



Научная статья
УДК 669.713.72, 667.621.33
EDN: YRJBRD
DOI: 10.21285/1814-3520-2023-4-800-808

Снижение экологической нагрузки на окружающую среду при производстве алюминия за счёт применения нефтяного пека

Н.В. Немчинова^{1✉}, Н.П. Коновалов², П.Н. Коновалов³, И.О. Дошлов⁴

¹⁻⁴Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме. Цель – разработка технологии получения нефтяного пека как связующего для анодной массы, используемой при электролитическом получении алюминия, из мазутов каталитического жидкофазного окислительного крекинга нефти. Для определения направления исследований в работе использовался анализ опубликованных данных о способах получения и свойствах нефтяного пека. Предложен способ получения нефтяных пеков методом каталитического жидкофазного окислительного крекинга нефтяного сырья с применением гетерогенных металлокомплексных катализаторов. Показано, что процесс получения данного пека состоит из нескольких стадий. К ним относятся: гомогенизация мазута и модифицирующей присадки; окислительный крекинг мазута в процессе нагрева гомогенизированного мазута в печи; каталитический жидкофазный окислительный крекинг мазута с удалением дистиллятов; ректификация светлых фракций; конденсация дистиллятов; сбор светлых нефтепродуктов; окисление воздухом и паром кубового остатка, удаление дистиллятов окисления и нефтяного пека; гранулирование пека. В результате сравнения полученного по предлагаемому методу нефтяного пека с каменноугольным пек марки Б-1 производства АО «Алтай-кокс» установлено, что предлагаемый материал не уступает требованиям технологического регламента Красноярского алюминиевого завода компании РУСАЛ. Показано, что по содержанию серы предлагаемый пек превосходит каменноугольный пек. Согласно результатам исследований и испытаний, проведенных на алюминиевом предприятии, в нефтяном пеке не содержатся вредные полиароматические углеводороды, в частности, канцерогенный бенз(а)пирен. Таким образом, замена каменноугольного пека нефтяным дает технологические и экологические преимущества для производителей первичного алюминия, а также для предприятий, выпускающих различные углеродные материалы.

Ключевые слова: производство алюминия, экологическая безопасность, анод электролизера, анодная масса, нефтяной пек

Для цитирования: Немчинова Н.В., Коновалов Н.П., Коновалов П.Н., Дошлов И.О. Снижение экологической нагрузки на окружающую среду при производстве алюминия за счёт применения нефтяного пека // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 4. С. 800–808. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-800-808>. EDN: YRJBRD.

METALLURGY

Original article

Reducing the environmental impact of aluminum production through the use of petroleum pitch

Nina V. Nemchinova^{1✉}, Nikolay P. Konovalov², Petr N. Konovalov³,
Ivan O. Doshlov⁴

¹⁻⁴Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. This study is aimed at developing a technology for obtaining petroleum pitch as a binder for anode mass used in the electrolytic production of aluminum from fuel oils of catalytic liquid-phase oxidative oil cracking. A review of published data on the existing methods for obtaining petroleum pitch and its properties is carried out in order to define research directions. A method for producing petroleum pitch by catalytic liquid-phase oxidative cracking of crude oil using heterogeneous metal complex catalysts is proposed. The process of petroleum pitch production is shown to undergo several stages, including homogenization of fuel oil and modifying additives; oxidative cracking of fuel oil during heating of

homogenized fuel oil in a furnace; catalytic liquid-phase oxidative cracking of fuel oil with removal of distillates; rectification of light fractions; condensation of distillates; collection of light oil products; oxidation of bottom residues by air and steam; removal of oxidation distillates and petroleum pitch; and pitch pelletizing. According to the conducted comparison of the as-obtained petroleum pitch with the B-1 coal tar pitch produced by the Altai Koks JSC, the proposed material meets the technological requirements of the Krasnoyarsk Aluminum Plant of the RUSAL company. In terms of sulfur content, the proposed petroleum pitch is superior to coal tar pitch. The experiments conducted at an aluminum plant showed the petroleum pitch to contain no harmful polyaromatic hydrocarbons, in particular, carcinogenic benz(a)pyrene. Therefore, replacement of coal tar pitch with petroleum pitch could provide technological and environmental advantages for primary aluminum producers, as well as for enterprises producing various carbon materials.

Keywords: aluminum production, environmental safety, electrolyser anode, anode paste, petroleum pitch

For citation: Nemchinova N.V., Konovalov N.P., Konovalov P.N., Doshlov I.O. Reducing the environmental impact of aluminum production through the use of petroleum pitch. *iPolytech Journal*. 2023;27(4):800-808. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-800-808>. EDN: YRJBRD.

