

ОТЧЕТ за 2019-2023 гг.

1. *Наименование Научной школы:* **Школа тяжелых цветных металлов.**
2. *ФИО руководителя(ей):* Мамяченков Сергей Владимирович.
3. *Количество и список членов научной школы, работающих в настоящее время в УРФУ:*
 1. Мамяченков С.В. – д-р техн. наук, зав. кафедрой
 2. Логинова И.В. – д-р техн. наук, профессор
 3. Рогожников Д.А. – д-р техн. наук, профессор
 4. Анисимова О.С. – канд. техн. наук, доцент
 5. Лобанов В.Г. – канд. техн. наук, доцент
 6. Шопперт А.А. – канд. техн. наук, доцент
 7. Маковская О.Ю. – канд. техн. наук, доцент
 8. Колмачихина О.Б. – канд. техн. наук, доцент
 9. Колмачихина Э.Б. – канд. техн. наук, доцент
 10. Дизер О.А. – канд. техн. наук, доцент
 11. Луговицкая Т.Н. – канд. техн. наук, доцент-исследователь
 12. Чайкин Л.И. – канд. техн. наук, доцент
 13. Чемезов О.В. – канд. техн. наук, доцент
 14. Николаев А.Ю. – канд. техн. наук, доцент
 15. Лукинских А.В. – канд. техн. наук, доцент
 16. Кырчиков А.В. – канд. техн. наук, доцент
 17. Кузас Е.А. – канд. техн. наук, инженер
 18. Меньщиков В.А. – канд. техн. наук, инженер
 19. Напольских Ю.А. – канд. техн. наук, инженер
 20. Крицкий А.В. – канд. техн. наук, научный сотрудник
 21. Каримов К.А. – канд. техн. наук, старший научный сотрудник
 22. Елфимова Л.Г. – старший преподаватель
 23. Польшгалов С.Э. – старший преподаватель
 24. Блудова Д.И. – ассистент
 25. Вальнев В.А. – зав. учебной лабораторией
 26. Крохина О.Е. – зав. учебной лабораторией
 27. Киреев А.Е. – младший научный сотрудник
 28. Третьяк М.А. – младший научный сотрудник
 29. Головкин Д.И. – младший научный сотрудник
 30. Соколов Л.В. – инженер
 31. Хабибулина Р.Э. – ассистент
 32. Шарипова У.Р. – инженер-исследователь
 33. Шкляев Ю. – инженер-исследователь
 34. Данилин Л.М. – лаборант-исследователь
 35. Энтин Я.В. – лаборант-исследователь
 36. Голибзода З.М. – лаборант-исследователь

4. *Результаты деятельности за 2019-2023 гг.*

Деятельность научной школы направлена на разработку новых высокоэффективных и экологичных процессов и технологий извлечения цветных, благородных и редких металлов из минерального и техногенного сырья посредством

углубленного изучения строения, составов, морфологических особенностей вовлекаемых в переработку ресурсов, установления физико-химических закономерностей, механизмов создаваемых процессов, их моделированием с применением математических методов, в том числе искусственного интеллекта, апробацией полученных результатов в опытно-промышленных и промышленных масштабах для последующего внедрения на металлургических предприятиях.

В рамках этого направления ведутся научно-технологические работы:

- разработка гидromеталлургических процессов атмосферного и автоклавного выщелачивания;
- извлечение ценных компонентов из растворов выщелачивания, промышленных стоков;
- утилизация токсичных полупродуктов и отходов производства;
- разработка комбинированных технологий с предварительной высокотемпературной обработкой;
- пирометаллургические процессы извлечения металлов;
- моделирование разрабатываемых процессов с использованием искусственного интеллекта;
- разработка ТЭО, эколого-экономическая оценка, проведение опытно-промышленных испытаний, разработка техрегламентов и т.д.

За отчетный 5-летний период получены следующие основные научно-технические результаты:

1) Разработан новый процесс гидрохимического вскрытия хвостов обогащения сульфидного медного сырья в щелочных средах с целью извлечения глинозема и кремнезема. Показано, что при установленных оптимальных условиях (температура 95 °С, 6 часов, Ж:Т=3:1) на первой стадии удастся извлечь до 70 % SiO₂. На 2-ой стадии при температуре 70 °С за 30 минут извлекается более 95 % глинозема и 20 % кремнезема (сквозное извлечение SiO₂ в раствор после двух стадий – более 90 %). Установлены кинетические закономерности осаждения из продуктивных растворов железа, алюминия и кремния в виде труднорастворимых соединений (жарозита, гидроксида алюминия и кремнезема): расчет энергии активации (> 40 кДж/моль) и др. кинетических параметров показал, что данные процессы протекают в кинетическом режиме.

