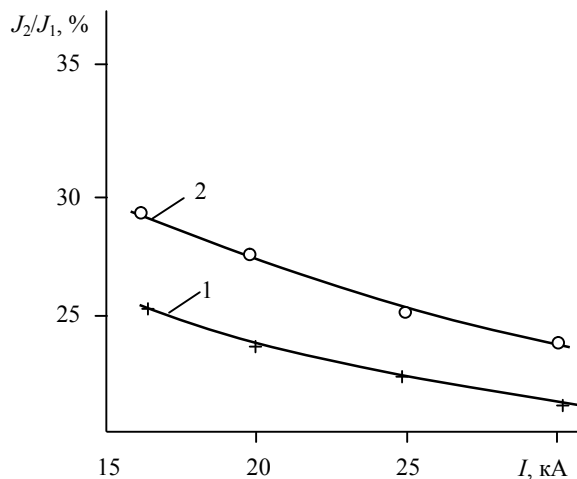


Рис. 1. Зависимость относительного содержания в токе электрода печи РКО-10,5 для плавки нормального электрокорунда гармонической составляющей с частотой 100 Гц от величины тока 2-й гармоники –  $J_2/J_1$ . Содержание  $Al_2O_3$  в расплаве, %: 1 – 93; 2 – 94

ческой дуги наряду с гармонической составляющей с частотой 100 Гц в токе электрода появляется и постепенно увеличивается относительное содержание гармонических составляющих с частотой 150 и 250 Гц. В отличие от стадии расплавления, на стадии доводки при увеличении тока электрода, т.е. уменьшении степени развития дуги, относительное содержание 2-й гармоники, как 3-й и 5-й уменьшается и, наоборот, возрастает, если ток уменьшается.

Этот факт, а также то, что на этой стадии постоянная составляющая фазного напряжения меняет знак (плюс на электроде) свидетельствует о том, что наличие 2-й гармоники, т.е. асимметрии вольт-амперной характеристики относительно оси абсцисс, обусловлено вентильным эффектом электрической дуги. Температура катодного пятна, когда он находится на твердом электроде, выше, чем в полупериод, когда катодом является жидкоподвижный шлак. Поэтому эмиссия электронов, а следовательно и ток, больше (а напряжение меньше), когда катод – электрод.

На этой стадии зависимость относительного содержания в токе электрода гармонической составляющей с частотой 100 Гц абсолютно соответствует уравнению (6) и ее наклон определяется сопротивлени-

ем  $R_0$ , т.е. температурой и составом расплава (рис.1) [3].

На рис.2 показаны зависимости относительного содержания в токе электрода фосфорной печи РКЗ-80Ф гармонической составляющей с частотой 100 Гц от тока электрода и активного сопротивления фазы.

Так как постоянная составляющая напряжения имела направление от электрода к расплаву, т.е. плюс в измерительной цепи находился на электроде, то наличие 2-й гармоники в данном случае можно объяснить преобладающим действием вентильного эффекта дуги по сравнению с выпрямляющим действием контакта электрода с расплавом. Однако с увеличением тока при неизменном напряжении, т.е. с увеличением заглупления электрода, наблюдается влияние вентильного эффекта контакта электрода с расплавом, что находит отражение в нелинейности полученных кривых.

На рис.2 пунктирными линиями показаны зависимости, когда при том же напряжении и токе была отмечена более глубокая посадка электродов.

Эти же зависимости, полученные на фосфорной печи с установленной мощностью печного трансформатора 24 МВ·А в г.Пистериц (Германия), носят другой характер: с увеличением тока растет и относительное содержание 2-й гармоники, а с увеличением активного сопротивления фазы – падает. Если в предыдущем случае направление постоянной составляющей фазного напряжения было от электрода к «земле» (на электроде был плюс), то во втором наоборот – плюс находился на расплаве. Это указывает на то, что на немецкой печи преобладает вентильный эффект контакта электрода с расплавом, т.е. электроды расположены глубже в реакционной зоне по сравнению с печью РКЗ-80Ф и электрическая дуга, которая в фосфорной печи развита незначительно [1], в печи 24 МВ·А практически отсутствует.

Последнее можно объяснить использованием на немецком заводе в качестве фосфорсодержащего сырья апатита, обладающего более высокой температурой плавления, чем применяемый на печи РКЗ-80Ф

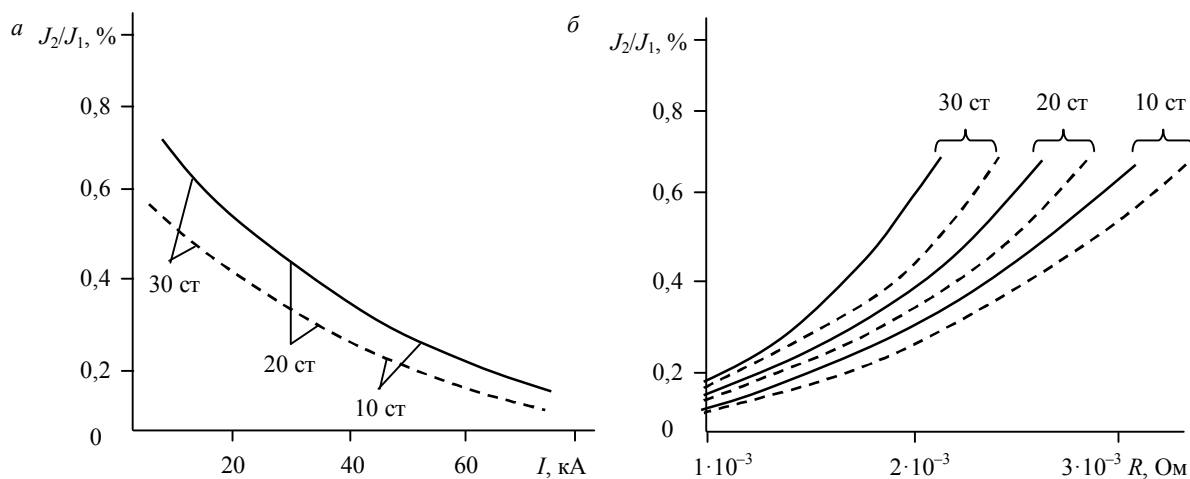


Рис.2. Зависимость относительного содержания в токе электрода печи РКЗ-80Ф гармонической составляющей с частотой 100 Гц от тока (а) и электросопротивления печного контура

фосфорит Каратау. Поэтому вязкость расплава, а следовательно, и электросопротивление на печах 24 МВ·А выше, чем на печах РКЗ-80Ф.

Кроме того, на немецких печах модуль кислотности и остаточное содержание  $P_2O_5$  в шлаке выше по сравнению с печами РКЗ-80Ф – соответственно 0,95 и 1,5 % против 0,90 и 1 %.

Как известно [1], с повышением содержания кремнезема, т.е. с повышением модуля кислотности, а также с увеличением содержания  $P_2O_5$ , в шлаке растет электросопротивление.

Именно эти два последних обстоятельства и ведут к повышенному заглублению электродов в реакционную зону. Следствием этого и является превалирующее воздействие вентильного эффекта контакта электрода с расплавом над вентильным эффектом электрической дуги переменного тока.

Это сопровождается изменением напряжения постоянной составляющей фазного напряжения и характера изменения относительного содержания гармонической составляющей с частотой 100 Гц от величины тока на печи 24 МВ·А по сравнению с печью 80 МВ·А.

### Выводы

1. Присутствие в гармоническом составе тока электрода рудно-термической печи

составляющей с частотой 100 Гц вызвано существованием вентильного эффекта электрической дуги переменного тока или контакта электрода с расплавом.

2. При существовании обоих вентильных эффектов результирующее значение относительного содержания в токе электрода гармонической составляющей с частотой 100 Гц зависит от распределения тока электрода между дугой и шунтирующим ее сопротивлением шихты или расплава.

3. Относительное содержание в токе электрода гармонической составляющей с частотой 100 Гц характеризует неравномерность нагрузки в соседних полупериодах.

4. Относительное содержание в токе электрода гармонической составляющей с частотой 100 Гц может быть использовано для оценки состава расплава и оценки положения рабочего конца электрода относительно этого уровня.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ершов В.А. Электротермия фосфора / В.А.Ершов, С.Д.Пименов. СПб: Химия, 1996. 248 с.
2. Педро А.А. О природе постоянной составляющей напряжения электрической дуги в печи для получения нормального электрокорунда // Промышленная энергетика. 1993. № 5. С.28-31.
3. Сергеев П.В. Энергетические закономерности рудно-термических электропечей, электролиза и электрической дуги. Алма-Ата: Изд-во Академии наук КазССР, 1963. 252 с.

4. *Сисоян Г.А.* Электрическая дуга в электрической печи. М.: Металлургия, 1974. 304 с.

5. Электротермические промышленные печи. Дуговые печи и установки специального нагрева: Учебник для вузов / Под ред. А.Д.Свечанского. М.: Энергоиздат, 1981, 296 с.

#### REFERENCES

1. *Ershov V.A., Pimenov S.D.* Elektroterm of phosphorus. Saint Petersburg: Himiya, 1996. 248 p.

2. *Pedro A.A.* About a nature of direct component of an electric arc phase voltage in the normal corundum furnace. *Promyshlennaya energetika*. 1993. N 5. P.28-31.

3. *Sergeev P.V.* Ore smelting furnaces, electrolysis and electric arc power regularities. Alma-Ata: Publishing House of the Academy of Sciences of the Kazakh SSR, 1963. 252 p.

4. *Sisoyan G.A.* The electric arc in an electric furnace. Moscow: Metallurgiya, 1974. 304 p.

5. Thermal-electric oven. Electric arc furnace and the installation of a special heating: textbook for high schools / Ed. by A.D.Svechanskiy. Moscow: Energoizdat, 1981. 296 p.

**И.И.БЕЛОГЛАЗОВ**, аспирант, *filosofem@mail.ru*  
Санкт-Петербургский государственный горный университет

**I.I.BELOGLAZOV**, post-graduate student, *filosofem@mail.ru*  
Saint Petersburg State Mining University

## РАСЧЕТ КИНЕТИКИ ХИМИЧЕСКИХ И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРВАЛЬНОГО МЕТОДА С ЦЕЛЬЮ КОНТРОЛЯ ИССЛЕДУЕМЫХ ПРОЦЕССОВ

В статье сформулирован единый подход к вопросу о переносе кинетических уравнений различной степени сложности, которые описывают кинетику гомогенных и гетерогенных химических процессов, происходящих в металлургических установках.

Этот факт имеет большое практическое значение, так как использование уравнений исключает субъективность в определении значений параметров и управления металлургическими процессами.

**Ключевые слова:** кинетические уравнения, химический процесс, симплексно-интервальный метод.

## THE CALCULATION OF THE KINETICS OF CHEMICAL AND METALLURGICAL PROCESSES FOR THE PURPOSE OF THE CONTROL AT USE OF THE INTERVAL METHOD

In the present article is formulated a unified approach to the question of the transposition of the kinetic equations of various degrees complexity which describe the kinetics homogeneous and heterogeneous chemical processes, which take place in the metallurgical equipment.

This situation fact has a considerable practical importance because the use of equations excludes subjectivity in the determination of the values of parameters and control of the metallurgical processes.

**Key words:** kinetic equations, chemical process, the simplex-interval method.

Для описания закономерностей протекания различных химико-технологических процессов широко используются статистические уравнения (например, уравнения химической кинетики; функций распределения времени пребывания частиц в аппарате; распределения частиц по крупности и т.д.). Значения констант и параметров, входящих в эти уравнения, определяются различными методами, причем наибольший практический интерес представляют методы, в которых значения параметров уравнений можно определить ограниченным числом экспериментальных точек. Применение интервального метода позволяет получить симплексно-интервальные уравнения, которые могут быть эффективно использованы для контро-

ля значений параметров технологических процессов.

Большое разнообразие методов, применяемых для определения параметров, входящих в статистические уравнения, связано с отсутствием единого подхода к решению этой достаточно сложной задачи. Данное положение обусловлено сложным характером уравнений, которые не решаются в общем виде относительно определяемых параметров. Для устранения указанных затруднений широко используются искусственные приемы, позволяющие получать уравнения, в которых каждый из рассматриваемых параметров выражается независимо от других параметров, входящих в исследуемую зависимость. Однако отсутствие

единого подхода к преобразованию статистических уравнений в форму, удобную для определения их констант, ограничивает возможность любого из существующих методов рамками одного конкретного типа химического или металлургического технологического процесса.

С целью устранения указанного недостатка существующих методов в настоящей работе рассмотрено применение симплексно-интервального метода для преобразования статистических уравнений различной степени сложности в удобную форму. Это позволит провести практические инженерные расчеты по определению значений констант и параметров, входящих в эти уравнения, а также организовать эффективный контроль за ходом технологического процесса [1-6].

В соответствии с симплексно-интервальным методом статистические уравнения, описывающие закономерности кинетики химических и металлургических процессов, могут быть преобразованы в безразмерную форму при использовании симплексов подобия, отвечающих нескольким значениям  $y_i$  и  $x_i$ , выбранным на экспериментальной кривой  $y_i = \varphi(x_i)$ , описывающей исследуемый технологический процесс. Так, например, для двух любых значений функций  $c_i$  и  $c_{i+1}$ , соответствующих двум значениям аргумента  $\tau_i$  и  $\tau_{i+1}$ , определенных по экспериментальной кривой,  $\tau_i = \varphi(c_i)$  и  $\tau_{i+1} = \varphi(c_{i+1})$ .

Для интервала  $\Delta\tau = \tau_{i+1} - \tau_i$  функциональная зависимость  $\Delta\tau = f(c)$  и  $S_c = f(c)$  имеет вид

$$\Delta\tau = \tau_{i+1} - \tau_i = \varphi_1(\tilde{n}_i; \tilde{n}_{i+1}), \quad (1)$$

$$S_{\tilde{n}} = \tau_{i+1} / \tau_i = \varphi_2(\tilde{n}_i; \tilde{n}_{i+1}). \quad (2)$$

Совместное решение уравнений (1)-(2) позволяет получить симплексно-критериальную зависимость, описывающую закономерности исследуемого технологического процесса.

Рассмотрим возможность применения симплексно-интервального метода для преобразования уравнений, описывающих за-

кономерности металлургических и химических процессов на следующих примерах.

1. Для реакции нулевого порядка, закономерности которой описываются кинетическим уравнением ( $n = 0$ ),

$$\frac{c}{c_0} = 1 - k_0 \frac{\tau}{c_0}, \quad (3)$$

где  $c_0$  и  $c$  – соответственно концентрации целевого компонента в момент времени  $\tau = 0$  и  $\tau$ ;  $k_0$  – константа скорости реакции нулевого порядка.

Определим интервальные характеристики  $\Delta\tau$  и  $\Delta c$ . Симплексно-критериальное уравнение для рассматриваемого случая будет иметь вид

$$\frac{\Delta c}{\Delta\tau} = k_0. \quad (4)$$

2. Для реакции первого порядка ( $n = 1$ )

$$\frac{c}{c_0} = \exp(-k_1\tau), \quad (5)$$

где  $k_1$  – константа реакции первого порядка.

Значения интервальных характеристик для двух любых точек, лежащих на кинетической кривой,

$$\Delta\tau = (1/k_1) \ln S_c^{-1} \quad (6)$$

и

$$\Delta c = c_0 = (S_c^{S_{\tau}/(S_{\tau}-1)} - S_c^{1/(S_{\tau}-1)}). \quad (7)$$

Объединяя зависимости (6) и (7), находим

$$\frac{\Delta c}{\Delta\tau} = k_1 c_0 (S_c^{S_{\tau}/(S_{\tau}-1)} - S_c^{1/(S_{\tau}-1)}) / \ln S_c.$$

3. Для реакций, имеющих порядок  $n > 1$ , кинетическая функция

$$\frac{c}{c_0} = \left( \frac{1}{1 + (n-1)k_n c_0^{n-1} \tau} \right)^{1/(n-1)},$$

где  $k_n$  – константа реакции  $n$ -го порядка, имеет вид

$$\Delta\tau = \left[ \frac{1}{(n-1)k_n c_0^{n-1}} \right] \frac{(1 - S_c^{n-1})(S_{\tau} - 1)}{S_{\tau} S_c^{n-1} - 1}$$



и

$$\Delta c = c_0 \frac{(S_\tau S_c^{n-1} - 1)^{1/(n-1)} (S_c - 1)}{(S_\tau - 1)^{1/(n-1)} S_c}.$$

Соответственно величину  $\Delta c / \Delta \tau$  определим по уравнению

$$\frac{\Delta c}{\Delta \tau} = (n-1) k_n c_0^n \frac{(S_\tau S_c^{n-1} - 1)^{n(n-1)} (1 - S_c)}{(S_\tau - 1)^{n(n-1)} (1 - S_c^{n-1}) S_c};$$

$$(n-1) k_n \Delta \tau \Delta c^{n-1} = \left(1 - S_c^{n-1}\right) \left(\frac{S_c - 1}{S_c}\right)^{n-1}.$$

Для определения величины  $c_0$  и порядка реакции  $n$  используется уравнение

$$c_0 = \Delta c S_c (S_\tau - 1)^{1/(n-1)} / (S_c - 1) (S_\tau S_c^{n-1} - 1)^{1/(n-1)};$$

$$n = 1 + \frac{1}{\ln S_c} \ln \left[ \frac{S_{\Delta \tau} (S_{\tau, i} - 1) - (S_{\tau, j} - 1)}{S_{\Delta \tau} S_{\tau, j} (S_{\tau, i} - 1) - S_{\tau, j} (S_{\tau, j} - 1)} \right],$$

где  $S_{\Delta \tau} = \Delta \tau_j / \Delta \tau_i$  – симплекс временного подобию для двух интервалов  $\Delta \tau_i$  и  $\Delta \tau_j$ .

4. Уравнение, описывающее закономерности кинетики гетерогенного процесса растворения твердых частиц, имеет вид

$$c_i / c_0 = (1 - T_i)^n = (1 - \tau_i / \tau_0)^n,$$

где  $n$  – показатель степени (постоянная величина);  $T = \tau_i / \tau_0$  – относительное время, равное отношению абсолютного времени  $\tau_i$  к времени полного (или условно полного) завершения процесса с требуемой  $\tau_0$ ;  $c_0$  и  $c_i$  – соответственно содержание извлекаемого компонента в моменты времени  $\tau_i = 0$  и  $\tau_i$ .

Симплексно-критериальное уравнение запишем в виде

$$\frac{\tau_0}{\Delta \tau} = \frac{S_\tau - S_c^{1/n}}{(1 - S_c^{1/n})(S_\tau - 1)};$$

$$\frac{\Delta c}{c_0} = \frac{(S_c - 1)(1 - S_\tau)^n}{(S_c^{1/n} - S_\tau)^n}.$$

Величину  $\Delta c / \Delta \tau$  определим по формуле

$$\frac{\Delta c}{\Delta \tau} = \frac{c_0}{\tau_0} \frac{(S_\tau - 1)(1 - S_c)^{n-1}}{(1 - S_c^{1/n})(S_c^{1/n} - S_\tau)^{n-1}}.$$

5. Кинетика широкого класса гетерогенных химических процессов описывается с помощью обобщенного топохимического уравнения Казеева – Ерофеева – Колмогорова:

$$c/c_0 = 1 - \exp(-k\tau n).$$

После определения интервальных характеристик симплексно-критериальное уравнение примет вид

$$k \Delta \tau^n = \frac{(S_\tau - 1)^n}{(S_\tau^n - 1)} \ln S_c^{-1};$$

$$c_0 = \Delta c \left( \frac{S_\tau}{S_c^{S_\tau^n - 1}} - \frac{1}{S_c^{S_\tau^n - 1}} \right)^{-1};$$

$$\frac{\Delta c}{\Delta \tau} = k^{1/n} c_0 \left( \frac{S_\tau^n}{S_c^{S_\tau^n - 1}} - \frac{1}{S_c^{S_\tau^n - 1}} \right) (S_\tau^n - 1)^{1/n} (S_\tau + 1) \ln^{1/n} S_c^{-1}.$$

6. Уравнение, полученное при использовании теории столкновений,

$$\frac{k_i}{k_0} = T_i^m \exp\left(-\frac{E}{RT_i}\right),$$

где  $k_i$  и  $k_0$  – константы скорости реакции для температур  $T_i$  и  $T_0$ ;  $E$  – энергия активации;  $R$  – газовая постоянная;  $m$  – показатель степени.

После нахождения интервальных характеристик получим симплексно-критериальное уравнение

$$\frac{R \Delta T}{E} = \frac{(S_T - 1)^2}{S_T \ln S_k S_T^{-m}}.$$

При  $m = 0$  из данного уравнения

$$\frac{R \Delta T}{E} = \frac{(S_T - 1)^2}{S_T \ln S_k}.$$

Таким образом, рассмотренные симплексно-интервальные уравнения могут быть использованы для определения параметров металлургических процессов. Вид получаемой зависимости зависит от характера кинетической кривой и типа математи-

ческого уравнения, применяемого для его описания. Рассмотренные выше уравнения позволяют производить расчеты на бесконечно малом интервале, а также на интервалах, имеющих достаточно большую величину, вследствие чего они могут описывать как дифференциальные, так и интегральные зависимости. Применение симплексно-интервального метода позволяет производить расчет параметров процесса при использовании ограниченного числа точек, в связи с чем симплексно-интервальные зависимости могут быть широко использованы в практике инженерных расчетов для эффективного контроля за ходом проведения исследуемого процесса.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Безденежных А.А.* Инженерные методы получения уравнения, описывающего скорость реакций и расчет кинетических констант. Л.: Химия, 1973. 206 с.
2. *Белоглазов И.Н.* Твердофазные экстракторы (инженерные методы расчета). Л.: Химия, 1985. 240 с.

3. *Белоглазов И.Н.* О некоторых особенностях моделирования гидродинамических процессов / И.Н.Белоглазов, Н.К.Белоглазов, М.И.Курочкина // Журнал прикладной химии. 1992. Т.65. № 5. С.1139-1146.

4. *Доброхотов Г.Н.* Процессы и оборудование для гидрометаллургической промышленности / Ленинградский горный институт. Л., 1978. 97 с.

5. *Романков П.Г.* Извлечение из твердых материалов / П.Г.Романков, М.И.Курочкина. Л.: Химия, 1983. 256 с.

6. *Эмануэль Н.М.* Курс химической кинетики / Н.М.Эмануэль, Д.Г.Кнорре. М.: Высшая школа, 1969. 432 с.

#### REFERENCES

1. *Bezdenzhnykh A.A.* Engineering methods for obtaining the equation describing reaction rates and calculating kinetic constants. Leningrad: Khimiya, 1973. 206 p.

2. *Beloglazov I.N.* Solid-phase extractors (engineering calculation methods). Leningrad: Khimiya, 1985. 240 p.

3. *Beloglazov I.N., Beloglazov N.K., Kurochkina M.I.* Some features of modeling of hydrodynamic processes // Journal of applied chemistry. 1992. Vol.65. N 5. P.1139-1146.

4. *Dobrokhotoy G.N.* Processes and equipment for hydrometallurgy manufactures / Leningrad State Mining Institute. Leningrad, 1978. 97 p.

5. *Romankov P.G., Kurochkina M.I.* Extraction from solid materials. Leningrad: Khimiya, 1983. 256 p.

6. *Emanuel N.M., Knorre D.G.* Chemical kinetics course. Moscow: Vyssh. Shkola, 1969. 432 p.

**А.О.СВИРИДЕНКО**, аспирант, *sviridenko\_ao@mail.ru*

*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

**С.А.БЕЛЯКОВ**, зам. начальника группы автоматизации, *rivs@rivs.ru*

*СПЗАО «ИВС», Санкт-Петербург*

**A.O.SVIRIDENKO**, post-graduate student, *sviridenko\_ao@mail.ru*

*Saint Petersburg State Mining University*

**S.A.BELYAKOV**, deputy head automation, *rivs@rivs.ru*

*«IVS» Co, Saint Petersburg*

## СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ ФЛОТАЦИИ РУД ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Описаны средства автоматизации, предназначенные для автоматической подачи реагентов в процесс пенной флотации с целью достижения максимального количества готового концентрата, а также для точного учета расхода реагентов, диагностики отказа питателей реагентов и прогнозирования остатка на конец смены. Изучены принципы работы установки дозирования реагентов УДР-РИФ в режиме локального регулирования и в составе АСУТП обогатительной фабрики.

**Ключевые слова:** флотация, обогащение, средства автоматизации.

## AUTOMATION MEANS IN TECHNOLOGICAL PROCESS OF FLOTATION OF ORES OF MINERALS

The description of the automation means intended for automatic giving of reagents in process of flotation for the purpose of achievement of a maximum quantity of a ready concentrate, and for the exact account of the expense of reagents, diagnostics of refusal of feeders and forecasting of the rest for the change end is given. The description of work of installation of reagents dispensing in a mode of local regulation and in structure ASUTP of concentrating factory is given.

