

МЕТАЛЛУРГИЯ

Обзорная статья

УДК 669.231.3

EDN: HZFFXH

DOI: 10.21285/1814-3520-2026-1-140-157



Пирометаллургическая переработка отработанных автомобильных катализаторов методом плавки на коллектор

Р.А. Пахомов¹, В.Ю. Бажин², В.А. Слободин³✉¹ООО «Институт Гипроникель», Санкт-Петербург, Россия^{2,3}Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Резюме. Цель – обобщить современные представления о влиянии флюсования на структурно-реологические свойства шлаковой фазы в процессе пирометаллургической плавки отработанных автомобильных катализаторов на коллектор. Методологию работы составляют аналитический обзор и оценка отечественных и зарубежных исследований в области переработки автомобильных катализаторов, содержащих металлы платиновой группы. Проанализированы механизмы воздействия флюсовых добавок (оксидов кальция, натрия, бора, фторида кальция) на микроструктуру расплава, в частности, на степень полимеризации силикатных и алюмосиликатных сетей при изменении соотношения форм химически связанного кислорода. Установлено, что управление пирометаллургическим процессом плавки сводится к контролю баланса между полимеризованными и деполимеризованными структурными составляющими в шлаке. Показано, что основные оксиды эффективно снижают вязкость расплава, разрывая мостиковые связи, но одновременно повышают активность свободного кислорода, что способствует окислению платины, палладия и родия и их потерям. Обоснована необходимость применения комплексных флюсовых композиций для корректировки свойств расплава и минимизации окислительного потенциала. Выявлено, что ключевой задачей для повышения извлечения платиноидов из исследуемого вторичного сырья является создание количественных моделей, связывающих состав флюсовой добавки, структуру шлака и его окислительный потенциал. Полученные выводы позволяют прогнозировать поведение многокомпонентных систем и формируют основу для оптимизации технологических режимов пирометаллургической переработки отработанных автомобильных катализаторов, обеспечивающих максимальное концентрирование ценных металлов в коллекторе при минимальных энергетических затратах и эксплуатационных расходах. Дальнейшие исследования должны быть сосредоточены на разработке таких моделей с применением современных термодинамических программных комплексов.

Ключевые слова: отработанные автомобильные катализаторы, металлы платиновой группы, плавка на коллектор, пирометаллургия, переработка отходов, платина, палладий, родий

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям (Договор о предоставлении гранта «УМНИК» № 19983ГУ/2025).

Для цитирования: Пахомов Р.А., Бажин В.Ю., Слободин В.А. Пирометаллургическая переработка отработанных автомобильных катализаторов методом плавки на коллектор // iPolytech Journal. 2026. Т. 30. № 1. С. 140–157. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-1-140-157>. EDN: HZFFXH.

METALLURGY

Review article

Pyrometallurgical processing of spent automotive catalysts by collector metal smelting

Roman A. Pakhomov¹, Vladimir Yu. Bazhin², Viktor A. Slobodin³✉¹Limited Liability Company Gipronickel Institute, Saint Petersburg, Russia^{2,3}Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

Abstract. This review consolidates current knowledge on the influence of flux addition on the structural and rheological properties of the slag phase during the pyrometallurgical smelting of spent automotive catalysts using a collector metal. The analysis draws on Russian and international studies that examine the processing of automotive catalysts containing platinum-group metals. The study evaluates the mechanisms by which flux additives, including calcium, sodium, and boron oxides, as well as calcium fluoride, modify the melt microstructure. It focuses on the degree of polymerization in silicate and aluminosilicate networks resulting from variations in the distribution of chemically bound oxygen. The findings show that effective control of the pyrometallurgical smelting process depends on maintaining an appropriate balance be-

tween polymerized and depolymerized structural units in the slag. Basic oxides reduce melt viscosity by breaking bridging bonds; however, they also increase oxygen activity, which promotes oxidation and loss of platinum, palladium, and rhodium. These results underscore the need for composite flux formulations that adjust melt properties while minimizing the oxidation potential of the slag. A central challenge in improving the recovery of platinum-group metals from this secondary raw material is the development of quantitative models that link flux composition, slag structure, and oxidation potential. These conclusions support predictive evaluation of multicomponent systems and provide a basis for optimizing smelting parameters to increase metal recovery to the collector while reducing energy use and operating costs. The development of predictive models using modern thermodynamic software packages represents a key direction for further research.

Keywords: spent automotive catalysts, platinum group metals, collector smelting, pyrometallurgy, waste recycling, platinum, palladium, rhodium

Funding: The work was supported by the Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises (UMNIK Grant Agreement No. 19983ГУ/2025).

For citation: Pakhomov R.A., Bazhin V.Yu., Slobodin V.A. Pyrometallurgical processing of spent automotive catalysts by collector metal smelting. *iPolytech Journal*. 2026;30(1):140-157. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-1-140-157>. EDN: HZFFXH.

ВВЕДЕНИЕ

В современном мировом контексте, характеризующемся стремительной трансформацией энергетики и транспорта, отработанные автомобильные катализаторы (SAC от англ. spent automotive catalysts) приобретают статус не просто отходов, а высококонцентрированного стратегического сырья металлов платиновой группы (МПГ или от англ. PGM – Platinum Group Metals) мобильной шахты МПГ (от англ. mobile mine PGM) [1–3]. Их актуальность в качестве вторичного ресурса определяется комплексом взаимосвязанных факторов, среди которых на первый план выходят экономические, экологические и стратегические аспекты [4–6].

Стратегическая независимость и геополитический аспект. Известно, что география первичной добычи МПГ крайне ограничена и территориально сконцентрирована: 80% добычи приходится на ЮАР и Россию [7–9], что создает значительные риски для

снабжения многих промышленно развитых стран. Развитие собственной мощной отрасли по переработке вторичных катализаторов позволяет диверсифицировать источники сырья и повысить устойчивость национальных промышленных цепочек, так как из-за особых физико-химических свойств металлов платиновой группы их невозможно заменить [10, 11]. Таким образом, эффективная рециркуляция МПГ трансформируется из сугубо коммерческой задачи в элемент стратегической ресурсной безопасности государства.

Экономический драйвер: цена, спрос и новые рынки. Основными экономическими стимулами для переработки вторичного сырья МПГ являются их высокая рыночная стоимость (рис. 1) и растущий спрос. Резкая волатильность цен, особенно на палладий и родий, напрямую влияет на себестоимость производства автомобилей и другой высокотехнологичной продукции.

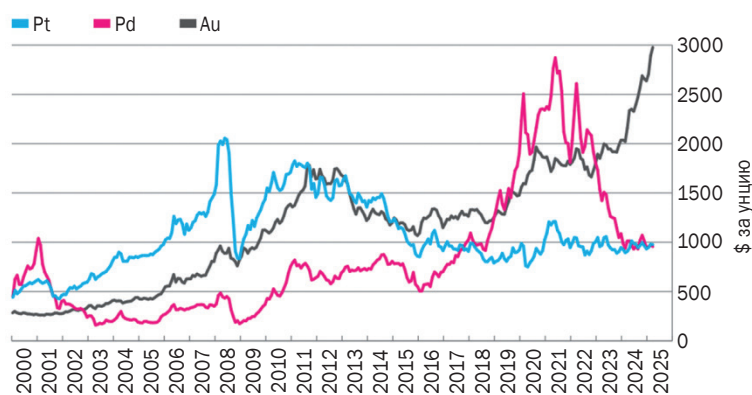


Рис. 1. График изменения среднемесячных цен на платину, палладий и золото, 2000-2025⁴
Fig. 1. Variations of average monthly prices for platinum, palladium and gold, 2000-2025⁴

⁴PGM market report May 2025. Режим доступа: <https://matthey.com/products-and-markets/pgms-and-circularity/pgm-markets/pgm-market-reports> (дата обращения: 16.12.2025).

Исторически главным потребителем МПГ была автомобильная промышленность для производства каталитических нейтрализаторов (на них приходится более 60% мирового спроса МПГ) [2, 12]. Как отражено на рис. 2, доля спроса палладия продолжает расти, даже несмотря на развитие электромобилестроения.

В настоящее время спектр применения платиноидов стремительно расширяется. Они становятся критически важными компонентами в технологиях водородной экономики (электролизеры, топливные элементы), в электронике, в катализе для химического

синтеза, а также в медицине [3, 12]. Диверсификация увеличивает влияние на сырьевые рынки. Стабильные поставки металлов платиновой группы становятся важным фактором технологического суверенитета для ведущих стран. В этой связи особенно стоит отметить развитие применения металлов платиновой группы в оборонной и аэрокосмической отраслях (табл. 1), например, в высокопрочных сплавах (Пт 99,95, ПтР10, Пли 95-5) [13, 14].

Экологический аспект: от линейной к циркулярной экономике. С экологической точки зрения переработка катализаторов

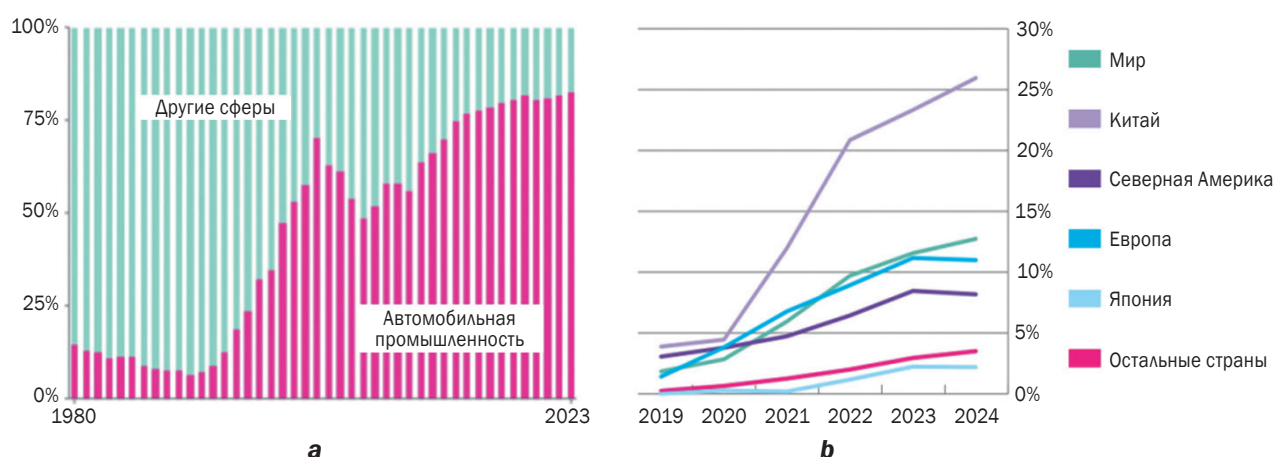


Рис. 2. Изменение доли спроса палладия в автомобильной промышленности относительно других сфер, 1980–2023 (а) и изменение доли аккумуляторных электрических автомобилей в мировом производстве легких транспортных средств, 2019–2024 (б)⁴