2) Проведены укрупненно-лабораторные и опытно-промышленные испытания комплексной автоклавной технологии переработки различного многокомпонентного низкосортного, в том числе техногенного сырья, содержащего благородные металлы. Разработана принципиальная технологическая схема: при температуре 200 °С и τ = 60 мин медь преимущественно переходит в раствор, а мышьяк, железо и благородные металлы концентрируются в кеке. Раствор направляют на выделение меди и нейтрализацию. Полученный кек после операции кондиционирования направляют на сорбционное цианирование, при этом сквозное извлечение золота на активный уголь достигает более 94 %. Уголь после десорбции направляют на регенерацию и повторное использование. Золото из цианистых растворов извлекают электроэкстракцией. Полученный катодный осадок содержит до 98 % золота и пригоден для переработки на аффинажных предприятиях.

3) Разработана новая комплексная технология вскрытия упорного сульфидного золотосодержащего концентрата Удере́йского месторождения с применением

азотнокислотного выщелачивания. В результате исследований удалось достичь степени извлечения в раствор, %: железа более 97, мышьяка более 95, серы более 85. Получены эффективные параметры процесса выщелачивания: концентрация HNO_3 – 5 моль/дм³, Ж:Т = 5:1, продолжительность 1 ч. Методами цианирования и тиомочевинного выщелачивания удалось достичь высоких показателей извлечения золота из кека азотнокислотного выщелачивания (97,3 и 95,2 % соответственно). На основе выполненных исследований разработана принципиальная технологическая схема процесса, проведены расчеты материального баланса по технологии на производительность 60 000 тонн перерабатываемого концентрата в год; предварительные экономические расчеты по основным предлагаемым вариантам технологии показали высокую экономическую эффективность технологии.

4) Разработан новый способ переработки бокситов на глинозем по параллельной схеме Байер-спекание. Ветвь Байера включает дробление и последующий размол боксита в оборотном растворе, автоклавное выщелачивание, сгущение пульпы с получением алюминатного раствора и красного шлама, промывку красного шлама, декомпозицию алюминатного раствора с получением гидроксида алюминия и маточного раствора, выпарку маточного раствора, кальцинацию гидроксида алюминия с получением глинозема. Ветвь спекания включает подготовку шихты, спекание шихты с получением спека и пыли электрофильтров, выщелачивание полученного спека с получением алюминатного раствора, содержащего кремнезем, и красного шлама спекательного передела, обескремнивание алюминатного раствора с получением белого шлама и обескремненного алюминатного раствора, декомпозицию обескремненного алюминатного раствора с получением гидроксида алюминия и маточного раствора, выпарку с получением оборотного раствора, направляемого в ветвь Байера на размол боксита. Достигнута высокая степень извлечения соединений редкоземельных элементов из пыли электрофильтров процесса переработки бокситового сырья.

5) Разработаны новые научно-обоснованные процессы вскрытия сульфидных материалов цветных металлов, полученные с применением впервые выведенных математических моделей окислительного выщелачивания в атмосферных и автоклавных условиях, позволяющие в зависимости от составов, строения, природы образования и пр. вовлекаемого в переработку рудного или техногенного сырья подбирать условия, обеспечивающие высокие показатели технико-экономической эффективности и экологичности производства при внедрении полученных теоретических и экспериментальных результатов в реальном секторе экономики.

На Опытно-промышленном участке НИЦИТ ТОО «КазГидроМедь» (г. Караганда, Казахстан) проведены балансовые испытания разработанной технологии гидрометаллургической переработки сульфидного мышьяковистого медьсодержащего концентрата «Акжал» в азотнокислых средах с последующей переработкой кеков выщелачивания с извлечением драгоценных металлов и утилизацией образующихся мышьяксодержащих растворов. Полученные результаты использованы при проектировании и освоении опытного гидрометаллургического завода на ЖМЗ ТОО «Казахмыс Смэлтинг» (Казахстан), что подтверждено соответствующими актами проведения ОПИ, внедрения технологии, заключения об экономической эффективности.

