

ОДНОСТАДИЙНАЯ ПИРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАО

Ю. А. Гудим¹, А. А. Голубев¹, В. А. Грачёв²

¹ООО Промышленная компания «Технология металлов», Челябинск

²Институт физической химии и электрохимии РАН им. А. Н. Фрумкина,
Центр глобальной экологии МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва

Статья поступила в редакцию 26 декабря 2017 г.

Предложен способ одностадийной пирометаллургической переработки металлических радиоактивных отходов на экспериментальном образце установки МАГМА плавильного агрегата, который подтвердил возможность реализации предложенной технологической схемы в полупромышленных условиях с получением дезактивированного металла, пригодного для хозяйственного применения без ограничений. Обоснованы и проверены способы улавливания и надежного кондиционирования получаемых в небольшом количестве вторичных твердых радиоактивных отходов. Выполнен проект опытно-промышленного участка для одностадийной дезактивации МРО в плавильном агрегате «МАГМА-3».

Ключевые слова: *металлические радиоактивные отходы (МРО), пирометаллургическая дезактивация, одностадийный процесс, плавильный агрегат, кислый шлак.*

Введение

В результате интенсивной хозяйственной и военно-технической деятельности человечество накопило огромное количество радиоактивных отходов (РАО), значительную часть из которых составляют металлические радиоактивные отходы (МРО).

РАО необходимо удалять из сферы обитания и жизнедеятельности людей, путем длительного захоронения (высокоактивные отходы — ВАО) или повторного использования после соответствующей переработки в хозяйственной сфере (прочие отходы).

Состояние вопроса

МРО целесообразно подвергать дезактивации. Наиболее эффективным способом дезактивации МРО является пирометаллургическая дезактивация. До настоящего времени применяются только двух- или многостадийные способы дезактивации МРО, использующие первоначально низкотемпературное удаление большей части поверхностных

загрязнений различными способами (физико-механическими, физико-химическими, химическими) и лишь финишную обработку частично дезактивированного металла пирометаллургическим методом (переплав в индукционных или дуговых электропечах) [1–12]. Впервые в отечественной литературе идею одностадийной пирометаллургической дезактивации МРО предложил А. А. Вертман [12]. Он же для реализации своей идеи изложил и общие принципы возможной конструкции плавильного агрегата.

Предлагаемая А. А. Вертманом идея одностадийной дезактивации МРО перспективна и может быть реализована, но предложенная конструкция плавильного агрегата реально не может быть использована для дезактивации МРО из-за конструктивных недостатков.

В силу своих конструктивных особенностей не подходят для реализации концепции одностадийной пирометаллургической дезактивации МРО традиционные индукционные и дуговые электрические печи.

Актуальность темы

Многостадийные способы дезактивации ПРО из-за громоздкости и низкой производительности не способны решить задачу массовой переработки накопленных и вновь образующихся ПРО. Поэтому весьма актуальной стала проблема создания концепции и реализации одностадийной пирометаллургической переработки ПРО в плавильных агрегатах, обеспечивающих достаточно высокую производительность и эффективную дезактивацию ПРО.

Авторами данной статьи разработана концепция одностадийной пирометаллургической переработки ПРО в плавильном агрегате, использующем отвод тепла с рабочей поверхности корпуса жидкометаллическим теплоносителем. Для дезактивации ПРО в рамках этой концепции предлагается использовать герметичный топливокислородный гарнисажный плавильный агрегат непрерывного действия «МАГМА-3», имеющий охлаждаемую жидкометаллическим теплоносителем — натрием — верхнюю часть корпуса, футерованную огнеупорами, и нижнюю часть корпуса, футерованную огнеупорами, создающими ванну для размещения расплавляемого жидкого металла [15].

Плавильный агрегат «МАГМА-3» проектировался как многофункциональный агрегат, способный перерабатывать руды различных металлов, промышленные и бытовые отходы. Создавали агрегат «МАГМА-3» ООО Промышленная компания «Технология металлов» и ООО НТП «Аконт» (г. Челябинск).

Агрегат «МАГМА-3» способен конкурировать широко и повсеместно применяемыми для расплавления металлической шихты (лом, металлизированное сырье) электропечами [13].

Наиболее полно концепция одностадийной пирометаллургической переработки ПРО в плавильном агрегате, использующем отвод тепла с рабочей поверхности корпуса жидкометаллическим теплоносителем, описана в [14]. В этой работе освещены не только несомненные достоинства излагаемой технологической схемы дезактивации ПРО, но и перечислены проблемы, решение которых путем теоретического анализа и экспериментов на небольшом экспериментальном образце плавильного агрегата значительно сократит время строительства и освоения полупромышленного участка для пирометаллургической дезактивации ПРО.