ВВЕДЕНИЕ

Российская алюминиевая промышленность является одной из самых ведущих отраслей отечественной промышленности, крупнейшим производителем алюминия и изделий на его основе. Сотрудники предприятий и организаций компании «РУСАЛ», представители образовательных и научных организаций постоянно совершенствуют технологии получения глинозема, алюминия и алюминийсодержащих изделий, повышая при этом экономические показатели и предлагая пути решения экологических проблем металлургического производства [1–6].

Промышленный способ получения первичного алюминия – электролиз Al_2O_3 (глинозема) в расплаве Na_3AlF_6 (криолита) [7, 8]. В течение процесса в атмосферу корпуса и окружающую среду выделяются вредные вещества, неизбежно образующиеся в результате взаимодействия компонентов электролита и углерода анода при воздействии электрического тока и высокой температуры. К таким вредным соединениям относятся твердые и газообразные фториды, диоксид серы, полиароматические углеводороды, углекислый газ, твердые частицы сырьевых материалов и другие соединения. Объем образования таких веществ зависит от многих факторов, основные из которых – это тип и производительность ванны, производительность корпуса (цеха), ведения технологического режима в процессе электролитического получения металла, количества и качества используемого сырья и др.

Согласно обновленной Экологической политике РУСАЛ, принятой в 2022 г., компания уделяет особое внимание вопросам экологии⁵. В связи с этим на металлургических предприятиях компании, производящих глинозем, первичный алюминий, металлургический

кремний, готовую продукцию (на основе алюминия) проводятся различные мероприятия по решению экологических проблем [9].

КАМЕННОУГОЛЬНЫЙ ПЕК КАК СВЯЗУЮЩЕЕ ВЕЩЕСТВО В АЛЮМИНИЕВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Производители первичного алюминия являются крупнейшим потребителем углерода, около 90% идет на изготовление анодной массы, используемой на ваннах с самообжигающимися анодами (анодами Содерберга) и для производства обожженных анодов (ОА); ~65% заводов компании работают на электролизерах такого типа [10]. Но в последние годы компания ведет масштабную реконструкцию предприятий, оснащая корпуса ваннами типа ЭкоСодерберг [11, 12], а новые строящиеся корпуса – ваннами с ОА.

Одним из основных конструктивных элементов электролизера для получения алюминия является анод. Анодная масса загружается непосредственно в электролизер, и при прохождении электрического тока по стальным штырям, удерживающих массу в анодном устройстве, формируется электропроводный анод, участвующий в электрохимическом процессе. Также из анодной массы изготавливают обожженные анодные блоки, которые монтируются в анодно-монтажном отделении алюминиевого завода и в готовом виде выступают участниками электролиза криолит-глиноземного расплава [13].

Электродным материалом, из которого формируются самообжигающиеся и обожженные аноды, является анодная масса, состоящая из кокса-наполнителя (в количестве ~70%) и связующего вещества, в качестве которого в настоящее время на алюминиевых предприятиях используется каменноуголь-

⁵Охрана окружающей среды // Русал. Режим доступа: <https://rusal.ru/sustainability/environmental-protection/> (дата обращения: 18.07.2023).

ный пек⁶ [14, 15]. Пековый или нефтяной коксы используются в качестве твердой части шихты для анодной массы.

Каменноугольный пек – это продукт коксохимического производства, образующийся как остаток при дистилляции каменноугольной смолы при 360°C. Данный остаток представляет собой ароматические углеводороды, некоторые из которых являются канцерогенными веществами [8, 14, 16, 17]. В целом расход углеродного сырья на 1 т алюминия составляет 410–530 кг. В каменноугольном пеке содержатся полиароматические углеводороды, среди которых бензоантрацен, бенз(а)пирен и дибензантрацен являются наиболее опасными (о чем имеется информация в «Российском регистре потенциально опасных химических и биологических веществ»). Допустимая концентрация канцерогенного бенз(а)пирена в атмосфере не должна превышать 10^{-9} г/м³ ^{7,8} [18].

Повышенное содержание примесей в каменноугольных пеках, а также несоответствие группы показателей требованиям алюминиевой промышленности, отрицательно сказывается как на качестве конечной продукции (из-за попадания в электролит различных элементов, следовательно, в алюминий-сырец), так и на экологических показателях алюминиевых предприятий (из-за выбросов в атмосферу вредных веществ).

Одним из перспективных направлений совершенствования алюминиевого производства и решения экологических проблем является замена каменноугольного пека нефтяным.

НЕФТЯНОЙ ПЕК КАК АЛЬТЕРНАТИВНОЕ СВЯЗУЮЩЕЕ

Нефтяные пеки по своим характеристикам могут выступить в качестве альтернативы каменноугольному пеку в роли связующего при изготовлении углеродной продукции и обеспечить необходимые свойства (однородность, пластичность, текучесть и реакционную способность) для последующих стадий обжига различных углеродных изделий.

Ценным сырьем, но пока еще не вовле-

ченным в производство нефтяного пека, является мазут, полученный после каталитического жидкофазного окислительного крекинга нефти. Низкое содержание бен(а)пиренов и других ароматических углеводородов в составе мазута является предпосылкой получения нефтяного пека с улучшенными экологическими показателями для любого производства при их использовании.