б) Получен новый сорбент из красного шлама глиноземного производства для удаления мышьяка из производственных растворов. Установлено, что полученные результаты соответствуют модели Лэнгмюра, что указывает на монослойный механизм

сорбции. Эффективность модифицированного красного шлама по отношению к мышьяку объясняется его высокой удельной площадью поверхности, т.к. основной фазой полученного сорбента является маггемит, что позволяет отделять его от раствора при помощи внешнего магнитного поля, что исключает проблемы с фильтрацией. Использование полученного сорбента позволяет сократить содержание мышьяка в растворе со 100 до 10 мкг/дм³, что соответствует международным требованиям к питьевой воде.

7) Разработан новый метод переработки высокожелезистых красных шламов (КШ) с концентрированием Sc и железа путем выщелачивания при атмосферном давлении в присутствии Fe²⁺, интенсифицирующего извлечение Al из Al-гематита и Al-гетита. Этот эффект обусловлен намагничиванием магнетита и гетита после их растворения в концентрированном щелочном растворе. Установлены оптимальные параметры выщелачивания: $t = 110$ °С, Ж:Т = 10:1, $\tau = 2,5$ ч, $C_{Na_2O} = 360$ г/дм³. В этих условиях степень извлечения глинозема из песков достигла 96,27 %, а из бокситового остатка - 86,07 %. Содержание железа в остатке может быть увеличено до 69,55 % для песка и 58,31% для КШ, скандия в 2 раза – до 70 г/т.

8) Разработана новая технология азотнокислотного выщелачивания полиметаллического сульфидного сырья цветных металлов, основными компонентами которого являются минералы пирита, теннантита, халькопирита, сфалерита, арсенопирита. Установлены эффективные условия ведения процесса азотнокислотного растворения синтетической смеси минералов теннантита, халькопирита и сфалерита с введением в систему FeS₂ и ионов Fe (III): концентрация азотной кислоты 6 моль/дм³, продолжительность процесса 60 мин, температура 80 °С, концентрация ионов Fe (III) 16,5 моль/дм³, количество пирита по массовому соотношению к смеси минералов 1,2:1. При этих значениях достигается степень растворения более 90 %, тем самым удается снизить концентрацию азотной кислоты с 12 до 6 моль/дм³, необходимую при ведении процесса без введения дополнительных реагентов. Пирит может выступать в качестве альтернативной каталитической поверхности для сульфидных медных минералов. За счёт образованная между минералами гальванической связи удаётся снизить влияние пассивирующего слоя образующейся элементной серы.

9) Разработаны варианты технологических схем гидрометаллургического обогащения низкосортных медных сульфидных концентратов с использованием высокотемпературного и низкотемпературного АОВ с последующей гидротермальной обработкой, в том числе в присутствии ПАВ, которые позволяют получать кондиционные медные концентраты, пригодные для традиционного пирометаллургического производства.

10) Лабораторными исследованиями и последующими опытно-промышленными испытаниями разработана двухстадийная технология переработки упорного золото-сурьмянистого концентрата Олимпиадинского месторождения. Предложено на 1 стадии селективное выщелачивание сурьмы в сульфидно-щелочных растворах. Установлены оптимальные параметры процесса: Ж:Т = 4,5:1; концентрация сульфида натрия – 61 г/дм³; концентрация гидроксида натрия – 16,5 г/дм³ при продолжительности 3 ч и температуре 50 °С. Извлечение сурьмы в раствор при этом составило 99%. На 2 этапе предложено сульфатно-нитратное растворение основных сульфидных минералов – носителей золота – пирита и арсенопирита. Определены оптимальные параметры азотнокислотного выщелачивания кека 1 стадии, обеспечивающие максимальное вскрытие сульфидов:

концентрация азотной кислоты – 6 моль/дм³; Ж:Т = 9:1 при продолжительности 90 минут. Таким образом удалось достичь сквозного извлечения золота из кека двухстадийного сульфидно-щелочного и азотнокислотного выщелачивания на уровне 95%.

11) Разработана принципиальная технологическая схема селективного извлечения РЗЭ из отходов глиноземного производства, таких как маггемитовые КШ, полученные методом щелочного низкотемпературного спекания бокситового сырья, и пыли ЭФ печей спекания бокситов с целью перевода складированных в настоящее время в отвалах ценных компонентов в товарные продукты.

12) Разработана, апробирована в опытно-промышленных масштабах и внедрена на Богословском алюминиевом заводе комплексная гидрометаллургическая технология, позволившая повысить степень извлечения алюминия и концентрирования железа в твердом остатке при переработке бокситов в цикле Байера с использованием восстановительного выщелачивания и электролиза в щелочных средах для получения кондиционного красного шлама, пригодного для дальнейшего получения железа и извлечения редкоземельных элементов.