К числу этих проблем относятся:

- конкретизация технологии натриевого охлаждения;
- оценка безопасности натриевого охлаждения плавильного агрегата применительно к аварийным ситуациям;
- уточнение поведения наиболее часто встречающихся радионуклидов — загрязнителей ПРО в процессе пирометаллургической переработки ПРО;

- оценка возможностей улавливания и последующего кондиционирования образующихся вторичных твердых радиоактивных отходов (ТРО);
- создание (разработка) способа эффективного кондиционирования образующихся при пирометаллургической переработке ПРО вторичных радиоактивных пыли и шлака;
- разработка рациональной конструкции контейнера для сбора, транспортировки и окончательного захоронения образующихся вторичных ТРО;
- проектирование опытно-промышленного участка для пирометаллургической переработки (дезактивации) ПРО.

Целями настоящей работы являлись изучение и решение этих проблем.

Методика проводимых теоретических исследований и экспериментов

Поведение радионуклидов — загрязнителей ПРО при их пирометаллургической переработке изучали на специально созданном экспериментальном образце плавильного агрегата (ЭПА) в лабораториях АО «ГНЦ РФ-ФЭИ». Принципиальная схема ЭПА приведена на рис. 1.

ЭПА состоит из трех модулей:

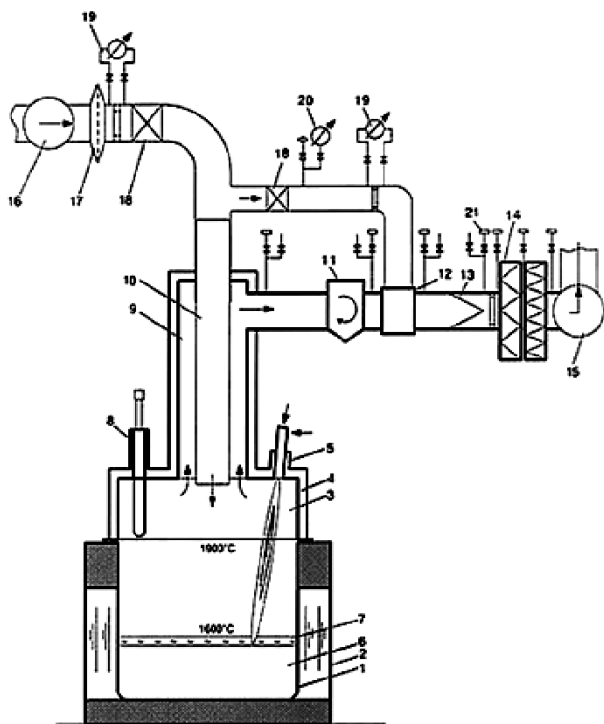
- 1) модуля пирометаллургической переработки (рис. 2);
- 2) модуля жидкометаллического контура охлаждения (рис. 3);
- 3) модуля системы улавливания и очистки газов от пыли и радиоактивных аэрозолей.

В качестве модуля пирометаллургической переработки ПРО использовали индукционную печь. Специально подготовленные образцы ПРО (5 штук) имели главным образом поверхностное загрязнение радионуклидами. Образцы ПРО и кислый шлак (отвальный шлак ОАО «Уфалей-никель») помещали в огнеупорный тигель, который ставили в индукционную печь. Расплавляли металл и шлак, перемешивали в течение 30 минут, доводя температуру металла (нержавеющая сталь 10X18H10) до 1600 °С. Затем печь отключали, извлекали из нее тигель с металлом и шлаком, охлаждали его. Полученные металл и шлак анализировали на загрязненность радионуклидами, также анализировали и пыль из модуля улавливания и очистки газов.

Далее приведены результаты изучения и решения перечисленных выше проблем.

1 Конкретизация технологии натриевого охлаждения рабочей поверхности корпуса плавильного агрегата

Проведен анализ конструкции и режимов эксплуатации плавильного агрегата, уточнены источники поступления примесей в жидкий натрий, предложены способы уменьшения количества примесей, поступающих в жидкий натрий.