Первые попытки получения нефтяного пека были сделаны в середине XX в. зарубежными фирмами «Ashland Petroleum» (США), «Kyreha», (Япония), «Rutgers Chemical GmbH» (Германия), «Intever» (Венесуэла), Marathon Ashland Petroleum, «Petroleum Chemical Corporation» (Австралия), «United States Steel Corporation» (США), «Gulf Oil Canada Ltd» (Шеридан Парк, США), «Mobile Oil Corporation» (Полсбаро, Нью Джерси) [15, 19].

Нефтяные пеки применяли на предприятиях США, Канады, Германии, Китая, Японии. Исходным сырьем для получения данного вида пека служили нефтяные остатки после каталитического крекинга, а ароматические вещества концентрировали экстракцией фурфуролом. Данный процесс состоит из двух ступеней термообработки. Полагают, что низкое содержание β -фракции в продукте по отношению к его коксовому остатку, соотношению С/Н и плотности, связано с высоким содержанием ароматичных веществ в сырье, получаемом при экстракции фурфуролом [20, 21].

Обзор производственной деятельности зарубежных фирм по выпуску нефтяных пеков показывает, что многие из них, в связи с производственной задачей и необходимостью снижения негативного влияния на окружающую среду, перешли на производство гибридных связующих (нефтяных и каменноугольных) в соотношении 50:50, кроме волокнообразующих. Производство пека для углекомполитов за рубежом возрастает на 50–60% ежегодно, кроме России.

Для оценки применимости пека в различных областях рассматривают его характеристики, такие как температура размягчения, содержание нерастворимых в бензоле и хинолине

⁶ГОСТ 10200-2017. Пек каменноугольный электродный. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2018. 10 с.

⁷Вредные вещества в промышленности: справочник для химиков, инженеров и врачей. 7-е изд., перераб. и доп. В 3 т. Т. 1. Органические вещества / под ред. Н.В. Лазарева, Э.Н. Левиной. Л.: Химия, 1976. 592 с.

⁸Вредные вещества в промышленности: справочник для химиков, инженеров и врачей. 7-е изд., перераб. и доп. В 3 т. Т. 2. Органические вещества / под ред. Н.В. Лазарева, Э.Н. Левиной. Л.: Химия, 1976. 314 с.

соединений, коксовый остаток, величину пикнометрической плотности, соотношение содержания основных элементов (С, Н и S). Температура размягчения пеков бывает разной и находится в температурном интервале от 79 до 126°C⁹ [22].

Исследования, проведенные в Государственном унитарном предприятии «Институт нефтепереработки Республики Башкортостан» И.Р. Хайрудиновым, Н.С. Гаскаровым, Р.Х. Садыковым в 1985–1995 гг. на базе АО «Ново-Уфимский нефтеперерабатывающий завод», позволили внедрить в промышленность производство нефтяных пеков, которые явились пригодными для российских предприятий – производителей первичного алюминия. Данное производство было организовано путем вакуумной перегонки крекингостатка на установке термокрекинга ТК-3 [20]. В год возможно было получить до 20 тыс. т продукта. Данный нефтяной пек в течение 6 лет проходил промышленные испытания на нескольких предприятиях (Братский и Саяногорский алюминиевые заводы, Новосибирский электродный завод и Челябинский электрометаллургический комбинат). Однако было показано, что данный пек целесообразно применять в смеси с традиционным каменноугольным [23], т.к. при использовании для производства анодной массы в качестве единственного связующего он показал неудовлетворительные результаты по основным показателям, кроме разрушаемости в токе CO₂.

При карбонизации нефтяных пеков размеры сферолитов увеличиваются более интенсивно, что вызвано меньшим содержанием в них α₁-фракции. Применение нефтяных пеков в пекококсовых композициях значительно меняет их свойства, придает большую пластичность, снижает вязкость [24]. Кроме того, заметно повышается степень заполнения открытых пор и снижается удельное электросопротивление композитов.

Кроме технологических преимуществ, нефтяные пеки значительно в меньшем количестве в своем составе содержат канцерогенные вещества. Так, концентрация бенз(а)пирена (по результатам исследования, проведенного

авторами [25]) в пеках из крекинг-остатков составляет 0,04–0,15%, в то время как в пиролизных пеках этот показатель выше и лежит в диапазоне 0,3–0,8%.

Гигиеническая оценка нефтяных пеков, по данным работы [20], показала, что при замене каменноугольного пека нефтяным средние концентрации бенз(а)пирена в воздухе в корпусах электролиза с ваннами с анодами Содерберга на основе нефтяного пека снижаются в 1,3–8,8 раза, в сметенной пыли в 7–24,3 раза, а в отходящих от электролизеров газах в 5,8 раза.