Fig. 2. Changes in the share of palladium demand in the automotive industry relative to other industries, 1980–2023 (a) and changes in the share of battery electric vehicles in the global production of light vehicles, 2019–2024 (b)⁴

Таблица 1. Применение металлов платиновой группы в оборонной и аэрокосмической отраслях⁴
Table 1. Application of platinum group metals in defence and aerospace industries⁴

Авионика и другая электроника	<ol style="list-style-type: none"> 1. Палладий для военных конденсаторов и других компонентов 2. Родий и иридий для герконовых переключателей 3. Рутений для чип-резисторов
Высокопрочные сплавы	<ol style="list-style-type: none"> 1. Палладий для высокопрочных паяльных сплавов 2. Платина и иридий для топливных форсунок, воздухопроводов, прокладок/уплотнителей, носовых обтекателей 3. Карбиды вольфрама, легированные рутением, для режущих пластин
Лазеры и оптические системы	<ol style="list-style-type: none"> 1. Иридиевые тигли для выращивания кристаллов иттрий-алюминиевого граната 2. Комплексы иридия для органических светодиодов 3. Платинородиевые сплавы для производства технического стекла
Авиационные двигатели	<ol style="list-style-type: none"> 1. Платиновое защитное покрытие и фиксирующая проволока для лопаток реактивного двигателя 2. Платина и родий для измерения температуры 3. Иридий для воспламенителей двигателя
Операционная энергия	<ol style="list-style-type: none"> 1. Платиновые и палладиевые катализаторы для переработки нефти в топливо и смазочные материалы 2. Платина в топливных элементах для подводных лодок с автономным ходом 3. Платина в топливных элементах для бесшумной, долговечной полевой электростанции и дронов
Другое	Ядерные технологии, катодная защита кораблей, механизмы посадочных мест эжекторов, хранение данных, обнаружение газов и др.

решает двуединую задачу. Во-первых, извлечение МПГ из отработанных автокатализаторов – более энергоэффективный и экологически чистый способ, чем традиционная добыча и обогащение руд [13, 14]. Во-вторых, переработка катализаторов предотвращает накопление отходов, включающих, помимо ценных металлов, потенциально опасные керамические и химические компоненты, что способствует снижению объемов захоронения, а также обеспечивает замкнутость материальных потоков. Извлечение МПГ из отработанных автокатализаторов сопряжено с меньшими затратами энергии и выбросами газов (SO₂, CO₂) и пыли, а также образованием отходов по сравнению с полным циклом первичного производства. Это приводит к значительному снижению общей нагрузки на биосферу [15–17]. Следовательно, высокотехнологичная переработка отработанных катализаторов становится важным аспектом в построении устойчивой, ресурсоэффективной модели промышленности.

Таким образом, актуальность системного подхода к переработке отработанных автомобильных катализаторов выходит далеко за рамки простого извлечения прибыли. Она находится на пересечении глобальных трендов: обеспечения экономической стабильности в условиях дефицита критического сырья, укрепления стратегической независимости и перехода к безотходному производству. Каждый использованный катализатор – это не просто отход, а ценный концентрированный ресурс для устойчивого будущего.

В таких условиях антропогенное месторождение, каким является парк катализаторов, представляет собой предсказуемый и постоянно возобновляемый источник, объемы которого напрямую зависят от уровня автомобилизации.

Цель исследования: анализ теории процесса плавки на коллектор и раскрытие принципов используемых технологий пиро-

металлургической переработки отработанных автокатализаторов, содержащих металлы платиновой группы.

ОСОБЕННОСТИ ОТРАБОТАННОГО АВТОМОБИЛЬНОГО КАТАЛИЗАТОРА КАК СЫРЬЯ МЕТАЛЛОВ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ

Все автомобили с бензиновыми двигателями внутреннего сгорания и искровым зажиганием должны быть оснащены каталитическими нейтрализаторами из-за экологических ограничений. Токсичные газы, такие как монооксид углерода, углеводороды и оксиды азота, выделяются при сгорании топлива, используемого в транспортных средствах, и превращаются в менее вредные или нейтральные газы (углекислый газ, водяной пар и азот) с помощью каталитических нейтрализаторов [15, 18]. Это преобразование происходит за счет катализа этих газов металлами платиновой группы, особенно платиной (Pt), палладием (Pd) и родием (Rh). Самые высокие показатели конверсии достигаются за крайне короткий промежуток времени при использовании МПГ, нанесенных на керамический материал сотовой формы с увеличенной площадью поверхности. Отработанный автомобильный катализатор обладает высоким потенциалом использования в качестве ресурса МПГ [13, 15]. Содержание основных компонентов в отработанном автокатализаторе на керамической основе приведено в табл. 2.

На рис. 3 приводятся схема работы, структура и химические реакции, происходящие при эксплуатации катализатора. Металлы платиновой группы постепенно окисляются, и катализатор приходит в негодность. Эффект усиливается при наличии серы в топливе, так как сродство МПГ к сере выше, чем к кислороду (также обосновывает использование сульфидных коллекторов при пирометаллургической переработке). Кроме того, в про-

Таблица 2. Химический состав отработанного автомобильного катализатора, % (составлено авторами)
Table 2. Chemical composition of spent automotive catalyst, wt% (compiled by the authors)

Компоненты													
SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	ZrO ₂	TiO ₂	CaO	Fe	C	S	P	Прочие	Pt	Pd	Rh
Содержание													
% масс.											г/т		
34,29	36,83	9,2	8,22	0,37	0,38	0,54	0,1	0,05	0,33	9,7	17	1000	280

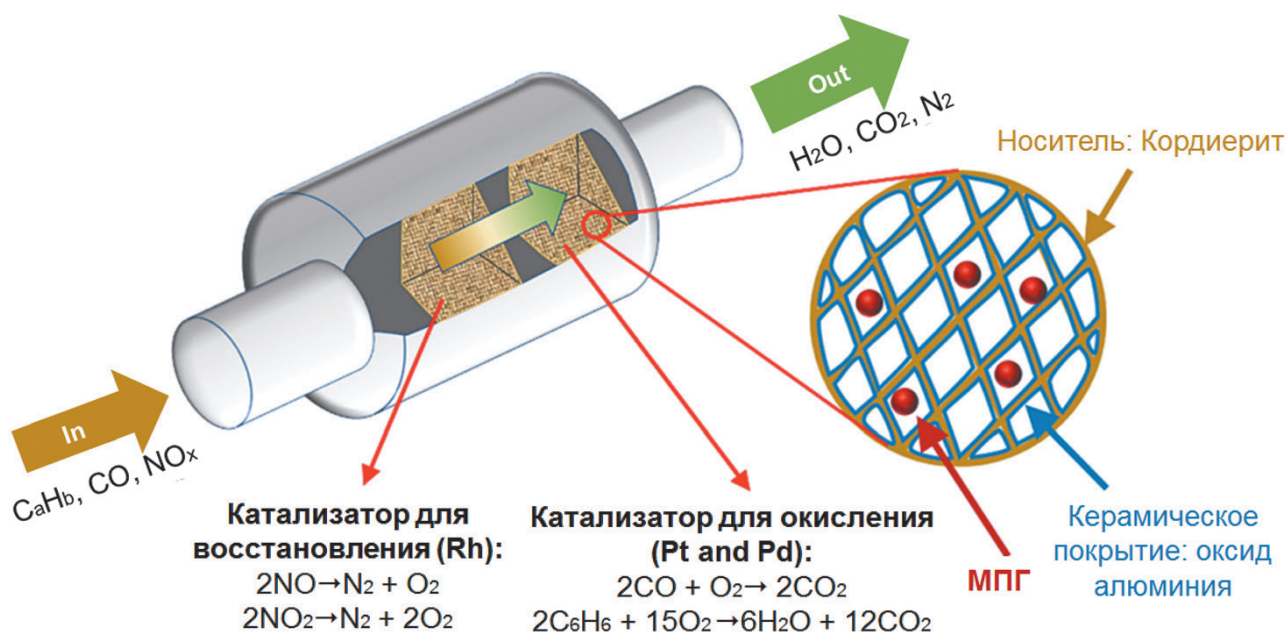


Рис. 3. Упрощенная схема автомобильного каталитического нейтрализатора [12]
Fig. 3. Simplified diagram of an automotive catalytic converter [12]

цессе эксплуатации происходит «отравление» другими металлами, соединениями фосфора, свинца и солями металлов⁵ [19].

Основа катализатора (кордиерит, оксид алюминия и др.) определяют способы переработки: необходимость предварительного обжига перед растворением в кислоте, количество флюсов для образования легкоплавкой и невязкой системы [7, 13, 15].

Ключевой особенностью гибридных автомобилей является повышенное содержание МПГ по сравнению с автомобилями с двигателями внутреннего сгорания [2].

На пунктах приема катализаторов проводят первичную сортировку на дизельные, бензиновые (первые содержат больше Pt, вторые – Pd), а также сажевые фильтры, которые являются упорным сырьем из-за высокой доли содержания SiC [20, 21]. Затем происходит разборка, измельчение, усреднение сырья и формирование партий (рис. 4). Сформированные партии в опломбированных бочках или биг-бегах отправляют на заводы-переработчики.

В Российской Федерации на данный момент существует несколько игроков (предприятий) на рынке приема отработанных автомобильных катализаторов: ООО «ЭКОКАТ ПЛЮС», ООО «Автокат Ресайкл», ООО ТД «ПромДраг-

Мет» и др. Сфера дальнейшей переработки также включает в себя ограниченное количество предприятий. Наиболее крупные объемы переработки у ОАО «Красноярский завод цветных металлов имени Н.В. Гулидова» (ОАО «Красцветмет», г. Красноярск) – лидера среди российских производителей аффинированных драгоценных металлов (более 60% МПГ в России). Это единственное отечественное предприятие, где существует полный цикл переработки автокатализаторов до аффинированных МПГ.

ООО «Никелевый штейн» (г. Москва, рис. 5) и ООО «Градара» (г. Екатеринбург) имеют объемы переработки значительно ниже, продуктами которой являются концентраты, отправляемые на выделение драгоценных металлов на аффинажные заводы, например, АО «Приокский завод цветных металлов» или ОАО «Красцветмет».