1 – тигель керамический; 2 – плавильный узел; 3 – зона сжигания; 4 – стальная крышка плавильного узла, охлаждаемая натрием; 5 – газовая горелка для повышения температуры газовой фазы; 6 – МРО; 7 – шлак; 8 – пирометр с керамическим чехлом; 9 – смесительная камера; 10 – труба керамическая смесительной камеры; 11 – осадитель; 12 – смесительная камера; 13 – рукавный фильтр; 14 – аэрозольный фильтр; 15 – газодувка; 16 – воздуходувка; 17 – фильтр; 18 – вентиль; 19 – расходомер; 20 – мановакуумметр; 21 – аналитический фильтр

Рис. 1. Принципиальная схема ЭПА

На основании полученных результатов обоснованы: возможность создания систем очистки натрия; выбор устройств и аппаратуры для поддержания параметров необходимой технологии натриевого охлаждения; рекомендации по схеме их включения в конструкцию плавильного агрегата. Выполнено расчетное обоснование принципиальной схемы системы очистки натрия без использования побудителя расхода натрия и ее параметров. Предложены рекомендации по включению системы очистки натрия без побудителя расхода, а также электрохимического анализатора содержания кислорода в натрии в первичную систему охлаждения плавильного агрегата.

Предложенные рекомендации были использованы для разработки принципиально новой конструкции системы очистки жидкого натрия, не содержащей побудителя расхода натрия, размещенной непосредственно в полости корпуса конкретного плавильного агрегата «МАГМА-3».

2. Оценка безопасности натриевого охлаждения плавильного агрегата применительно к аварийным ситуациям

Наиболее вероятными и опасными аварийными ситуациями при работе плавильного агрегата,



Рис. 2. Вид «горячего» тигля после эксперимента

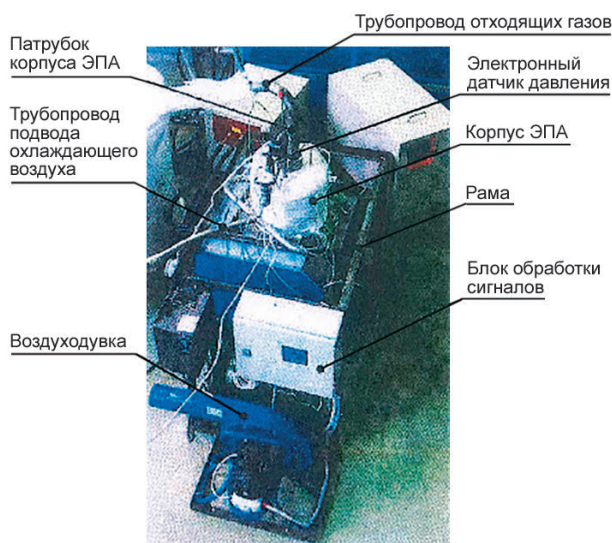


Рис. 3. Внешний вид модуля жидкометаллического корпуса охлаждения

использующего отвод тепла с рабочей поверхности корпуса жидким натрием, могут быть нарушение герметичности полости корпуса плавильного агрегата и истечение (вытекание) жидкого натрия в рабочее пространство плавильной камеры или в заполненное воздухом пространство вторичного контура охлаждения плавильной камеры.

Оценку безопасности плавильного агрегата при аварийном истечении натрия производили расчетными методами. Результаты выполненных расчетов показывают, что:

- попавший в рабочее пространство плавильного агрегата натрий мгновенно окисляется до оксида натрия Na_2O ;
- образовавшийся основной оксид Na_2O преимущественно (на 97%) поглощается кислым плавильным шлаком с образованием комплексного соединения $2\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{CaO} \cdot 3\text{SiO}_2$;
- остальные 3% Na_2O поступают в газовую фазу в виде солей натрия (преимущественно в виде NaPO_3), уносятся из рабочего пространства и после охлаждения газа переходят в пыль преимущественно в виде NaNO_3 ;
- при аварийном истечении натрия со скоростью 60 кг/ч масса шлака может увеличиться за час в среднем на 6%, масса отходящего из агрегата газа остается практически неизменной;

- в результате выделения тепла при окислении натрия в рабочем пространстве агрегата температура отходящего газа несколько повышается в пределах, не оказывающих влияния на эксплуатацию агрегата;
- натрий, вытекающий в заполненное воздухом пространство вторичного контура охлаждения плавильной камеры, окисляется до оксида Na_2O и уносится воздухом в систему очистки газов.

Таким образом, результаты расчетов показали, что аварийное истечение натрия из системы первичного охлаждения корпуса плавильного агрегата не приведет к мгновенному выходу плавильного агрегата из штатного режима работы и развитию сценариев проектной аварии.

Система АСУТП плавильного агрегата «МАГМА-3» содержит устройства и подсистему обнаружения течи натрия и обеспечит своевременную остановку плавильного агрегата на ранней стадии аварийного истечения натрия. Это еще больше уменьшает вероятность мгновенного выхода агрегата из штатного режима работы.

