

Научная статья
УДК 621.3.049.7:628.542

ТИПОВОЙ РАСЧЕТ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ОТ РУДНО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ДУГОВОЙ ПЕЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Наталья Алексеевна Воронова¹, Артем Вячеславович Артемов²

¹ Общество с ограниченной ответственностью «Технология систем безопасности», Екатеринбург, Россия

² Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, Россия

¹ voronova_nataliy_20@mail.ru

² artemovav@m.usfeu.ru

Аннотация. Предложен метод определения загрязняющих веществ от рудно-термической дуговой печи постоянного тока (РДППТ). Дана оценка состава газозвушной смеси, поступающей от РДППТ на производстве. Определены максимально-разовые и валовые объемы выбросов от РДППТ.

Ключевые слова: литейное производство, дуговая печь, шихта, выброс, загрязняющие вещества, атмосфера

Для цитирования: Воронова Н. А., Артемов А. В. Типовой расчет загрязняющих веществ от рудно-термической дуговой печи постоянного тока // Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий = Effective reaction to modern challenges of the interaction between human and nature, human and technologies : материалы XVII Международной научно-технической конференции. Екатеринбург : УГЛТУ, 2026. С. 441–449.

Original article

TYPICAL CALCULATION OF POLLUTANTS FROM A DIRECT CURRENT MINERAL-ARC FURNACE

Natalia A. Voronova¹, Artyom V. Artyomov²

¹ Technology of Security Systems LLC, Yekaterinburg, Russia

² Ural State Forestry Engineering University, Yekaterinburg, Russia

¹ voronova_nataliy_20@mail.ru

² artemovav@m.usfeu.ru

Abstract. A method for determining pollutants from a direct current mineral-arc furnace (DCMAF) has been proposed. The composition of the gas-air mixture emitted from the DCMAF in production has been evaluated. The maximum single and total emission volumes from the DCMAF have been determined.

Keywords: casting production, arc furnace, charge, emission, pollutants, atmosphere

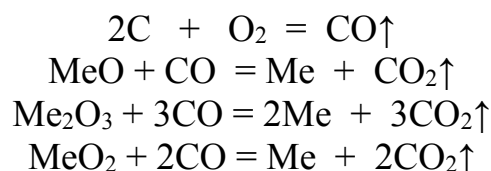
For citation: Voronova N.A., Artyomov A.V. (2026) Tipovoj raschet zagryaznyayushchikh veshchestv ot rudno-termicheskoy dugovoj pechi postoyannogo toka [Typical calculation of pollutants from a direct current mineral-arc furnace]. Effektivnyi otvet na sovremennye vyzovy s uchetom vzaimodeystviya cheloveka i prirody, cheloveka i tekhnologii [Effective reaction to modern challenges of the interaction between human and nature, human and technologies : materials of the XVII International Scientific and Technical Conference]. Ekaterinburg : USFEU, 2026. P. 441–449. (In Russ).

Плавка и разлив металлов осуществляются с использованием вагранок, электродуговых и индукционных печей, а также литьевых машин различных типов. В процессе их работы в атмосферу могут выделяться оксиды металлов, углерода, азота и серы, а также масла, щелочи, пары ацетона и спиртов [1].

Процесс разделения драгоценных и недрагоценных металлов осуществляется посредством плавления и удаления шлака, содержащего неблагородные металлы, в металлический сплав с коллектором. Плавка на три периода: завалка (загрузка) шихты, расплавление, выдержка и слив расплава. Плавка ведется с накоплением металла, т. е. делается 5–10 плавов, в результате которых сливается только шлак, а затем сливается металл, если тигель футерованный. Если плавка ведется в медном кристаллизаторе, то кристаллизатор охлаждается и разбирается, после чего металл снимается с пода печи.

Загрузка шихты осуществляется периодически по мере ее проплавления и проседания, порциями на поверхность еще нерасплавленной шихты. В этот период возможно появление кратковременных пыле-дымовых выбросов из печи, связанных с проседанием шихты в расплав и загрузкой свежей порции материала. Локализацию и удаление этих выбросов осуществляет зонтик, расположенный над печью. Этот период занимает до 70 % от всего времени плавки.

Во время второго периода шихта полностью расплавляется и доводится до требуемой температуры, при которой шлак имеет оптимальную жидкотекучесть для максимального осаждения металла из него. В этот период протекают процессы восстановления металла и образования оксида углерода (II) из загружаемого восстановителя (кокса):



где Me – Fe, Ni, Cu и ДМ.

В этот период при нормально работающей вытяжной вентиляции газопылевых выбросов не происходит. Длительность второго периода занимает 10–30 % от всего времени плавки.