Таким образом, замена каменноугольного пека нефтяным дает значительные технологические и экологические выгоды для предприятий, выпускающих конструкционные материалы, графитированные электроды, электроугольные материалы, пекококсовые композиты, а также для алюминиевых предприятий.

Целью работы явилось исследование характеристик мазутов каталитического жидкофазного окислительного крекинга нефти и разработка технологии получения нефтяного пека со свойствами, не уступающими характеристикам каменноугольного пека для дальнейшего применения как связующего материала в производстве анодов и электродов для алюминиевой промышленности.

ПРОИЗВОДСТВО НЕФТЯНОГО ПЕКА МЕТОДОМ КАТАЛИТИЧЕСКОГО ЖИДКОФАЗНОГО ОКИСЛИТЕЛЬНОГО КРЕКИНГА

Нефтяные пеки можно производить различными способами: термополиконденсацией, вакуумной дистилляцией, компаундированием, пластификацией, термостатированием, термоокислением¹⁰.

В качестве сырьевых источников для производства нефтяных пеков применяют продукты пиролиза и крекинга нефти. Однако они не обладают удовлетворительными значениями вязкости, коксуемости, выхода летучих веществ, а также имеют малую адгезионную способность. В связи с этим необходимы мероприятия по изменению их химического состава

⁹Лысова Г.А. Научное обоснование и разработка требований к качеству нефтяных связующих материалов для производства графитированных электродов: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.07. Челябинск, 2003. 126 с.

¹⁰ИТС 30-2017. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Переработка нефти. М.: Бюро НДТ, 2017. 635 с.

и физико-химических характеристик.

Как указывал автор¹¹ в своем диссертационном исследовании, в процессе термодеструктивных термополиконденсационных преобразований из сырья формируется мезогенный углеродный материал, при температурах выше 400°C создающий в расплаве подвижную мезофазу, которая распределяется между частицами наполнителя, формируя в дальнейшем жидкокристаллическую связку. На основе данной связки образуются электродные композиты или другие изделия, получаемые из пекококсовых композиций.

Нами предлагается способ получения нефтяных пеков методом каталитического жидкофазного окислительного крекинга (КЖОК) нефтяного сырья с применением гетерогенных металлокомплексных катализаторов. Каталитический жидкофазный окислительный крекинг мазута основан на использовании физико-химических и дисперсных свойств мазута, полученного в процессе переработки

нефти, а также применением комплексообразующих добавок, которые способствуют увеличению поликонденсированных ароматических соединений, тем самым увеличивая соотношение С/Н.

Процесс получения нефтяного пека состоит из следующих стадий (установка приведена на рисунке):

- гомогенизации мазута и модифицирующей присадки;
- окислительного крекинга мазута в процессе нагрева гомогенизированного мазута в печи;
- каталитического жидкофазного окислительного крекинга мазута с удалением дистиллятов;
- ректификации светлых фракций;
- конденсации дистиллятов;
- сбора светлых нефтепродуктов;
- окисления воздухом и паром кубового остатка, удаление дистиллятов окисления и нефтяного пека;
- гранулирования пека.