Зарубежные фирмы, перерабатывающие катализаторы: Platinum Metals FZE (ОАЭ), Sino-Platinum (Китай), Umicore (Бельгия), Heraeus (Германия), BASF/Engelhard (США), Johnson Matthey (Великобритания), Nippon/Mitsubishi (Япония) [15, 22].

Существуют разные технологии вскрытия отработанных автокатализаторов: пирометаллургические, гидрометаллургиче-

⁵Сапунов А.В. Фосфорное отравление автомобильных катализаторов: дис. ... канд. техн. наук: 02.00.15. М., 2005. 124 с.



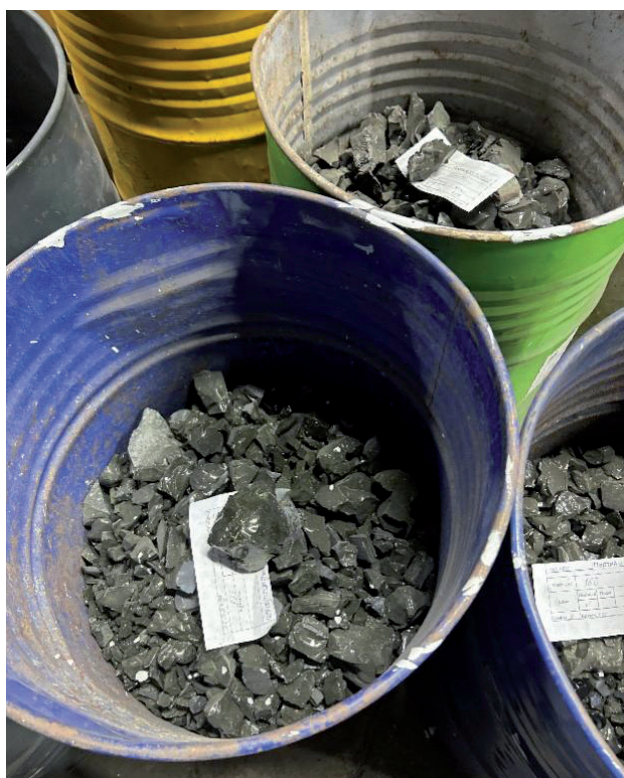
a



b

Рис. 4. Измельченный отработанный автомобильный катализатор (а) и получаемый в процессе плавки на коллектор стекловидный шлак (b) (составлено авторами)

Fig. 4. Ground-up spent automotive catalyst (a) and vitreous slag obtained during collector smelting b) (compiled by the authors)



a



b

Рис. 5. Дробленный шлак предприятия по переработке отработанных автокатализаторов после плавки (а) и штейн, обогащенный металлами платиновой группы (b) (составлено авторами)

Fig. 5. Crushed slag from the enterprise recycling spent automotive catalysts after melting (a) and matte enriched with platinum group metals (b) (compiled by the authors)

ские [23–25], комбинированные (в зарубежной литературе также выделяют биометаллургические подходы [13, 26]). Основная цель большинства способов – извлечение металлов платиновой группы, но уже опубликованы результаты исследований, направленных на попутное извлечение

редкоземельных металлов [27–29]. Сравнение и анализ каждого вида заслуживает отдельной статьи. Данный обзор направлен на один из методов пирометаллургической переработки – плавка на коллектор, наиболее распространенный и внедренный в промышленности.

ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАВКИ НА КОЛЛЕКТОР

Плавка на коллектор представляет собой высокотемпературный пирометаллургический процесс, направленный на концентрирование благородных металлов (платины, палладия, родия) из отработанных автомобильных катализаторов (рис. 6) в металлическом коллекторе, преимущественно на основе железа. Изначально способ переработки на железный коллектор был разработан Johnson Matthey Co., Ltd в Великобритании. Для его реализации использовали плазменно-дуговую плавку 1600–2000 °С без флюса или с добавлением небольшого количества извести (CaO), в дальнейшем этот метод распространился в США и Чехии [30].

Помимо железа применяются и другие коллекторы: медь (Cu) – второе место по распространенности; свинец (Pb) – из-за токсичности от него в настоящее время отказываются, никелевый штейн (Ni₃S₂), отработанные печатные платы (основа сплава в таком случае Sn и Cu). Менее распространены такие коллекторы, как алюминий (Al), цинк (Zn), кальций (Ca) и магний (Mg) [15, 18, 31]. Современные тенденции переработки направлены на использование других техногенных отходов и их составляющих в качестве коллекторов и шлакообразующих, например, хвостов цианидного выщелачивания и красного шлама [32, 33].

При выборе коллектора необходимо учитывать температуру плавления и особенности используемой печи (электродуговая, индукционная, плазменная и др.) [18, 34, 35], взаимную растворимость, а также химиче-

ские и физические свойства металла с МПГ (плотность, прочность и другие) [36].

Физическая сущность способа плавки на коллектор заключается в переводе оксидной или керамической матрицы катализатора (носитель на основе оксида алюминия или кордиерита) в шлаковую фазу, в то время как ценные металлы, благодаря сродству к металлическому или сульфидному коллектору, растворяются в нем [15, 18]. Принципиальным условием эффективного разделения фаз является создание таких физико-химических условий, при которых капли расплава коллектора с МПГ могли бы коалесцировать и сепарироваться от расплавленного шлака под действием сил гравитации. Особенную важность имеют вязкость, плавкость и температура плавления шлака, которые определяют время процесса плавки и необходимые энергозатраты (время выдержки и температура) [36].

Для описания скорости процесса осаждения используют формулы (1) и (2):

$$v = \frac{gd^2(\rho_{Me} - \rho_{slag})}{18\eta}; \quad (1)$$

$$\frac{\pi\rho_{Me}gd^3}{6} = \frac{\pi\rho_{slag}gd^3}{6} + 3\pi\eta dv, \quad (2)$$

где v – скорость осаждения металла, см/с; g – ускорение свободного падения (980,7 см/с²); d – диаметр частицы (капли) металла, см; ρ_{Me} – плотность металла, г/см³; ρ_{slag} – плотность шлака, г/см³; η – вязкость шлака, Па·с [21, 37].

Существует два значимых параметра, применяемых для оценки эффективности процес-

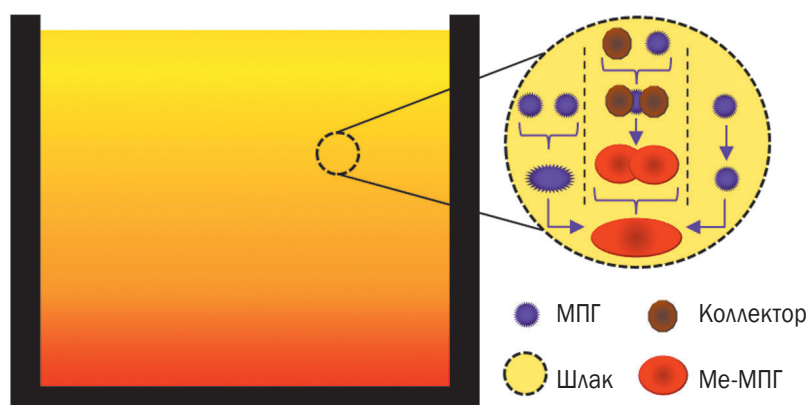


Рис. 6. Схема процесса плавки на металл-коллектор [18]
Fig. 6. Schematic diagram of collector smelting [18]

са плавки на коллектор: коэффициент извлечения R (от англ. recovery rate) и коэффициент обогащения E (от англ. enrichment coefficient) [21, 38]. Их расчет производится по следующим формулам (3) и (4) соответственно:

$$R = \left(1 - \frac{m_2 \times c_2}{m_1 \times c_1}\right) \times 100\% = \left(1 - \frac{M_2}{M_1}\right) \times 100\% = \frac{M_3}{M_1} \times 100\%; \quad (3)$$

$$E = \frac{m_1 \times c_1 - m_2 \times c_2}{c_1 \times m_3} = \frac{M_3/m_3}{M_1/m_1} = \frac{c_3}{c_1}, \quad (4)$$

где m_1, m_2, m_3 – массы автокатализатора, шлака и обогащенного МПГ продукта (сплава или штейна) соответственно, г; c_1, c_2, c_3 – содержание МПГ в автокатализаторе, шлаке и обогащенном продукте, г; M_1, M_2, M_3 – массы МПГ в автокатализаторе, шлаке и обогащенном продукте, г [21, 38].

Из составляющих формулы выделяют концентрацию МПГ в шлаке. По остаточному со-

держанию МПГ в шлаке определяют, является промпродукт оборотным или отвальным, другими словами, необходим ли повторный переплав на предприятии или транспортировка на обеднение большими партиями на заводы с крупноразмерными плавильными агрегатами. В российской практике удовлетворительным отвальным шлаком (содержащим недостаточное количество ценных компонентов для его экономически эффективного повторного перепада) считается шлак, с содержанием менее МПГ 25 г/т. В табл. 3 приведены результаты экспериментальных исследований процесса плавки автокатализаторов на железо как наиболее часто используемого коллектора в промышленности.

Из представленных данных в табл. 3 следует, что чем выше температура плавки, тем ниже доля флюсов в исходной шихте и наоборот.

Самым распространенным видом железного коллектора для ввода в шихту является железный порошок (ГОСТ 9849-86⁶) или лом. Оба материала эффективно применяются на аффинажных заводах цементации

Таблица 3. Показатели плавки отработанных автомобильных катализаторов на железный коллектор (составлено авторами)

Table 3. Rates of spent automotive catalyst melting on iron collector (compiled by the authors)

Температура, °С	Продолжительность, мин	Состав флюса	Общее кол-во флюса, %	Кол-во восстановителя (кокса), %	Кол-во коллектора, %	Тип коллектора	Проба SAC, г	c ₂ , г/т	E	R, %	Источник
1550	120	20% CaO	20	-	10,50	Fe	200	9,4	8,03	98,40	[39]
1300-1400	75	CaO/Na ₂ O = 35:20, 5% CaF ₂ , 8,5% Na ₂ B ₄ O ₇	68,50	5	15	Fe	1000	7,26	7,96	>99	[37]
1550	60	38-39% CaO, 50% угольной зола, 14% H ₃ BO ₃	206	-	5	Fe	50	3,74	4,2	99	[40]
1400	30	40% CaO, 22,7% Na ₂ CO ₃ , 5% Na ₂ B ₄ O ₇ , 5% CaF ₂	72,70	5	15	Fe	1000	7,29	~9	~95	[21]
1550-1600	60	20% хим. катализатора 16% Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O	~83,75	-	11	Fe	100	<7	~4	~98	[41]
1800	6	10% CaO	10	-	5	Fe	200	-	-	98	[42]
1400	60	30% CaO, 20% Na ₂ O, 15% B ₂ O ₃	65	3	15	Fe	400	8,4	2,31	>99	[43]

⁶ГОСТ 9849-86. Порошок железный. Технические условия. Введ. 01.07.87. М.: Изд-во стандартов, 1987.