**Key words:** flotation, concentrating, automation means.

Современные автоматизированные системы управления технологическим процессом (АСУТП) обогатительных фабрик являются сложными многоуровневыми комплексами на базе технических средств, включающих автоматические датчики технологических параметров, исполнительные органы и средства вычислительной техники. Развитые АСУТП охватывают все переделы обогатительного производства, начиная от приема руды и заканчивая отгрузкой готового концентрата.

Одним из этапов переработки руд полезных ископаемых является технологический процесс флотации – процесс разделения мелких твердых частиц (минералов),

основанный на различии их в смачиваемости водой. Увеличение объемов и расширение области применения флотации связано с пенной флотацией, при которой обработанные реагентами частицы выносятся на поверхность воды пузырьками воздуха, образуя пенный слой, устойчивость которого регулируется добавлением пенообразователей. Полученную пену сгущают и фильтруют, после чего получают готовый продукт – концентрат.

Средства автоматизации в технологическом процессе пенной флотации могут быть предназначены, например, для автоматической подачи (дозирования) реагентов в процесс флотации с целью достижения макси-

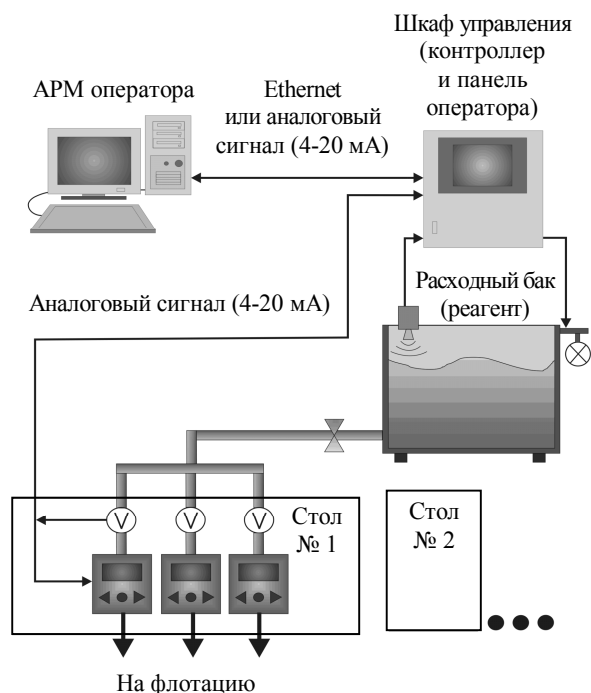


Рис.1. Структурная схема установки дозирования реагентов УДР-РИФ

мального количества готового концентрата. Дозирование реагентов по каждой точке подачи осуществляется в соответствии с заданием, устанавливаемым вручную с панели оператора, в функции от технологических параметров (расхода твердого вещества, остаточной концентрации реагентов в пульпе и т.п.) либо в соответствии с заданием, получаемым от верхнего уровня управления. Кроме этого, средства автоматизации позволяют вести точный учет расхода реагентов по каждой точке дозирования, диагностику отказа питателей реагентов по балансу заданного и фактического расхода реагентов, а также контролировать запас реагентов в емкости с возможностью прогнозирования остатка на конец смены.

Примером устройства, позволяющего осуществить все указанные функции, является установка дозирования реагентов УДР-РИФ, разработанная СП ЗАО «ИВС» (ЗАО «РИВС-проект»). Структурная схема установки представлена на рис.1.

Принцип действия установки следующий. Подача реагента осуществляется из расходного бака на вход напорного бака. Из напорного бака реагент поступает на вход

дозировочного коллектора, установленного снизу дозировочного стола.

Функция напорного бака – поддержание постоянного напора на входе в дозировочный коллектор путем поддержания уровня в баке. Устройством, регулирующим уровень в баке, является поплавковый клапан, расположенный на входе в бак. Дозировочный коллектор служит для подачи реагента на вход питателей, устанавливаемых на столешницу стола.

Предусмотрена подача четырех типов реагентов: сульфат алюминия ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , концентрация 5 %); талловое масло (ЖКТМ, концентрация 4 %); сода кальцинированная ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , концентрация 2 %); syquest 3223 (сайквест, концентрация 5 %).

В качестве питателей используются: для дозирования сульфата алюминия и сайквеста – насосы типа DME (DME-19, DME-48 и DME-60 производительностью соответственно 19, 48 и 60 л/ч, питание – переменное однофазное напряжение 220 В/50 Гц, управление – 4-20 мА); для дозирования таллового масла и соды кальцинированной – насосы типа DMX (DMX-765 производительностью 765 л/ч, питание – переменное трехфазное напряжение 380 В/50 Гц, управление с помощью частотного преобразователя). Питатели устанавливаются на столешницу дозировочного стола с помощью несущей конструкции из нержавеющей стали. Измерение расхода реагента производится с помощью электромагнитного расходомера. Диагностика отказов осуществляется за счет встраиваемых датчиков потока.

Для перекрытия подачи реагента на отдельные питатели предусмотрены шаровые краны. В коллекторах для насосов DME предусмотрено пять выпусков G1/2, для насосов DMX – три выпуска G3/4.

Для выдачи питания и управляющего воздействия на насосы DME и DMX используется шкаф управления. При этом управляющее воздействие для насосов DMX подается на входы преобразователей частоты, которые расположены в отдельных силовых шкафах. Корпус шкафа управления изготовлен из листовой углеродистой стали (толщина корпуса – 1,5 мм,

двери – 2,0 мм). Габариты по корпусу (Ш × В × Г) – 500 × 700 × 250 мм. Степень защиты для установленного внутри оборудования не ниже IP56.

Шкаф управления состоит из вводного автоматического выключателя, автоматических выключателей для питания насосов DME, контроллера, панели оператора. Внутри шкафа оборудование располагается на монтажной панели (оцинкованная сталь толщиной 3,0 мм). Часть оборудования (панель оператора) вынесена на лицевую панель.

Контроллер выдает управляющие воздействия на дозирочные насосы в соответствии с заданием, выставленным на панели оператора.

Установка дозирования реагентов УДР-РИФ может находиться в непосредственной близости от точек подачи реагентов. Это, во-первых, экологически более безопасно, так как позволяет осуществлять дозирование в изолированной зоне и вдали от рабочих мест персонала; во-вторых, сокращается время транспортировки реагентов, что способствует более быстрому воздействию на процесс и, соответственно, улучшению качества управления.

Таким образом, установка дозирования реагентов УДР-РИФ является эффективным средством автоматизации в технологическом процессе пенной флотации. В настоящее время подобные установки применяются на таких предприятиях, как обогатительная фабрика СП «Эрдэнэт» (Монголия), медная обогатительная фабрика Алмалыкского ГМК (Узбекистан), обогатительная фабрика Зыряновского ГОК (Казахстан), обогатительные фабрики Учалинского ГМК и комбината «Печенганикель» (Россия) и др.

Установка дозирования реагентов УДР-РИФ предполагает возможность работы как в режиме локального регулирования, так и в составе АСУТП обогатительной фабрики. В последнем случае, алгоритм работы установок можно рассмотреть на примере комплекса систем автоматизации. Блок-схема подобного комплекса представлена на рис.2.

Рудная пульпа с выхода мельниц под воздействием двух пар насосов (рабо-

чий / резервный) через задвижки двумя потоками подается в гидроциклоны. В гидроциклонах происходит разделение пульпы на мелкую и крупную фракции (слив и пески соответственно). Крупная фракция гидроциклонов возвращается на доизмельчение, а мелкая – подается во флотомашину. В процессе флотации образуются готовый концентрат и хвосты. Концентрат отправляется на последующую переработку, а хвосты поступают в хвостохранилище.

Задвижки служат для подачи пульпы от рабочего насоса и перекрытия трубопровода от резервного насоса.

Пробоотборники служат для отбора проб пульпы с частотой 2 раза в час для дальнейшего анализа на содержание металлов. Отбор проб производится со следующих продуктов гидроциклона: питания, слива (мелкая фракция) и песков (крупная фракция).

Контроль процесса флотации осуществляется с помощью датчиков технологических параметров: уровнемеров; pH-метров; кондуктометрических концентратомеров; датчика расхода; изотопных плотномеров. Информация с датчиков поступает в шкафы управления установок дозирования реагентов № 1 и 2, где обрабатывается в контроллерах, с помощью которых осуществляется дальнейшее управление дозированием реагентов в соответствии с заложенной программой с целью достижения максимального количества готового концентрата.

Управление происходит с помощью операторских панелей, расположенных на дверцах шкафов управления. Операторские панели обладают интуитивно-понятным интерфейсом, снабжены встроенной системой помощи.

Здесь установки дозирования реагентов состоят из шкафов управления – 2 шт.; силового шкафа (только для установки № 1); дозирочных столов – 4 шт. (в составе которых – каркас, коллектор, шаровые краны, столешница, распределительная коробка, рама, реле потока, дозирочные насосы); соединительных шлангов и рукавов.

В установке № 1 в качестве питателей реагентов используются насосы DMX,

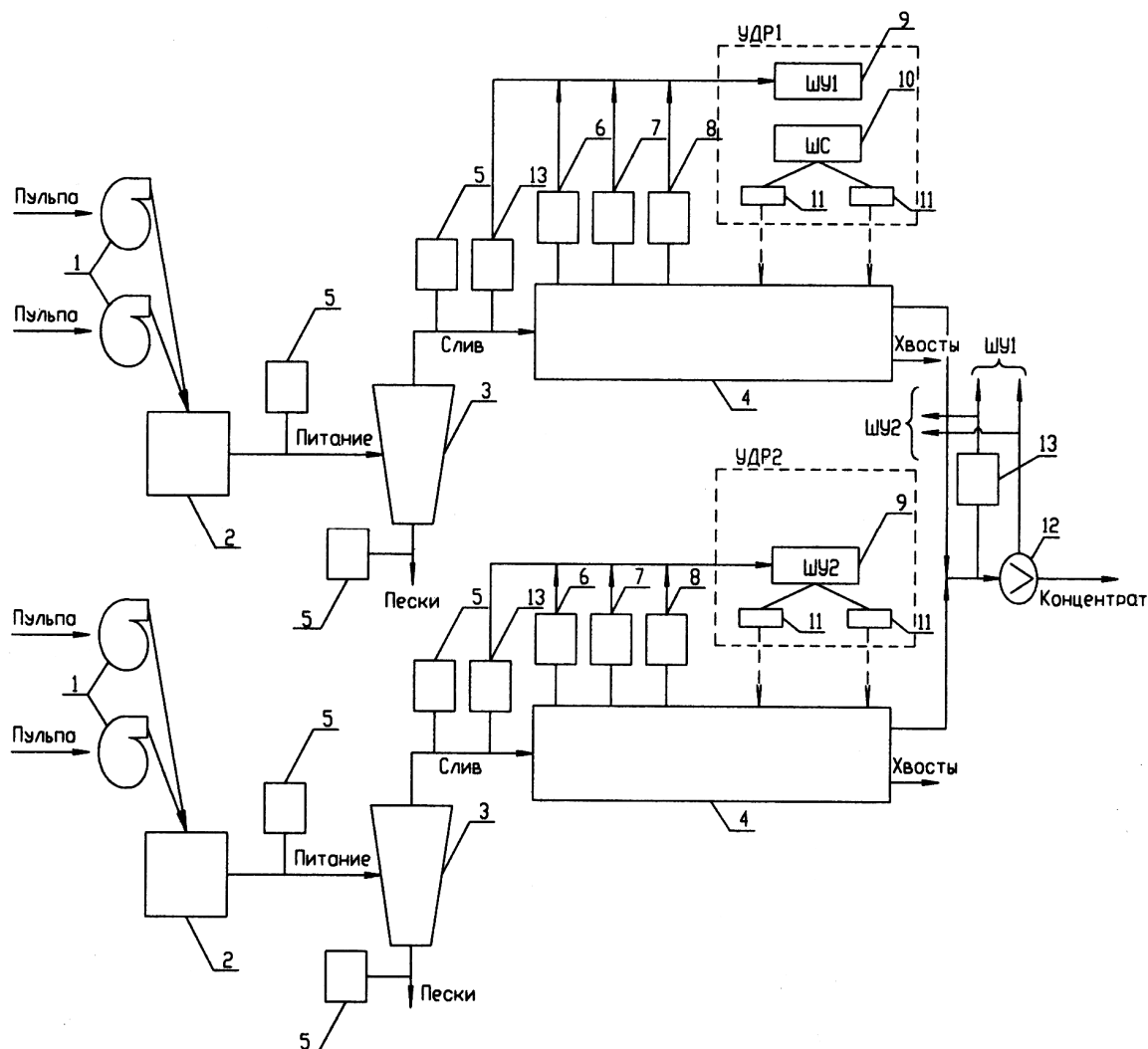


Рис.2. Блок-схема комплекса систем автоматизации обогатительной фабрики с использованием установок дозирования реагентов УДР-РИФ

1 – песковый насос; 2 – задвижка Tech Taylor; 3 – гидроциклон; 4 – флотомашина; 5 – пробоотборник ПРО-1А; 6 – уровнемер Gydroranger Plus; 7 – рН-метр DL 421; 8 – кондуктометрический концентратометр АЖЭ; 9 – шкаф управления (ШУ1, ШУ2); 10 – шкаф силовой (ШС); 11 – дозировочный стол; 12 – датчик расхода пульпы 55S3H; 13 – плотномер ПР 1027М

управление которыми осуществляется с помощью частотных преобразователей, установленных в силовом шкафу. В установке № 2 в качестве питателей реагентов используются насосы DME, управление которыми осуществляется сигналом 4-20 мА непосредственно из шкафа управления.

Реле потока находится на выходе дозировочных насосов и используется для диагностики работы насосов. Сигналы с реле потока также поступают в шкафы управления.

Информация о всех текущих состояниях технологического процесса передается от шкафов управления установок дозирования реагентов на автоматизированное рабочее место оператора.

Таким образом, использование установки дозирования реагентов в режиме локального регулирования или в составе АСУТП обогатительной фабрики позволяет эффективно контролировать параметры и управлять технологическим процессом пенной флотации руд полезных ископаемых.

**П.А.ПЕТРОВ**, канд. техн. наук, ассистент, (812)328-24-31  
Санкт-Петербургский государственный горный университет

**P.A.PETROV**, PhD in eng. sc., associate professor, (812)328-24-31  
Saint Petersburg State Mining University

## ТРЕХМЕРНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛА В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА С ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ОБОЖЖЕННЫМИ АНОДАМИ

Описана необходимость расчета теплового поля при проектировании и анализе эксплуатации электролизеров для получения алюминия. Рассчитан тепловой баланс электролизера. Построена трехмерная геометрическая модель электролизера с обожженными анодами, позволяющая изучать тепловые поля электролизной ванны.

**Ключевые слова:** тепловое поле, электролизер, геометрическая модель.

## 3D HEAT DISTRIBUTION IN THE CONSTRUCTION OF THE REDUCTION CELL WITH BURNED ANODES

The importance of heat field calculation for designing and analysis of aluminium reduction cells operation is described. The heat balance of the reduction cell was calculated. The 3D-geometry of the reduction cell with prebaked anodes was constructed. Given geometry helps to research the heat distribution of electrolyzer.

**Key words:** heat field, aluminium reduction cell, geometrical model.

Физико-химические процессы, проходящие в электролизной ванне, определяются температурным полем, взаимосвязанным с электрическим и магнитным полями, гидродинамикой электролита и металла. Направление и скорость движения расплава влияют на теплопередачу, потери металла, скорость растворения и транспорт глинозема, на форму рабочего пространства и срок службы ванн [1].

Тепловое поле в значительной степени воздействует на протекание процесса электролитического получения алюминия. Главными параметрами, определяющими правильную эксплуатацию электролизера, являются объем, форма гарнисажа и настыли, которые регулируются процессами теплопереноса. Нарушения энергетического режима проявляются резкими колебаниями длины и высоты настыли, колебаниями уровней ме-

талла и электролита, резкими изменениями химического состава, частотой анодных эффектов.

Алюминиевые электролизеры характеризуются периодической загрузкой в ванну материалов, вследствие чего тепловой режим этих агрегатов изменяется во времени. С помощью энергетических балансов можно проверять не только равенство прихода и расхода энергии, но и ее распределение в электролизере [2, 5]. Приведем результаты расчета теплового баланса электролизера с обожженными анодами на силу тока 100 кА:

Приход:

• от электрической энергии постоянного тока	405600/92,97
• реакция вторичного окисления алюминия	7612/1,74
• теплота анодных газов	23061/5,29

Всего 436272/100,00

Расход:

• разложение глинозема	180325/41,54
• нагрев и растворение глинозема	20079/4,63
• нагрев анода	4484/1,03
• реакция Будуара	4348/1,00
• энергия побочных процессов	386/0,09
• тепловые потери	224445/51,71
Всего	434066/100,00
Невязка	2206/0,51

*Примечание.* В числителе – в ваттах, в знаменателе – в процентах.

Объем алюминиевого электролизера, для которого производился расчет баланса, ограничивался поверхностями днища и бортовых стенок катодного кожуха, внешними поверхностями анода.

Тепловые балансы являются завершающим этапом в анализе сложной схемы происходящих в электролизере процессов, обеспечивают при правильной методике со-

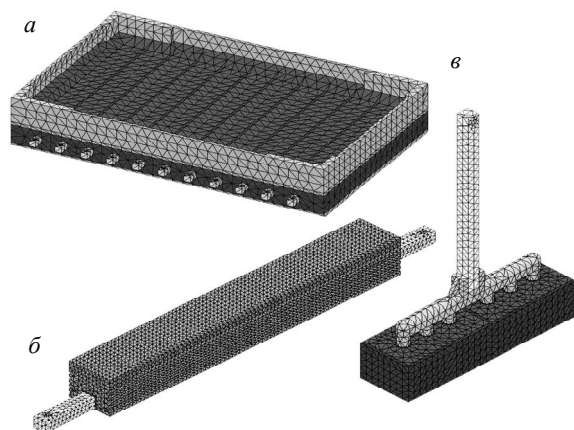


Рис.1. Элементы конструкции электролизера: а – шахта электролизера; б – катодный блок; в – анодное устройство

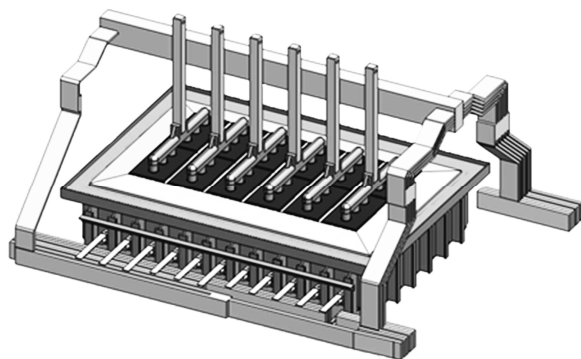


Рис.2. Трехмерная геометрическая модель электролизера с обожженными анодами

ставления баланса возможность количественной итоговой оценки явлений тепломассопереноса, особенностей конструкции и технологии [6, 7].

При проведении теплового расчета должны соблюдаться следующие условия [3]:

1. Изотерма ликвидуса должна соответствовать оптимальной форме рабочего пространства.

2. Изотерма солидуса (850-880 °С) должна проходить ниже катодных секций по всей площади проекции анода.

3. Расположение изотермы 650 °С не должно способствовать протеканию металла.

Для оптимизации задач алюминиевого производства целесообразно использовать моделирование как важный инструмент развития технологического режима алюминиевого производства. Математическое моделирование и компьютерный эксперимент являются эффективными методами исследования и оптимизации процессов электролитического получения алюминия. Разработанные на основе математического описания модели позволяют анализировать технологический режим объекта, определять различные варианты оптимизации конструктивных и технологических параметров, находить закономерности работы электролизера и способы влияния на показатели процесса [4].

При моделировании процессов, протекающих в электролизере, для более адекватных расчетов целесообразно применять трехмерную модель физических полей. Современные вычислительные средства вполне могут справиться с поставленной задачей численного решения физических полей методом конечных элементов. В результате определяется не только распределение температуры, но и теплового потока, а следовательно, можно рассчитывать эффективность предлагаемых изменений в технологии на стадии проектирования и в процессе эксплуатации.

Для изучения теплового поля была построена блочная объемная геометрия электролизера, позволяющая рассчитывать распределение тепла в цельной конструк-



ции и в отдельных элементах электролизной ванны: анодах, катодных блоках, бортовой футеровке, кожухе и т.д. (рис.1, 2). Моделирование выполнялось в пакете системы автоматизированного проектирования SolidWorks.

Построенная геометрия импортировалась в среду SolidWorks Simulation (COSMOS/M), в которой была создана достаточно мелкая сетка, необходимая для проведения корректных расчетов, а также были занесены важные для решения краевые условия. В результате моделирования определяется распределение температур в изучаемом объеме электролизера.

Таким образом, математическая модель тепловых процессов позволяет

- проводить анализ направления и значений потоков тепла в любом элементе электролизера;
- выявлять зависимости физических процессов от технологических параметров;
- проводить анализ различных технических решений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Галевский Г.В. Экология и утилизация отходов в производстве алюминия / Г.В.Галевский, Н.М.Кулагин, М.Я.Минцис. Новосибирск: Наука, 1997. 159 с.
2. Ветюков М.М. Электрометаллургия алюминия и магния: Учебник для вузов / М.М.Ветюков, А.М.Цыплаков, С.Н.Школьников. М.: Металлургия, 1987. 320 с.

3. Михеев А.Е. Модернизация футеровки электролизеров при технологии процесса на литиевом электролите / А.Е.Михеев, С.А.Панин, А.И.Карпенко, А.С.Рубан // Цветные металлы. 2006. № 5. С.33-35.

4. Сысоев А.В. Математическое моделирование электрических и тепловых полей в алюминиевых электролизерах с боковым токоподводом / А.В.Сысоев, Ю.П.Зайков, С.А.Щербинин и др. // Цветные металлы. 1998. № 1. С.70-72.

5. Панов Е.Н. Тепловые процессы в электролизерах и миксерах алюминиевого производства / Е.Н.Панов, Г.Н.Васильченко, С.В.Даниленко и др. / Под общ. ред. Б.С.Громова. М.: Изд. дом «Руда и металлы», 1998. 256 с.

6. Piskazhova T.V., Mann V.C. The use of a dynamic aluminium cell model // JOM. 2006. N 2. P.48-52.

7. Arkhipov G.V. The mathematical Modelling of Aluminium Reduction Cells // JOM. 2006. N 2. P.54-56.

#### REFERENCES

1. Galevskiy G.V., Kulagin N.M., Mintsis M.Ya. Ecology and waste treatment in the aluminium production. Novosibirsk: Nauka, 1997. 159 p.
2. Vetyukov M.M., Tsyplakov A.M., Shkolnikov S.N. Electrometallurgy of aluminium and magnesium. Moscow: Metallurgy, 1987. 320 p.
3. Mikheev A.E., Panin S.A., Karpenko A.I., Ruban A.S. Modernization of cell lining at the lithium electrolyte technology // Nonferrous Metals. 2006. N 5. P.33-35.
4. Sysoev A.V., Zaikov Yu.P., Shcherbinin S.A. et al. Mathematical simulation of electric and heat fields for electrolyzers with side feed // Nonferrous Metals. 1998. N 1. P.70-72.
5. Panov E.N., Vasilchenko G.N., Danilenko S.V. Thermal processes in the electrolyzers and mixers of aluminium production / Edit by B.S.Gromov. Moscow: Ore and Metals, 1998. 256 p.
6. Piskazhova T.V., Mann V.C. The use of a dynamic aluminium cell model // JOM. 2006. N 2. P.48-52.
7. Arkhipov G.V. The mathematical Modelling of Aluminium Reduction Cells // JOM. 2006. N 2. P.54-56.

**П.В.ИВАНОВ**, канд. техн. наук, ассистент, *skript@gmail.com*  
**А.В.БОЙКОВ**, студент, 328-82-56  
*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

**P.V.IVANOV**, PhD in eng. sc., assistant lecturer, *skript@gmail.com*  
**A.V.BOIKOV**, student, 328-82-56  
*Saint Petersburg State Mining University*

## ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ

Влияние компьютерных технологий на все сферы деятельности в настоящее время колоссально. Внедрение инновационных идей позволяет упростить производственный процесс, обезопасив его и повысив экономическую выгоду. Одним из таких локомотивов является система технического зрения «умная камера», способная выполнять поставленные перед ней задачи разнообразного спектра.