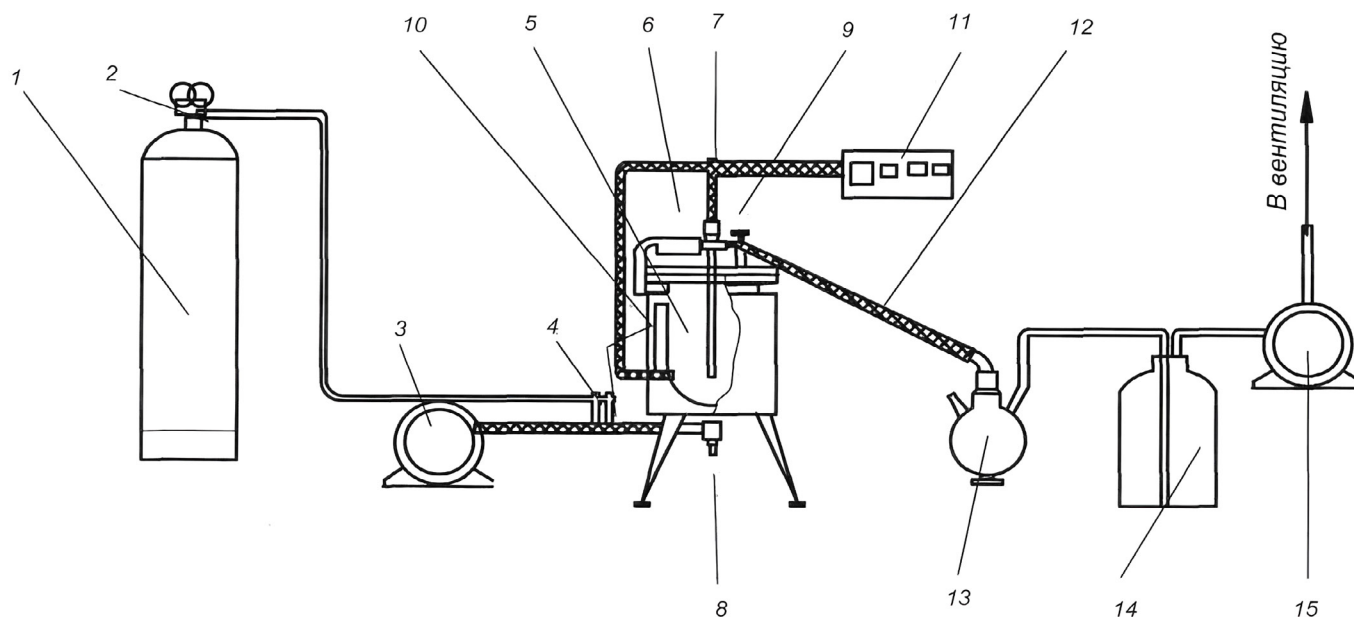


Схема экспериментальной установки для получения нефтяного пека:

- 1 – баллон с воздухом; 2 – редуктор; 3 – пароперегреватель;
4 – тройник-вентиль; 5 – автоклав; 6 – манометр;
7 – термодатчик; 8 – нижний вентиль; 9 – верхний вентиль;
10 – рубашка автоклава; 11 – блок терморегуляции;
12 – теплообменник; 13 – приемная емкость;
14 – каплеотбойник; 15 – газовые часы [26]

Diagram of the experimental installation for petroleum pitch production:

- 1 – air cylinder; 2 – reducer; 3 – steam superheater; 4 – Tee valve;
5 – autoclave; 6 – pressure gauge; 7 – thermal sensor;
8 – bottom valve; 9 – top valve; 10 – autoclave jacket; 11 – thermal control unit;
12 – heat exchanger; 13 – receiving container; 14 – drip eliminator; 15 – gas clock [26]

¹¹Туманян И.Б. Интенсификация процесса термолиза нефтяного остаточного сырья: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08. Москва, 2008. 177 с.

Сравнение характеристик пеков с требованиями технологического регламента Красноярского алюминиевого завода
Comparison of pitch characteristics with the requirements of the Krasnoyarsk Aluminum Smelter technological regulations

Наименование характеристики	Ед. изм.	Требования КрАЗ	Каменноугольный пек Б-1, АО «Алтай-кокс»	Протокол испытаний № 429 от 07.11.2018, нефтяной кокс
1. Температура размягчения (Меттлер)	°С	110–117	74	108,4
2. Температура размягчения (кольцо и стержень)	°С	85–92	–	82
3. Вязкость при 155°С	сПз	1500–5000	800	2499
4. Вязкость при 185°С	сПз	300–550	146	497
5. Коксовый остаток, не менее	%	55,0	53	57,7
6. Летучие, не более	%	53–59	59	56,9
7. Вещества, нерастворимые в толуоле (α ₁ -фракция)	%	29,0	28	28
8. Зольность, не более	%	0,3	0,1	0,10
9. Вещества, нерастворимые в хинолине (α ₁ -фракция)	%	5–12	7	5
10. Содержание бенз(а)пирена	мг/г	0,5	–	Следы
11. Сера, не более	%	0,7	0,51	1,43
12. Натрий, не более	%	0,022	0,011	0,002

Были проведены исследования свойств и характеристик полученного нефтяного пека на Красноярском алюминиевом заводе (КрАЗе). Результаты сравнения свойств представлены в таблице.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Производство алюминия сопровождается выделением в атмосферу корпуса и окружающий воздух вредных веществ. Частичная замена традиционного каменноугольного пека нефтяным, полученным каталитическим жидкофазным окислительным крекингом, решает ряд экологических и экономических проблем электролитического получения алюминия. Использование нефтяного пека в качестве связующего в анодной массе, применяемой для получения обожженных анодов и анодной массы, а также различной углеродной продукции (конструкционные материалы, графитированные электроды, электроугольные материалы и пекококсовые композиты)

позволит снизить более чем в десять раз выбросы канцерогенных полиароматических веществ. Это даст возможность уменьшить экологическую нагрузку на окружающую среду и вредное воздействие на здоровье людей, а также позволит снизить экологические штрафы промышленных предприятий, использующих каменноугольный пек. С точки зрения решения экономических проблем при отлаженном производстве отечественного нефтяного пека исчезнет необходимость приобретения импортного каменноугольного пека, цена которого достигает 650 долл США за 1 т, а доля использования которого составляет 40–45% от всего объема, потребляемого в России. При равной или меньшей стоимости производства нефтяного пека, по сравнению со стоимостью ввозимого импортного каменноугольного пека, рентабельность разработанной технологии при крупнотоннажном производстве будет иметь положительную динамику.