драгоценных металлов из бедных оборотных растворов и не требуют поиска дополнительных путей поставок [44]. В ходе расчетов, выполненных специалистами ЦНИИчермет им. И.П. Бардина, установлено, что осаждение частиц железного коллектора размером 0,1 мм требует 15 мин, что делает эту стадию лимитирующей. Согласно полученным данным, минимально допустимый размер частиц коллектора должен составлять 0,13 мм. Удаление из шихты фракции 0,13–0,1 мм позволило уменьшить продолжительность выдержки расплава с 15 до 10 мин без снижения степени извлечения [45].

Как показали дальнейшие исследования ЦНИИчермет, при идентичном составе и количестве компонентов шихты, а также одинаковой температуре выдержки способ загрузки металла-коллектора в печь существенно влияет на степень извлечения МПГ (повышение достигает до 5%). Подача коллектора на поверхность расплава инициирует иной механизм осаждения ценных компонентов на подину, что, вероятно, обусловлено увеличением площади поверхности, доступной для захвата твердых частиц платиноидов [42]. Но стоит отметить, что такой способ требует создания инертной атмосферы, иначе повышается вероятность окисления железа или иного коллектора кислородом воздуха по сравнению с вводом в объем. Образующиеся оксиды хуже коллектируют МПГ и лучше растворяются в шлаке, что приведет к снижению извлечения платиноидов.

Еще одним альтернативным способом ввода металла-коллектора в шихту является предварительная пропитка раствором соли металла-коллектора. Количество соли рассчитывают так, чтобы обеспечить массовое содержание металла-коллектора в расплаве, превышающее содержание извлекаемых металлических компонентов. Пропитанный материал прокаливают в восстановительной атмосфере. В результате соли разлагаются, и металл-коллектор восстанавливается непосредственно на поверхности и в порах материала. Такая подготовка шихты обеспечивает образование тонкодисперсных частиц коллектора, равномерно распределенных по объему материала и в непосредственной близости от частиц целевых металлов, благодаря чему достигается высокая степень извлечения драгоценных металлов (до 95%) в

сплав при минимальных потерях. В качестве соли металла-коллектора могут использоваться нитраты никеля, меди, серебра, а также сульфат меди, в зависимости от состава перерабатываемого материала и присутствия других металлов (например, железа) [46].

Кроме того, для приготовления шихты с коллектором может быть применено брикетирование. Данная операция заключается в смешивании размолотой огнеупорной подложки катализатора с флюсами, материалом-коллектором и связующим компонентом с последующим прессованием полученной смеси под давлением от 5 до 40 МПа. В результате формируются прочные брикеты, в которых расстояние между частицами целевых металлов и коллектора становится минимальным, что обеспечивает их тесный контакт на начальном этапе плавки. Преимуществами такого способа являются сокращение времени выдержки расплава (до 15–20 мин), повышение степени извлечения металлов до 99,5% и снижение пыления при загрузке до 60%, что уменьшает потери материала и нагрузку на газоочистку [47].

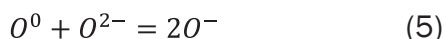
ОПИСАНИЕ ВЛИЯЮЩИХ НА ПРОЦЕСС ФАКТОРОВ

На показатель извлечения МПГ в процессе плавки влияет много параметров: температура, время выдержки, количество добавляемого коллектора и др. [15, 18]. Каждый из факторов может повлиять на процесс как положительно, так и отрицательно. Например, увеличение количества добавляемого коллектора повышает извлечение ценных компонентов, но приводит к уменьшению концентрации МПГ в получаемом продукте, что усложняет дальнейшую переработку. На практике доля коллектора в шихте обычно не превышает 15%, но также применяется плавка без коллектора или с его минимальным количеством (1–3%), в таком случае коллектором выступит содержащееся в автокатализаторе железо. От количества коллектора рассчитывается и ожидаемый выход сплава коллектор-МПГ, так как масса МПГ в шихте по отношению к массе добавляемого коллектора незначительна. Например, при плавке 1 кг катализатора с добавлением 1 кг флюсов и 150 г коллектора при содержании МПГ в автокатализаторе 1200 г/т и в шлаке 25 г/т по формулам (3) и (4) извлечение и

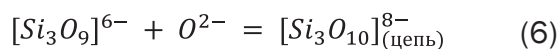
коэффициент обогащения составят 95,83% и 6,39 раз соответственно. В данной работе показано влияние некоторых флюсов на процесс. Полный анализ факторов будет отражен в последующих работах.

Добавление флюсов является важным технологическим приемом в пирометаллургической переработке отработанных автомобильных катализаторов, позволяющим целенаправленно регулировать физико-химические свойства шлаковой фазы. Основная цель добавки флюсов – снижение вязкости и температуры плавления расплава, что обеспечивает максимальную сепарацию фаз и снижение механических потерь коллекторного сплава, обогащенного металлами платиновой группы [15, 18, 37].

На уровне микроструктуры действие флюсов основано на контроле баланса различных форм кислородных связей в силикатной матрице: мостикового (BO), немостикового (NBO), свободного (FO), также возможен кислород в трикластерах (TO) [38]. Уравнение взаимодействия первых трех форм (5) [30]:



Основные оксиды (например, CaO, Na₂O) выступают в роли модификаторов сетки, разрывая мостиковые связи Si–O–Si и повышая количество деполимеризующих форм кислорода (NBO, FO) [15, 21]. Уравнения (6) и (7) – примеры реакций деполимеризации [18]:



Кислотные оксиды (SiO₂, избыток В₂O₃) способствуют полимеризации структуры [48, 49]. Таким образом, технологическая эффективность флюсования определяется достижением оптимального соотношения полимеризованных и деполимеризованных структурных единиц (табл. 4), что обеспечивает низкую вязкость при контролируемом окислительном потенциале, существенном для извлечения МПГ.

Как видно из табл. 4, повышение значения отношения O:Si способствует упрощению структуры.

Ключевым модификатором выступает оксид кальция (CaO), интенсивно деполимеризующий силикатные и алюмосиликатные сети [30, 52, 53]. Однако его избыток ведет к росту температуры плавления вследствие образования тугоплавких соединений (2CaO·SiO₂, 3CaO·SiO₂) и повышает окислительный потенциал расплава, увеличивая потери металлов платиновой группы за счет ее окисления и перехода в шлак, как показано в уравнениях (8)–(10) [21]:

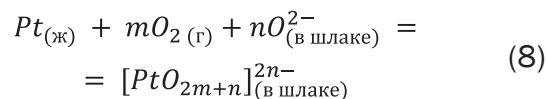
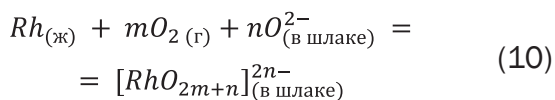
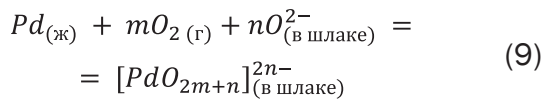


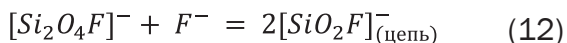
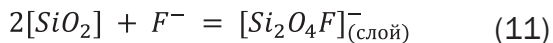
Таблица 4. Систематика кремнекислородных комплексов [50, 51]

Table 4. Systematization of silicon-oxygen complexes [50, 51]

Анион	Форма аниона	Формула	Заряд на 1 атом	Отношение O:Si	Силикат
Конечный	единичный (отдельный) тетраэдр	[SiO ₄] ⁴⁻	-4,0	4,0	ортосиликат
	сдвоенный тетраэдр	[Si ₂ O ₇] ⁶⁻	-3,0	3,5	диортосиликат
	кольцо из трех тетраэдров	[Si ₃ O ₉] ⁶⁻	-2,0	3,0	метасиликат кольцевого строения
	кольцо из четырех тетраэдров	[Si ₄ O ₁₂] ⁸⁻	-2,0	3,0	
	кольцо из шести тетраэдров	[Si ₆ O ₁₈] ¹²⁻	-2,0	3,0	
Бесконечный	цепочка из тетраэдров	[SiO ₃] ²⁻	-2,0	3,0	цепочный метасиликат
	лента из шестерных колец	[Si ₄ O ₁₁] ⁶⁻	-1,5	2,75	амфиболовая лента
	слой из шестерных колец	[Si ₂ O ₅] ²⁻	-1,0	2,50	листовой силикат
	каркас	SiO ₂	0	2,0	кремнезем



Альтернативным флюсом является фторид кальция (CaF₂), снижающий вязкость преимущественно за счет замещения ионов кислорода на фтор в полимерных цепях (уравнения (11) и (12) [21, 37]. Применение CaF₂ обычно ограничивают (~5% от массы шихты) из-за риска интенсификации коррозии футеровки:



Для дополнительного снижения температуры плавления и плотности шлака использу-

ют оксид натрия (Na₂O), вводимый в форме карбоната или гидроксида. Хотя его модифицирующая способность ниже, чем у CaO, избыток Na₂O также повышает окислительный потенциал [43, 54, 55]. Как правило, его используют совместно с оксидом бора (B₂O₃), например, в составе буры.

Оксид бора (B₂O₃) эффективно снижает вязкость и температуру плавления, но при содержании свыше 21% проявляет кислотные свойства, способствуя полимеризации [21, 43, 56]. Его добавка возможна также в форме борной кислоты.

Таким образом, выбор и количество добавляемых флюсов представляют собой многопараметрическую задачу, требующую учета их комплексного влияния на полимерное состояние расплава и окислительную активность. Для ее решения и прогнозирования поведения сложных многокомпонентных систем необходимо термодинамическое моделирование в специализированных программах (FactSage, Thermocalc), как показано на рис. 7.