**Ключевые слова:** автоматизация, техническое зрение.

## SPHERES OF USING TECHNICAL VISION

Influence of computer technology in all spheres of activity currently tremendously. Introduction of innovative ideas to simplify the manufacturing process, will protect and increase economic benefits. One of these locomotives is a system of technical vision: «smart camera» capable of performing its task, whose spectrum is diverse.

**Key words:** automation, technical vision.

Нынешний век – это время автоматизации и роботизации высокого уровня. Примером высоких технологий может служить машинное зрение, представляющее собой относительно молодую отрасль, но уже сейчас имеющую огромное распространение во всех областях жизнедеятельности человека: от систем обработки текстовых печатных документов и до распознавания лиц человека или его жестов.

Простым примером применения машинного зрения в обычной жизни может служить система обнаружения и считывания штрих-кода. Штриховой код – наиболее распространенный способ распознавания товаров. Штрих-код – это последовательность черных и белых полос, представляющая некоторую информацию в удобном для считывания техническими средствами виде. В этом случае происходит сканирование определенной линии в искомой области, а за-

тем расчет ширины штрихов вдоль заданной траектории. Однако такие «линейчатые» штрих-коды обладают рядом неблагоприятных факторов: низкой помехоустойчивостью и относительно малым объемом хранимой информации. Поэтому существуют коды не только линейчатого типа. Так, в торговле встречаются двумерные коды, представляющие собой совокупность цифр, букв и штрихов.

Однако техническое зрение применяется не только в области торговли, но и активно в промышленности.

Измерение объема круглых лесоматериалов чрезвычайно важно в области лесозаготовки и деревообрабатывающей промышленности. Лесоматериалы являются востребованным товаром во всем мире, а следовательно, их качество и геометрические параметры партии подвергаются серьезному контролю. Так, наиболее распро-

страненный сейчас ручной метод оценки показывает результат с погрешностью до 30 %. В то же время новые методы дистанционного анализа имеют лишь 5 %.

Также промышленность активно использует машинное зрение для проверки собранных компьютерных плат, сварки швов, качества кристаллов, сортировки предметов, находящихся на конвейерной ленте, и т.д.

Область применения машинного зрения настолько широка, что включает в себя даже медицину: компьютерная томографическая ангиография, рентген, УЗИ и т.п.

Компьютерная томографическая ангиография позволяет получить подробное изображение кровеносных сосудов и оценить характер кровотока. После проведения компьютерной томографии с внутривенным контрастным усилением производится анализ полученных данных с применением специальных алгоритмов реконструкции изображений. Преимущество данного метода: исключение риска возникновения осложнений от хирургических манипуляций, необходимых при обычной ангиографии, незначительная лучевая нагрузка на пациента. КТ-ангиография позволяет получить послойную серию изображений кровеносных сосудов; на основе полученных данных посредством компьютерной постобработки с 3D-реконструкцией строится трехмерная модель кровеносной системы.

В ГосНИИАС были разработаны многочисленные системы обнаружения препятствия и позиционирования транспортного средства на дороге, определения государственного номера автомашин в режиме реального времени.

Модуль распознавания автомобильных номеров автоматически определяет и распознает номера автомобилей в поле зрения камеры. Он позволяет фиксировать и сохранять в базе данных распознанный номер, а также изображение транспортного средства, часть кадра с номерным знаком и время регистрации. Таким образом формируется база всех транспортных средств, прошедших через зону контроля, с возможностью добавления текстового комментария к каждому распознанному номеру.

Венцом использования технического зрения являются разработки в области распознавания жестов рук человека и биомеханических исследований.

Системы для биомеханических исследований предназначены для регистрации и анализа характеристик движения человека. Основной задачей является высокоскоростная съемка траекторий движения различных частей тела, слежение за положением конечностей и выделение характерных черт лица человека. Все эти параметры можно использовать в охранных системах и при создании человекоподобных роботов.

На основе показанных примеров можно говорить о техническом зрении как о полезном инструменте во всех областях жизни, а также ощутимой экономической выгоде при его использовании, наравне с ювелирной точностью и простотой использования. Несмотря на молодой возраст, данная наука чрезвычайно востребована и перспективна. В будущем – это создание андроидов, способных сравниться с человеком по интеллектуальным способностям, превзойти по физическим параметрам.

**Н.И.КОТЕЛЕВА**, канд. техн. наук, ассистент, (812) 328-82-56  
*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

**N.I.KOTELEVA**, PhD in eng. sc., assistant lecturer, (812) 328-82-56  
*Saint Petersburg State Mining University*

## НОВЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ ПРОЦЕССОМ ШАХТНОГО ОБЖИГА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ИЗВЕСТНЯКА

При разработке систем управления металлургическими процессами все чаще используют специальные методы теории управления, к которым относятся методы оптимального, нейронечеткого и адаптивного управления. Прежде всего это связано с повышением сложности задач, предъявляемых в процессе управления. В статье представлены результаты применения нейросетевых методов при разработке автоматизированной системы управления процессом шахтного обжига известняка.

**Ключевые слова:** шахтная печь, система управления, нейронная сеть.

## THE NEW APPROACH TO CONTROL OF THE METALLURGICAL LIMESTONE SHAFT KILNING PROCESS

Today at management system engineering by metallurgical processes used to special methods of the control theory such as optimal, neuro-fuzzy and adaptive methods. First of all, it is connected with increase of problems complexity maintained in control process. In article possibility of application of neural networks is considered at improvement of a control system by process of mine roasting of limestone, are described the neural network scheme controls and the basic stages of its construction.

**Key words:** shaft kiln, control system, neural network.

В настоящее время в практике работы металлургических комбинатов при управлении процессами шахтного обжига известняка используются так называемые локальные автоматизированные системы. Такие системы позволяют успешно решать задачи стабилизации одного (реже двух-трех) параметра процесса. При использовании такого рода систем эффективность управления объектом в целом очень сильно зависит от действий оператора. При этом различные проведенные исследования работы операторов показывают, что управление часто ведется ими нерационально ввиду ограниченных возможностей человека, который не в состоянии контролировать и анализировать одновременно большое количество переменных факторов [3]. В классической тео-

рии управления, на которой основываются современные автоматизированные системы управления технологическим процессом шахтного обжига известняка, обозначенные проблемы решаются с помощью математических моделей, реализуемых на основе предположений о линейности систем [1]. Однако эти модели адекватны лишь в некоторой ограниченной области и в полной мере не могут отражать действительные физические свойства таких сложных объектов, к которым относится шахтная печь для обжига известняка, ввиду наличия в реальной системе нелинейных характеристик, множественных обратных связей, неконтролируемых внешних факторов, сложных для моделирования динамических элементов и других факторов, затрудняющих реализацию

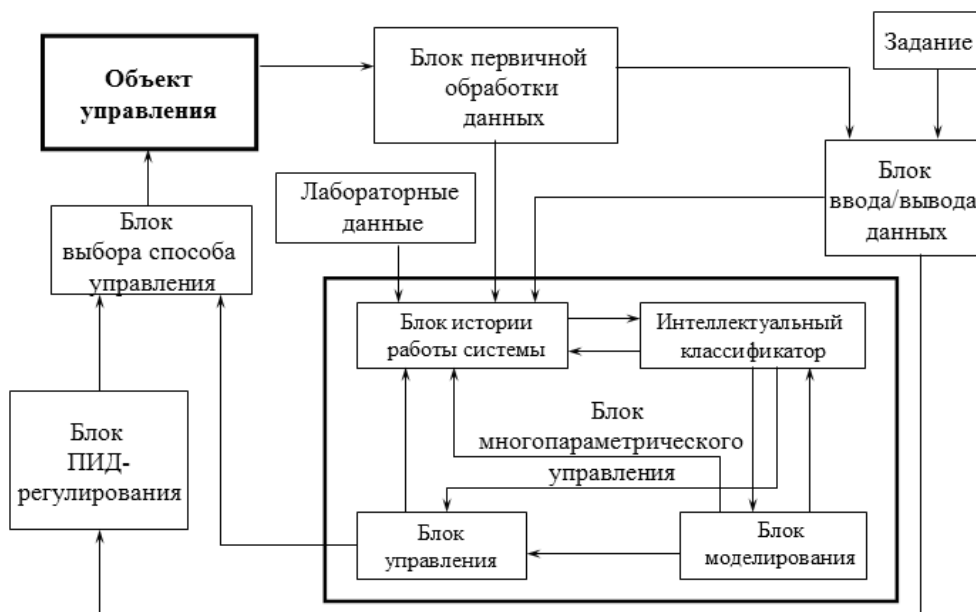


Рис. 1. Структурная схема автоматизированной системы управления процессом шахтного обжига известняка с применением нейросетевых алгоритмов

управления. В связи с этим возникает необходимость усовершенствования существующих или поиска новых способов создания алгоритмов управления процессом шахтного обжига известняка, что будет способствовать росту эффективности управления и снижению влияния оператора на ход технологического процесса.

Шахтная печь относится к классу сложных объектов управления с характерными для него нелинейностью, неоднозначностью, нестационарностью характеристик, большими транспортными и переходными запаздываниями, многосвязанностями каналов управления, высоким уровнем контролируемых и неконтролируемых возмущений, неполного контроля параметров и др.

Получение качественно обожженной извести напрямую связано с правильным выбором температурного режима работы шахтной печи. Основными причинами отклонения температуры от заданных значений являются изменение качества известняка и нарушение распределения материалов и газов по сечению печи. Компенсация колебаний температуры осуществляется, в основном, за счет изменения количества топлива, подводимого к горелкам, а также за

счет изменения производительности по извести [2]. Целью управления процессом шахтного обжига известняка является стабилизация температурного режима работы печи. При этом шахтная печь как объект управления обладает большой инерционностью по отдельным каналам воздействий и запаздыванием, и традиционные системы управления на основе ПИД-регуляторов не всегда способны достигать заданной цели управления. Для улучшения качества управления процессом шахтного обжига известняка предлагается использовать структуру автоматизированной системы управления на основе нейросетевых алгоритмов (рис.1).

Автоматизированная система управления процессом шахтного обжига известняка с применением нейросетевых алгоритмов выполнена в виде информационно-вычислительного комплекса и состоит из следующих основных блоков (рис.1): объект управления; блок первичной обработки данных, осуществляющий преобразование данных, полученных с объекта управления в форму, определенную пользователем; блок ввода / вывода данных или графический интерфейс пользователя, осуществляющий взаимодействие пользователя и системы, на который приходит

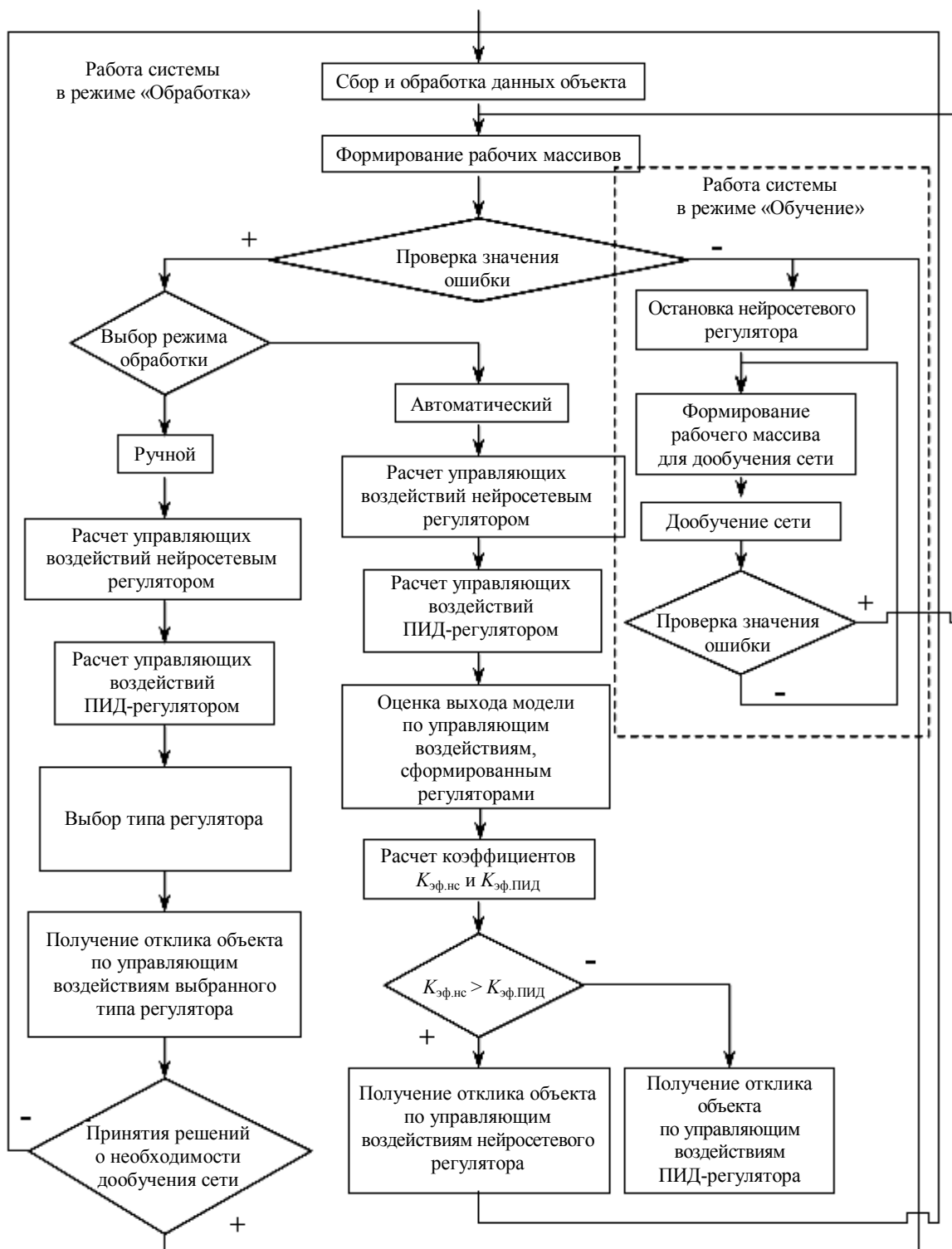


Рис.2. Блок-схема алгоритма работы автоматизированной системы управления процессом шахтного обжига известняка

задание; блок реализации алгоритмов ПИД-регулирования, где на основе показаний одного или нескольких датчиков формируется

единичное управляющее воздействие на исполнительный механизм; блок многопараметрического управления, состоящий из че-

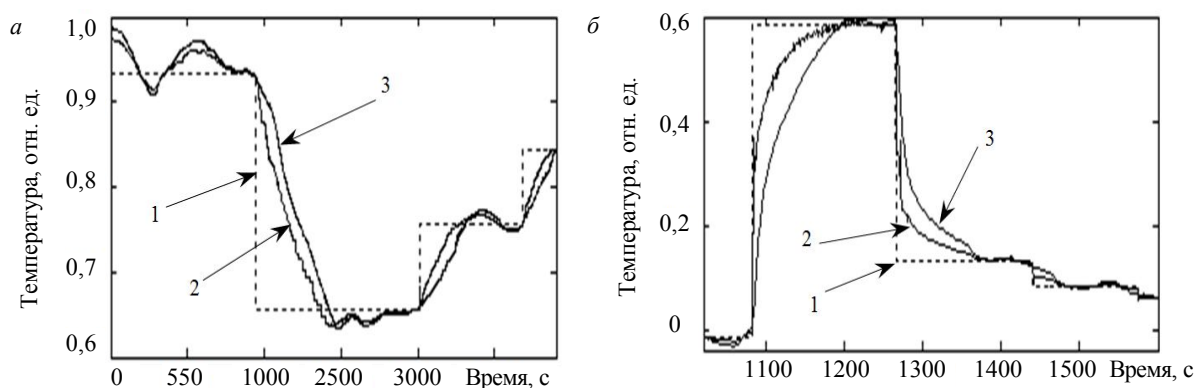


Рис.3. Результаты работы системы управления: а – в зоне обжига; б – в зоне охлаждения  
1 – сигнал задания; 2 – расчетные значения (реакция разработанной системы на задание); 3 – фактические значения (реакция существующей системы на задание)

#### Оценка качества управления

Параметр	Номер выхода нейронной сети	$G$ , %	$t_p$ , мин	$P$	СКО
Выход 1	Фактические значения	3,993	4,9	0,993	0,0082
	Расчетные значения	1,208	3,4	0,995	0,0039
	Оценка изменения показателей, %	69,75	30,61	0,2	52,44
Выход 2	Фактические значения	15	8,32	0,671	0,2046
	Расчетные значения	8	5,14	0,817	0,158
	Оценка изменения показателей, %	46,67	38,22	17,87	22,78
Выход 3	Фактические значения	2,225	4,7	0,753	0,1502
	Расчетные значения	1,83	3,3	0,861	0,0716
	Оценка изменения показателей, %	17,75	29,79	12,54	52,33
Выход 4	Фактические значения	8,56	1,7	0,922	0,1126
	Расчетные значения	4,11	1,2	0,987	0,0885
	Оценка изменения показателей, %	51,99	29,41	6,58	21,4
Выход 5	Фактические значения	1,5	0,3	0,853	0,1341
	Расчетные значения	0,7	0,21	0,932	0,0654
	Оценка изменения показателей, %	53,33	30	8,48	51,23

тырех основных блоков: блока истории работы системы, осуществляющего сбор основных параметров системы и формирование различных выборок данных для отдельных блоков системы, а также расчет коэффициента эффективности работы системы, интеллектуального классификатора, осуществляющего выбор оптимального режима работы системы, блока моделирования, выполняющего оценку состояния объекта с точки зрения изменения тактики и стратегии поведения и блока управления, выдающего управляющие воздействия; блока выбора способа управления, который, используя

оценку, полученную от блока моделирования, выбирает на основании некоторого критерия способ управления для каждого управляемого параметра системы.

На рис.2 представлена блок-схема алгоритма работы предлагаемой автоматизированной системы управления процессом шахтного обжига известняка.

Для проверки эффективности работы системы был проведен вычислительный эксперимент, в ходе которого получена оценка качества управления по пяти параметрам: выход 1 – температура в зоне подогрева; выход 2 – температура в нижней

части зоны обжига; выход 3 – температура в верхней части зоны обжига; выход 4 – температура в зоне охлаждения; выход 5 – суммарное содержание СаО и MgO в известии.

Для проведения эксперимента были взяты данные с действующей шахтной печи за период ее работы 1 мес. с интервалом 1 мин.

На рис.3 представлены результаты работы автоматизированной системы управления по двум параметрам – температуре в зоне обжига (рис.3, а) и в зоне охлаждения (рис.3, б).

Качество управления оценивалось по величине перерегулирования ( $G$ ), времени переходного процесса ( $t_p$ ), плотности вероятности внутри границ допустимых пределов изменения параметра ( $P$ ) и среднеквадратическому отклонению ошибки регулирования (СКО). Результаты оценки качества управления представлены в таблице.

Полученные значения подтверждают повышение качества по величине перерегулирования на 15 %, времени переходного процесса на 25 %, плотности вероятности внутри границ допустимых пределов изменения параметра на 0,2 % и среднеквадратическому отклонению ошибки регулирования на 20 %.

Получив положительные результаты при решении поставленной задачи, можно говорить о целесообразности применения

нейронных сетей при решении подобных и более сложных задач, связанных с управлением процессом шахтного обжига известняка. Кроме того, поскольку применение нейронной сети позволило решить данную задачу значительно быстрее и проще традиционных методов, то можно говорить об успешной интеграции подобных алгоритмов в различные схемы управления.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Анхимюк В.Л. Теория автоматического управления / В.Л.Анхимюк, О.Ф.Опейко, Н.Н.Михеев. Минск: Дизайн ПРО, 2000.
2. Голубев В.О. Исследование процесса обжига металлургического известняка в шахтной печи // Записки Горного института. 2006. Т.169.
3. Еременко Ю.И. Автоматизация управления шахтными печами цеха металлзации с использованием динамической экспертной системы // Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. № 4.

#### REFERENCES

1. Ankhimuk V.L., Opeiko O.F., Mikheev N.N. Automatic control theory. Minsk: Design PRO, 2000.
2. Golubev V. Research of process of roasting of metallurgical limestone in the mine furnace // Notes of Mining institute. 2006. Vol.169.
3. Eremenko U.I. Management automation by mine furnaces of shop of metallization with use of dynamic expert system // Mechatronics, automation, control. 2004. N 4.



**А.В.СПЕСИВЦЕВ**, канд. техн. наук, доцент, ведущий специалист, sav2050@gmail.com  
ЗАО «Технолинк», Санкт-Петербург

**И.И.БЕЛОГЛАЗОВ**, аспирант, filosofem@mail.ru

Санкт-Петербургский государственный горный университет

**И.Т.КИМЯЕВ**, канд. техн. наук, руководитель проектов

ООО «Микротест», Москва

**A.V.SPESIVTSEV**, PhD in eng. sc., associate professor, leading expert, sav2050@gmail.com  
«Technolink» Co, Saint Petersburg

**I.I.BELOGLAZOV**, post-graduate student, filosofem@mail.ru

Saint Petersburg State Mining University

**I.T.KIMYAEV**, PhD in eng. sc., head of project

«Microtest» Co, Moscow

## ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИНФОРМАЦИОННЫХ КАНАЛОВ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ПЕЧЬЮ КИПЯЩЕГО СЛОЯ

Одной из основных проблем моделирования пирометаллургических процессов вообще и обжига в кипящем слое в частности является выбор оптимальной совокупности определяющих факторов функционирования объекта.

Общей тенденцией в эксплуатации и управлении сложными объектами является выработка и принятие решения исключительно человеком. При этом правильность принятия решения во многом зависит от адекватной диагностики технического состояния объекта. Таким образом, возможность эксплуатации объекта полностью определяется и его техническим состоянием на данный момент времени, и правильностью принятия решения экспертом.

**Ключевые слова:** информационный канал, обжиг в кипящем слое, моделирование, пирометаллургический процесс.

## STUDY OF INFORMATION CHANNELS CHARACTERISTICS IN CONTROL FLUID BED FURNACE

One of the main problems of modeling of pyrometallurgical processes and roasting in a fluidized bed is the optimal choice of defining aggregate factors of the object.

The general trend in the use and management of complex objects is the development and adoption of solutions exclusively human. In this case the correctness of the decision depends on an adequate diagnosis of the technical state of the object. Thus, the ability to operate the facility is completely determined by its technical state at any given time, and accuracy of decision-making expert.

**Key words:** information channel, fluid bed roasting, modeling, pyrometallurgical process.

**Введение.** Одной из основных проблем моделирования пирометаллургических процессов вообще и обжига в кипящем слое в частности является выбор оптимальной совокупности определяющих факторов функционирования объекта.

Строго обоснованного алгоритма выбора самих факторов и их количества не существует. Все зависит от решаемой задачи и предпочтений исследователя, его знаний и опыта. Сформулируем некоторые общенаучные требования для обеспечения адекватности модели [1]:

- достаточность факторов;
- системность в описании объекта моделирования;
- измеримость (количественная и (или) вербальная);
- понятный физический смысл и т.д.

В конкретных условиях задачи системность выбора переменных зависит от факторного пространства, которое должно включать переменные, характеризующие назначение и текущее состояние объекта, внешние контролируемые (температура в реакционной зоне, подача шихтовых материалов) и неконтролируемые (содержание серы в шихтовых материалах) действующие факторы.

Поскольку количество входных переменных, которыми может оперировать оператор-технолог, ограничено, то они по возможности должны быть «очень емкими», т.е. обобщенными. Понятие обобщенности переменной довольно субъективно и зависит, на наш взгляд, в первую очередь от уровня принимаемых решений, поскольку для рядового оператора и лица, принимающего решения высокого уровня, например технолога цеха, степень обобщенности одной и той же информации о протекании процесса существенно различна.

Общей тенденцией в эксплуатации и управлении сложными объектами является выработка и принятие решения исключительно человеком. При этом правильность принятия решения во многом зависит от адекватной диагностики технического состояния объекта. Таким образом, возможность эксплуатации объекта полностью определяется и его техническим состоянием на данный момент времени, и правильно принятым решением эксперта.

Математическую модель объекта априори можно представить некоторой функцией или системой уравнений в выбранном многомерном факторном пространстве. Конкретные значения управляющих воздействий на объект вычисляются только после определения количественных значений входящих в него факторов. Пока такая ситуация не наступила, можно говорить только о про-

гностических свойствах этой модели при условии ее адекватности изучаемому явлению [2].

Таким образом, управляющее воздействие как координата точки в многомерном факторном пространстве вырабатывается по состоянию в данный конкретный момент и не зависит от траектории (предыстории) достижения этого состояния.

Поэтому при разработке моделей поведения объектов необходимо учитывать их общие особенности [2, 3]: высокий уровень сложности; многофакторность; особенности эксплуатации; ограниченный, как правило, объем формализованных знаний о взаимодействии переменных.