Список источников

1. Mann V., Buzunov V., Pitertsev N., Chesnyak V., Polyakov P. Reduction in power consumption at UC RUSAL's smelters 2012–2014 // *Light Metals* / eds. M. Hyland. Cham: Springer, 2015. P. 757–762. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48248-4_128.
2. Напалков В.И., Баранов В.Н., Фролов В.Ф. Лигатуры алюминиевые: структура и назначение: монография. Красноярск: СФУ, 2019. 176 с.
3. Dubovikov O.A., Brichkin V.N., Ris A.D., Sundurov A.V. Thermochemical activation of hydrated aluminosilicates and its importance for alumina production // *Non-ferrous Metals*. 2018. No. 2. P. 11–16. <https://doi.org/10.17580/nfm.2018.02.02>. EDN: VAYILV
4. Nemchinova N.V., Barauskas A.E., Tyutrin A.A., Vologin V.S. Processing finely dispersed technogenic raw materials for aluminum production in order to extract valuable components // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2021. Vol. 62. No. 6.

P. 659–667. <https://doi.org/10.3103/S1067821221060158>. EDN: RHWKMQ.

5. Patrín R.K., Bazhin V.Yu. Spent linings from aluminum cells as a raw material for the metallurgical, chemical, and construction industries // *Metallurgist*. 2014. Vol. 58. Iss. 7-8. P. 625–629. <https://doi.org/10.1007/s11015-014-9967-2>.

6. Бурдонов А.Е., Зелинская Е.В., Гавриленко Л.В., Гавриленко А.А. Изучение вещественного состава глиноземсодержащего материала алюминиевых электролизеров для использования в технологии первичного алюминия // *Цветные металлы*. 2018. № 3. С. 32–38. <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.03.05>.

7. Grjotheim K., Kvande H. Introduction to aluminium electrolysis. Düsseldorf: Aluminium-Verlag, 1993. 260 p.

8. Борисоглебский Ю.В., Галевский Г.В., Кулагин Н.М., Минцис М.Я., Сиразутдинов Г.А. *Металлургия алюминия*. Новосибирск: Наука, 1999. 438 с.

9. Mann V., Buzunov V., Pingin V., Zherdev A., Grigoriev V. Environmental aspects of UC RUSAL's aluminum smelters sustainable development // *Light Metals* / eds. C. Chesonis. Cham: Springer, 2019. P. 553–563. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05864-7_70.

10. Хайрудинов И.Р., Тихонов А.А., Таушев В.В., Теляшев Э.Г. Современное состояние и перспективы развития термических процессов переработки нефтяного сырья. Уфа: ГУП ИНХП РБ, 2015. 328 с. EDN: IGKCDX.

11. Виноградов А.М., Пинаев А.А., Виноградов Д.А., Пузин А.В., Шадрин В.Г., Зорько Н.В., Сомов В.В. Повышение эффективности укрытия электролизеров Содерберга // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. 2017. № 1. С. 19–30. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-19-30>.

12. Buzunov V., Mann V., Chichuk E., Frizorger V., Pinaev A., Nikitin E. The first results of the industrial application of the EcoSoderberg technology at the Krasnoyarsk aluminium smelter // *Light metals*. 2013. P. 573–576. <https://doi.org/10.1002/9781118663189.ch98>.

13. Янко Э.А. Аноды алюминиевых электролизеров. М.: Руда и металлы, 2001. 671 с.

14. Сидоров О.Ф., Селезнёв А.Н. Перспективы производства и совершенствования потребительских свойств каменноугольных электродных пеков // *Российский химический журнал*. 2006. Т. 50. № 1. С. 16–24. EDN: GZQCPJ.

15. Привалов В.Е., Степаненко М.А. Каменноугольный пек: получение, переработка, применение. М.: Металлургия, 1981. 208 с.

16. Аншиц А.Г., Куртеева Л.И., Цыганова С.И., Суздорф А.Р., Аншиц Н.Н., Морозов С.В. Сравнительная оценка эмиссии канцерогенных веществ при использовании средне- и высокотемпературных пеков в производстве алюминия в электролизерах Содерберга // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2001. № 9. С. 345–352.

17. Храменко С.А., Анушенков А.Н., Маракушина Е.Н., Третьяков Я.А. Оценка эмиссии полиароматических углеводородов с поверхности анодов Содерберга // *Цветные металлы*. 2012. № 6. С. 34–37.

18. Дошлов О.И., Кондратьев В.В., Угапьев А.А. Влияние тяжелой смолы пиролиза на свойства анодной массы // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2013. № 2. С. 67–75.

19. Фитцер Э., Дифендорф Р., Калинин И. Углеродные волокна и углекомпозиаты / пер. с англ.; под ред. Э. Фитцера. М.: Мир, 1988. 336 с.

20. Хайрудинов И.Р., Садыков Р.Х., Гаскаров Н.С., Султанов Ф.М. Перспективы производства нефтяных пеков из различных видов сырья // *Цветные металлы*. 1993. № 7. С. 24–25.