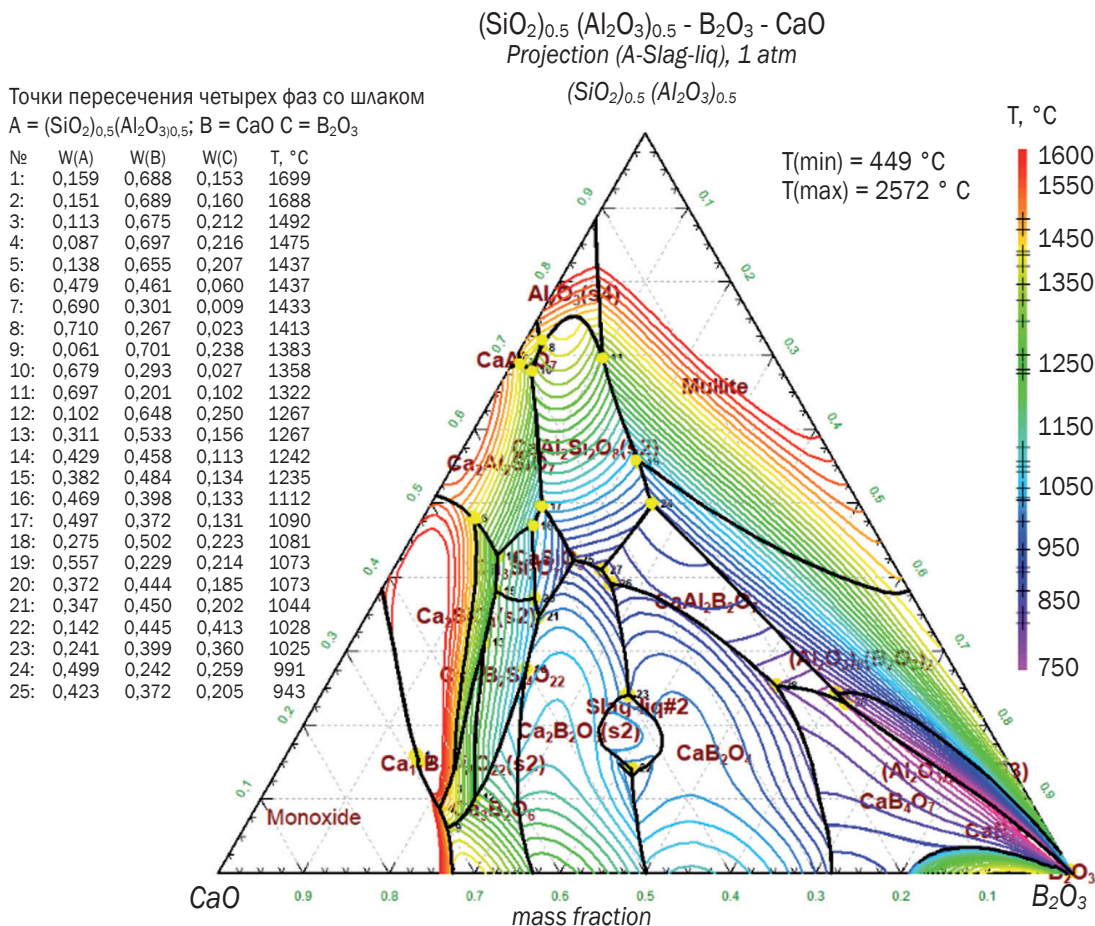


Рис. 7. Фазовая диаграмма шлаковой системы SiO₂-Al₂O₃-CaO-B₂O₃ (составлено авторами)
Fig. 7. Phase diagram of the SiO₂-Al₂O₃-CaO-B₂O₃ slag system (compiled by the authors)

При построении диаграммы (см. рис. 7) состав автокатализатора был принят относительно табл. 2, то есть кордиеритовая основа, большую часть которой составляют оксиды алюминия и кремния примерно в равном соотношении, что отражено в верхнем углу диаграммы. Тугоплавкие оксиды магния и циркония приняты за остаточную твердую фазу, так как в практике пирометаллургических процессов допускается до 15% твердой фазы. Основными флюсами, принятыми при моделировании, являются известь и борная кислота, которые после разложения оставят компоненты CaO и V_2O_5 , как показано в нижних углах диаграммы. Так как экономически целесообразно максимизировать количество автокатализатора в составе шихты по сравнению с остальными компонентами, то примем значение в 50% (отн.) автокатализатора как оптимальное. В таком случае выбираем точки с соответствующим содержанием $Al_2O_3+SiO_2$: 6, 7, 8, 10, 11, 16, 17, 19, 24. Первые 3 имеют слишком высокую температуру плавления для такого высокого количества добавляемых флюсов. 24 – имеет низкую температуру плавления, но высокое содержание кислотных и амфотерных оксидов сделает шлак слишком вязким, что негативно отразится на осаждении МПГ. Выбор между точками 10, 11 и 16, 17, 19 требует экспериментальной проверки и определения цели (экономия на энергозатратах и огнеупорах или на флюсах): первые две позволяют вовлечь большую долю автокатализатора в переработку за одну плавку, но с более высокой температурой, что увеличивает нагрузку на футеровку печи и энергозатраты. Последние составы сильнее снижают температуру, но потребуют больших затрат на флюсование шихт. В любом случае, после экспериментальной проверки необходим расчет экономической эффективности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В контексте растущего мирового спроса на металлы платиновой группы, обусловленного их уникальными свойствами и ростом применения в водородной энергетике и высокотехнологичных отраслях, переработка отработанных автомобильных катализаторов приобретает стратегическое значение. Развитие эффективных технологий их утилизации является ключевым элементом обеспечения сырьевой независимости и перехода к циркулярной экономике.

Настоящее исследование показывает, что пирометаллургическая переработка отработанных автокатализаторов плавкой на коллектор представляет собой сложный физико-химический процесс, эффективность которого зависит от согласованного управления несколькими параметрами. Ключевым звеном является формирование шлака с оптимальными реологическими свойствами (низкая вязкость) и минимальной окислительной активностью по отношению к МПГ. Достижение этого баланса обеспечивается строго дозированным введением флюсующих добавок (CaO , Na_2O , V_2O_5 , CaF_2), действие которых на структурном уровне сводится к контролю соотношения между полимеризованными и деполимеризованными формами кислородных соединений кремния.

Дальнейшие исследования по процессу коллекторной плавки могут быть связаны с разработкой математических и физических моделей, подбором новых шихт, а именно коллектора, восстановителя и сочетаний флюсов для образования легкоплавких и невязких шлаков совместно с определением режима (температуры, длительности) плавки с учетом необходимости минимизации экономических затрат.

Список источников

1. Liu Chuan, Sun Shuchen, Zhu Xiaoping, Tu Ganfeng. Metals smelting-collection method for recycling of platinum group metals from waste catalysts: a mini review // Waste Management and Research. 2020. Vol. 39. Iss. 1. P. 43–52. <https://doi.org/10.1177/0734242X20969795>. EDN: HYTLPJ.
2. Hughes A.E., Haque N., Northey S.A., Giddey S. Platinum group metals: a review of resources, production and usage with a focus on catalysts // Resources. 2021. Vol. 10. Iss. 9. P. 93. <https://doi.org/10.3390/resources10090093>. EDN: ZYVXZN.
3. Tang Huimin, Peng Zhiwei, Tian Ran, Ye Lei, Zhang Jian, Rao Mingjun, et al. Platinum-group metals: demand, supply, applications and their recycling from spent automotive catalysts // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2023. Vol. 11. Iss. 5. P. 110237. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110237>. EDN: DGJXTS.
4. Chvileva T., Golovina E. Publication of reporting of metallurgical companies in context of the concept of corporate sustainable development // Journal of Industrial Pollution Control. 2017. Vol. 33. Iss. 1. P. 926–930. EDN: XNFPGF.

5. Литвиненко В.С., Петров Е.И., Василевская Д.В., Яковенко А.В., Наумов И.А., Ратников М.А. Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами // Записки Горного института. 2023. Т. 259. С. 95–111. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.100>. EDN: APFXQN.
6. Grilli M.L., Slobozeanu A.E., Larosa C., Paneva D., Yakoumis I., Cherkezova-Zheleva Z. Platinum group metals: Green recovery from spent auto-catalysts and reuse in new catalysts – a review // Crystals. 2023. Vol. 13. Iss. 4. P. 550. <https://doi.org/10.3390/cryst13040550>. EDN: QQZMFU.
7. Murata T., Yamaguchi K. Recovery of palladium and platinum particles suspended in the Al_2O_3 -CaO-SiO₂ slag using copper-based extractants at 1723 K // Materials Transactions. 2021. Vol. 62. Iss. 10. P. 1495–1501. <https://doi.org/10.2320/matertrans.M-M2021844>. EDN: TDVHTX.
8. Александрова Т.Н., О'Коннор К. Переработка руд металлов платиновой группы в России и Южной Африке: состояние и перспективы // Записки Горного института. 2020. Т. 244. С. 462–473. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.4.9>. EDN: UKMJUX.
9. Canhimbue L., Talovina I. Geochemical distribution of platinum metals, gold and silver in intrusive rocks of the Norilsk Region // Minerals. 2023. Vol. 13. Iss. 6. P. 719. <https://doi.org/10.3390/min13060719>. EDN: EZRTOC.
10. Sun Shiqiang, Jin Chenxi, He Wenzhi, Li Guangming, Zhu Haochen, Huang Juwen. A review on management of waste three-way catalysts and strategies for recovery of platinum group metals from them // Journal of Environmental Management. 2022. Vol. 305. P. 114383. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114383>. EDN: PKNNBD.
11. Trinh Ha Bich, Lee Jae-Chun, Suh Yong-Jae, Lee Jaeryeong. A review on the recycling processes of spent auto-catalysts: towards the development of sustainable metallurgy // Waste Management. 2020. Vol. 114. P. 148–165. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.06.030>. EDN: EGLIZK.
12. Cherepovitsyn A., Mekerova I., Nevolin A. Analysis of the palladium market: a strategic aspect of sustainable development // Mining. 2025. Vol. 5. Iss. 3. P. 39. <https://doi.org/10.3390/mining5030039>. EDN: VIRTOC.
13. Karim S., Ting Yen-Peng. Recycling pathways for platinum group metals from spent automotive catalyst: a review on conventional approaches and bio-processes // Resources, Conservation and Recycling. 2021. Vol. 170. P. 105588. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105588>. EDN: QONNPE.
14. Xia Jinsong, Ghahreman A. Platinum group metals recycling from spent automotive catalysts: metallurgical extraction and recovery technologies // Separation and Purification Technology. 2023. Vol. 311. P. 123357. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123357>. EDN: OPCTAY.
15. Tang Huimin, Peng Zhiwei, Tian Ran, Ye Lei, Zhang Jian, Rao Mingjun, et al. Recycling of platinum-group metals from spent automotive catalysts by smelting // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2022. Vol. 10. Iss. 6. P. 108709. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108709>. EDN: NJSYDH.
16. Литвинова Т.Е., Сучков Д.В. Комплексный подход к утилизации техногенных отходов минеральносырьевого комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6-1. С. 331–348. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_61_0_331. EDN: VWGWFK.
17. Пашкевич М.А., Евдокимова М.Е. Тонкодисперсные отходы титанового производства как добавка для изготовления строительных материалов // Экология и промышленность России. 2025. Т. 29. № 2. С. 19–23. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2025-2-19-23>. EDN: KMWLNS.
18. Yan Jisen, Wei Jia, Zhang Fan, Zhang Xin, He Zhenkun, Xie Fang, et al. Comprehensive review on recovery of platinum group metals from spent automotive catalysts by metal capture technology: present progress and outlook // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2024. Vol. 12. Iss. 5. P. 114017. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114017>. EDN: FHJVUN.
19. Сапунов А.В., Литвинцев И.Ю., Сапунов В.Н. Фосфорное отравление церийсодержащего катализатора // Химическая промышленность сегодня. 2005. № 8. С. 40–44. EDN: LNKDТО.
20. Пахомов Р.А., Фокина С.Б., Мушыхин Е.А., Щербаков С.В. Использование многокомпонентных диаграмм состояния шлаковых систем применительно к переработке отработанных автомобильных катализаторов // Цветные металлы. 2023. № 2. С. 49–59. <https://doi.org/10.17580/tsm.2023.02.07>. EDN: YSKUZZ.
21. Zheng Huandong, Ding Yunji, Wen Quan, Zhao Shizhen, He Xuefeng, et al. Slag design and iron capture mechanism for recovering low-grade Pt, Pd, and Rh from leaching residue of spent auto-exhaust catalysts // Science of the Total Environment. 2022. Vol. 802. P. 149830. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149830>. EDN: NDGTSM.
22. Peng Zhiwei, Li Zhizhong, Lin Xiaolong, Tang Huimin, Ye Lei, Ma Yutian, et al. Pyrometallurgical recovery of platinum group metals from spent catalysts // JOM. 2017. Vol. 69. Iss. 9. P. 1553–1562. <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2450-3>. EDN: YHZIZN.
23. Zheng Huandong, Ding Yunji, Wen Quan, Liu Bo, Zhang Shengen. Separation and purification of platinum group metals from aqueous solution: recent developments and industrial applications // Resources, Conservation and Recycling. 2021. Vol. 167. P. 105417. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105417>. EDN: TBUDQF.
24. Ilyas S., Kim Hyunjung. Recovery of platinum-group metals from an unconventional source of catalytic converter using pressure cyanide leaching and ionic liquid extraction // JOM. 2022. Vol. 74. Iss. 3. P. 1020–1026. <https://doi.org/10.1007/s11837-021-05119-6>. EDN: KCFVQJ.
25. Бодуэн А.Я., Фокина С.Б., Федоров А.Т., Петров Г.В. Технологическое усовершенствование процесса адсорбционной концентрации платиновых металлов из хлоридных растворов после гидрометаллургической переработки малосульфидных флотационных концентратов // Горный журнал. 2023. № 10. С. 34–40. <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.10.04>. EDN: MVEQZQ.