3 Изучение поведения наиболее часто встречающихся радионуклидов – загрязнителей МРО в процессе их пирометаллургической переработки

Результаты проведенных экспериментов (усредненные) показаны в табл. 1.

Таблица 1. Результаты спектрометрического анализа продуктов плавки до и после дезактивации металла

Изотоп	Удельная активность образца МРО, Бк/г	Удельная активность дезактивированного металла, Бк/г	Удельная активность, Бк/г		Коеф-фициент дезактивации
			Шлака	Пыли	
Cs-137	216,0	≤ 0,1	20,0	196,0	≥ 2160
Am-241	68,6	≤ 0,1	7,0	61,6	≥ 686
U-235	20,0	≤ 0,1	2,0	18,0	≥ 200
*Co-60	110,0	1,0	50,0	60,0	110,0
Сум-марно	414,6	≤ 1,0	79,0	317,6	≥ 3156

* Примечание: Co-60 в поверхностных отложениях.

Данные табл. 1 свидетельствуют о том, что радионуклиды поверхностных загрязнений образцов МРО в процессе расплавления и нагрева расплавленных металла и шлака частично перешли в кислый шлак и там зафиксировались, но в большей степени испарились, перешли в газовую фазу, а при охлаждении газов конденсировались и перешли в пыль.

В процессе проведения описанных экспериментов проверена и подтверждена длительная работоспособность модуля жидкометаллического

контура охлаждения при температуре газовой фазы в рабочем пространстве ЭПА до 1900 °С.

На модуле системы улавливания и очистки газов от пыли и радиоактивных аэрозолей проверялась предложенная в концепции схема сухой очистки газов, выделяющихся при работе плавильного агрегата. Степень финишной очистки получаемых в экспериментах газов составила 99,99%. Для очистки газов использовали рукавные и аэрозольные фильтры.

Очистке подвергали газы, охлажденные до температуры ниже 150 °С и выше 60 °С (точка росы). Результаты экспериментов подтвердили работоспособность предлагаемой нами системы сухой очистки газов от пыли и аэрозолей, исключаяющей получение жидких РАО.

Таким образом, опробование технологической схемы одностадийной пирометаллургической переработки (дезактивации) МРО в плавильном агрегате, использующем отвод тепла с рабочей поверхности корпуса жидкометаллическим теплоносителем, в экспериментах на ЭПА в условиях АО «ГНЦ РФ-ФЭИ» подтвердило возможность реальной дезактивации МРО в опытно-промышленном агрегате «МАГМА-3» и работоспособность систем жидкометаллического охлаждения, улавливания и очистки газов, предлагаемых в концепции.

4 Проверка возможности надежного кондиционирования вторичных ТРО, получаемых при дезактивации МРО

В процессе пирометаллургической дезактивации кроме «чистого» металла производятся вторичные твердые радиоактивные отходы: конечный шлак (до 6% от массы переработанных МРО) и пыль, уловленная в газоочистных устройствах (до 1% от массы переработанных МРО). Так как масса получаемых вторичных ТРО значительно меньше массы перерабатываемых МРО, уровень радиоактивности этих ТРО значительно превышает уровень радиоактивности дезактивируемых МРО.

Поэтому возникает проблема кондиционирования получаемых ТРО для окончательного захоронения или долговременного хранения.

Предложенная нами концепция переработки МРО предусматривает проведение дезактивации МРО под кислым шлаком. Конечные шлаки процесса остаются кислыми (имеют низкую основность $(\text{CaO})/(\text{SiO}_2) \leq 0,8$). Такие шлаки не рассыпаются при хранении, не размываются водой или слабыми кислотными растворами.

Кислые шлаки, аналогичные шлакам, получаемым при дезактивации МРО, но не содержащие радионуклиды, были испытаны по стандартной методике в ЦЗЛ ФГУП «ПО «Маяк» и показали соответствие критериям приемлемости РАО для их дальнейшего хранения и захоронения.

В условиях АО «ГНЦ РФ-ФЭИ» на соответствие критериям приемлемости РАО были испытаны реальные конечные шлаки процесса дезактивации МРО на ЭПА, содержащие радионуклиды (табл.2).