Цель статьи – изучение характеристик информационных каналов при управлении пирометаллургическим процессом как предварительного и важного этапа построения математической модели управления.

**Факторы управления и их информационные каналы.** Методом интервью с выступающими в роли экспертов операторами-технологами были выявлены факторы, учитываемые ими при управлении процессом в режиме реального времени. Следует отметить, что факторное пространство содержит не только количественные, но и качественные (неколичественные) переменные.

Охарактеризуем детально входные факторы.

- Скорость загрузки концентрата текущая, т/ч. Измеряется с помощью тензометрических весов 0-50 т/ч. При стабильной скорости подачи количество загружаемого за некий период времени концентрата определяется просто.

Управление загрузкой осуществляют путем изменения напряжения на двигателе тарельчатого питателя концентрата в диапазоне 0-250 В. Предусмотрено также дискретное управление исполнительным механизмом загрузки в режиме вкл./откл.

Измерительный контур скорости массопотока концентрата характеризуется неформализуемыми случайными возмущениями, например, налипанием концентрата на ленту конвейера, под которым установлен весовой тензометрический датчик.

- Скорость загрузки оборотной пыли текущая, т/ч. Судить о ее величине можно лишь косвенно путем измерения напряжения на двигателе тарельчатого питателя в диапазоне 0-250 В.

Количественные оценки загрузки пылиотягчены ошибками более высокими, чем при измерении концентрата.

- Температура в слое, °С (0-1500 °С).

Измерения проводят, как правило, в двух точках около стенки печи кипящего слоя (КС). Два регистрирующих прибора типа КСУ отслеживают параметр как непрерывно (но только в одной точке), так и дискретно, примерно через 2,5 мин (после всех 12 точек многоточечного показывающего прибора). Возникающая при этом задержка в показаниях прибора измеренной температуры, по оценке операторов-технологов, приемлема для оперативного управления процессом.

Поскольку температурный режим существенным образом влияет на основные технологические параметры процесса обжига и определяет не только количественные и качественные показатели процесса, но и устойчивость кипящего слоя, поддержание его на заданном уровне в регламентируемом технологической инструкцией диапазоне является одной из основных задач управления процессом обжига.

- Динамика и направление изменения температуры (градиент), °С/мин. Определяют по тем же приборам КСУ. Выбор представительных величин данного параметра зависит от квалификационного уровня оператора.

- Пульсация давления в рабочей камере, мм вод.ст. Измерение непрерывное. Отслеживают органолептически (визуально) амплитуду колебаний и направление изменения общего давления в рабочей камере. В нормальном режиме работы печи КС расход воздуха и его давление поддерживают постоянным. Увеличение амплитуды колебаний ( $x_5$ ) наблюдают на фоне некоторого среднего уровня при нормальном протекании процесса. Переменная несет в себе неколичественный смысл, так как учитываются только резкое отклонение от нор-

мального протекания процесса в ту или иную сторону и наличие пиков на диаграмме давлений.

- Время предыстории, т.е. время наблюдения после принятия предыдущего управляющего воздействия, мин. Этот параметр отражает как физическое положение процесса в пространстве состояний, так и градиент его движения. Учитывает поведение температуры, служит для формирования стратегии последующего выбора режима управления печью КС. От величины этого параметра зависит, будет ли процесс переведен на новый режим, или останется на прежнем. Служит косвенным критерием физико-химического состояния кипящего слоя. По температуре можно судить о наличии или отсутствии в печи «горючего», а по ее градиенту – о стадии протекания процесса (стадия «прожарки», малая загрузка сульфидного никелевого концентрата и т.д.). Носит в количественном смысле неформализованный характер и учитывается при выработке управляющего воздействия. Зависит от индивидуального почерка ведения процесса и уровня квалификации оператора-обжигальщика.

В качестве выходных факторов обычно выбирают основные управляющие воздействия на процесс обжига в печи КС: величины уставок скоростей загрузки сульфидного никелевого концентрата и оборотной пыли.

Уставки скоростей с входными переменными скоростей загрузки концентрата и пыли имеют тот же смысл, наименования и точность измерения, однако они распределены во времени.

Выбор уставок скоростей загрузки сульфидного никелевого концентрата и оборотной пыли в качестве управляющих переменных обуславливает в полном объеме управление процессом обжига, включая и его производительность. С одной стороны, при постоянном расходе воздуха величины этих переменных и их соотношение полностью определяют ход процесса окислительного обжига, поскольку они формируют материальный и тепловой балансы работы агрегата, а с другой – определяют напряженность теплового режима печи КС, совокуп-

ным отражением которого является температура кипящего слоя, от величины которой, в свою очередь, напрямую зависит производительность объекта управления в целом.

**Оценка интервала квантования и погрешностей информационных каналов.** Для построения управляющей модели процесса обязательное условие – ошибки определения переменных должны быть известны заранее. Это значит, что измерения и управляющие воздействия, не разделенные доверительным интервалом, принимаются как одно с параллельными замерами. Кроме того, при выборе уровня квантования (дискретизации) непрерывного процесса ошибки определения переменных играют решающую роль, так как уровень квантования измеряемой переменной всегда должен быть возможно больше ошибки ее измерения.

К сожалению, на практике погрешности измерения переменных не формализованы, поэтому возникает задача их оценки хотя бы приближенно.

Приведем три независимых способа оценки интервалов нечувствительности процесса, полученные при его рассмотрении с трех различных точек зрения [1].

*Первый способ.* Основан на данных при расчетах материального и теплового балансов объекта, которые позволяют оценить верхнюю границу точности изменения переменных, поскольку учитывают лишь некоторые, доступные для вычислений, возмущающие воздействия в рассмотренных информационных каналах.

Количественные значения погрешностей информационных каналов, полученные при расчете материальных и тепловых затрат во время окислительного обжига в печи КС, следующие:

- измерение температуры имеет относительную ошибку  $\pm 3,75\%$  или  $\pm 45^\circ\text{C}$ . Если считать, что ошибка приведена с учетом 3-сигмового интервала, то при доверительной вероятности 0,95 она составит  $\pm 30^\circ\text{C}$ ;
- измерение скорости массопотока (концентрата и пыли), проведенное по стандартной методике расчета ошибки средств измерения,  $\pm 1,7\%$  или  $\pm 0,20$  т/ч.

Количественные значения погрешности измерения скорости массопотока, полученные на основе паспортных данных штатных средств измерения, составляют  $\pm 0,17$  т/ч, что достаточно близко к рассчитанным по порогу нечувствительности ( $\pm 0,20$  т/ч). Это значит, что принятые ограничения и допущения достаточно адекватны.

*Второй способ.* Время нечувствительности печи КС по загрузке, рассчитанное на основе материальных и энергетических затрат в объеме печи КС, не менее 5,6 мин. Поэтому время квантования непрерывного процесса обжига в печи должно быть больше этого показателя. Таким образом, при выработке управляющего воздействия важно учитывать именно такой период «невмешательства» в процесс управления обжигом.

Таким образом, приведенные выше данные можно считать статистически (и практически) неразличимыми значениями по скорости массопотока  $\pm 0,17$  т/ч, измерению температуры  $\pm 25^\circ\text{C}$ , по временной «нечувствительности» печи КС  $\geq 5,6$  мин.

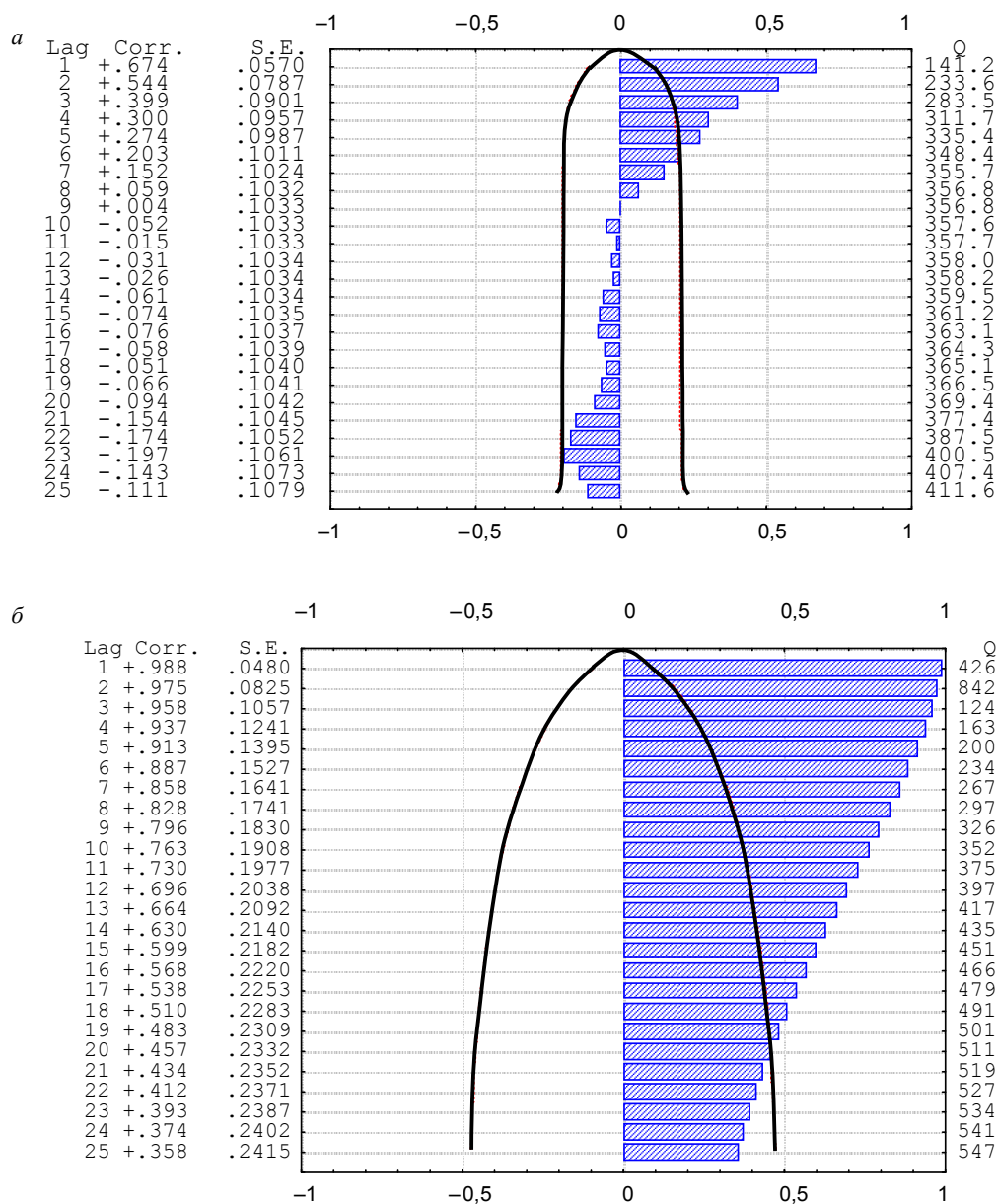
*Третий способ.* Объективным методом оценки интервала некоррелированности двух распределенных во времени значений переменных является автокорреляционная функция.

Если значения измеряемых входных и выходных параметров рассматривать как случайный процесс, развивающийся во времени, то незначимая величина автокорреляционной функции

$$R_x(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau)dt,$$

где  $\tau$  – варьируемый сдвиг между мгновенными значениями сигнала  $x$  определяет временной интервал квантования исследуемой переменной [1].

На основе сбора информации [3] о работе печи КС за длительный период времени (смена) с интервалом 1 мин были построены автокорреляционные функции для скорости загрузки сырья (концентрата) и



Автокорреляционная функция скорости загрузки концентрата (а) и температуры в КС (б) в реакционной зоне печи КС

температуры в кипящем слое (см. рисунок). Согласно графикам корреляция удаленных друг от друга значений становится неразличимой на фоне ошибки своего определения при достижении по загрузке примерно 6-7 мин, а по температуре в кипящем слое – 19 мин. Это говорит о том, что система «помнит свое прошлое» именно в такие интервалы времени. Иными словами, проведения оценка инерционности системы по этим основным управляющим переменным.

Таким образом, полученные различными способами оценки погрешностей практически совпадают. Этот факт указывает на достоверность проведенных исследований и хорошо согласуется с практикой ведения обжига: в условиях неопределенности оператор-технолог полностью прекращает загрузку материалов в печь для полного выжигания находящегося в ней «горючего» (режим «прожарки»). Продолжительность этого периода составляет не менее 15-20 мин.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Кимяев И.Т.* Интеллектуальная система управления процессом обжига сульфидного никелевого концентрата в кипящем слое: Автореф. дис... канд. техн. наук. МИСиС. М., 2001.
2. *Миронов А.Н.* Теоретические основы и методы многомодельного прогнозирования долговечности сложных военно-технических систем космического назначения. М., 2000.
3. *Спесивцев А.В.* Metallurgical process as an object of study: new concepts, system, practice. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2004.

## REFERENCES

1. *Kimyaev I.T.* Intelligent control system firing process sulphide nickel concentrate in fluidized bed: Thesis PhD. tech. Science. MISA. Moscow, 2001.
2. *Mironov A.N.* The theoretical foundations and methods of forecasting durability of the multimodal complex military-technical systems for space purposes. Moscow, 2000.
3. *Spesivtsev A.V.* Metallurgical process as an object of study: new concepts, system, practice. Saint Petersburg: Polytechnic Press, 2004.

**Э.А.ЗАГРИВНЫЙ**, д-р техн. наук, профессор, [zagrivniy@yandex.ru](mailto:zagrivniy@yandex.ru)

**В.И.МАЛАРЕВ**, канд. техн. наук, доцент, [malarev@yandex.ru](mailto:malarev@yandex.ru)

**Е.Е.ВАСИЛЬЕВА**, инженер, 328-82-67

*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

**E.A.ZAGRIVNY**, Dr. in eng. sc., professor, [zagrivniy@yandex.ru](mailto:zagrivniy@yandex.ru)

**V.I.MALAREV**, PhD in eng. sc., associate professor, [malarev@yandex.ru](mailto:malarev@yandex.ru)

**E.E.VASILIEVA**, engineer, 328-82-67

*Saint Petersburg State Mining University*

## **СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ НА ОСНОВЕ ЗАБОЙНОГО СКВАЖИННОГО ЭЛЕКТРОПАРОГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРОДУКТИВНЫЕ ПЛАСТЫ ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТИ**

Рассмотрены электротермический комплекс на основе забойного скважинного электропарогенератора для термического воздействия на продуктивные пласты высоковязкой нефти и система управления этим комплексом. Предложенная система управления позволяет автоматически поддерживать заданные технологические параметры в зависимости от режимов работы комплекса.

**Ключевые слова:** добыча высоковязкой нефти, термические технологии добычи, паронефтяной фактор, забойные электротермические устройства, забойный скважинный электронагреватель, система управления, регулируемый электропривод.

## **ELECTROTHERMAL COMPLEX INCLUDING STEAM AND GAS ELECTROGENERATOR FOR THERMAL INFLUENCE TO PRODUCTIVE LAYERS OF THE HIGHLY VISCOUS OIL CONTROL SYSTEM**

The electrothermal complex on a basis of face electrosteam and gas generator for thermal influence on productive layers of high viscosity oil and a control system of this complex is considered. This control system allows to support automatically the set technological parameters depending on operating modes of a complex.

**Key words:** extraction oil of high viscosity, thermal technologies of extraction, steam-oil factor, face electrothermal devices, face well electroheater, control system, the adjustable electric drive.

Состояние ресурсной базы углеводородного сырья в России и мире в целом характеризуется значительным увеличением доли трудноизвлекаемых запасов в низкопроницаемых коллекторах с нефтями повышенной и высокой вязкости.

Особую важность приобретает рациональное освоение широко распространен-

ных залежей тяжелых высоковязких нефтей (ВВН), мировые запасы которых приблизительно в 7 раз превышают запасы легких нефтей (более 700 млрд т).

Безальтернативными методами нефтеотдачи отечественными и зарубежными специалистами признаны термические методы (ТМ) воздействия на продуктивные пласты ВВН.

К наиболее широко применяемым в Европейской части термическим методам увеличения нефтеотдачи относятся:

1) вытеснение нефти при постоянном нагнетании горячей воды или пара;

2) циклическое паротепловое воздействие (ПТВ);

3) импульсно-дозированное тепловое воздействие (ИДТВ).

К недостаткам традиционных термических методов добычи ВВН можно отнести высокие материало- и капиталоемкость теплоэнергетического оборудования, потери теплоты в трубопроводной системе и скважине, а также снижение эффективности процесса из-за сжигания части добытого сырья (нефти, газа) в парогенераторах и ухудшение экологической обстановки в районах нефтедобычи.

Одним из перспективных направлений развития термических методов добычи является разработка забойных теплогенераторов. В Санкт-Петербургском государственном горном университете разработаны и запатентованы в РФ электротермические комплексы более 1000 кВт, применение которых позволит снизить потери энергии и повысить качество теплоносителей (пара, воды), нагнетаемых в пласт ВВН [1].

Целью работы является дальнейшее совершенствование забойных электродных нагревателей и парогенераторов мощностью свыше 1000 кВт. Разрабатываемое скважинное электротермическое оборудование должно обеспечить тепловое воздействие на призабойные зоны добычных и нагнетательных скважин с использованием пластовой жидкости (товарной воды), а также допускать применение термохимических методов повышения нефтеотдачи пластов ВВН [2].

Рассматриваемый в работе комплекс позволяет выполнять технологические операции по паротепловому воздействию, импульсно-дозированному тепловому воздействию и термогидродинамическому воздействию. Для этого в состав комплекса (рис.1) включены насос с регулируемым электроприводом, емкость с котловой водой, насосно-компрессорные трубы (НКТ), по которым котловая вода через диэлектрическую

вставку и водоподающий узел с обратным клапаном поступает в изолированный интервал скважины. Автоматическое поддержание заданных технологических параметров (напряжение  $U$ , ток  $I$ , расход котловой воды  $q$ , частота вращения насоса  $\omega$ ) обеспечивается системой управления (СУ).

Режим ПТВ реализуется при заданных часовых расходах тепловой энергии и котловой воды, которые обеспечивают определенное количество пара в зоне продуктивного пласта с сухостью, зависящей от соотношения часовых количеств энергии и воды. Режим ИДТВ обеспечивается чередующимися импульсами ПТВ и подачей котловой воды с увеличенными часовыми расходами, чем достигается ускоренное продвижение теплового фронта и снижение ПНФ.

Скважинное электротермическое устройство получает питание по схеме фаза – три жилы погружной линии параллельно – НКТ, обсадная колонна – нейтраль. Такие системы широко применяются для электрообеспечения специальных установок (электрифицированные железные дороги, где по этой схеме питаются электровозы напряжением 3 кВ на постоянном токе и 25 кВ – на переменном). На схеме (рис.2) куст добычных скважин 1-6, в центре которого размещена нагнетательная скважина 7. Такая семиточечная система разработки применяется, в частности, при добыче тяжелой нефти на Усинском месторождении. Силовой трансформатор мощностью 10-16 МВ·А и напряжением 35-110/6-10 кВ с обмотками, соединенными по схеме звезда – звезда с заземленной нейтралью вторичной обмотки, по воздушным линиям ВЛ31 и ВЛ32 питает электроэнергией куст скважин 1-6. Высоковольтное и низковольтное электрооборудование размещено в передвижных контейнерах К1-К6 (рис.3).

Воздушные линии ВЛ31 и ВЛ32 выполнены изолированными проводами, установленными на деревянных переносных опорах с полиэтиленовыми изоляторами. Такие опоры широко применяются на открытых горных работах и позволяют сооружать по несколько километров линий электропередач в день при малых трудовых затратах.



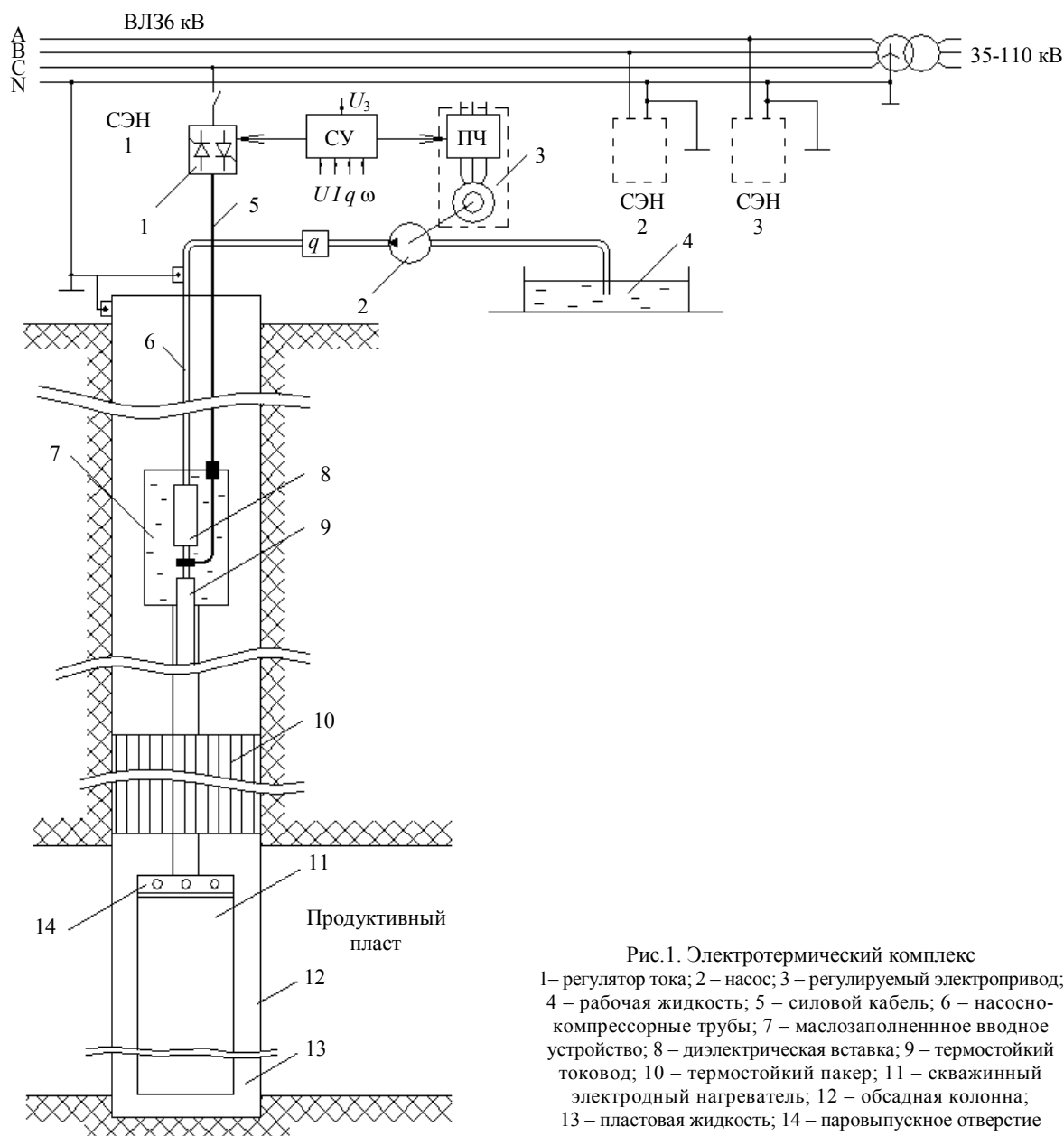


Рис.1. Электротермический комплекс  
1 – регулятор тока; 2 – насос; 3 – регулируемый электропривод;  
4 – рабочая жидкость; 5 – силовой кабель; 6 – насосно-компрессорные трубы; 7 – маслозаполненное вводное устройство; 8 – диэлектрическая вставка; 9 – термостойкий токовод; 10 – термостойкий пакер; 11 – скважинный электродный нагреватель; 12 – обсадная колонна; 13 – пластовая жидкость; 14 – паровыпускное отверстие

К добычным скважинам 1-6 подается электроэнергия напряжением 0,4 кВ. В передвижных контейнерах К1-К6 размещены высоковольтная ячейка с однополюсным вакуумным выключателем (или однополюсный выключатель нагрузки, или разъединитель) при выполнении электроснабжения участка по упрощенной схеме, тиристорный преобразователь частоты для питания регулируемого электропривода питательного насоса, распределительного устройства низкого напряжения, высоковольтного тиристорного регулятора тока ЭПГ и шкафа

управления, в котором размещены пульт управления режимами электротермического комплекса, регуляторы тока ЭПГ и расхода питательного насоса, приборы контроля (напряжения, тока, мощности, давления, расхода питательного насоса) и учета расхода электрической энергии и котловой воды, релейная токовая защита ЭПГ.