26. Karim S., Saw Han Mei, Ting Yen-Peng. Evaluation of green chemistry metrics for sustainable recycling of platinum group metals from spent automotive catalysts via bioleaching // *Green Chemistry*. 2024. Vol. 26. Iss. 7. P. 4112–4126. <https://doi.org/10.1039/d3gc03918h>. EDN: NWBEQS.
27. Shi Bingyin, Qian Guoyu, Pang Sheng, Sun Yiwei, Peng Hongbing, Fu Wenlong, et al. Synchronous extraction of Pt, Zr and Ce from spent catalysts via SoG-Si scraps melting collection by regulating Si reduction based on a new fluorine-containing slag // *Separation and Purification Technology*. 2024. Vol. 351. P. 128086. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128086>. EDN: WVEHOJ.
28. Yang Dongfang, Yang Qingyuan, Ma Wenhui, Wang Shiding, Lei Yun. Co-treatment of diamond-wire-saw silicon kerf and spent automotive catalysts for simultaneous recovery of PGMs, REEs, Zr, and high-purity Si // *Waste Management*. 2023. Vol. 171. P. 237–247. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.08.035>. EDN: AWPKFJ.
29. Литвинова Т.Е., Герасёв С.А. Поведение фосфата церия (III) в карбонатно-щелочной среде // *Записки Горного института*. 2025. Т. 271. С. 181–188. EDN: BJJKVD.
30. Wang Zhe, Wei Qi-long, Shi Cheng-bin, Guo Zhan-cheng. Effect of Al_2O_3/SiO_2 mass ratio and CaO content on viscosity and structure of slag for pyrometallurgical processing of spent automotive catalysts // *Journal of Iron and Steel Research International*. 2024. Vol. 31. Iss. 3. P. 608–621. <https://doi.org/10.1007/s42243-024-01181-x>. EDN: YDBVOQ.
31. Sasaki H., Maeda M. Zn-vapor pretreatment for acid leaching of platinum group metals from automotive catalytic converters // *Hydrometallurgy*. 2014. Vol. 147. P. 59–67. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.04.019>. EDN: SOFKVB.
32. Liu Chuan, Sun Shuchen, Tu Ganfeng, Xiao Faxin. An integrated capture of red mud and one-step heat-treatment process to recover platinum group metals and prepare glass-ceramics from spent auto-catalysts // *Minerals*. 2022. Vol. 12. Iss. 3. P. 360. <https://doi.org/10.3390/min12030360>. EDN: FQFKRJ.
33. Liu Chuan, Sun Shuchen, Tu Ganfeng, Xiao Faxin. Co-treatment of spent automotive catalyst and cyanide tailing via vitrification and smelting-collection process for platinum group metals recovery // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021. Vol. 9. Iss. 5. P. 105823. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105823>. EDN: LOCYYQ.
34. Bazhin V.Yu., Masko O.N., Nikitina L.N. Decarbonization of exhaust gases of industrial metallurgical furnaces // *Metallurgist*. 2024. Vol. 67. Iss. 9-10. P. 1407–1417. <https://doi.org/10.1007/s11015-024-01632-6>. EDN: GHZZGE.
35. Fedorova E., Morgunov V., Lobko K., Pupyshcheva E. Review: axial motion of material in rotary kilns // *Eng*. 2025. Vol. 6. Iss. 6. P. 106. <https://doi.org/10.3390/eng6060106>. EDN: TIGGRJ.
36. Chen Shuyu, Song Qingming, Xu Zhenming. Mechanism of PGMs capture from spent automobile catalyst by copper from waste printed circuit boards with simultaneous pollutants transformation // *Waste Management*. 2024. Vol. 186. P. 130–140. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.06.001>. EDN: LLCIGP.
37. Ding Yunji, Zheng Huandong, Zhang Shengen, Liu Bo, Wu Boyu, Jian Zhuming. Highly efficient recovery of platinum, palladium, and rhodium from spent automotive catalysts via iron melting collection // *Resources, Conservation and Recycling*. 2020. Vol. 155. P. 104644. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104644>. EDN: YUEHQU.
38. Liang Guangbing, Qu Zhenping. Insight into pyrometallurgical recovery of platinum group metals from spent industrial catalyst: co-disposal of industrial wastes // *ACS ES and T Engineering*. 2023. Vol. 3. P. 1532–1546. <https://doi.org/10.1021/acsestengg.3c00129>. EDN: BCLXMH.
39. Liu Chuan, Sun Shuchen, Zhu Xiaoping, Tu Ganfeng. Feasibility of platinum recovery from waste automotive catalyst with different carriers via cooperative smelting-collection process // *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2021. Vol. 23. P. 581–590. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01143-x>. EDN: ZQIYJW.
40. Sun Shuchen, Liu Chuan, Xiao Faxin, Tu Ganfeng. Recovery of platinum and synthesis of glass-ceramic from spent automotive catalyst via co-treatment process with coal fly ash // *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2022. Vol. 24. P. 1971–1981. <https://doi.org/10.1007/s10163-022-01451-4>. EDN: BRUEAY.
41. Liu Chuan, Sun Shuchen, Tu Ganfeng, Xiao Faxin. A novel method for extraction of platinum from spent automotive catalyst: utilization of spent fluid catalytic cracking catalyst as flux // *Environmental Technology*. 2021. Vol. 44. Iss. 2. P. 139–149. <https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1965662>. EDN: DOEOWJ.
42. Кириченко А.С., Нехамин С.М., Самотаев Н.Н., Антонов А.А. Новый механизм осаждения платины, палладия и родия на железный металл-коллектор // *Металлург*. 2020. № 5. С. 65–68. EDN: HPEAML.
43. He Xue-Feng, Yin Xi-Ping, Ding Yun-Ji, Shi Zhi-Sheng, Zhao Bao-Huai, Zheng Huan-Dong, et al. Slag design and optimization for iron capturing platinum group metals from alumina-based spent catalysts // *Rare Metals*. 2023. Vol. 42. Iss. 6. P. 2093–2103. <https://doi.org/10.1007/s12598-023-02262-8>. EDN: FVEFAQ.
44. Petrov G.V., Fokina S.B., Nikitina T.Y. Aspects of iridium extraction from chloride solutions // *Non-ferrous Metals*. 2021. Vol. 50. Iss. 1. P. 10–14. <https://doi.org/10.17580/nfm.2021.01.02>. EDN: JTCCOQ.
45. Кириченко А.С., Серегин А.Н. Повышение эффективности пирометаллургической переработки отработанных автомобильных катализаторов с использованием металл-коллектора на основе железа // *Черные металлы*. 2017. № 11. С. 59–62. EDN: ZXPYBV.
46. Пат. № 2248406, Российская Федерация, С1. С22В 11/02. С22В 7/00. Способ разделения многокомпонентного материала, содержащего металлические компоненты / С.Г. Бодров, С.Н. Дорохов, А.В. Калмыков, А.Н. Носов; заявители и патентообладатели С.Г. Бодров, С.Н. Дорохов, А.В. Калмыков, А.Н. Носов. № 2004102052/02. Заявл. 20.01.2004; опубл. 20.03.2005. Бюл. № 8. EDN: GWUSMP.
47. Пат. № 2553117, Российская Федерация, С2. С22В 11/00. С22В 7/00. Способ переработки катализаторов, содержащих металлы платиновой группы на носителях из оксида алюминия / А.С. Кириченко, А.Н. Серегин;

заявитель и патентообладатель ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина». № 2013122722/02. Заявл. 20.05.2013; опубл. 10.06.2015. Бюл. № 16. EDN: FCYVWG.