Таблица 2. Результаты испытаний конечного шлака процесса дезактивации МРО на пригодность для кондиционирования и долговременного хранения

№ образца	Активность выщелоченной пробы по Cs-137, Бк			Скорость выщелачивания по Cs-137 на 7 сутки, г/см ² -сутки
	1 сутки	3 сутки	7 сутки	
1	9,5·10 ³	1,39·10 ³	4,51·10 ²	4,34·10 ⁻⁴
2	1,36·10 ⁴	8,47·10 ³	1,28·10 ³	8,17·10 ⁻⁴

Образцы шлака считаются выдержавшими испытания, если значения скорости выщелачивания радионуклидов по Cs-137 составляют менее $1 \cdot 10^{-3}$ г/см·сутки [ГОСТ Р 50926, НП-019-15].

Таким образом, конечные кислые шлаки, получаемые в процессе дезактивации МРО, могут быть матрицей для иммобилизации радионуклидов, пригодной для долговременного хранения и окончательного захоронения.

Так как масса пыли, улавливаемой газоочистными устройствами в процессе дезактивации МРО, в 100 раз меньше массы МРО, уровень ее загрязнения радионуклидами на 2 порядка выше, чем у МРО. В результате такая пыль представляет собой среднеактивные отходы (САО), и остро встает вопрос ее надежного кондиционирования и окончательного захоронения.

При разработке концепции одностадийной пирометаллургической переработки МРО была предложена следующая схема и способ кондиционирования радиоактивной пыли, уловленной газоочистными устройствами.

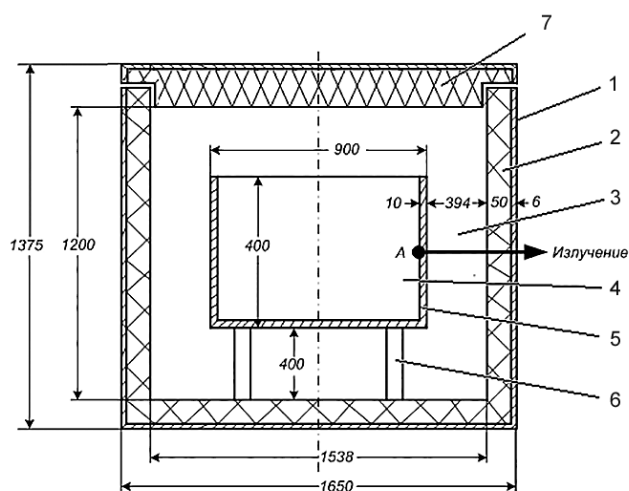
Для размещения радиоактивного шлака и пыли, их транспортировки и захоронения предложен металлический контейнер стандартных размеров, футерованный изнутри слоем кислой огнеупорной набивки толщиной 50 мм.

Такой контейнер устанавливается на самоходную рельсовую тележку и помещается под желоб для слива шлака из плавильного агрегата. Пыль из газоочистных устройств загружается в нефутерованный металлический контейнер меньших размеров, чем большой контейнер для окончательного захоронения РАО. Затем закрытый крышкой контейнер с пылью помещают в большой контейнер, стоящий под сливным шлаковым желобом, и заполняют оставшееся свободное пространство большого контейнера жидким конечным кислым шлаком процесса дезактивации МРО (рис. 4). После остывания и затвердевания шлака большой контейнер накрывают футерованной крышкой, герметизируют и отправляют в место временного хранения или конечного захоронения РАО.

Слой затвердевшего шлака в большом контейнере значительно снижает уровень γ -излучения с наружной поверхности контейнера и позволяет безопасно транспортировать контейнер к месту окончательного захоронения и хранить его там положенное время. Прочный монолит кислого застывшего шлака в контейнере исключает возможность выделения из него РАО даже в аварийных ситуациях.

В соответствии с концепцией одностадийной пирометаллургической переработки МРО в плавильном агрегате, использующем отвод тепла с рабочей поверхности корпуса жидкометаллическим теплоносителем, и с учетом результатов ее уточнения и опробования разработан рабочий проект опытно-демонстрационного комплекса для пирометаллургической дезактивации МРО в плавильном агрегате «МАГМА-3». Проектирование комплекса осуществлялось в соответствии с нормами и правилами, предъявляемыми к радиационно опасным объектам. Проект привязан к площадке АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», но может быть с небольшими изменениями привязан к другим строительным площадкам. В таблице 3 приведены сравнительные показатели проекта «МАГМА-3» и применяемых, а также предложенных до настоящего времени технологий дезактивации МРО.

Из приведенных данных видно, что предложенная концепция одностадийной пирометаллургической переработки МРО в плавильном агрегате, использующем отвод тепла с рабочей поверхности корпуса жидкометаллическим теплоносителем, при ее практической реализации обеспечивает ряд серьезных преимуществ по сравнению с известными технологиями дезактивации МРО.