13) Проведены комплексные исследования, направленные на установление механизма действия поверхностно-активных веществ (ПАВ) в условиях, моделирующих автоклавное выщелачивание сульфидного сырья цветных металлов. Для исследования межфазных явлений адсорбции, смачивания, диспергирования использовали лигносульфонаты ЛС, мономинеральный образец сульфида цинка, природный концентрат Березовского месторождения (52,1% Zn) и элементную серу гексагональной модификации. Обнаружено, что повышение температуры способствует компактизации макромолекулы КС, вследствие этого их адсорбция на границе жидкость – газ, жидкость – твердое в нейтральных средах возрастает. Показано, что введение серной кислоты в водные растворы повышает смачивающую, адсорбционную и диспергирующую активность ЛС по отношению к ZnS. Последнее сопровождается снижением краевого угла смачивания θ (на 10 и 40°); ростом как удельного числа частиц ZnS (не менее чем в 1,3 – 1,8 раза), так и содержания фракций размером -3,5 мкм. Установлено, что функциональное действие ЛС в исследуемых условиях реализуется посредством адсорбционно-расклинивающего механизма.

По результатам работы за отчетный период подготовлено:

- РИД – 48;
- монографий – 3;
- учебных пособий – 7;

4.1. *Количество статей в журналах ВАК:* 175.

4.2. *Количество статей в WoS/Scopus:* 155.

4.3. *Количество проведенных научных конференций/мероприятий:* 2

4.4. *Количество и объем выигранных научных грантов (тип, название, руководитель):* 34 работы на сумму 119 140 000 руб.

4.5. *Количество защит кандидатских и докторских диссертаций членами коллектива:*

- Наумов Константин Дмитриевич, кандидатская диссертация «Теоретические и технологические основы осаждения золота из цианистых растворов крупнодисперсным цинком», дата защиты – 11 июня 2019 г. (рук. В.Г. Лобанов)

- Королев Алексей Анатольевич, кандидатская диссертация «Комплексная переработка свинецсодержащих промпродуктов вакуумной дистилляцией», дата защиты – 25 июня 2019 г. (рук. В.Г. Лобанов)
- Захарьян Семен Владимирович, докторская диссертация «Исследование и разработка гидрометаллургической технологии переработки бедного медно-сульфидного сырья Жезказганского региона с извлечением меди и сопутствующих ценных компонентов сорбционным методом», дата защиты – 18 сентября 2020 г. (конс. С.С. Набойченко)
- Рогожников Денис Александрович, докторская диссертация «Азотнокислотная переработка полиметаллического упорного сульфидного сырья цветных металлов», дата защиты – 19 февраля 2021 г. (конс. С.В. Мамяченков)
- Шахалов Александр Александрович, кандидатская диссертация «Автоклавная технология переработки некондиционных медных концентратов с использованием гидротермальной обработки», дата защиты – 19 февраля 2021 г. (рук. С.С. Набойченко)
- Русалев Ростислав Эдуардович, кандидатская диссертация «Гидрометаллургическая технология переработки Au-Sb сульфидных концентратов Олимпиадинского месторождения», дата защиты – 19 марта 2021 г. (рук. Д.А. Рогожников)
- Крицкий Алексей Владимирович, кандидатская диссертация «Гидротермальное рафинирование халькопиритных концентратов», дата защиты – 19 марта 2021 г. (рук. С.С. Набойченко)
- Тимофеев Константин Леонидович, докторская диссертация «Сорбционное извлечение цветных и редких металлов из промышленных растворов горно-металлургических предприятий», дата защиты – 17 сентября 2021 г. (конс. Г.И. Мальцев)
- Дизер Олег Анатольевич, кандидатская диссертация «Гидрометаллургическая переработка медно-мышьяковистого сульфидного сырья», дата защиты – 17 июня 2022 г. (рук. Д.А. Рогожников)
- Топоркова Юлия Игоревна, кандидатская диссертация «Комплексная переработка цинксодержащей пыли сталеплавильного производства в аммиачно-хлоридных средах», дата защиты – 18 июня 2021 г. (рук. С.В. Мамяченков)
- Кырчиков Алексей Владимирович, кандидатская диссертация «Исследование твердофазных взаимодействий компонентов боксита со щелочью при получении глинозема по способу низкотемпературного спекания», дата защиты – 02 декабря 2022 г. (рук. И.В. Логинова)
- Напольских Юлия Александровна, кандидатская диссертация «Селективное извлечение редкоземельных элементов из отходов глиноземного производства», дата защиты – 20 октября 2023 г. (рук. И.В. Логинова)