21. Хайрудинов И.Р., Ахметов М.М., Теляшев Э.Г. Состояние и перспективы развития производства кокса и пека из нефтяного сырья // *Российский химический журнал*. 2006. Т. 50. № 1. С. 25–28.

22. Нешев А.В., Будник В.А., Хайбуллин А.А., Муратшин Р.Р. Сравнение требований к качеству нефтяных и каменноугольных пеков для электродной промышленности // *Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт*. 2011. № 11. С. 50–57. EDN: ONCTLP.

23. Мухамедзянова А.А., Бейлина Н.Ю. О создании в России производства нефтяных коксов и пеков-прекурсоров углеродных композиционных материалов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2018. № 4-2. С. 109–116. EDN: XXRULJ.

24. Дошлов О.И., Кондратьев В.В., Угапьев А.А., Ким И.В. Применение метода компаундирования для производства связующих материалов для алюминиевой промышленности // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2014. № 2. С. 31–41.

25. Дошлов О.И., Дошлов И.О. О перспективах производства нефтяных вяжущих в ОАО «Ангарская нефтехимическая компания» // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2015. № 5. С. 141–146. EDN: TVQUNP.

26. Дошлов И.О., Горяшин Н.А., Кузора И.Е. Нефтяной пек из высокоароматизированного мазута // *Нефть и газ: сб. тр. 74-й Междунар. молодежной науч. конф. (г. Москва, 28 сентября – 04 октября 2020 г.)*. М.: Российский гос. ун-т нефти и газа (нац. иссл. ун-т) им. И.М. Губкина, 2020. С. 166–174. EDN: KCKCWR.

References

1. Mann V., Buzunov V., Pitertsev N., Chesnyak V., Polyakov P. Reduction in power consumption at UC RUSAL's smelters 2012–2014. In: Hyland M. (eds.). *Light Metals*. Cham: Springer; 2015, p. 757-762. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48248-4_128.