1 – стальной корпус большого контейнера; 2 – кислая набивная футеровка; 3 – кислый конечный шлак; 4 – радиоактивная пыль; 5 – стальной корпус малого контейнера; 6 – опоры малого контейнера; 7 – металлическая крышка большого контейнера с огнеупорной набивкой

Рис. 4. Схема размещения вторичных ТРО в контейнере для окончательного захоронения

Таблица 3. Сравнительные показатели проекта и известных технологий дезактивации МРО

Показатель	Проект «МАГМА»	Существующие технологии
Процесс	Одностадийный	Две и более стадии
Экономическая эффективность	Да	Нет
Возможность переработки различных видов отходов	Да	Нет
Энергоёмкость процесса*	Низкая (2010 кВт·ч/т)	Высокая (3000 кВт·ч/т)
Производительность по перерабатываемым МРО	Высокая (до 7000 м ³ /год)	Низкая (до 2500 м ³ /год)
Необходимость предварительных операций дезактивации и фрагментации	Нет	Да
Уровень активности отходов, принимаемых на переработку	НАО, САО	НАО
Тип плавильной установки	Топливокислородная, гарнисажная, герметичная	Электрические индукционные, дуговые и шахтные печи с огнеупорной футеровкой
Образование вторичных радиоактивных отходов от дезактивации	Шлак, пыль	Шлак, огнеупоры, пыль, жидкие РАО

* Примечание: в пересчете на первичную энергию

Заключение

Опробование технологии одностадийной переработки МРО на экспериментальном плавильном агрегате подтвердило возможность реализации предложенной схемы в полупромышленных условиях с получением в агрегате «МАГМА-3» дезактивированного металла, пригодного для хозяйственного применения без ограничений. Обоснованы и проверены способы улавливания и надежного кондиционирования полученных в небольшом количестве вторичных твердых радиоактивных отходов. Это позволило выполнить проект опытно-демонстрационного комплекса для одностадийной дезактивации МРО в плавильном агрегате «МАГМА-3», использующем отвод тепла с рабочей поверхности корпуса жидкометаллическим теплоносителем.

Литература

1. Скачек М. А. Радиоактивные компоненты АЭС: обращение, переработка, локализация: учебное пособие для вузов / М. А. Скачек — М.: Издательский дом МЭИ, 2014. — 552 с.
2. Смирнов С. Н. Радиационная экология. Физика ионизирующих излучений: учебник для студентов вузов / С. Н. Смирнов, Д. Н. Герасимов. — М.: Издательский дом МЭИ, 2006. — 326 с.
3. Кузнецов С. Б. Обращение с радиоактивными отходами на Курской АЭС. — М.: ЭНИЦ ВНИИ АЭС, 2002. — 32 с.
4. Полуэктова Г. Б. Методы дезактивации и демонтажа оборудования АЭС / Г. Б. Полуэктова, О. В. Ковальчук // Атомная техника за рубежом. — 1990. — № 8. — С. 9.
5. Технология и оборудование на базе индукционного плавителя с холодным тиглем для переработки радиоактивных металлических отходов /

В. Г. Пастушков, А. В. Молчанов, В. П. Серебряков и др. // Обращение с радиоактивными отходами. — М., ЭНИЦ ВНИИ АЭС. — 2002. — С. 99.

6. Разработка технологии плавления и дезактивации радиоактивных металлических отходов с применением порошкообразных металлизированных топлив / И. А. Соболев, С. И. Дмитриев и др. // Обращение радиоактивными отходами. — М., ЭНИЦ ВНИИ АЭС. — 2002. — С. 142.

7. Зарубин В. А. Переработка и хранение радиоактивных отходов на АЭС с ВВЭР // Ярмарка инновационных проектов в области обращения с РАО, вывода из эксплуатации и экологической реабилитации: Материалы конференции. — М., 2007. — С. 58—63.

8. Чапаев И. Г. Создание производства по переработке молибденового лома, загрязненного ураном ВВЭР // Ярмарка инновационных проектов в области обращения с РАО, вывода из эксплуатации и экологической реабилитации: Материалы конференции. — М., 2007. — С. 73—76.

9. Вошинин С. А. Типовая установка плазменной переработки радиоактивных отходов на атомных электростанциях (пилотная установка для Нововоронежской АЭС) / С. А. Вошинин, В. Г. Поденко, С. А. Дмитриев и др. // Ярмарка инновационных проектов в области обращения с РАО, вывода из эксплуатации и экологической реабилитации: Материалы конференции. — М., 2007. — С. 76—85.