48. Немчинова Н.В., Ильин А.А., Тютрин А.А., Галачиева С.В., Яковлева А.А. Изучение структуры и динамической вязкости модельных шлаковых систем CaO-SiO_2 и $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 3. С. 562–575. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-562-575>. EDN: IXGBEL.

49. Ilin A.A., Zobnin N.N., Pikalova I.A., Nemchinova N.V. Distribution of iron and boron between silicon metal smelting products in industrial saf using borate fluxes // Silicon. 2024. Vol. 16. P. 3085–3092. <https://doi.org/10.1007/s12633-024-02895-z>. EDN: TWOJLD.

50. Васютинский Н.А. Металлургические шлаки. Киев: Техника, 1990. 152 с.

51. Онаев И.А. Физико-химические свойства шлаков цветной металлургии. Алма-Ата: Наука, 1972. 120 с.

52. Szyakov V.M., Brichkin V.N., Kurtenkov R.V., Maksimova R.I. Synthesis, properties and applications of complex calcium aluminates and hydroaluminates // Non-ferrous Metals. 2025. Iss. 1. P. 10–17. <https://doi.org/10.17580/nfm.2025.01.02>. EDN: TGASFO.

53. Murata T., Yamaguchi K. Effects of SiO_2 and CaO on distributions of platinum group metals between $\text{Cu-CuO}_{0.5}$ and Pb-PbO -based slags at 1523 K // Metallurgical and Materials Transactions B. 2023. Vol. 54. Iss. 5. P. 2360–2369. <https://doi.org/10.1007/s11663-023-02837-x>. EDN: PQVCZQ.

54. Tang Huimin, Peng Zhiwei, Li Zhizhong, Ma Yutian, Zhang Jian, Ye Lei, et al. Recovery of platinum-group metals from spent catalysts by microwave smelting // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 318. P. 128266. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128266>. EDN: TFTLSD.

55. Пат. № 2484154, Российская Федерация, С1. С22В 11/00. С25С 1/20. С22В 7/00. Способ переработки отходов, содержащих цветные и платиновые металлы / А.Н. Теляков, С.А. Рубис; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский государственный горный университет. № 2012113084/02. Заявл. 03.04.2012; опубл. 10.06.2013. Бюл. № 16. EDN: FGISVF.

56. Bi Zhisheng, Li Kejiang, Chunhe Jiang, Zhang Jianliang, Ma Shufang. Effects of amphoteric oxide (Al_2O_3 and B_2O_3) on the structure and properties of $\text{SiO}_2\text{-CaO}$ melts by molecular dynamics simulation // Journal of Non-Crystalline Solids. 2021. Vol. 559. P. 120687. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2021.120687>. EDN: PBKYCV.

References

1. Liu Chuan, Sun Shuchen, Zhu Xiaoping, Tu Ganfeng. Metals smelting-collection method for recycling of platinum group metals from waste catalysts: a mini review. *Waste Management and Research*. 2020;39(1):43-52. <https://doi.org/10.1177/0734242X20969795>. EDN: HYTLPI.

2. Hughes A.E., Haque N., Northey S.A., Giddey S. Platinum group metals: a review of resources, production and usage with a focus on catalysts. *Resources*. 2021;10(9):93. <https://doi.org/10.3390/resources1009093>. EDN: ZYVXZN.

3. Tang Huimin, Peng Zhiwei, Tian Ran, Ye Lei, Zhang Jian, Rao Mingjun, et al. Platinum-group metals: demand, supply, applications and their recycling from spent automotive catalysts. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2023;11(5):110237. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110237>. EDN: DGJXTS.

4. Chvileva T., Golovina E. Publication of reporting of metallurgical companies in context of the concept of corporate sustainable development. *Journal of Industrial Pollution Control*. 2017;33(1):926-930. EDN: XNFPGF.

5. Litvinenko V.S., Petrov E.I., Vasilevskaya D.V., Yakovenko A.V., Naumov I.A., Ratnikov M.A. Assessment of the role of the state in the management of mineral resources. *Journal of Mining Institute*. 2023;259:95-111. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.100>. EDN: APFXQN.

6. Grilli M.L., Slobozeanu A.E., Larosa C., Paneva D., Yakoumis I., Cherkezova-Zheleva Z. Platinum group metals: Green recovery from spent auto-catalysts and reuse in new catalysts – a review. *Crystals*. 2023;13(4):550. <https://doi.org/10.3390/cryst13040550>. EDN: QQZMFU.

7. Murata T., Yamaguchi K. Recovery of palladium and platinum particles suspended in the $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ slag using copper-based extractants at 1723 K. *Materials Transactions*. 2021;62(10):1495-1501. <https://doi.org/10.2320/matertrans.M-M2021844>. EDN: TDVHTX.

8. Aleksandrova T.N., O'Connor C. Processing of platinum group metal ores in Russia and South Africa: current state and prospects. *Journal of Mining Institute*. 2020;244:462-473. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.4.9>. EDN: UKMJUX.

9. Canhimbue L., Talovina I. Geochemical distribution of platinum metals, gold and silver in intrusive rocks of the Norilsk Region. *Minerals*. 2023;13(6):719. <https://doi.org/10.3390/min13060719>. EDN: EZRTOC.

10. Sun Shiqiang, Jin Chenxi, He Wenzhi, Li Guangming, Zhu Haochen, Huang Juwen. A review on management of waste three-way catalysts and strategies for recovery of platinum group metals from them. *Journal of Environmental Management*. 2022;305:114383. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114383>. EDN: PKNNBD.

11. Trinh Ha Bich, Lee Jae-Chun, Suh Yong-Jae, Lee Jaeryeong. A review on the recycling processes of spent auto-catalysts: towards the development of sustainable metallurgy. *Waste Management*. 2020;114:148-165. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.06.030>. EDN: EGIIZK.

12. Cherepovitsyn A., Mekerova I., Nevolin A. Analysis of the palladium market: a strategic aspect of sustainable development. *Mining*. 2025;5(3):39. <https://doi.org/10.3390/mining5030039>. EDN: VIRTOC.

13. Karim S., Ting Yen-Peng. Recycling pathways for platinum group metals from spent automotive catalyst: a review on conventional approaches and bio-processes. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021;170:105588. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105588>. EDN: QONNPE.
14. Xia Jinsong, Ghahreman A. Platinum group metals recycling from spent automotive catalysts: metallurgical extraction and recovery technologies. *Separation and Purification Technology*. 2023;311:123357. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123357>. EDN: OPCTAY.
15. Tang Huimin, Peng Zhiwei, Tian Ran, Ye Lei, Zhang Jian, Rao Mingjun, et al. Recycling of platinum-group metals from spent automotive catalysts by smelting. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2022;10(6):108709. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108709>. EDN: NJSYDH.
16. Litvinova T.E., Suchkov D.V. Comprehensive approach to the utilisation of technogenic waste from the mineral resource complex. *Mining informational and analytical bulletin*. 2022;6-1:331-348. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_61_0_331. EDN: VWGWFK.
17. Pashkevich M.A., Evdokimova M.E. Finely-dispersed wastes of titanium production as an additive for manufacturing of building materials. *Ecology and Industry of Russia*. 2025;29(2):19-23. (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2025-2-19-23>. EDN: KMWLNS.
18. Yan Jisen, Wei Jia, Zhang Fan, Zhang Xin, He Zhenkun, Xie Fang, et al. Comprehensive review on recovery of platinum group metals from spent automotive catalysts by metal capture technology: present progress and outlook. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2024;12(5):114017. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114017>. EDN: FHJVUN.
19. Sapunov A.V., Litvintsev I.Yu., Sapunov V.N. Phosphorus poisoning of a cerium-containing catalyst. *Khimicheskaya promyshlennost segodnya*. 2005;(8):40-44. (In Russ.). EDN: LNKDIO.
20. Pakhomov R.A., Fokina S.B., Mushikhin E.A., Shcherbakov S.V. Use of multicomponent phase diagrams of slag systems for recycling of spent automotive catalysts. *Tsvetnye Metally*. 2023;2:49-59. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2023.02.07>. EDN: YSKUZZ.
21. Zheng Huandong, Ding Yunji, Wen Quan, Zhao Shizhen, He Xuefeng, et al. Slag design and iron capture mechanism for recovering low-grade Pt, Pd, and Rh from leaching residue of spent auto-exhaust catalysts. *Science of the Total Environment*. 2022;802:149830. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149830>. EDN: NDGTSM.
22. Peng Zhiwei, Li Zhizhong, Lin Xiaolong, Tang Huimin, Ye Lei, Ma Yutian, et al. Pyrometallurgical recovery of platinum group metals from spent catalysts. *JOM*. 2017;69(9):1553-1562. <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2450-3>. EDN: YHZIZN.
23. Zheng Huandong, Ding Yunji, Wen Quan, Liu Bo, Zhang Shengen. Separation and purification of platinum group metals from aqueous solution: recent developments and industrial applications. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021;167:105417. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105417>. EDN: TBUDQF.
24. Ilyas S., Kim Hyunjung. Recovery of platinum-group metals from an unconventional source of catalytic converter using pressure cyanide leaching and ionic liquid extraction. *JOM*. 2022;74(3):1020-1026. <https://doi.org/10.1007/s11837-021-05119-6>. EDN: KCFVQJ.
25. Boduen A.Ya., Fokina S.B., Fedorov A.T., Petrov G.V. Technological improvement of adsorptive concentration of platinum metals from chloride solutions after hydrometallurgical processing of low-sulfide flotation concentrates. *Gornyi Zhurnal*. 2023;10:34-40. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.10.04>. EDN: MVEQZQ.
26. Karim S., Saw Han Mei, Ting Yen-Peng. Evaluation of green chemistry metrics for sustainable recycling of platinum group metals from spent automotive catalysts via bioleaching. *Green Chemistry*. 2024;26(7):4112-4126. <https://doi.org/10.1039/d3gc03918h>. EDN: NWBEQS.
27. Shi Bingyin, Qian Guoyu, Pang Sheng, Sun Yiwei, Peng Hongbing, Fu Wenlong, et al. Synchronous extraction of Pt, Zr and Ce from spent catalysts via SoG-Si scraps melting collection by regulating Si reduction based on a new fluorine-containing slag. *Separation and Purification Technology*. 2024;351:128086. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128086>. EDN: WVEHOJ.
28. Yang Dongfang, Yang Qingyuan, Ma Wenhui, Wang Shiding, Lei Yun. Co-treatment of diamond-wire-saw silicon kerf and spent automotive catalysts for simultaneous recovery of PGMs, REEs, Zr, and high-purity Si. *Waste Management*. 2023;171:237-247. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.08.035>. EDN: AWPKFJ.
29. Litvinova T.E., Gerasev S.A. Behaviour of cerium (III) phosphate in a carbonate-alkaline medium. *Journal of Mining Institute*. 2025;271:181-188. EDN: BJVKD.
30. Wang Zhe, Wei Qi-long, Shi Cheng-bin, Guo Zhan-cheng. Effect of Al₂O₃/SiO₂ mass ratio and CaO content on viscosity and structure of slag for pyrometallurgical processing of spent automotive catalysts. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2024;31(3):608-621. <https://doi.org/10.1007/s42243-024-01181-x>. EDN: YDBVOQ.
31. Sasaki H., Maeda M. Zn-vapor pretreatment for acid leaching of platinum group metals from automotive catalytic converters. *Hydrometallurgy*. 2014;147:59-67. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.04.019>. EDN: SOFKVB.
32. Liu Chuan, Sun Shuchen, Tu Ganfeng, Xiao Faxin. An integrated capture of red mud and one-step heat-treatment process to recover platinum group metals and prepare glass-ceramics from spent auto-catalysts. *Minerals*. 2022;12(3):360. <https://doi.org/10.3390/min12030360>. EDN: FQFKRJ.