2. Napalkov V.I., Baranov V.N., Frolov V.F. *Aluminum ligatures: structure and purpose*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2019, 176 p. (In Russ.).
3. Dubovikov O.A., Brichkin V.N., Ris A.D., Sundurov A.V. Thermochemical activation of hydrated aluminosilicates and its importance for alumina production. *Non-ferrous Metals*. 2018;2:11-16. <https://doi.org/10.17580/nfm.2018.02.02>. EDN: VAYILV.
4. Nemchinova N.V., Barauskas A.E., Tyutrin A.A., Vologin V.S. Processing finely dispersed technogenic raw materials for aluminum production in order to extract valuable components. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2021;62(6):659-667. <https://doi.org/10.3103/S1067821221060158>. EDN: RHWKMQ.
5. Patrín R.K., Bazhin V.Yu. Spent linings from aluminum cells as a raw material for the metallurgical, chemical, and construction industries. *Metallurgist*. 2014;58(7-8):625-629. <https://doi.org/10.1007/s11015-014-9967-2>.
6. Burdonov A.E., Zelinskaya E.V., Gavrilenko L.V., Gavrilenko A.A. Investigation of substantial composition of alumina-bearing material of aluminium electrolyzers for usage in primary aluminium technology. *Tsvetnye Metally*. 2018;3:32-38. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.03.05>.
7. Grjotheim K., Kvande H. Introduction to aluminium electrolysis. Düsseldorf: Aluminium-Verlag; 1993, 260 p.
8. Borisoglebskij Yu.V., Galevskij G.V., Kulagin N.M., Mincis M.Ya., Sirazutdinov G.A. *Aluminum metallurgy*. Novosibirsk: Nauka; 1999, 438 p. (In Russ.).
9. Mann V., Buzunov V., Pingin V., Zherdev A., Grigoriev V. Environmental aspects of UC RUSAL's aluminum smelters sustainable development. In: Chesonis C. (eds.). *Light Metals*. Cham: Springer; 2019, p. 553-563. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05864-7_70.
10. Hajrudinov I.R., Tihonov A.A., Taushev V.V., Telyashev E.G. *Current state and development prospects of thermal processes of petroleum processing*. Ufa: Institute of Petroleum Refining and Petrochemistry; 2015, 328 p. (In Russ.). EDN: IGKCDX.
11. Vinogradov A.M., Pinaev A.A., Vinogradov D.A., Puzin A.V., Shadrin V.G., Zor'ko N.V., Somov V.V. Increasing hooding efficiency of Soderberg cells. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2017;(1):19-30. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-19-30>.
12. Buzunov V., Mann V., Chichuk E., Frizorger V., Pinaev A., Nikitin E. The first results of the industrial application of the EcoSoderberg technology at the Krasnoyarsk aluminium smelter. *Light metals*. 2013;573-576. <https://doi.org/10.1002/9781118663189.ch98>.
13. Yanko E.A. *Aluminum electrolyser anodes*. Moscow: Ruda i metally; 2001, 671 p. (In Russ.).
14. Sidorov O.F., Seleznyov A.N. Prospects for the production and consumer property improvement of coal electrode pitches. *Rossiiskij himicheskij zhurnal*. 2006;50(1):16-24. EDN: GZQCPJ.
15. Privalov V.E., Stepanenko M.A. *Coal tar pitch: production, processing, application*. Moscow: Metallurgiya; 1981, 208 p. (In Russ.).
16. Anshitz A.G., Kurteeva L.I., Cyganova S.I., Suzdorf A.R., Anshic N.N., Morozov S.V. Comparative assessment of carcinogenic substance emission when using medium- and high-temperature pitches in aluminum production in Soderberg electrolyzers. *Himiya v interesah ustojchivogo razvitiya = Chemistry for Sustainable Development*. 2001;9:345-352. (In Russ.).
17. Khramenko S.A., Anushenkov A.N., Marakushina E.N., Tret'yakov Ya.A. Estimation of polyaromatic hydrocarbon emission from the Soderberg anode surfaces. *Tsvetnye Metally*. 2012;6:34-37. (In Russ.).
18. Doshlov O.I., Kondratiev V.V., Ugapyev A.A. Heavy pyrolysis tar effect on characteristics of anode mass. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2013;2:67-75. (In Russ.).
19. Fitzer E., Difendorf R., Kalinin I. *Carbon fibers and carbon composites*, 1988. 336 p. (Russ. ed.: *Uglerodnye volokna i uglekompozity*. Moscow, Mir; 1988, 336 p.)
20. Khajrudinov I.R., Sadykov R.H., Gaskarov N.S., Sultanov F.M. Production prospects of petroleum pitches from various types of raw materials. *Tsvetnye Metally*. 1993;7:24-25. (In Russ.).
21. Khajrudinov I.R., Akhmetov M.M., Telyashev E.G. State and development prospects of coke and pitch production from petroleum raw materials. *Rossiiskij himicheskij zhurnal*. 2006;L(1):25-28. (In Russ.).
22. Neshev A.V., Budnik V.A., Khajbullin A.A., Muratshin R.R. Comparing quality requirements for petroleum and coal tar pitches for the electrode industry. *Neftepererabotka i neftekhimiya. Nauchno-tekhnicheskie dostizheniya i peredovoj opyt*. 2011;11:50-57. (In Russ.). EDN: ONCTLP.
23. Mukhamedzianova A.A., Beylina N.Yu. About creation in Russia productions oil coke and pitches – precursors carbon composite materials. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*. 2018;4-2:109-116. (In Russ.). EDN: XXRULJ.
24. Doshlov O.I., Kondratiev V.V., Ugapyev A.A., Kim I.V. Application of compounding technique for aluminum industry binder material production. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2014;2:31-41. (In Russ.).
25. Doshlov O.I., Doshlov I.O. On production prospects of oil binders in JSC "Angarsk petrochemical company". *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015;5:141-

146. (In Russ.). EDN: TVQUNP.

26. Doshlov I.O., Goryashin N.A., Kuzora I.E. Petroleum pitch from highly aromatic fuel oil. In: *Neft' i gaz: sbornik trudov 74-j Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferencii = Oil and gas: collected articles of the 74th International youth scientific conference*. 28 September – 4 October 2020. Moscow: Gubkin University. National University of Oil and Gas; 2020, p. 166-174. (In Russ.). EDN: KCKCWR.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Немчинова Нина Владимировна,

д.т.н., профессор,
заведующая кафедрой металлургии
цветных металлов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова 83
✉ ninavn@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0001-9895-1709>

Коновалов Николай Петрович,

д.т.н., профессор,
заведующий кафедрой физики,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
knp@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0001-6786-2711>

Коновалов Пётр Николаевич,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры физики,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
iskpn@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3005-6577>

Дошлов Иван Олегович,

аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
doshlov125@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Немчинова Нина Владимировна является членом редакционной коллегии журнала «iPolytech Journal» с 2000 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 01.09.2023 г.;
одобрена после рецензирования 30.09.2023 г.;
принята к публикации 01.10.2023 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nina V. Nemchinova,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Non-Ferrous
Metals Metallurgy,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
✉ ninavn@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0001-9895-1709>

Nikolay P. Konovalov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Physics,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
knp@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0001-6786-2711>

Petr N. Konovalov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Physics,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
iskpn@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3005-6577>

Ivan O. Doshlov,

Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
doshlov125@mail.ru

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

Nina V. Nemchinova has been a member of the iPolytech Journal Editorial Board since 2000, but she was not involved in making decision about accepting the present article for publication. The article was subjected the Journal's review procedure. The authors did 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 01.09.2023;
approved after reviewing 30.09.2023;
accepted for publication 01.10.2023.