10. Колпаков Г. Н. Очистка лома нержавеющей стали от радиоактивных загрязнений электролитическим методом / Г. Н. Колпаков, Н. А. Колпакова, В. А. Кузов и др. // Известия Томского политехнического института. — 2009. — Т. 314. — № 3 — С. 74—77.

11. ОАО Атомтехэнерго. Технико-коммерческое предложение «Создание установки по переработке твердых низкоактивных отходов методом плавления в электрической печи постоянного тока».
12. Вертман А. А. Обезвреживание и утилизация металлических радиоактивных отходов // *Металлург.* — 2001. — № 2. — С. 30–32.
13. Гудим Ю. А. Производство стали из твердой металлической шихты. Электрические или топливные плавильные агрегаты? / Ю. А. Гудим, И. Ю. Зинуров // *Электрометаллургия.* — 2010. — № 11. — С. 2–7.
14. Гудим Ю. А. Проблемы и возможности пирометаллургической дезактивации металлических радиоактивных отходов / Ю. А. Гудим, А. А. Голубев, В. И. Бердников, И. Ю. Зинуров // *Бюллетень «Черная металлургия».* — 2016. — № 7. — С. 70–74.
15. Способ безотходной термической переработки твердых коммунальных отходов и агрегат для его осуществления: патент № 2461776 РФ / Голубев А. А., Гудим Ю. А., Грачев В. А., Дыбычкин В. П. — Заявка № 2011112128/03; заявл. 22.06.2010; опубл. 20.09.2012 — *Бюл.* № 26.

Информация об авторах

Голубев Анатолий Анатольевич, заместитель генерального директора, ООО Промышленная компания «Технология металлов», e-mail: a.golubev@metalstech.ru.

Грачёв Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, Институт физической химии и электрохимии РАН им. А. Н. Фрумкина, Центр глобальной экологии МГУ им. М. В. Ломоносова, e-mail: eco.moskvitina@mail.ru.

Гудим Юрий Александрович, доктор технических наук, заместитель генерального директора по научной работе, ООО Промышленная компания «Технология металлов», e-mail: mail@metalstech.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Гудим Ю. А., Голубев А. А., Грачёв В. А. Одностадийная пирометаллургическая переработка металлических РАО // *Радиоактивные отходы.* — 2018. — № 1 (2). — С. 68–75.

SINGLE-STAGE PYROMETALLURGICAL PROCESSING OF RADIOACTIVE SCRAP METAL

Yu. A. Gudim¹, A. A. Golubev¹, V. A. Grachev²

¹Industrial company Metals Technology, Chelyabinsk, Russian Federation

²A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Center for Global Ecology of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Article received 26 December 2017

The authors proposed a method for a single-stage pyrometallurgical processing of radioactive scrap metal using an experimental sample of the MAGMA melting unit. Feasibility of implementing the proposed technological scheme in semi-industrial conditions and of producing deactivated metal suitable for economic use without restrictions has been confirmed. The methods of trapping and safe conditioning of small amounts of secondary solid radioactive wastes were substantiated and tested. A pilot project for a single-stage deactivation of radioactive scrap metal in the MAGMA-3 melting unit has been completed.

Keywords: radioactive scrap metal, RSM, pyrometallurgical deactivation, single-stage process, melting unit, acid slag.