33. Liu Chuan, Sun Shuchen, Tu Ganfeng, Xiao Faxin. Co-treatment of spent automotive catalyst and cyanide tailing via vitrification and smelting-collection process for platinum group metals recovery. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021;9(5):105823. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105823>. EDN: LOCYYQ.
34. Bazhin V.Yu., Masko O.N., Nikitina L.N. Decarbonization of exhaust gases of industrial metallurgical furnaces. *Metallurgist*. 2024;67(9-10):1407-1417. <https://doi.org/10.1007/s11015-024-01632-6>. EDN: GHZZGE.
35. Fedorova E., Morgunov V., Lobko K., Pupysheva E. Review: axial motion of material in rotary kilns. *Eng*. 2025;6(6):106. <https://doi.org/10.3390/eng6060106>. EDN: TIGGRJ.
36. Chen Shuyu, Song Qingming, Xu Zhenming. Mechanism of PGMs capture from spent automobile catalyst by copper from waste printed circuit boards with simultaneous pollutants transformation. *Waste Management*. 2024;186:130-140. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.06.001>. EDN: LLCIGP.
37. Ding Yunji, Zheng Huandong, Zhang Shengen, Liu Bo, Wu Boyu, Jian Zhuming. Highly efficient recovery of platinum, palladium, and rhodium from spent automotive catalysts via iron melting collection. *Resources, Conservation and Recycling*. 2020;155:104644. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104644>. EDN: YUEHQU.
38. Liang Guangbing, Qu Zhenping. Insight into pyrometallurgical recovery of platinum group metals from spent industrial catalyst: co-disposal of industrial wastes. *ACS ES and T Engineering*. 2023;3:1532-1546. <https://doi.org/10.1021/acsestengg.3c00129>. EDN: BCLXMH.
39. Liu Chuan, Sun Shuchen, Zhu Xiaoping, Tu Ganfeng. Feasibility of platinum recovery from waste automotive catalyst with different carriers via cooperative smelting-collection process. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2021;23:581-590. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01143-x>. EDN: ZQIYJW.
40. Sun Shuchen, Liu Chuan, Xiao Faxin, Tu Ganfeng. Recovery of platinum and synthesis of glass-ceramic from spent automotive catalyst via co-treatment process with coal fly ash. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2022;24:1971-1981. <https://doi.org/10.1007/s10163-022-01451-4>. EDN: BRUEAY.
41. Liu Chuan, Sun Shuchen, Tu Ganfeng, Xiao Faxin. A novel method for extraction of platinum from spent automotive catalyst: utilization of spent fluid catalytic cracking catalyst as flux. *Environmental Technology*. 2021;44(2):139-149. <https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1965662>. EDN: DOEOWJ.
42. Kirichenko A.S., Nekhamin S.M., Samotaev N.N., Antonov A.A. New mechanism for depositing platinum, palladium and rhodium on iron metal collector. *Metallurg*. 2020;5:65-68. (In Russ.). EDN: HPEAML.
43. He Xue-Feng, Yin Xi-Ping, Ding Yun-Ji, Shi Zhi-Sheng, Zhao Bao-Huai, Zheng Huan-Dong, et al. Slag design and optimization for iron capturing platinum group metals from alumina-based spent catalysts. *Rare Metals*. 2023;42(6):2093-2103. <https://doi.org/10.1007/s12598-023-02262-8>. EDN: FVEFAQ.
44. Petrov G.V., Fokina S.B., Nikitina T.Y. Aspects of iridium extraction from chloride solutions. *Non-ferrous Metals*. 2021;50(1):10-14. <https://doi.org/10.17580/nfm.2021.01.02>. EDN: JTCCOQ.
45. Kirichenko A.S., Seregin A.N. Efficiency rise of pyrometallurgical processing of wasted automotive catalysts using Fe-based metal collector. *Chernye Metally*. 2017;11:59-62. (In Russ.). EDN: ZXPYBV.
46. Bodrov S.G., Dorokhov S.N., Kalmykov A.V., Nosov A.N. *Method of separating multicomponent material containing metallic components*. Patent RF, no 2248406; 2005. (In Russ.). EDN: GWUSMP.
47. Kirichenko A.S., Seregin A.N. *Method of processing of catalysts containing platinum metals on aluminium oxide carriers*. Patent RF, no 2553117; 2015. (In Russ.). EDN: FCYVWG.
48. Nemchinova N.V., Ilin A.A., Tyutrin A.A., Galachieva S.V., Yakovleva A.A. Structure and dynamic viscosity of CaO-SiO₂ and CaO-SiO₂-B₂O₃ model slag systems. *iPolytech Journal*. 2024;28(3):562-575. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-562-575>. EDN: IXGBEL.
49. Ilin A.A., Zobnin N.N., Pikalova I.A., Nemchinova N.V. Distribution of iron and boron between silicon metal smelting products in industrial saf using borate fluxes. *Silicon*. 2024;16:3085-3092. <https://doi.org/10.1007/s12633-024-02895-z>. EDN: TWOJLD.
50. Vasyutinsky N.A. *Metallurgical slags*. Kiev: Tekhnika; 1990, 152 p. (In Russ.).
51. Onaev I.A. *Physico-chemical properties of non-ferrous metallurgy slags*. Alma-Ata: Nauka; 1972, 120 p. (In Russ.).
52. Sizyakov V.M., Brichkin V.N., Kurtenkov R.V., Maksimova R.I. Synthesis, properties and applications of complex calcium aluminates and hydroaluminates. *Non-ferrous Metals*. 2025;1:10-17. <https://doi.org/10.17580/nfm.2025.01.02>. EDN: TGASFO.
53. Murata T., Yamaguchi K. Effects of SiO₂ and CaO on distributions of platinum group metals between Cu-CuO_{0.5} and Pb-PbO-based slags at 1523 K. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2023;54(5):2360-2369. <https://doi.org/10.1007/s11663-023-02837-x>. EDN: PQVCZQ.
54. Tang Huimin, Peng Zhiwei, Li Zhizhong, Ma Yutian, Zhang Jian, Ye Lei, et al. Recovery of platinum-group metals from spent catalysts by microwave smelting. *Journal of Cleaner Production*. 2021;318:128266. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128266>. EDN: TFTLSD.
55. Telyakov A.N., Rubis S.A. *Processing wastes containing nonferrous and platinum metals*. Patent RF, no 2484154; 2013. (In Russ.). EDN: FGISVF.
56. Bi Zhisheng, Li Kejiang, Chunhe Jiang, Zhang Jianliang, Ma Shufang. Effects of amphoteric oxide (Al₂O₃ and B₂O₃) on the structure and properties of SiO₂-CaO melts by molecular dynamics simulation. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2021;559:120687. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2021.120687>. EDN: PBKYCV.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пахомов Роман Александрович,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
лаборатории пирометаллургии,
ООО «Институт Гипроникель»,
195220, г. Санкт-Петербург,
Гражданский пр-т, д. 11, Россия
pakhomovra@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0008-7451-9610>

Бажин Владимир Юрьевич,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой металлургии,
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II,
199106, г. Санкт-Петербург,
21-я линия В.О., д. 2, Россия
bazhin-alfoil@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8231-3833>

Слободин Виктор Андреевич,
студент,
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II,
199106, г. Санкт-Петербург,
21-я линия В.О., д. 2, Россия
✉ s242803@stud.spmi.ru
<https://orcid.org/0009-0001-9784-8168>

Заявленный вклад авторов

Пахомов Р.А. – разработка плана исследования и редактирование текста статьи, Бажин В.Ю. – общее руководство исследованием и редактирование текста статьи, Слободин В.А. – литературный анализ проблемы, написание текста статьи и подготовка рисунков.

Конфликт интересов

Бажин В.Ю. является членом редакционной коллегии журнала «iPolytech Journal» с 2015 года, но не имеет отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах авторы не заявляли.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 29.12.2025 г.; одобрена после рецензирования 01.02.2026 г.; принята к публикации 18.02.2026 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Roman A. Pakhomov,
Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher,
Pyrometallurgy Laboratory,
Limited Liability Company Gipronickel Institute,
11 Grazhdansky pr., Saint Petersburg 195220, Russia
pakhomovra@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0008-7451-9610>

Vladimir Yu. Bazhin,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Metallurgy Department,
Empress Catherine II Saint Petersburg
Mining University,
2, 21st Line, Saint Petersburg 199106, Russia
bazhin-alfoil@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8231-3833>

Viktor A. Slobodin,
Student,
Empress Catherine II Saint Petersburg
Mining University,
2, 21st Line, Saint Petersburg 199106, Russia
✉ s242803@stud.spmi.ru
<https://orcid.org/0009-0001-9784-8168>

Authors' contribution

Roman A. Pakhomov – research plan development and editing, Vladimir Yu. Bazhin – research supervision and editing, Viktor A. Slobodin – literature review, article writing and preparation of figures.

Conflict of interests

Vladimir Yu. Bazhin has been a member of the iPolytech Journal Editorial Board since 2015, but he was not involved in making decision about accepting the present article for publication. The article was subjected the Journal's review procedure. The authors do not report any other conflicts of interest

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 29.12.2025; approved after reviewing 01.02.2026; accepted for publication 18.02.2026.