Система управления процессом термического воздействия на продуктивный нефтяной пласт должна обеспечивать реализацию следующих режимов работы комплекса:

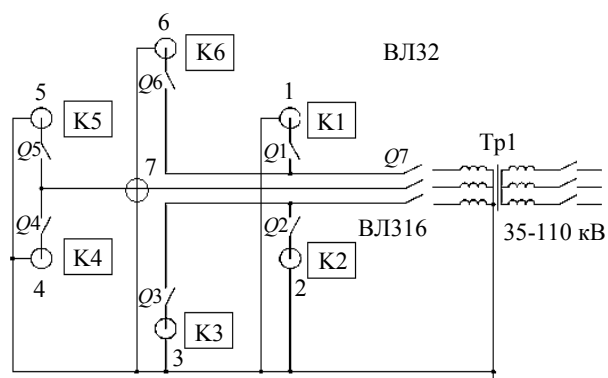


Рис.2. Принципиальная схема электроснабжения электротермического участка  
1-6 – добычные скважины; 7 – нагнетательная скважина; K1-K6 – передвижные контейнеры

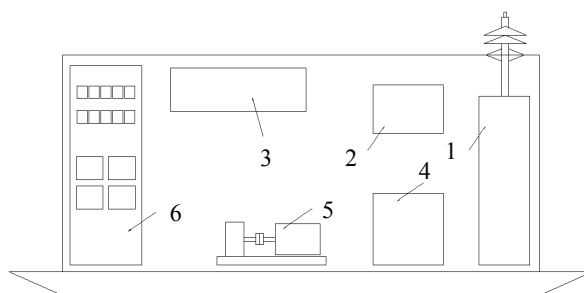


Рис.3. Размещение оборудования в передвижном контейнере

1 – высоковольтная ячейка; 2 – тиристорный преобразователь частоты; 3 – распределительное устройство нужного напряжения; 4 – тиристорный регулятор тока; 5 – насосный агрегат; 6 – шкаф управления приборами контроля, учета и защит

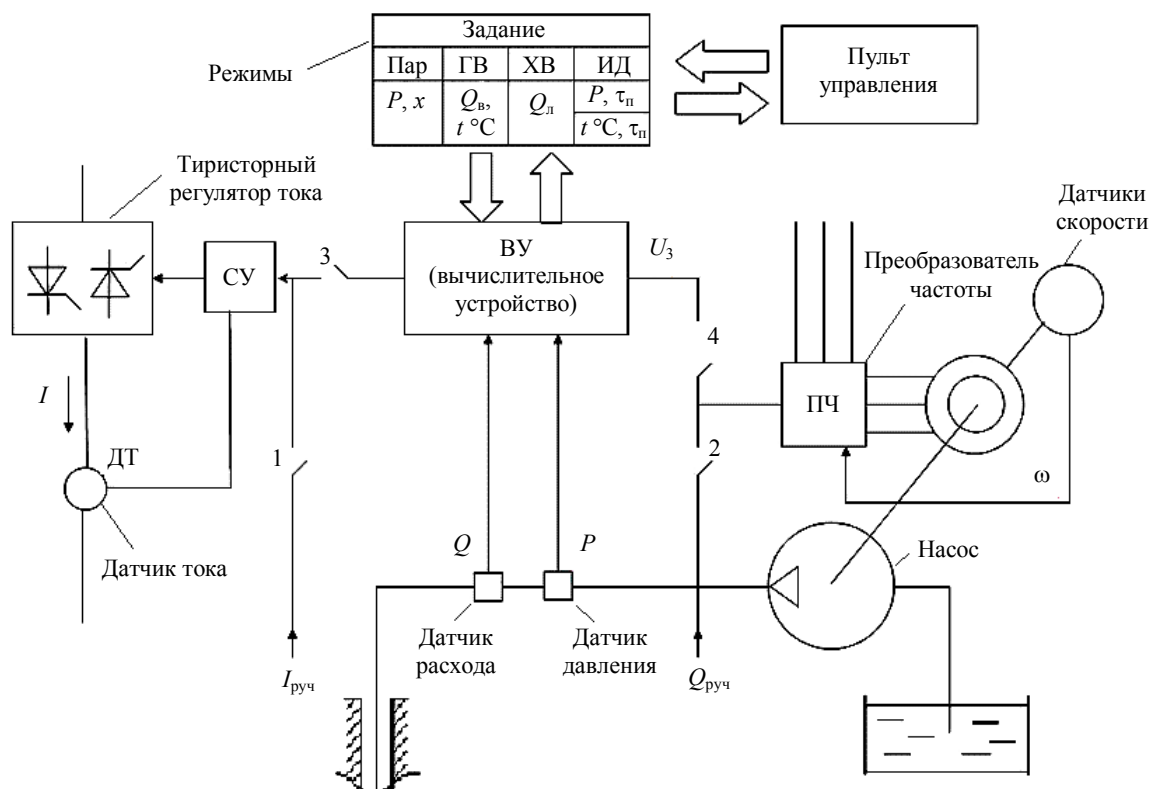


Рис.4. Функциональная схема управления электротермическим комплексом

1, 2 – ключи при ручном режиме; 3, 4 – ключи при автоматическом режиме

1. Ручное задание тока скважинного электропарогенератора и стабилизация заданного значения тока  $I_{зад}$  с точностью не менее чем  $\pm 2\%$ . Эта же система должна обеспечивать токовую отсечку на уровне максимального тока  $I_{max}$ .

Скважинный электропарогенератор получает питание от однофазного источника переменного напряжения. Регулирование тока нагревателя осуществляется с помощью однофазного тиристорного регулятора. Изменение угла открывания двух встречно-

параллельно включенных тиристорov осуществляется посредством системы управления. Величина тока в нагревательном элементе контролируется с помощью внутренней обратной связи по току.

2. Ручное задание и поддержание на заданном уровне с точностью не менее  $\pm 2\%$  давления питательного насоса  $P_{\text{зад}}$  при изменении производительности  $Q_{\text{в}}$  (кубические метры в секунду) от нуля до  $Q_{\text{ном}}$ . Регулирование осуществляется посредством преобразователя частоты в цепи статора двигателя. Статический момент питательного насоса с некоторым приближением можно представить вентиляторной характеристикой вида

$$M_{\text{с}} = C\omega_r^2 + M_{\text{с0}},$$

где  $M_{\text{с}}$  – момент сопротивления насоса;  $M_{\text{с0}}$  – момент холостого хода;  $\omega_r$  – скорость вращения.

Поскольку при построении системы управления не используют сложные векторные законы частотного регулирования, можно ограничиться простым законом скалярного управления:

$$U_m / f_{i\div} = \text{const}.$$

3. При ручном управлении током скважинного электронагревателя и давлением питательного насоса эти два технологических параметра задаются оператором независимо друг от друга. При этом обеспечивается следующий режим парообразования на забое. При максимальном токе нагревателя  $I_{\text{max}}$  в соответствии с известными таблицами состояния вода – пар [3] необходимо обеспечивать такую подачу воды, при которой соблюдается условие:

$$P_y = U_{\text{iii}} I_{\text{max}} = W_0,$$

где  $P_y$  – часовая мощность скважинного электронагревателя, кВт;  $W_0$  – энтальпия пара,

$$W_0 = W_{\text{г}} + W_{\text{п}},$$

$W_{\text{к}}$  – энергия, которую необходимо затратить на нагрев воды до температуры кипения  $T = T_{\text{к}}, ^\circ\text{C}$ ;  $W_{\text{п}}$  – энергия парообразования.

Комплекс включает систему управления током скважинного нагревателя и систему частотного регулирования электроприводом питательного насоса (рис.4).

Очевидно, что каждому значению часовой мощности  $P_y$  при работе скважинного нагревателя должна соответствовать вполне определенная производительность питательного насоса  $Q_{\text{в}}$ . Обеспечить строгое соответствие этих двух параметров с помощью ручного управления достаточно сложно. Если к этому добавить, что помимо режима парообразования на забое в комплексе должны быть также предусмотрены режимы горячей и холодной воды, автоматизация комплекса в дальнейшем будет необходима [4]. В режиме горячей воды скважинный электронагреватель должен работать с максимальным током  $I_{\text{max}}$  и питательный насос должен работать с максимальной производительностью  $Q_{\text{max}}$ . Это значит, что этот режим является предельным для установленного оборудования. В режиме холодной воды скважинный электронагреватель отключен от источника электроэнергии (тиристоры регулятора напряжения полностью закрыты). При этом ток нагревателя равен нулю, а питательный насос должен по-прежнему работать с максимальной производительностью  $Q_{\text{max}}$ .

Поскольку выходные параметры главных элементов комплекса (энергия скважинного электронагревателя  $W$  и производительность питательного насоса  $Q$ ) являются нелинейной (в первом приближении) квадратичной функцией выходных параметров (тока скважинного электронагревателя  $I$  и частоты вращения двигателя питательного насоса  $\omega_r$ ), объединение систем управления составными частями комплекса должно быть выполнено на основе микроконтроллера, в котором исходная информация о желаемом состоянии комплекса должна быть в виде таблицы вода – пар.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Загривный Э.А.* Электротермический комплекс на основе скважинного электродного нагревателя мощностью более 500 кВт для теплового воздействия на продуктивный пласт высоковязкой нефти / Э.А.Загривный, А.Е.Козярук, С.Н.Батаев // *Электротехника*. 2003. № 5.
2. *Загривный Э.А.* Перспективы развития методов повышения нефтеотдачи пластов с тяжелой высоковязкой нефтью / Э.А.Загривный, Е.Е.Мельникова // *Материалы конференции «Наука и новейшие технологии при поисках, разведке и разработке месторождений полезных ископаемых»*. 2006.
3. *Кутателадзе С.С.* Теплопередача при конденсации и кипении. М.-Л.: Машиностроение, 1952.
4. *Лукас В.А.* Теория управления техническими системами: Учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 2005.

## REFERENCES

1. *Zagrivniy E.A.* Electrothermal a complex on a basis скважинного an electrode heater capacity more than 500 kw for thermal influence on a productive layer высоковязкой oil / E.A.Zagrivniy, A.E.Kozjaruk, S.N.Bataev // *Electrical engineering*. 2003. № 5.
2. *Zagrivniy E.A., Melnikova E.E.* Ways of development methods to increase of petrofeedback of layers with heavy oil // *Materials of conference «Science and the newest technologies by searches, investigation and development of deposits of minerals»*. 2006.
3. *Kutateladze S.S.* Heat transfer on condensation and boiling // *Moscow-Leningrad: Mashinostroenie*, 1952.
4. *Lukas V.A.* Technical systems management theory: the manual. Ekaterinburg: Publishing house UGGU, 2005.

**Ю.П.СТАШИНОВ**, канд. техн. наук, доцент, [yustashinov@yandex.ru](mailto:yustashinov@yandex.ru)

**Д.А.БОЧЕНКОВ**, аспирант, [yustashinov@yandex.ru](mailto:yustashinov@yandex.ru)

**В.В.ВОЛКОВ**, канд. техн. наук, доцент, [yustashinov@yandex.ru](mailto:yustashinov@yandex.ru)

Шахтинский институт (филиал)

Южно-Российского государственного технического университета

(Новочеркасского политехнического института),

г. Шахты, Ростовская область

**Y.P.STASHINOV**, PhD in eng. sc., associate professor, [yustashinov@yandex.ru](mailto:yustashinov@yandex.ru)

**D.A.BOCHENKOV**, post-graduate student, [yustashinov@yandex.ru](mailto:yustashinov@yandex.ru)

**V.V.VOLKOV**, PhD in eng. sc., associate professor, [yustashinov@yandex.ru](mailto:yustashinov@yandex.ru)

The Novocherkassk Polytechnical Institute

## ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ ГЛАВНЫХ ВОДООТЛИВНЫХ УСТАНОВОК ШАХТ И РУДНИКОВ

С учетом технологических особенностей главных водоотливных установок шахт и рудников предложены способ энергосберегающего регулирования режима работы основного насосного агрегата изменением частоты вращения одноколесного подкачивающего насоса средствами асинхронного частотно-регулируемого привода и экстремальная поисковая система регулирования с периодической подстройкой на работу насосной установки с минимальным удельным расходом электроэнергии.

**Ключевые слова:** водоотливная установка, частотно-регулируемый привод.

## ENERGY SAVING REGULATION OF THE MODE OF OPERATION MAIN WATER-OUTFLOW INSTALLATION

Taking into consideration technological features of the main mining water-removal plants, there are suggested: an energy saving method of their control and an extremal searching system using single-stage booster pumps with a variable-frequency induction motor drive.

**Key words:** main mining water-removal, variable-frequency induction motor drive.

Главные водоотливные установки (ГВУ) шахт и рудников, оборудованные центробежными секционными насосами с высоковольтным асинхронным приводом напряжением 6 кВ и мощностью, как правило, более 500–600 кВт, относятся к наиболее энергоемким объектам указанных предприятий. Поэтому энергосберегающее регулирование режима их работы является важной и актуальной задачей.

Известны предложения по применению для этой цели асинхронного частотно-регулируемого привода насосных агрегатов [1, 5, 6] с учетом успешного опыта его рабо-

ты на насосных установках промышленного и бытового водоснабжения с переменным водопотреблением [3, 4].

Однако при реализации этого предложения важно учитывать ряд существенных особенностей режима работы ГВУ. Наиболее важная из них – в течение суток необходимо откачать суточный приток шахтных вод, т.е. выполнить определенный объем полезной работы независимо от частоты вращения рабочих колес насосного агрегата. Снизить расход электроэнергии в этом случае можно только при работе насосной установки в режиме максимального КПД

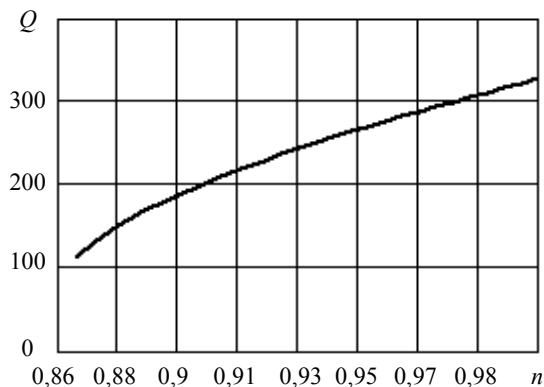


Рис. 1. Зависимость подачи от относительной частоты вращения для центробежного секционного насоса с шестью рабочими колесами

(с минимальным удельным расходом энергии). Как показывают расчеты, такой режим соответствует меньшей номинальной подаче (на 8-18 %) насоса при максимальной величине его КПД.

Вторая особенность – жесткая характеристика сети, благодаря чему для перевода насосной установки в энергоэффективный режим работы средствами электропривода достаточно регулировать частоту вращения вниз от номинальной в узком диапазоне с изменением напора в пределах доли напора, развиваемого одним рабочим колесом. На рис. 1 приведена зависимость подачи  $Q$  от относительной частоты вращения  $n = n / n_{\text{н}}$  для центробежного насоса ЦНС 300-360, полученная с использованием данных примера расчета типовой водоотливной установки с тремя секционными насосами [3], уравнения напорной характеристики насоса. Зависимость напора  $H$  от подачи  $Q$  насоса имеет вид

$$H = H_0 n^2 + AnQ - BQ^2;$$

$$Q = \frac{An + \sqrt{A^2 n^2 + 4(B + R_0)(H_0 n^2 - H_a)}}{2(B + R_0)},$$

где  $H_0$ ,  $A$ ,  $B$  – коэффициенты аппроксимации напорной характеристики;  $H_a$  – геодезическая высота подачи;  $R_0$  – гидравлическое сопротивление (постоянная) трубопровода.

Как видно из рисунка, для уменьшения подачи на 20 % достаточно снижения частоты вращения примерно на 6 %.

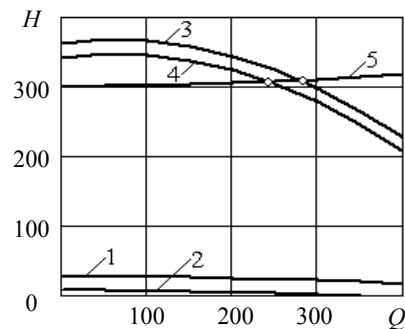


Рис. 2. Напорные характеристики  
1, 2 – подкачивающего насоса ВП-340-18Л;  
3, 4 – насосного агрегата при относительной частоте вращения рабочего колеса подкачивающего насоса  $n = 1$  и  $n = 0,5$  соответственно; 5 – характеристика сети

Применение в этом случае регулируемого электропривода насосных агрегатов приводит к техническому противоречию: регулирующее воздействие оказывается на все рабочие колеса (при использовании для этого мощных высоковольтных дорогостоящих преобразователей частоты), тогда как для достижения необходимого результата достаточно было бы регулировать частоту вращения только одного рабочего колеса.

Для разрешения указанного противоречия предлагается использовать в составе насосных агрегатов одноколесные подкачивающие насосы, оборудованные низковольтным асинхронным частотно-регулируемым электроприводом мощностью десятки киловатт, и осуществлять регулирование режима работы водоотливной установки изменением частоты вращения рабочего колеса подкачивающего насоса.

В качестве примера, поясняющего предлагаемый метод регулирования (рис. 2), приведем напорные характеристики насосного агрегата в составе центробежного насоса ЦНС 300-300 в комплекте с серийно выпускаемым подкачивающим насосом ВП 340-18Л.

Уменьшение подачи в этом случае составляет примерно 10 % при снижении частоты вращения рабочего колеса подкачивающего насоса в 2 раза.

Для расширения диапазона регулирования в качестве подкачивающих можно применить одноколесные насосы с несколько большими значениями подачи и напора.

Поскольку в процессе эксплуатации параметры насосов и трубопроводов изменяются, для реализации энергоэффективного режима предлагается экстремальная система управления (рис.3) с поиском по результатам измерения потребляемой мощности  $P$  и подачи  $Q$ , режима работы с минимальными удельными энергозатратами  $E = P/Q \rightarrow \min$ .

Учитывая, однако, что характеристики водоотливной установки в процессе эксплуатации изменяются сравнительно медленно, настройка на оптимальный по расходу электроэнергии режим работы может производиться периодически, например, только при каждом включении насосного агрегата.

Так как к техническим средствам измерения подачи  $Q$  при реализации поставленной задачи не предъявляются жесткие метрологические требования, с целью существенного упрощения и удешевления технического решения величину подачи можно оценивать косвенно из уравнения характеристики трубопроводной сети:  $H = H_{\Gamma} + R_{\Gamma} Q^2$ , где  $R_{\Gamma}$  – постоянная трубопровода. По результатам измерения напора  $H$  на выходе насоса и подачи  $Q$  известными методами предварительно определяют величину  $R_{\Gamma}$ , а затем подачу насосного агрегата – косвенно по величине напора  $H$ :  $Q = \sqrt{(H - H_{\text{а}}) / R_{\Gamma}}$ . По мере необходимости величина постоянной трубопровода  $R_{\Gamma}$  может периодически уточняться.

Применение подкачивающих насосов повысит стоимость водоотливной установки, но, помимо обеспечения экономичного энергосберегающего регулирования режима работы, позволит дополнительно увеличить срок службы основных насосных агрегатов благодаря устранению кавитационных явлений, которые, как показывает опыт эксплуатации, в той или иной степени проявляются на многих главных водоотливных установках шахт. При этом следует иметь в виду, что ряд центробежных секционных насосов, например, ЦНС 300-650 ... 1300 с отрицательной допустимой высотой всасывания предназначены для работы только с подкачивающими насосами [3].

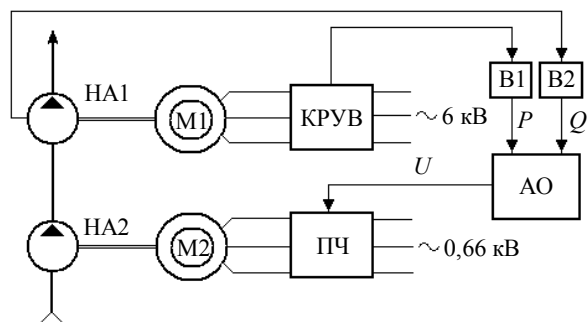


Рис.3. Функциональная схема системы энергоэффективного регулирования режима работы водоотливной установкой

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бабокин Г.И. Энергосбережение в насосных станциях водоотлива средствами регулируемого электропривода // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 11.
2. Ильинский Н.Ф. Электропривод в современном мире // Сб. материалов 5-й Международной (XVI Всероссийской) науч. конф., 18-21 сентября 2007. СПб, 2007.
3. Попов В.М. Водоотливные установки: Справочное пособие. М.: Недра. 1990.
4. Ремезов А.Н. Некоторые аспекты применения частотно-регулируемого электропривода на теплоснабжающих предприятиях ЖКХ / А.Н.Ремезов, А.В.Сорокин // Приводная техника. 2007. № 3.
5. Тимухин С.А. Математические модели функционирования и оптимизации комплексов главных водоотливных установок // Горный журнал. 2002. № 4.
6. Черняховский Р.Л. Адаптация режимов работы электромеханических комплексов шахтного водоотлива к графикам энергосистемы в условиях переменных водопритоков: Автореф. дис ... канд. тех. наук. СПб, 2003.

## REFERENCES

1. Babokin G.I. Energy saving at the water drainage pumps stations by means of the variable drive // Mining informational and analytical bulletin. 2005. N 5.
2. Ilinsky N.F. Electric drive in the modern word // Proceedings of the fifth international (XVI All-Russian) conference on the electric drive, 18-21 September 2007. Saint Petersburg, 2007.
3. Popov V.M. Water-removal plants: reference manual. Moscow: Nedra, 1990.
4. Remezov A.N., Sorokin A.V. Some aspects of frequency controlled drive applications at the heat supplying enterprises of HMS // Drives technique. 2007. N 7.
5. Timuhin S.A. Mathematical models of the main mining water-removal plants functioning and optimization // Mining magazine. 2002. N 4.
6. Chernyahovsky R.L. Adaptation of the electromechanical mining drainage complexes operating conditions to the energy system schedules under variable water influx conditions: the author summary of the master's thesis. Saint Petersburg, 2003.

**Н.И.КОТЕЛЕВА**, канд. техн. наук, ассистент, *asutp@spmi.ru*

**И.Е.ШАБЛОВСКИЙ**, студент, (812) 328-82-56

**А.В.КОШКИН**, студент, (812) 328-82-56

*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

**N.I.KOTELEVA**, PhD in eng. sc., assistant lecturer, *asutp@spmi.ru*

**I.E.SHABLOVSKY**, student, (812) 328-82-56

**A.V.KOSHKIN**, student, (812) 328-82-56

*Saint Petersburg State Mining University*

## **КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТРЕНАЖЕРЫ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ОПЕРАТОРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ: АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ РЕШЕНИЙ И ПУТИ ИХ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ**

На сегодняшний день большое количество разнообразных функций по управлению сложными технологическими процессами возлагается на труд операторов. Очень часто от их действий зависит качество получаемого продукта и правильная безаварийная эксплуатация оборудования. В статье представлен краткий обзор существующих программно-тренажерных комплексов для обучения операторов технологических процессов нефтегазовой отрасли, обозначены основные проблемы развития компьютерных тренажеров, а также пути их усовершенствования

**Ключевые слова:** компьютерный тренажер, обучение операторов.

## **COMPUTER TRAINING SIMULATOR FOR INSTRUCTION OF OIL AND GAS TECHNOLOGICAL PROCESSES OPERATORS: THE ANALYSIS OF EXISTING DECISIONS AND THE WAY OF THEIR IMPROVEMENT**

Today a considerable quantity of various functions on management of difficult technological processes is assigned to shoulders of operators. Very often quality of a received product and correct accident-free operation of the equipment depends on their actions. In given article the short review of existing programmno-training complexes for training of operators of technological processes of oil and gas branch is presented, the basic problems of development of computer training apparatus, and also ways of their improvement are designated.

**Key words:** computer training simulator, operators instruction.

В настоящее время на многих предприятиях нефтегазовой отрасли наблюдается тенденция к использованию для обучения операторов технологических процессов виртуальных тренажеров. Современные тренажеры для операторов имеют ряд недостатков и, к сожалению, задача создания оптимального компьютерного тренажера для обучения операторов, несмотря на множест-

во существующих подходов, до сих пор окончательно не решена. Это связано с трудностью представления полностью реального процесса в компьютерном интерфейсе, а при создании необходимой программы она становится довольно сложной и не совсем схожей с реальными процессами и др. В статье представлен обзор существующих компьютерных тренажеров, рас-



смотрены основные этапы их создания, обозначены трудности, возникающие при разработке компьютерных тренажеров и возможные пути их усовершенствования.