References

1. *Skachek M. A.* Radioaktivnye komponenty AEHS: obrashchenie, pererabotka, lokalizatsiya: uchebnoe posobie dlya vuzov / M. A. Skachek — M.: Izdatel'skij dom MEHI, 2014. — 552 s. (In Russian).
2. *Smirnov S. N.* Radiacionnaya ehkologiya. Fizika ioniziruyushchih izlucheniij: uchebnik dlya studentov vuzov / S. N. Smirnov, D. N. Gerasimov. — M.: Izdatel'skij dom MEHI, 2006. — 326 s. (In Russian).
3. *Kuznecov S. B.* Obrashchenie s radioaktivnymi othodami na Kurskoj AEHS. — M.: EHNIC VNII AEHS, 2002. — 32 s. (In Russian).
4. *Poluehktova G. B.* Metody dezaktivatsii i demon-tazha oborudovaniya AEHS / G. B. Poluehktova, O. V. Koval'chuk // Atomnaya tekhnika za rubezhom. — 1990. — № 8. — S. 9. (In Russian).
5. Tekhnologiya i oborudovanie na baze indukcionnogo plavitelya s holodnym tiglem dlya pererabotki radioaktivnyh metallicheskih othodov / V. G. Pastushkov, A. V. Molchanov, V. P. Serebryakov i dr. // Obrashchenie s radioaktivnymi othodami. — M., EHNIC VNII AEHS. — 2002. — S. 99. (In Russian).
6. Razrabotka tekhnologii plavlenniya i dezaktivatsii radioaktivnyh metallicheskih othodov s primeneniem poroshkoobraznyh metallizovannyh topliv / I. A. Sobolev, S. I. Dmitriev i dr. // Obrashchenie radioaktivnymi othodami. — M., EHNIC VNII AEHS. — 2002. — S. 142. (In Russian).
7. *Zarubin V. A.* Pererabotka i hranenie radioaktivnyh othodov na AEHS s VVEHR // YArmarka innovacionnyh proektov v oblasti obrashcheniya s RAO, vyvoda iz ehkspluatatsii i ehkologicheskoy reabilitatsii: Materialy konferencii. — M., 2007. — S. 58–63. (In Russian).
8. *Chapaev I. G.* Sozdanie proizvodstva po pere-rabotke molibdenovogo loma, zagryaznennogo uranom VVEHR // YArmarka innovacionnyh proektov v oblasti obrashcheniya s RAO, vyvoda iz ehkspluatatsii i ehkologicheskoy reabilitatsii: Materialy konferencii. — M., 2007. — S. 73–76. (In Russian).
9. *Voshchinin S. A.* Tipovaya ustanovka plazmennoj pererabotki radioaktivnyh othodov na atomnyh ehlektrostanciyah (pilotnaya ustanovka dlya Novovoronezhskoj AEHS) / S. A. Voshchinin, V. G. Podenko, S. A. Dmitriev i dr. // YArmarka innovacionnyh proektov v oblasti obrashcheniya s RAO, vyvoda iz ehkspluatatsii i ehkologicheskoy reabilitatsii: Materialy konferencii. — M., 2007. — S. 76–85. (In Russian).
10. *Kolpakov G. N.* Ochistka loma nerzhavayushchih stalej ot radioaktivnyh zagryaznenij ehlektroliticheskim metodom / G. N. Kolpakov, N. A. Kolpakova, V. A. Kuzov i dr. // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo instituta. — 2009. — T. 314. — № 3 — S. 74–77. (In Russian).
11. OAO Atomtekhehnergo. Tekhniko-kommercheskoe predlozhenie «Sozdanie ustanovki po pere-rabotke tverdyh nizkoaktivnyh othodov metodom plavlenniya v ehlektricheskoy pechi postoyannogo toka». (In Russian).
12. *Vertman A. A.* Obezvrezhivanie i utilizatsiya metallicheskih radioaktivnyh othodov // Metallurg — 2001. — № 2. — S. 30–32. (In Russian).
13. *Gudim Yu. A.* Proizvodstvo stali iz tverdoj metallicheskoj shihty. EHlektricheskie ili toplivnye plavil'nye agregaty? / Yu. A. Gudim, I. Yu. Zinurov // Ehlektrometallurgiya. — 2010. — № 11. — S. 2–7. (In Russian).
14. *Gudim Yu. A.* Problemy i vozmozhnosti piro-metallurgicheskoy dezaktivatsii metallicheskih radioaktivnyh othodov / Yu. A. Gudim, A. A. Golubev, V. I. Berdnikov, I. Yu. Zinurov // Byulleten' «Chernaya metallurgiya» — 2016. — № 7. — S. 70–74. (In Russian).
15. Sposob bezothodnoj termicheskoy pererabotki tverdyh kommunal'nyh othodov i agregat dlya ego osushchestvleniya: patent No 2461776 RF / Golubev A. A., Gudim Yu. A., Grachev V. A., Dydychkin V. P. — Zayavka No 2011112128/03; zayavl. 22.06.2010; publ. 20.09.2012. — Byul. No 26.

Information about the author

Golubev Anatoly Anatolievich, Industrial Company Metals Technology, Deputy General Director, e-mail: a.golubev@metalstech.ru.

Grachev Vladimir Alexandrovich, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, professor, Doctor of Technical Sciences, A. N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of Russian Academy of Sciences, Center for Global Ecology of Lomonosov Moscow State University, e-mail: eco.moskvitina@mail.ru.

Gudim Yury Alexandrovich, Doctor of Technical Sciences, Deputy General Director for Research, Industrial Company Metals Technology, e-mail: mail@metalstech.ru.

Bibliographic description

Gudim Yu. A., Golubev A. A., Grachev V. A. Single-stage pyrometallurgical processing of radioactive scrap metal. Radioactive waste, 2018, no 1 (2), pp. 68–75 (In Russian).