При управлении сложным технологическим объектом, к которым, безусловно, относятся нефтегазовые процессы, оператор отслеживает состояние совокупности параметров, различные сочетания которых характеризуют множество возникающих ситуаций. При этом опытный оператор руководствуется интуицией, осуществляя наработанные «правильные» стратегии, зафиксированные в технологических инструкциях, содержащих несколько сотен правил. Задача разработчика компьютерного тренажера – передача этих наработанных правил программе. Обучаясь на таком тренажере, оператор усвоит и закрепит основные навыки управления в различных режимах работы этого объекта. Компьютерные тренажеры способны имитировать не только стандартные или регламентируемые ситуации, но и нештатные, аварийные и другие ситуации, которые могут привести к печальным последствиям в случае неправильных действий операторов.

Основной задачей при разработке компьютерных тренажеров является обучение операторов. Но это далеко не единственная проблема, решаемая компьютерными тренажерами. Кроме обучения операторов, компьютерные тренажеры могут использоваться для разработки и проверки новых технологических решений, стратегий управления, тестирования различных устройств, подключаемых к объекту управления, и т.д.

Процесс разработки компьютерного тренажера для обучения операторов технологических процессов нефтегазовой отрасли условно можно разделить на три этапа: 1) разработка адекватной модели технологического процесса; 2) разработка базы данных с разнообразными параметрами процесса (значения параметров должны охватывать всю область допустимых значений для выбранного процесса) для поддержания работы компьютерного тренажера; 3) разработка методики обучения операторов. На сегодняшний день нет готовых решений или ре-

комендаций по выполнению перечисленных этапов создания компьютерных тренажеров. Это подтверждает актуальность исследований, проводимых в этом направлении.

В настоящее время современные компьютерные тренажеры для обучения операторов находятся в начале своего развития. Причем, существует ряд проблем, существенно затормаживающих их развитие. Прежде всего, это связано с большим количеством различных компаний-разработчиков компьютерных тренажеров, жестко конкурирующих между собой и держащих в строгой секретности положительные и отрицательные результаты своей деятельности. Кроме того, разрабатываемые в строгой секретности для конкретного заказчика тренажеры являются зачастую непонятными самим заказчикам, что само по себе парадоксально, учитывая стандартные функции компьютерного тренажера.

Современный мировой рынок компьютерных тренажеров представлен тремя основными производителями: «Honeywell», ABB и «Aspen Technology». Российский рынок компьютерных тренажеров представлен компаниями СП «Петроком», ООО «Инсист Автоматика» и др. Рассмотрим некоторые разработки этих компаний [1].

Тренажерный комплекс «UniSim» компании «Honeywell» представляет собой комплексную систему, включающую статические и динамические модели процесса и рабочее место оператора и инструктора. При разработке компьютерного тренажера «UniSim» используются статические и динамические модели основных технологических процессов нефтегазопереработки. Одним из достоинств этих тренажеров является реализация автоматизированных рабочих мест операторов и инструкторов на базе реальных распределенных систем управления. Математические модели для тренажерного комплекса «UniSim» построены на базе материально-теплового баланса. Заявленная точность модели в установленном режиме 95 %.

Компьютерные тренажер АФОН основан на двух методиках обучения: прогнозирование последствий нарушения нормального хода процесса и определение возмож-

ных причин нарушения. Обе методики формируются на базе знаний путем обобщения известных типовых нарушений хода процесса, анализа таких нарушений на реальных технологических установках, моделирования этих ситуаций на компьютерных тренажерах и привлечения экспертных оценок специалистов. База знаний представляет собой легко пополняемый перечень типовых нарушений процесса («причин») с порождаемыми ими последствиями («симптомами»). Во время обучения оператора система АФОН предъявляет обучаемому выбранную случайным образом причину и предлагает оценить изменение параметров. Ответы обучаемого оцениваются, а на стадии тренировок приводится правильный ответ.

Автоматизированная система обучения ДИАГНОСТ предназначена для выработки у оператора умения эффективно и надежно определять причины неисправностей по характеру изменений параметров технологического процесса. Обучение реализуется в форме «игры» с оператором, в ходе которой ДИАГНОСТ «загадывает» одну из причин и делает «первоначальный вброс» – сообщает оператору об изменении одного из параметров процесса вследствие наступления загаданной причины. Задача оператора – найти загаданную причину путем запросов изменений остальных параметров из предлагаемого списка, причем сделать это необходимо за минимальное количество шагов. Для лучшего понимания задачи обучаемому представляются подсказки в виде технологических схем, описаний процесса, а также оценок сделанного информационного запроса. Использование системы ДИАГНОСТ наиболее продуктивно после тренинга обучаемых с помощью автоматизированных методик формирования базовых навыков АФОН. При этом ДИАГНОСТ позволяет не только развивать и укреплять умение диагностировать, но и совершенствовать это умение за счет мотивирования обучаемого на применение наиболее эффективных способов решения задачи диагностики.

Программный комплекс ПЛАС+ представляет собой открытую, расширяемую пользователем автоматизированную систе-

му создания, редактирования и освоения планов локализации и ликвидации аварийных ситуаций (ПЛАС). В него входят: электронный учебник, содержащий принципиальную технологическую схему и план-схему размещения оборудования, справочную информацию, необходимую оператору для действий в аварийных ситуациях, краткую характеристику опасности технологических блоков; модуль проверки знаний, позволяющий в режиме тренировки обучаемому практиковаться в выборе правильных элементов, в режиме экзамена – тестировать знания и умения оператора; модуль настройки параметров тестирования, с помощью которого специалисты Службы промышленной безопасности и подготовки персонала корректируют систему оценки за экзамен; модуль редактирования – обновляет, редактирует и создает компьютерный тренажер «с нуля».

Перечисленные программно-тренажерные комплексы системы в большей или меньшей степени используются российскими предприятиями нефтегазовой отрасли. Безусловно, каждый из них имеет свои достоинства и недостатки, устранение которых целесообразно осуществлять, не производя новые программно-тренажерные комплексы, а усовершенствуя уже существующие.

По мнению авторов, перспективным направлением развития компьютерных тренажеров для обучения операторов технологических процессов нефтегазовой отрасли является усовершенствование математической модели, лежащей в основе тренажерного комплекса. Причем при усовершенствовании математической модели целесообразно применять современные методы компьютерного моделирования, основанные на теории нейронных сетей, нечетких множеств и экспертных систем. Варьирование этих методик может быть разнообразным и направлено на увеличение точности моделирования.

Построение нечеткой модели процесса состоит из следующих этапов [3]: предварительное изучение объекта управления; выбор наблюдаемых выходных переменных и управляющих воздействий, определение пределов их изменения и выбор масштаб-

ных нормировочных коэффициентов; определение лингвистических переменных и их функций принадлежности, соответствующих отдельным термам; формулирование на основе интервьюирования и анкетирования экспертов логических правил, определяющих алгоритмы управления; проверка сформулированных правил на полноту, непротиворечивость и избыточность; выбор операторов импликации и инференц-процедуры, а также метода дефазификации; проведение исследования функционирования нечеткой системы управления.

Построение нейросетевой модели процесса состоит из четырех этапов [3]: предобработка данных; выбор структуры сети; оптимизация параметров и проверка адекватности решения. Применение нейросетевых методов при создании модели процесса позволит корректировать параметры модели в зависимости от изменяющихся условий и повысит тем самым точность моделирования.

Нейросетевые и нечеткие модели могут лежать в основе экспертной системы. Построение экспертной системы включает шесть основных этапов: идентификация, концептуализация, формализация, выполнение, тестирование и опытная эксплуатация. Экспертная система строится на основе поведенческой логической модели технологического процесса, использующей понятия отклонения наблюдаемых параметров от нормы. При отклонении технологического процесса от нормального режима эксплуатации экспертная система формирует совет оператору в виде указаний, какие из управляющих воздействий в каком направлении следует изменить (увеличить, уменьшить) и прогноз поведения технологического процесса [2].

Один из вариантов реализации компьютерного тренажера на базе экспертной системы [2] – построение по поведенческой модели процесса независимого от сбора оперативной информации тренажера, позволяющего имитировать различные отклонения технологического процесса от нормаль-

ного режима эксплуатации. В этом случае реальные значения параметров имитируются вводом с клавиатуры компьютера любого текущего состояния объекта. Оператору следует так подобрать управляющие воздействия, чтобы перевести технологический процесс в нормальный режим эксплуатации. Такой перевод, как правило, осуществляется за несколько шагов последовательным приближением к норме.

В заключение можно сказать, что анализ динамики развития рынка компьютерных тренажеров свидетельствует о быстром прогрессе в данной области. На предприятиях нефтегазовой отрасли все чаще используются программно-тренажерные комплексы при обучении операторов. В ближайшем будущем компьютерные тренажеры должны стать более доступными, дешевыми и реально отражающими течение технологических процессов. Способствовать этому будут развитие методов построения математической модели, лежащей в основе компьютерно-тренажерного комплекса и усовершенствование методик обучения операторов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дозорцев В.М. Компьютерные тренажеры для обучения операторов технологических процессов. М.: СИНТЕГ, 2009.
2. Компьютерный тренажер для операторов технологических процессов доменного производства / В.П.Чистов, Г.Б.Захарова, И.А.Кононенко, В.Г.Титов // Программные продукты и системы. 2002. № 3.
3. Методы робастного, нейронечеткого и адаптивного управления: Учебник / Под ред. Н.Д.Егупова. М.: Изд-во МГТУ, 2002.

## REFERENCES

1. Dosorcev V.M. Computer training apparatus for training of operators of technological processes. Moscow: SINTEG, 2009.
2. Chistov V.P., Sacharova G.B., Kononenko I.A., Titov V.G. Computer training apparatus for operators of technological processes of domain manufacture / Software products and systems. 2002. N 3.
3. Robast, neuro-fuzzy and adaptive methods control: textbook / Ed. by N.D.Egupov; MG TU. Moscow, 2002.

**П.В.ИВАНОВ**, канд. техн. наук, ассистент, *skript@gmail.com*  
**А.В.БОЙКОВ**, студент, 328-82-56  
*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

**P.V.IVANOV**, PhD in eng. sc., assistant, *skript@gmail.com*  
**A.V.BOIKOV**, student, 328-82-56  
*Saint Petersburg State Mining University*

## **ПРЕИМУЩЕСТВА ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА LabView ДЛЯ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ**

В настоящее время автоматизация производственного процесса является весьма важной проблемой. Это обусловлено сложностью и вредностью работы на металлургических предприятиях. Инновационным решением данного вопроса могут стать системы технического зрения.

Описаны основные предпосылки и проблематика машинного зрения. Предложены способы их реализации на основе программного продукта LabView компании «National Instruments».

**Ключевые слова:** автоматизация, техническое зрение, LabView, «National Instruments».

## **ADVANTAGES OF APPLICATION OF PROGRAM COMPLEX LabView TO CREATION OF VISUAL SYSTEMS**

Automatization in manufacturing process is a very urgent question at present time: it's based on complexity and health hazard of work at metallurgical factories. Technical vision may become an innovative decision for this problem.

In the article main backgrounds and topics are described. Also methods for their realisation with using of LabView software of «National Instruments» Company are offered.

**Key words:** automation, technical vision, LabView, «National Instruments».

В настоящее время робототехнические комплексы имеют широкое распространение во всех сферах человеческой деятельности, активно применяются при автоматизированном проведении и контроле технологическими процессами. Не является исключением и металлургическая промышленность, которая неразрывно связана с опасными и вредными для здоровья и жизни человека факторами. Минимизировать, а то и вовсе устранить вероятность риска можно, заменив человеческий труд автоматизированной системой управления и промышленного контроля производственной схемы.

Реализацию данных систем можно осуществить в LabView или Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench (среда разработки лабораторных приборов) компании «National Instruments» (США), имеющую на фоне других ныне существующих программных пакетов ряд существенных преимуществ.

1. Среда программирования LabView представлена в виде графической оболочки, которая оснащена набором иконок-инструментов, имеющих ассоциативно понятные возможности. Таким образом, LabView реализован на графическом языке программи-

рования. Это сводит задачу к созданию блок-диаграммы, которая самостоятельно программой будет преобразована в машинный код, что значительно облегчает работу программиста.

2. Среда LabView многоплатформенна, т.е. реализована на большинстве операционных систем, таких как Windows, Macintosh, Linux и др. В свою очередь персональные компьютеры имеют повсеместное распространение во всех областях человеческой деятельности, что способствует внедрению LabView.

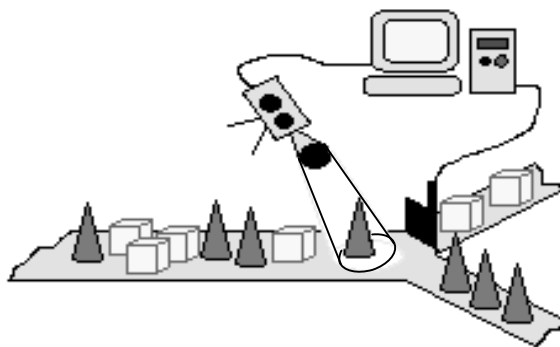
3. LabView имеет обширные технические возможности и высоко функциональный математический аппарат, способные решать практически любую поставленную задачу.

4. Достоинством LabView является немаловажный в настоящее время факт: возможность удаленного управления и наблюдения посредством связи internet.

5. LabView предназначен не только для снятия измерений и анализа полученных величин, но и мониторинга и управления процессами.

С помощью многофункциональной среды LabView можно в кратчайшие сроки создавать автоматизированные системы промышленного контроля, а также привносить в них новые инновационные идеи. Примером таких технологий может послужить техническое зрение (машинное зрение). Машинное зрение (см. рисунок) – это возможность существенно расширить существующие функциональные границы систем автоматического контроля за счет ряда практических и теоретических знаний, связанных с распознаванием сцены наблюдения по ее двумерным проекциям (фотографическим изображениям) и последующим применением полученных сведений.

Техническому зрению легко найти применение в промышленности, в частности, в металлургии. Примером может послужить классификация и сортировка объектов, движущихся по конвейерной ленте в режиме реального времени. Камера получает данные об исследуемом объекте и отправляет их на компьютер, который производит распозна-



Схематичное изображение применения технического зрения

вание и генерирует управляющий сигнал на объект управления, – подвижную перегородку, которая определяет дальнейшее направление движения объекта.

Однако, несмотря на огромные предпосылки, создание сложных автоматизированных систем промышленного контроля, обладающих техническим зрением и функционирующих в режиме реального времени, осложнено одной существенной проблемой – разработкой методов и алгоритмов понимания изображения. Появление этой проблемы неразрывно связано с объектом основных исследований – двумерными проекциями.

Например, попробуем описать такую, казалось бы, простую геометрическую фигуру, как квадрат. Однако для этого нам понадобится как минимум четыре условия: фигура замкнута, имеет четыре равные стороны, все углы прямые и данные о цвете фигуры. Этот пример говорит о сложности описания реального объекта. Проблема объясняется отсутствием развитого математического аппарата, дающего объяснение бесконечно разнообразной цветовой гамме и форме существующих объектов.

Реализуемые проекты в среде LabView и ряде других программ задают дополнительные требования технического характера, связанные с обработкой и анализом полученных от камеры данных:

- Высокое качество обрабатываемого изображения. Это довольно трудная задача, так как на любом изображении есть помехи: сложный фон, заслонение объектов, блики, тени, разнообразие и изменчивость самих объектов.

- Точность обработки данных. Малейшая погрешность в первичной обработке может привести к невозможности дальнейшего анализа изображения, например, не точно отделив фон от объекта, нельзя правильно определить реальные геометрические параметры.

- Относительная простота реализации программы. Расчет большого количества данных (а именно к таким и относятся изображения) в реальном времени требует максимальной отдачи ресурсов системы и длительного времени.

- Однотипность исследуемых объектов. Все ныне существующие программы имеют

узкую специализацию, которая в большей степени связана с наличием известной модели исследуемого объекта и ряде операций по его преобразованию.

Техническое зрение является молодым и перспективным направлением, у которого, бесспорно, есть перспектива занять свое место в металлургической промышленности и других областях человеческой деятельности. Однако это требует комплексного подхода, результатом которого будет создание универсальной программы, распознающей любые предметы, независимо от их формы, цвета или структурного содержания.

**Э.А.ЗАГРИВНЫЙ**, д-р техн. наук, профессор, [zagrivniy@yandex.ru](mailto:zagrivniy@yandex.ru)

**Д.А.УСТИНОВ**, канд. техн. наук, доцент, [bescheiden@rambler.ru](mailto:bescheiden@rambler.ru)

**В.И.МАЛАРЕВ**, канд. техн. наук, доцент, [malarev@yandex.ru](mailto:malarev@yandex.ru)

**Е.Е.ВАСИЛЬЕВА**, инженер, 328-82-67

*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

**E.A.ZAGRIVNY**, Dr. in eng. sc., professor, [zagrivniy@yandex.ru](mailto:zagrivniy@yandex.ru)

**D.A.USTINOV**, PhD in eng. sc., associate professor, [bescheiden@rambler.ru](mailto:bescheiden@rambler.ru)

**V.I.MALAREV**, PhD in eng. sc., associate professor, [malarev@yandex.ru](mailto:malarev@yandex.ru)

**E.E.VASILIEVA**, engineer, 328-82-67

*Saint Petersburg State Mining University*

## **ВЛИЯНИЕ РАБОТЫ ЗАБОЙНЫХ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ И ГЛУХОЗАЗЕМЛЕННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ**

Рассмотрены основные способы управления мощностью, передаваемой нагревательному элементу забойных электротермических устройств. Проведено исследование влияния работы нагревательного элемента на качество электроэнергии в распределительных сетях.

**Ключевые слова:** добыча высоковязкой нефти, термические технологии добычи, паронефтяной фактор, забойные электротермические устройства, забойный скважинный электронагреватель, фазовое управление, целочисленное управление, субгармонические составляющие.

## **THE ELECTROTHERMAL COMPLEXES INFLUENCE ON QUALITY OF THE ELECTRIC POWER IN THE ISOLATED AND DEAFLY EARTHED NEUTRAL NETWORKS**

The basic ways of control of power, transferred to a heating element of coal-face electrothermal devices are considered. Research of influence of work of a heating element on quality of the electric power in distributing networks is carried out.

**Key words:** extraction oil of high viscosity, thermal technologies of extraction, steam-oil factor, face electrothermal devices, face well electroheater, phase management, integer management, subharmonic components.

Рассмотренный в работах [1,2] электротермический комплекс на основе скважинного электродного нагревателя, предназначенный для теплового воздействия на продуктивный пласт высоковязкой нефти, позволяет выполнять технологические операции по паротепловому (ПТВ), импульсно-дозированному тепловому (ИДТВ) и термогидродинамическому воздействию (ТГВ) на призабойную зону пласта. Скважинный электродный нагреватель получает питание от однофазного источника пере-

менного напряжения. Система управления процессом термического воздействия предполагает регулирование тока скважинного нагревателя с помощью однофазного тиристорного регулятора. Величина тока контролируется с помощью внутренней обратной связи по току.

Управление мощностью, передаваемой нагревательному элементу, сводится к управлению группами тиристоров, включенных встречно-параллельно, или симисторами. Существуют два варианта управления:

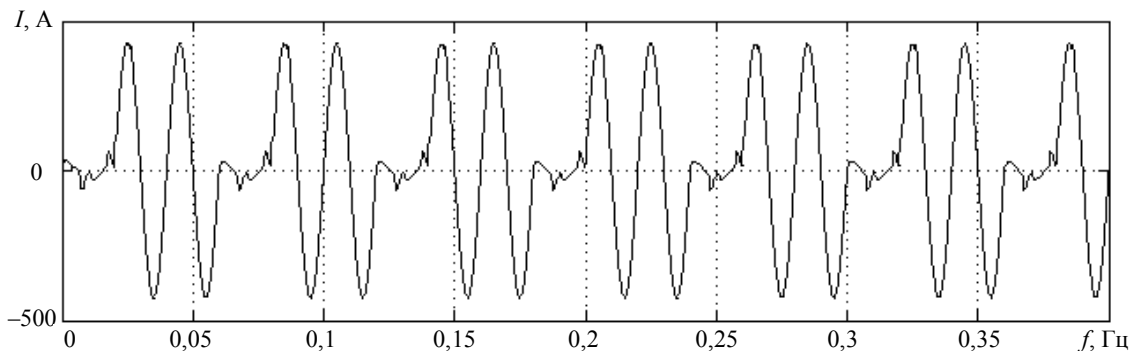


Рис.1. Ток нагревательного элемента при целочисленном управлении ( $N = 2$ ,  $M = 3$ )

1) фазовое управление – формирование каждого периода кривых напряжения и тока нагревательного элемента посредством управления углом открытия тиристорov;

2) целочисленное управление – регулирование мощностью путем исключения целых периодов напряжения и тока.

Фазовый способ управления подходит для любых типов нагрузки, обеспечивает плавность и непрерывность выходного сигнала; позволяет поддерживать минимальное отклонение температуры в комплексе с ПИД-регулятором. К его недостаткам можно отнести высокую стоимость и генерацию помех при переключении.

Для целочисленного способа управления током характерны низкая стоимость аппаратуры управления, простая структура управления, отсутствие помех, создающихся третьей гармоникой при включении [3]. К его недостаткам можно отнести значительные разрывы в выходном сигнале, нестабильная мощность для потребителей с низкой нагрузкой, применение только для потребителей с постоянной резистивной нагрузкой.

Полный период управления включает  $N$  циклов проводимости (количество периодов напряжения питания за время прохождения тока через нагревательный элемент) в рамках целого числа циклов  $M$  (количество периодов напряжения питания в полном цикле регулирования). Величина средней мощности, подводимой к нагрузке, регулируется посредством регулирования величины соотношения  $N/M$ . В качестве основы для проведения анализа Фурье (гармониче-

ского анализа) период повторяемости формы кривой тока или напряжения необходимо принять равным  $Mf$ , где  $f$  – частота напряжения питания. На рис.1 показан ток нагревательного элемента при целочисленном управлении при  $N = 2$ ,  $M = 3$ , выходное напряжение при этом составляет  $U_{\text{вых}} = 67\%$ .

Данный тип управления является источником появления субгармоник и промежуточных гармоник, однако не является источником высших гармоник – основной составляющей сигнала [4]. Спектр сигнала тока, характеризующий данный случай, представлен на рис.2. Как видно из рисунка, основными составляющими сигнала являются гармоника частоты напряжения питания и субгармоника с частотой  $(2f)/3$ .

Рассмотрим влияние работы нагревательного элемента на качество электроэнергии в распределительных сетях 35 кВ при изолированном режиме нейтрали и 110 кВ при глухозаземленной нейтрали. Нагрузка во вторичной цепи трансформатора представляет активное сопротивление  $P = 4$  МВт. Регулирование нагрузки производим фазовым и целочисленным способами только в фазе  $A$ , при этом объем регулируемой нагрузки в этой фазе составляет 4 МВт (100 % нагрузки). При фазовом управлении угол управления  $\alpha$  имеет следующие значения:  $18^\circ$  (90 % выходного напряжения);  $45^\circ$  (75 % выходного напряжения),  $90^\circ$  (50 % выходного напряжения) и  $135^\circ$  (25 % выходного напряжения). При целочисленном управлении параметры  $M$  и  $N$  имеют следующие значения:  $M = 10$  и  $N = 5$  (50 % выходного напряжения).



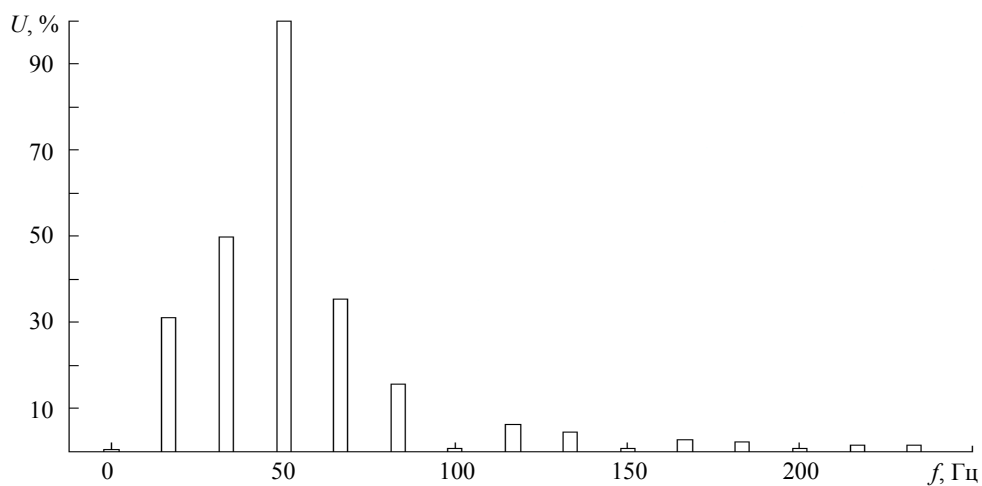


Рис.2. Спектр сигнала тока при целочисленном управлении ( $N = 2, M = 3$ )

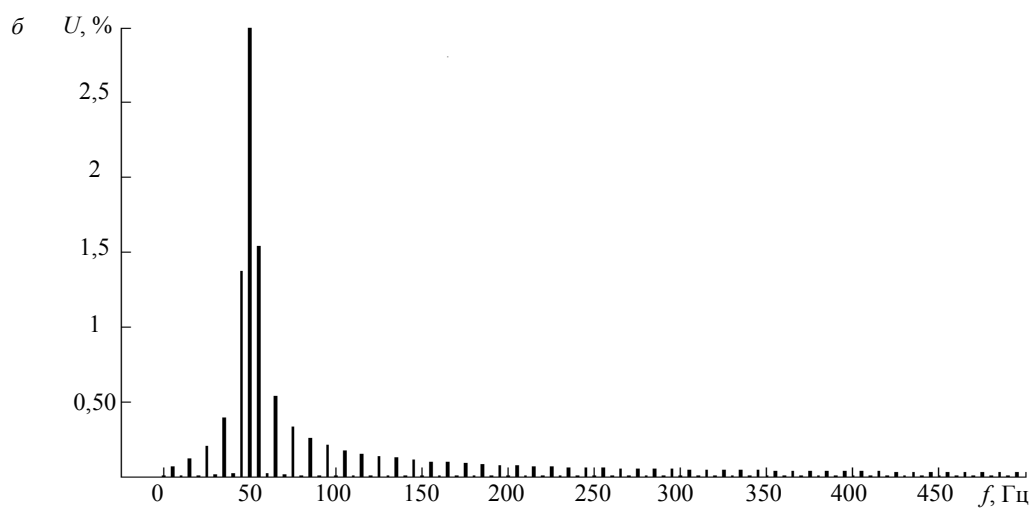
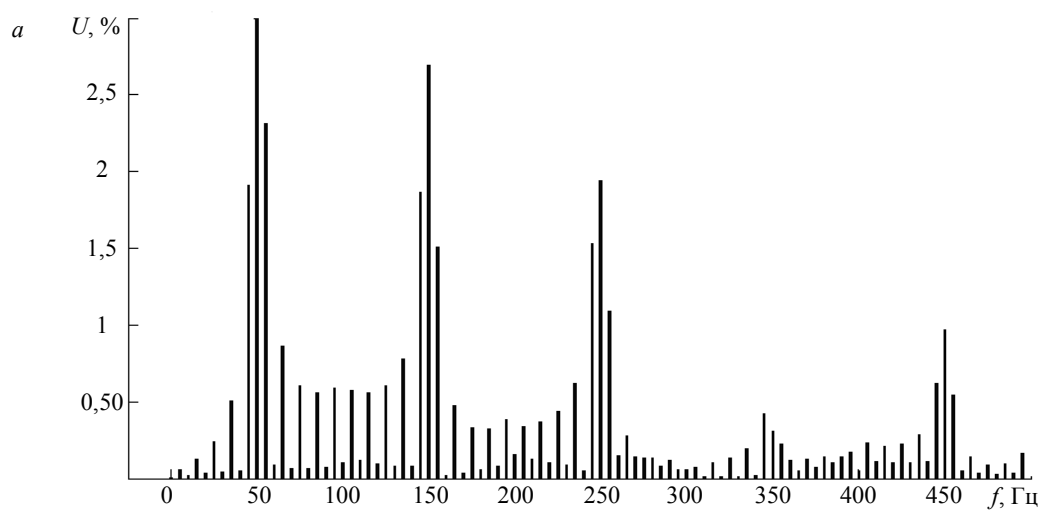


Рис.3. Спектр сигнала напряжения при целочисленном управлении ( $N = 5, M = 10$ ) в случае изолированного (*a*) и глухозаземленного (*б*) режима нейтрали

**Характеристика гармонических составляющих линейного напряжения  $U_{AB}$  при различных значениях выходного напряжения**

Выходное напряжение, %	Величина гармонической составляющей, %				
	1-я	3-я	5-я	7-я	9-я
90	100	0,93	1,37	1,62	1,70
75	100	3,65	4,05	3,03	2,15
50	100	5,34	3,78	3,15	2,58
25	100	5,24	2,74	2,13	2,89

*Примечание.* Фазовое управление, величина регулируемой части нагрузки 100 %,  $U_{AB} = 35$  кВ

При целочисленном управлении (см. таблицу), при величине регулируемой части нагрузки 25 и 50 %, при различных значениях выходного напряжения отсутствуют гармонические составляющие линейного напряжения  $U_{AB}$  на стороне 35 кВ, кратные 50 (кроме основной), однако присутствуют нечетные субгармонические составляющие на частотах, кратных пяти. Их величины не превышают 0,9 % от основной частоты. При увеличении доли регулируемой части нагрузки в фазе в случае целочисленного способа управления на высшей стороне трансформатора появляются нечетные гармоники, кратные 50. На рис.3, а показан спектральный состав линейного напряжения  $U_{AB}$  на стороне 35 кВ при целочисленном управлении, величина регулируемой части нагрузки 100 %.

На рисунке видно присутствие нечетных гармонических составляющих кратных 50. Их величина достигает: для 3-й гармоники (150 Гц) более 2,5 %, для 5-й (250 Гц) – около 2 %, для 7-й (350 Гц) – около 0,5 %. Кроме названных гармонических составляющих в спектральном составе присутствуют нечетные субгармонические составляющие кратные пяти на всем представленном диапазоне частот. Это можно объяснить тем, что при использовании изолированного режима нейтрали на высокой стороне питающего трансформатора, регулировании большой нагрузки в одной фазе

А (75 и 100 %), в нерегулируемых фазах В и С происходят скачки напряжения. Поскольку в моделировании использованы модели трансформатора с учетом сопротивлений обмоток и насыщения в магнитопроводе, а также трехфазного источника электроэнергии, обладающего внутренним сопротивлением, произошло искажение напряжения на высокой стороне и появление нечетных гармонических составляющих кратных 50.

При использовании на высокой стороне глухозаземленного режима нейтрали ( $U_{AB} = 110$  кВ), целочисленном управлении и регулировании большой нагрузки в одной фазе А (75 и 100 %), в нерегулируемых фазах В и С скачки напряжения будут отсутствовать (рис.3, б). Изменение напряжения в регулируемой фазе будет скомпенсировано благодаря применяемому режиму нейтрали.

Выявлено, что появление нечетных гармоник, кратных 50, является причиной применения изолированного режима нейтрали на высшей стороне трансформатора, использования модели трансформатора с учетом сопротивлений обмоток и насыщения в магнитопроводе, а также трехфазного источника электроэнергии, обладающего внутренним сопротивлением. Отметим, что при применении глухозаземленного режима нейтрали на высшей стороне питающего трансформатора, при фазовом управлении амплитуды гармонических составляющих меньше, чем соответствующие амплитуды гармонических составляющих с изолированным режимом нейтрали на высшей стороне питающего трансформатора.

Показано, что при глухозаземленном режиме нейтрали на высшей стороне питающего трансформатора, целочисленном регулировании в спектральном составе линейного напряжения присутствуют только нечетные субгармонические составляющие кратные пяти.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Загрянный Э.А.* Электротермический комплекс на основе скважинного электродного нагревателя мощностью более 500 кВт для теплового воздействия на продуктивный пласт высоковязкой нефти / Э.А.Загрянный, А.Е.Козярук, С.Н.Батаев // *Электротехника*. 2003. № 5.
2. *Загрянный Э.А.* Электротермическое воздействие на продуктивный пласт высоковязкой нефти с помощью комбинированного забойного теплогенератора / Э.А.Загрянный, В.И.Маларев, Е.Е.Мельникова // *Материалы конференции «Наука и новейшие технологии при поисках, разведке и разработке месторождений полезных ископаемых»*. М., 2008.
3. *Збигнев Ханзелка.* Управление целочисленными периодами тиристорных переключателей / Збигнев Ханзелка, Анжей Бень. // *Энергосбережение*. 2005. № 6.
4. *Шахматов С.П.* Низкочастотные помехи: качество напряжения тоже можно измерить // *Силовая электроника*. 2004. № 4.

## REFERENCES

1. *Zagrivniy E.A., Kozjaruk A.E., Bataev S.N.* Eelectrothermal complex on a basis tube electrode heater capacity more than 500 kW for thermal influence on a productive layer heave oil // *Electrical engineer*. 2003. N 5.
2. *Zagrivniy E.A., Malarev V.I., Melnikova E.E.* Eelectrothermal influence on a productive layer heave oil with the help combined heater // *Materials of conference «Science and the newest technologies by searches, investigation and development of deposits of minerals»*. Moscow. 2008.
3. *Zbignev Hanselka, Angei Ben.* Management of the integer periods thiristor switches. Powersawe. 2005. N 6.
4. *Shakhmatov S.P.* Low-frequency of a handicap: to measure the quality of a votage is possible // *Power electronics*. 2004. N 4.

**Д.А.УСТИНОВ**, канд. техн. наук, доцент, [bescheiden@rambler.ru](mailto:bescheiden@rambler.ru)

**А.В.ТУРЫШЕВА**, аспирантка, [anna\\_turysheva\\_21@mail.ru](mailto:anna_turysheva_21@mail.ru)

*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

**D.A.USTINOV**, PhD in eng. sc., associate professor, [bescheiden@rambler.ru](mailto:bescheiden@rambler.ru)

**A.V.TURYSHEVA**, post-graduate student, [anna\\_turysheva\\_21@mail.ru](mailto:anna_turysheva_21@mail.ru)

*Saint Petersburg State Mining University*

## ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МАШИН И КОМПЛЕКСОВ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Рассмотрены проблемы электроснабжения объектов нефтегазодобычи удаленных районов. Обосновано применение локальных систем электроснабжения с использованием в качестве энергоносителя попутного нефтяного газа. Выполнен анализ применяемой локальной системы электроснабжения и даны рекомендации по ее совершенствованию путем реализации автоматического секционирования воздушных линий электропередачи на основе децентрализованного алгоритма работы многофункциональных автоматических пунктов секционирования.

**Ключевые слова:** электроснабжение, попутный нефтяной газ, микротурбинная установка, автоматический пункт секционирования.

## SUBSTANTIATION STUDY ABOUT THE RATIONAL CIRCUIT OF POWER SUPPLY OF MACHINES AND COMPLEXES OF THE OIL AND GAS PRODUCING ENTERPRISES

The problems of power supply of the distal oil and gas producing enterprises are considered. Application of local system of electro-power supply with using passing oil gas is based. The analysis of system of electro-power supply in operation is executed and recommendations on its perfection are given by realization of automatic sectioning overhead power line on a basis decentralized algorithm of work of multipurpose automatic slice post.

**Key words:** power supply, passing oil gas, microturbine installation, automatic slice post.

В настоящее время специфика электроснабжения машин и комплексов нефтегазодобывающих предприятий (НГДП) определяется следующими факторами: все большим удалением источника питания от центра электрических нагрузок; ухудшением горно-технических условий, требующих все больших удельных энергозатрат на добычу полезных ископаемых; тенденцией роста единичных мощностей добычных и перерабатывающих комплексов; соизмеримостью мощности установок с мощностью трансформаторной подстанции [5]. Большая про-

тяженность низко- и высоковольтных сетей, территориальная рассредоточенность потребителей электроэнергии, неравномерность графиков электрических нагрузок потребителей (что обусловлено самой технологией и организацией работ) являются основными преградами на пути повышения надежности и экономичности электроснабжения. Одним из способов повышения надежности и экономичности электроснабжения является максимальное приближение центров электрических нагрузок к электро-механическим комплексам НГДП, а также



Рис.1. Структурная схема электроснабжения на основе энергоносителя в виде попутного нефтяного газа

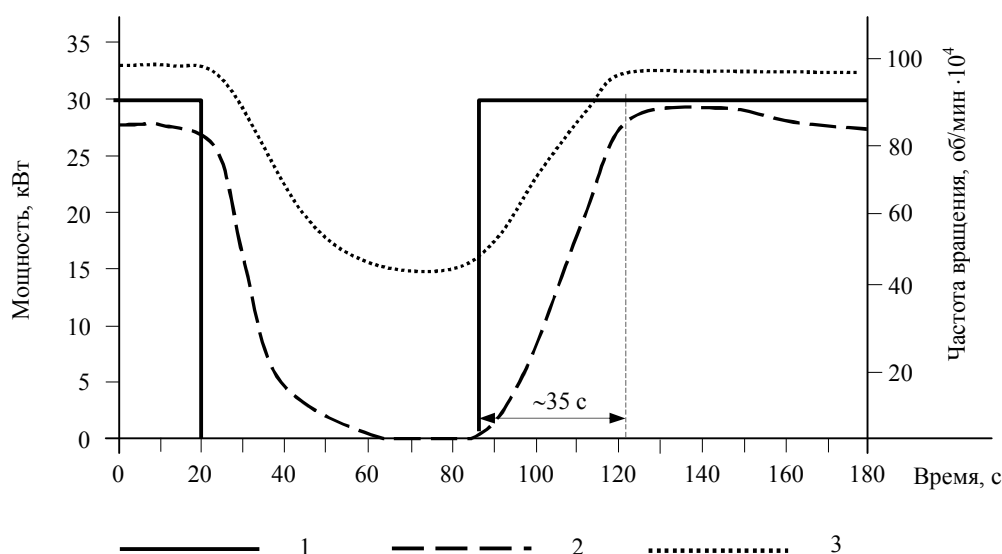


Рис.2. Осциллограмма изменения частоты вращения и мощности турбины при сбросе/набросе номинальной нагрузки (электроагрегат С30)  
1 – электрическая нагрузка; 2 – мощность, развиваемая турбиной; 3 – частота вращения турбины

принятием мер по реконструкции электросетей. В качестве энергоносителя в районах интенсивной нефтедобычи целесообразно использование попутного нефтяного газа (ПНГ), утилизация которого является одной из актуальных проблем нефтедобывающей отрасли при разработке месторождений в отдаленных районах. Ежегодная добыча попутного нефтяного газа в России по различным оценкам составляет 30-60 млрд м<sup>3</sup>. При этом на газоперерабатывающие заводы поступает только 11-12 млрд м<sup>3</sup> [1,2], остальная часть углеводородного топлива сжигается в факелах, либо списывается на технологические потери.

Установка, работающая на попутном нефтяном газе, включает в себя следующие основные блоки: турбинную установку, состоящую из синхронного генератора, компрессора, турбины и камеры сгорания; трансформатора; аккумуляторных батарей (АБ); преобразователя частоты и нагрузки (рис.1).

Мощностной ряд электроагрегатов (производимых или находящихся в стадии испытаний): 30, 50, 60, 70, 75, 80, 100, 200, 250, 300, 375, 400 кВт. При этом в режиме параллельной работы могут быть включены до 100 установок. Таким образом, мощность автономных источников, работающих на попутном нефтяном газе, может составлять

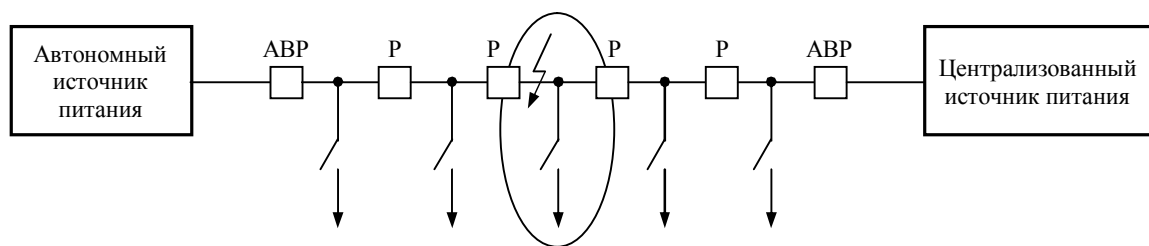


Рис.3. Децентрализованное управление аварийным режимом работы сети  
Р – АПС; АВР – АПС в качестве автоматического ввода резервного питания

3-40 МВт. В основном используются синхронные генераторы. Однако не исключена возможность применения и асинхронных генераторов [6].

В отличие от газопоршневых и дизельных агрегатов установки, работающие на попутном нефтяном газе, способны надежно работать при 100 %-ном набросе нагрузки, хотя при этом время перехода турбодвигателя на новый режим работы может составлять 30-50 с. На рис.2 приведены кривые изменения частоты вращения и развиваемой мощности микротурбоагрегата С30 (Carpstone) при сбросе/набросе нагрузки 100 % (режим работы автономный).

При рассмотрении диаграммы видно, что при набросе нагрузки турбодвигатель выходит на номинальный режим (~30 кВт) примерно через 35 с. Очевидно, что в течение этого времени полное обеспечение нагрузки электроэнергией возможно только при работе электрогенератора совместно с аккумуляторной батареей. Это обстоятельство требует применения АБ повышенной емкости. При параллельной работе электрогенератора с другими установками или с сетью можно использовать АБ меньшей емкости, достаточной только для запуска турбины. Необходимо отметить, что при параллельной работе с сетью запуск возможен и без АБ – за счет электроэнергии сети.

Из-за протяженных (3-30 км) распределительных линий на 6 (10) кВ на НГДП с территориально рассредоточенными потребителями электроэнергии происходит основное количество отказов СЭС. Частота отказов воздушной линии длиной 6 км на

данное напряжение в среднем составляет  $1,5 \text{ год}^{-1}$ , а кабельной линии –  $0,6 \text{ год}^{-1}$  [4].

Известны несколько путей обеспечения требуемой надежности и экономичности систем электроснабжения НГДП: уменьшение приведенной длины линий, обоснованность выбора количества и мест расположения трансформаторных подстанций на напряжение 6-10 кВ, выбор повышенного рационального напряжения, резервирование элементов системы электроснабжения, использование АВР, повышение качества проектных и монтажных работ. Наиболее эффективным способом повышения надежности электроснабжения в воздушных распределительных сетях является реализация автоматического секционирования воздушных линий электропередачи (рис.3) на основе децентрализованного алгоритма работы многофункциональных автоматических пунктов секционирования (АПС) [3]. Каждый отдельный секционирующий аппарат является интеллектуальным устройством, которое анализирует режимы работы электрической сети и автоматически производит ее реконфигурацию в аварийных режимах, т.е. локализацию места повреждения и восстановление электроснабжения потребителей неповрежденных участков сети.

Наличие телемеханики в этом случае не влияет на выполнение основных функций и носит вспомогательный характер (оперативное управление, контроль параметров сети и т.д.), а следовательно, требования к надежности каналов связи снижаются. При телемеханике диспетчер видит конечное состояние на мнемосхеме – локализованный участок сети, все переключения и реконфигурации выполняются автоматически без его

участия. При таком подходе в задачу диспетчера входит только направление на поврежденный участок ремонтной бригады.

Преимуществом децентрализованного подхода является отсутствие роли человеческого фактора. Отключение короткого замыкания и локализация повреждения происходят автоматически. Время восстановления питания на неповрежденных участках сети сокращается до секунд, и как следствие, снижается риск ущерба потребителям электрической энергии.

Таким образом, обеспечение требуемой надежности и экономичности систем электроснабжения НГДП может быть достигнуто путем создания интеллектуальной системы электроснабжения на основе взаимодействия электрических сетей энергосистемы и сетей предприятий НГДП, обеспечивающей управление потреблением энергии в нормальных и экстремальных режимах при условии бесперебойности энергоснабжения объектов первой и особой категории НГДП и условия минимизации энергозатрат и повышения энергоэффективности.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» за 2009-2013 гг.

## ЛИТЕРАТУРА

1. А газ и ныне там // Нефть и капитал. М., 2008. № 1-2. С.60-61.
2. Гайсин Р. Обременительный попутчик // Нефть России. 2008. № 11. С.76-79.
3. Белоусенко И.В. Управление надежностью электроснабжения объектов ЕСГ / И.В.Белоусенко, С.В.Голубев, М.Д.Дильман // Газовая промышленность. 2004. № 7. С.64-66.
4. Меньшов Б.Г. Электротехнические установки и комплексы в нефтегазовой промышленности / Б.Г.Меньшов, М.С.Ершов, А.Д.Яризов. М.: Недра, 2000. 487 с.
5. Орлов В.П. Попутный газ снижает риски // Нефть России. 2008. № 11. С.80-81.
6. Позжидяев В.М. Микрогазотурбинные электроагрегаты – новое направление в малой энергетике // Академия энергетики. 2005. № 4. С. 26-33.

## REFERENCES

1. And gas and nowadays there // Oil and capital. Moscow, 2008. N 1-2. P.60-61.
2. Gajsin R. Chargeable follower // Oil of Russia. 2008. N 11. P.76-79.
3. Belousenko I.V., Golubev S.V., Dilman M.D. Control of security of electrical supply of objects Unified Gas Supply System // Gas industry. 2004. N 7. P.64-66.
4. Menshov B.G., Ershov M.S., Jarizov A.D. Electro technical installations and complexes in the oil and gas industry. Moscow: Nedra, 2000. 487 p.
5. Orlov V.P. Passing gas reduces risks // Oil of Russia. 2008. N 11. P.80-81.
6. Pozhidaev V.M. Micro gas turbine generating set – a new direction in small power // Power Academy. 2005. N 4. P.26-33.

**Д.Н.САФОНОВ**, аспирант, *Juvus@yandex.ru*  
Санкт-Петербургский государственный горный университет  
**ХАККИНЕН АНТТИ**, профессор, *Antti.Hakkinen@lut.fi*  
**КРАСЛАВСКИ АНЖИ**, профессор, *Andrzej.Kraslawski@lut.fi*  
Лаппеенрантский технологический университет, Финляндия  
**И.Н.БЕЛОГЛАЗОВ**, д-р техн. наук, профессор, *Inbspsmi@mail.ru*  
Санкт-Петербургский государственный горный университет  
**ПАЛМЕР ДЖЕЙСОН**, бизнес-директор, *Jason.Palmer@larox.com*  
**ЭКБЕРГ БЪЯРНЕ**, старший менеджер, *Bjarne.Ekberg@larox.com*  
Корпорация Larox Oy, Турку, Финляндия

**D.N.SAFONOV**, post-graduate student, *Juvus@yandex.ru*  
Saint Petersburg State Mining University  
**HÄKKINEN ANTTI**, professor, *Antti.Hakkinen@lut.fi*  
**KRASLAWSKI ANDRZEJ**, professor, *Andrzej.Kraslawski@lut.fi*  
Lappeenranta University of Technology  
**I.N.BELOGLAZOV**, Dr. in eng. sc., professor, *Inbspsmi@mail.ru*  
Saint Petersburg State Mining University  
**PALMER JASON**, bisnes-director, *Jason.Palmer@larox.com*  
**EKBERG BJARNE**, senior research, *Bjarne.Ekberg@larox.com*  
Larox Oy Co, Turku, Finland

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХОПРОНИЦАЕМОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ФИЛЬТРУЕМОСТИ РАЗЛИЧНЫХ СУСПЕНЗИЙ**

В работе была сделана попытка применить Блэйн-метр для прямой оценки фильтруемости различных материалов. В теоретической части статьи описаны основные закономерности, связывающие Блэйн-индекс порошкового материала и удельное сопротивление осадка. Проведен ряд экспериментов с материалами, взятыми с реально действующих заводов. Для определения Блэйн-индекса использовался лабораторный Блэйн-метр, а для определения удельного сопротивления осадка проводились стандартные тесты на фильтруемость суспензии на лабораторном фильтре, работающем под давлением. В результате обработки экспериментальных данных и необходимых расчетов были получены зависимости, отражающие прямую связь между Блэйн-индексом и удельным сопротивлением осадка.

**Ключевые слова:** Блэйн-индекс, Блэйн-метр, фильтрование под давлением, фильтруемость.

## **APPLICATION OF AIR-PERMEABILITY METHOD FOR FILTERABILITY PREDICTION OF DIFFERENT MATERIALS**

The article is devoted to research work, in which an attempt was made to apply the Blaine-meter for direct assessment of filterability of different materials. In the theoretical part of the article the main laws linking the Blaine index of the powder material and the average specific cake resistance are described. A number of experiments with materials taken from actual operating plants were carried out. To determine the Blaine-index the laboratory Blaine-meter was used, and to de-



termine the average specific cake resistance standard tests of filterability on the batch pressure filter were carried out. As a result of processing experimental data and the necessary calculations direct relations between the Blaine-index and average specific cake resistance were obtained.

**Key words:** Blaine-index, Blaine-meter, pressure filtration, filterability.

**Введение.** Стандартная методика расчета процесса фильтрования, определения условий его протекания и последующего ввода в эксплуатацию промышленного фильтра на обогатительных фабриках подразумевает предварительное проведение ряда тестов на фильтруемость суспензии. Подобные тесты обычно проводятся на специальных лабораторных пилотных фильтрах, отличающихся от промышленных установок лишь размерами и рабочим перепадом давлений. Для получения правдивых результатов тестирования необходимы такие же условия проведения фильтрования, как и на промышленном фильтре, т.е. использовать одинаковые фильтрующие перегородки и одну и ту же суспензию. В ряде случаев это оказывается непростой задачей, так как требует либо транспортировки и последующей наладки лабораторного пилотного фильтра на обогатительной фабрике, либо отправки достаточно большого количества суспензии непосредственно в лабораторию. Довольно часто это приводит к неоправданным дополнительным затратам времени, труда и материальных средств. Поэтому на сегодняшний день актуальна проблема интенсификации тестирования на фильтруемость. Поиск новых способов и методик тестирования ведется, прежде всего, в тех направлениях, которые позволят в будущем упростить этот процесс, снизить его стоимость, сократить сроки получения готовых результатов и уменьшить количество материалов, необходимых для проведения тестов.

Одним из направлений в решении задачи интенсификации тестирования является применение нового лабораторного оборудования, ранее не применявшегося для определения фильтруемости суспензий. Именно такой установкой является Блэйн-метр, измеряющий Блэйн-индекс, или удельную площадь поверхности частиц порошкового материала. Подобный метод измерения

Блэйн-индекса получил широкое распространение в цементной промышленности для определения качества производимого цемента. Несмотря на некоторые недостатки, этим простым способом определения удельной площади поверхности частиц пользуются с начала 40-х годов прошлого столетия.

Удельная площадь поверхности частиц является одним из основных показателей крупности этих частиц порошкового материала. С другой стороны, крупность частиц, по сути, определяет удельное сопротивление осадка, образующегося в процессе фильтрования на фильтровальной перегородке. Таким образом можно проследить определенную связь между Блэйн-индексом и фильтруемостью различных суспензий.

Основная цель работы – определить возможность применения Блэйн-метра для оценки удельного сопротивления осадка, т.е. фильтруемости суспензии. В задачи исследования входило: проведение ряда экспериментов на Блэйн-метре и на лабораторном пилотном фильтре, работающем под давлением; обработка экспериментальных данных и построение необходимых графиков для наглядного представления результатов.

Научная новизна исследовательской работы заключается в том, что была принята первая попытка определения зависимости между удельным сопротивлением осадка и удельной площадью поверхности частиц порошкового материала, полученной напрямую с Блэйн-метра. В результате проведенных экспериментов и обработки экспериментальных данных были построены графики, выражающие эту зависимость. Принимая во внимание простоту работы с Блэйн-метром и высокую скорость получения конечных результатов тестирования, этот метод тестирования может быть с успехом использован для предварительной оценки фильтруемости перед проведением

стандартных полномасштабных пилотных испытаний на фильтруемость суспензии. Данный метод может быть единственно возможным при незначительном количестве материала для тестирования (до 100 г), когда проведение стандартного теста на фильтруемость невозможно.

**Теоретические исследования.** *Тестирование материалов на воздухопроницаемость.* Метод определения Блэйн-индекса основан на измерении времени, необходимого для прохождения определенного объема воздуха через известный объем исследуемого сыпучего материала. Это время используется в дальнейших расчетах для определения удельной площади поверхности частиц (квадратный метр в граммах в минус первой степени или квадратный метр в килограммах в минус первой степени). Подобные тесты проводятся на дешевом и легком в использовании Блэйн-метре. Важными преимуществами данного метода тестирования являются высокая скорость получения результатов и возможность использования очень малого количества пробы для тестирования (менее 100 г).

Методика тестирования порошков на Блэйн-метре подробно описана в стандарте ASTM C 207-07 (Стандартный метод определения удельной площади поверхности гидравлических цементов по воздухопроницаемости, Американская ассоциация тестирования, 2007) и состоит из нескольких этапов. Сначала проводится ряд калибровочных тестов с помощью стандартного порошка (портланд-цемента) с известной удельной площадью поверхности частиц и их распределением по крупности, затем – аналогичные эксперименты с тестируемым материалом. Зная время прохождения одинакового объема воздуха через стандартный и тестируемый порошки, упакованные с заранее известной пористостью, рассчитывается удельная площадь поверхности тестируемого материала.

Несмотря на очевидные преимущества определения удельной площади поверхности с помощью Блэйн-метра, этот метод имеет свои недостатки [2]. Многочисленные эксперименты показали, что аккуратность

метода снижается при тестировании порошков, состоящих из очень мелких частиц. Было установлено, что метод практически неприменим при тестировании материалов с удельной площадью поверхности частиц более 500 м<sup>2</sup>/кг из-за большой ненадежности.

*Оценка фильтруемости суспензии.* Фильтруемость суспензии целиком определяется свойствами ее твердой и жидкой фаз. К первичным относятся свойства, которые можно определить независимо друг от друга: физико-химические свойства фаз, размер и форма частиц, их распределение по крупности, свойства поверхности частиц и др. Первичные свойства определяют состояние суспензии, что оценивается такими характеристиками, как пористость будущего осадка, концентрация, гомогенность и степень дисперсии частиц. От состояния суспензии зависят макроскопические свойства целиком процесса фильтрования: удельное сопротивление осадка, скорость осаждения частиц суспензии и др. [3].

Наиболее важной характеристикой осадка фильтрования с теоретической точки зрения является его среднее удельное сопротивление. Причем эта характеристика определяет не только скорость движения жидкой фазы суспензии через образовавшийся осадок, но и скорости движения воздуха и промывающей воды через осадок на стадиях воздушной сушки и промывки соответственно. Наиболее широко применяемой моделью для описания движения жидкой фазы суспензии через слой осадка, учитывающей влияние размеров частиц, является уравнение Козени – Кармана [4]:

$$Q = \frac{\varepsilon^3}{K(1-\varepsilon)^2 SSA^2 \rho_s^2} \frac{\Delta p A}{\mu_L L}, \quad (1)$$

где  $Q$  – объемная скорость движения жидкой фазы, м<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup>;  $\varepsilon$  – локальная пористость осадка;  $\Delta p$  – разность давлений, Па;  $A$  – площадь фильтровальной перегородки, м<sup>2</sup>;  $K$  – константа Козени;  $SSA$  – удельная площадь поверхности частиц осадка, м<sup>2</sup>·кг<sup>-1</sup>;  $\rho_s$  – плотность твердой фазы суспензии, кг·м<sup>-3</sup>;  $\mu_L$  – вязкость жидкой фазы суспензии, Па·с;  $L$  – толщина осадка, м.

Константа Козени зависит от структуры осадка. Для случайно сформированных несжимаемых осадков  $K = 5$  [5, 6]. Уравнение (1) может быть преобразовано в форму, выражающую зависимость удельного сопротивления осадка от ряда факторов:

$$\alpha_{Av} = \frac{5\rho_s S S A^2 (1 - \varepsilon_{Av})}{\varepsilon_{Av}^3}, \quad (2)$$

где  $\alpha_{Av}$  – среднее удельное сопротивление осадка,  $\text{м} \cdot \text{кг}^{-1}$ ;  $\varepsilon_{Av}$  – средняя пористость осадка.

Уравнение (2) явно показывает квадратичную зависимость среднего удельного сопротивления осадка от удельной площади поверхности его частиц при постоянном значении средней пористости. Необходимо отметить, что последнее выражение может быть использовано для оценки значения  $\alpha_{Av}$  только для несжимаемых или слабо сжимаемых осадков. В случае сильно сжимаемых осадков, которые изменяют свою структуру и пористость под действием перепада давления, формула неприменима [7].

**Экспериментальное оборудование и методы.** Цель проведения экспериментов – исследование возможности проявления на практике зависимости между удельной площадью поверхности, измеренной с помощью Блэйн-метра, и средним удельным сопротивлением осадка, определенным при проведении тестов на фильтруемость.

Всего было протестировано 11 различных материалов с разной крупностью частиц, формой и их распределением по размеру, а именно: пшеничный крахмал, угольный порошок, карбонат кальция, диоксид титана, синтетический магнетит, апатитовый концентрат, промышленный магнетит, железный концентрат, цинковый концентрат, медный концентрат и пиритный концентрат. Все материалы были взяты с ряда реально действующих обогащательных заводов Финляндии.

Лабораторное оборудование состояло из Блэйн-метра для оценки удельной площади поверхности порошковых материалов

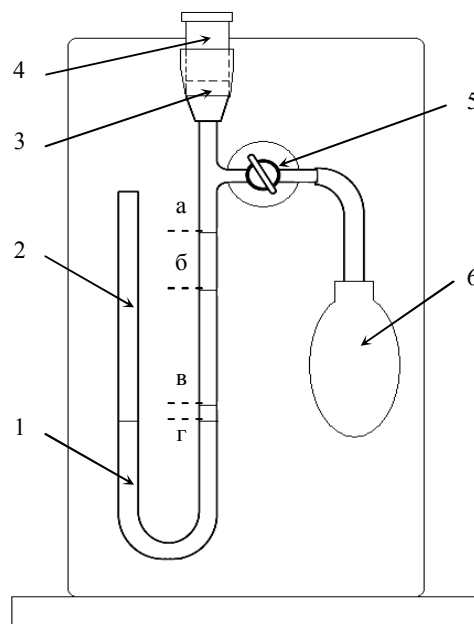


Рис.1. Схематическое изображение Блэйн-метра

1 – подкрашенная жидкость; 2 – U-образный манометр; 3 – ячейка с упакованным материалом; 4 – плунжер; 5 – стеклянный краник; 6 – резиновая груша; а, б, в, г – риски на трубке манометра

и лабораторного Нутч-фильтра для определения среднего удельного сопротивления осадков.

*Измерение Блэйн-индекса порошковых материалов.* Блэйн-метр представляет собой простой в использовании аппарат (рис.1). Непосредственной величиной, измеряемой на Блэйн-метре, является время, необходимое для прохождения определенного объема воздуха через упакованный порошковый материал с заранее известной пористостью. Тестирование материала производилось в два этапа. На первом этапе готовилась упаковка материала. Для этого в ячейку насыпался порошковый материал известной массы и утрамбовывался с помощью плунжера до необходимой пористости. На втором этапе осуществлялось пропускание воздуха через ячейку с материалом, предварительно закрепленную на одном из колен манометра. Измерялось время  $t$ , которое тратилось на опускание столбика подкрашенной жидкости от риски б до риски в, что свидетельствовало о прохождении постоянного объема воздуха через материал. Для одного материала проводилось три параллельных экспе-

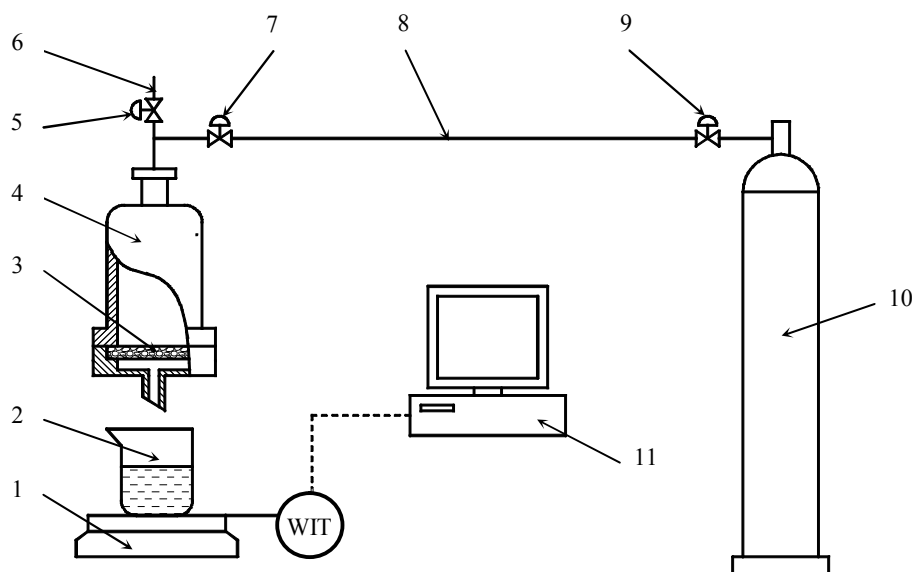


Рис.2. Система фильтрации

1 – лабораторные аналитические весы; 2 – емкость для фильтрата; 3 – заменяемая фильтровальная перегородка; 4 – лабораторный Нутч-фильтр; 5 – кран на патрубке для ввода суспензии; 6 – патрубок для ввода суспензии; 7 – кран на трубке подвода сжатого газа; 8 – трубка для подвода сжатого газа; 9 – вентиль для регулирования давления газа внутри фильтра; 10 – баллон с жатым газом (азотом); 11 – компьютер

римента. Для одного эксперимента готовилось пять упаковок материала с различной пористостью – от минимальной до максимально возможной. После проведения экспериментов рассчитывалась удельная площадь поверхности материала в соответствии с методикой, описанной в стандарте ASTM.

*Проведение тестов на фильтруемость.* Фильтрация суспензии осуществлялось на лабораторном Нутч-фильтре (рис.2).

Перед проведением тестов на фильтруемость готовилась суспензия определенной концентрации путем смешивания порошкового материала и воды. После тщательного перемешивания в фильтр через патрубок вливалось 300 мл суспензии. Сразу после этого открывался кран для подачи сжатого воздуха внутрь фильтра, где поддерживалось постоянное давление 2,0 бар. В процессе фильтрации твердые частицы задерживались на фильтровальной перегородке, а фильтрат выходил из фильтра и скапливался в емкости для фильтрата. После окончания процесса производились замеры некоторых параметров осадка и фильтрата, необходимых для определения основной характеристики осадка – среднего удельного

сопротивления. Для этой цели использовалось классическое уравнение фильтрации при постоянном перепаде давления [1].

График зависимости среднего удельного сопротивления осадка от удельной площади поверхности для всех тестируемых материалов представлен на рис.3.

Согласно полученным экспериментальным данным для большинства тестируемых материалов прослеживается прямая связь между удельным сопротивлением осадка и удельной площадью поверхности материала. Аппроксимирующая прямая (пунктирная линия, рис.3) построена по квадратичному закону зависимости. Она явно показывает вполне ожидаемый результат – зависимость удельного сопротивления осадка от квадрата удельной площади поверхности [см. уравнение (2)]. Причем коэффициент корреляции имеет достаточно близкое к единице значение – 0,969.

Некоторые материалы, такие как диоксид титана, синтетический магнетит и пшеничный крахмал не подчиняются общей зависимости, характерной для всех остальных материалов. Первые два материала состояли из очень мелких частиц (удельная площадь поверхности намного больше  $500 \text{ м}^2/\text{кг}$ ), что могло стать

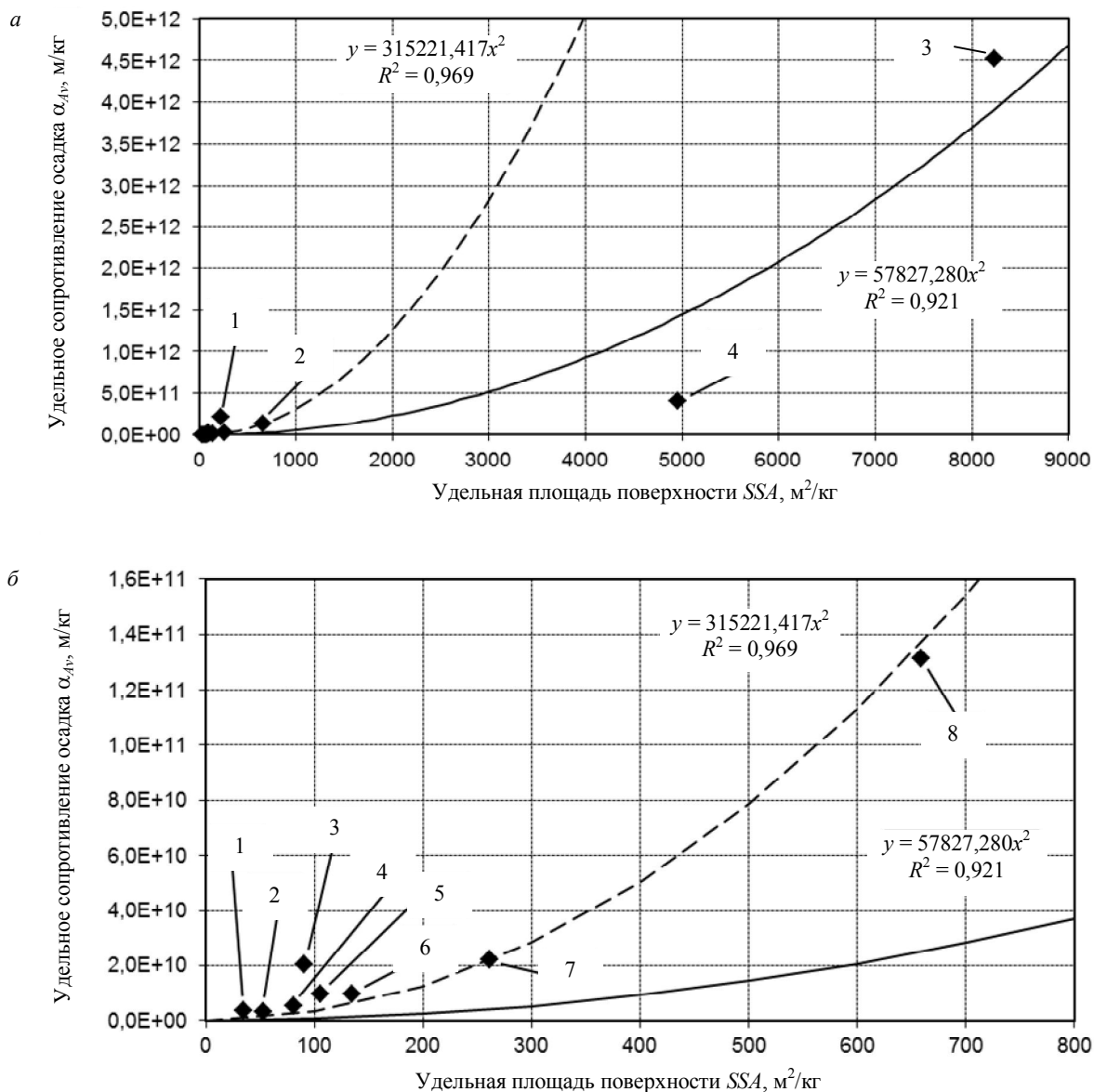


Рис.3. Зависимость удельного сопротивления осадка от удельной площади поверхности для перепада давления на фильтре 2,0 бар. Сплошная линия – с учетом всех материалов; пунктирная линия – без диоксида титана, синтетического магнетита и пшеничного крахмала: а – 1 – пшеничный крахмал; 2 – карбонат кальция; 3 – диоксид титана; 4 – синтетический магнетит; б – 1 – пиритный концентрат; 2 – апатитовый концентрат; 3 – железный концентрат; 4 – цинковый концентрат; 5 – медный концентрат; 6 – промышленный концентрат; 7 – угольный концентрат; 8 – карбонат кальция

причиной получения ненадежных результатов при тестировании на Блэйн-метре [2]. Пшеничный крахмал, также использованный в тестах, как органическое вещество во время фильтрования мог изменить свои свойства (например, размер и форму частиц), внося большую погрешность в конечный результат измерения.

Для уточнения полученных в исследовательской работе зависимостей в дальнейшем предполагается провести тестирование с гораздо большим числом различных материалов. Интересным было бы тестирование материалов с более широким диапазоном удельной площади поверхности (до 1000 м<sup>2</sup>/кг).

## Выводы

На основании литературного поиска и проведения экспериментов с большим количеством различных материалов можно сделать общий вывод о том, что методика измерения удельной площади поверхности материалов на Блэйн-метре может быть пригодна для оценки удельного сопротивления осадков большинства материалов, использованных в исследовательской работе.

Несмотря на некоторые ограничения определения Блэйн-индекса, эта техника является наиболее приемлемой для оценки фильтруемости суспензий в тех случаях, когда необходимо быстро получить конечный результат, не предполагается тратить значительные финансовые ресурсы на проведение экспериментов и при наличии очень малого количества материала для тестирования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Белоглазов И.Н. Фильтрование технологических пульп / И.Н.Белоглазов, В.О.Голубев, О.Н.Тихонов. М.: Издательский дом «Руда и Металлы», 2003. 318 с.
2. Potgieter J.H., Strydom C.A. An investigation into the correlation between different surface area determination techniques applied to various limestone-related compounds // Cement and Concrete Research. 1996. Vol.26. N 11. P.1613-1617.
3. Wakeman R.J. The influence of particle properties on filtration // Separation and Purification Technology. 2007. N 58. P.234-241.

4. Wakeman R.J., Tarleton E.S. Solid/liquid Separation: Principles of Industrial Filtration. Elsevier, Oxford, UK, 2005. P.339.

5. Grace H.P. Resistance and compressibility of filter cakes // Chemical Engineering Progress. 1953. Vol.49. N 6. P.303-318.

6. Tiller F.M. The role of porosity in filtration. Numerical methods for constant rate and constant pressure filtration based on Kozeny's law // Chemical Engineering Progress. 1953. Vol.49. N 9. P.467-479.

7. Häkkinen A., Pöllänen K., Reinikainen S., Louhi-Kultanen M., Nystrom L. Prediction of filtration characteristics by multivariate data analysis // Filtration. 2008. Vol.8. N 2. P.144-153.

## REFERENCES

1. Beloglazov I.N., Golubev V.O., Tichonov O.N. Filtration of the technological suspensions. Moscow: Publishing house «Ore and metals», 2003. 320 p.

2. Potgieter J.H., Strydom C.A. An investigation into the correlation between different surface area determination techniques applied to various limestone-related compounds // Cement and Concrete Research. 1996. Vol.26. N 11. P.1613-1617.

3. Wakeman R.J. The influence of particle properties on filtration // Separation and Purification Technology. 2007. N 58. P.234-241.

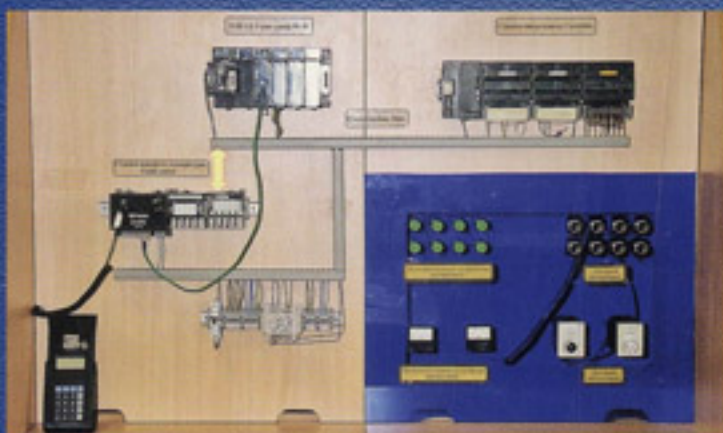
4. Wakeman R.J., Tarleton E.S. Solid/liquid Separation: Principles of Industrial Filtration. Elsevier, Oxford, UK, 2005. P.339.

5. Grace H.P. Resistance and compressibility of filter cakes // Chemical Engineering Progress. 1953. Vol.49. N 6. P.303-318.

6. Tiller F.M. The role of porosity in filtration. Numerical methods for constant rate and constant pressure filtration based on Kozeny's law // Chemical Engineering Progress. 1953. Vol.49. N 9. P.467-479.

7. Häkkinen A., Pöllänen K., Reinikainen S., Louhi-Kultanen M., Nystrom L. Prediction of filtration characteristics by multivariate data analysis // Filtration. 2008. Vol.8. N 2. P.144-153.









# САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

## ПЕРВОЕ В РОССИИ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ – ЭТО

- лучшее академическое образование в области геологии, горного дела, металлургии, экономики;
- высшая квалификация профессорско-преподавательского состава;
- мировой уровень получаемой квалификации и выдаваемых дипломов;
- уникальная научно-исследовательская база;
- новейшие коммутационные сети, высший уровень компьютеризации учебного процесса и научных исследований;
- Горный музей и Главная библиотека – хранилища бесценных исторических экспонатов;
- обширные научные и деловые связи с крупнейшими промышленными предприятиями России и зарубежными фирмами:



ОАО «Новатэк»



Компания «Фосагро»



ОАО «Сургутнефтегаз»



«Тоталь»



ОАО «Уралмаш»



ЗАО «Русская  
медная компания»



ОАО «Алроса»



ООО «Металл-груп»



ОАО «Газпром нефть»