Слив расплава длится 5–10 % от всего времени плавки и характеризуется интенсивным выделением пыледымовых газов. Слив расплава делится на две части: слив шлака, разогрев и слив металла. Перед сливом шлака из расплава поднимают электроды и выдерживают 5–10 мин до прекращения интенсивного газовыделения внутри печи, после чего производят слив шлака в заранее подготовленную и обмазанную изложницу. Затем прогревают металл и сливают в заранее подготовленную и обмазанную изложницу. Слив металла производят только после его накопления примерно через 5–10 плавков. При плавке в медном кристаллизаторе слив металла не производят, так как он за счет водоохлаждаемого пода печи, кристаллизуется на поде печи [2].

Определение состава и объема выбросов вредных веществ в атмосферу от рассматриваемого технологического оборудования проводилось поэтапно [3]:

1. Подготовительный этап включал изучение характеристики рассматриваемой печи как источника загрязнения атмосферы, анализ балансовой схемы, определение параметров источника выбросов, а также идентификация загрязняющих веществ.

2. Систематизация установленных данных, формирование исходных и выполнение расчетов.

Объект исследования – технологический процесс разделения драгоценных и недрагоценных металлов путем расплавления и удаления примесей с образованием шлака. В результате драгоценные металлы переходят в металлический сплав с металлом-коллектором, что приводит к образованию загрязняющих веществ, которые во время плавки в дуговой печи выделяются в атмосферу.

Цель работы – определение состава и мощности выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от рудно-термической дуговой печи постоянного тока (РДППТ) расчетным методом.

РДППТ (рудовосстановительная печь) – электрическая дуговая печь смешанного нагрева, в которой теплота выделяется как от электрической дуги под слоем шихты или шлака, так и от электрического тока между электродами через шихту или шлак [4].

В качестве примера, была рассмотрена эксплуатация дуговой печи постоянного тока с двумя сводовыми и одним подовым электродами [5].

Шихта на плавку поступает из отделения шихтовки, отделения сушки или со склада временного хранения, откуда ее привозят на электропогрузчике или гидравлической тележкой в транспортной таре.

Далее шихта из транспортной тары пересыпается в приемный бункер-питатель. Операция заполнения бункера-питателя производится с помощью бочкоопрокидывающего устройства, которое подвешивается на кран-балку. На бочку устанавливается специально изготовленная крышка с вмонтированным патрубком для высыпания материала. При опрокидывании бочки патрубок соединяется с приемным отверстием бункера-питателя. Для исключения пыления применяются мягкие вставки.

Шихта подается в печь из накопительного бункера с помощью питающего устройства. Подача осуществляется периодически: новая порция загружается после полного проплавления предыдущей. Загрузка продолжается до достижения максимально допустимого уровня. Период загрузки материала длится 1–2 ч.

При достижении расплавом нужного уровня загрузка прекращается, и расплав прогревается до температуры, обеспечивающей оптимальную вязкость шлака для его разделения с металлом и позволяющей слить его без застывания в печи. После достижения заданной температуры расплав выдерживается 20–40 мин для полного восстановления драгоценных металлов и их перехода из шлака в коллектирующий сплав. Период проплавления и выдержки длится 40–60 мин.

По окончании периода выдержки печь отключается, электроды полностью выводятся из печи, и расплав выстаивается 2–5 мин для дегазации. После дегазации производится наклон печи и происходит слив шлака в заранее подготовленную изложницу с антипригарным покрытием. Изложницу заполняют шлаком не более чем на 3/4 от полного объема изложницы. После слива 3/4 шлака печь возвращается в исходное положение, электроды опускаются, и подается нагрузка. Печь загружается шихтой и плавка повторяется еще 5–10 раз, до накопления металла.

По мере накопления металла в печи происходит его слив. Для этого после слива шлака металл прогревается до температуры, обеспечивающей его слив без застывания в печи. Разогретый металл сливается в заранее подготовленную изложницу с антипригарным покрытием.

При сливе шлаков происходит отбор пробы. Проба отбирается пробоотборником с закрепленным на конце графитовым тиглем марки ТГН-5. Отобранная проба от шлака сливается в небольшую изложницу. После охлаждения проба измельчается и затаривается в пакет.

Если плавка ведется в медном кристаллизаторе, то для выпуска шлака специальным устройством пробивается шпур и происходит выпуск шлака в заранее подготовленную изложницу, покрытую антипригарным покрытием. По мере накопления металла кристаллизатор охлаждается, снимается и вывозится на стенд. На стенде происходит разборка кристаллизатора, снимаются боковые стены, а с пода кристаллизатора сдирается металл. После съема металла плиты кристаллизатора осматриваются на отсутствие повреждений согласно инструкции эксплуатации кристаллизатора. После замены поврежденных плит кристаллизатор собирается и устанавливается на печь [5].

Выделяющиеся в процессе работы газы проходят последовательную очистку от пыли в системе газоочистки. Система газоочистки состоит из циклона-искрогасителя ЦГ-10 и рукавного фильтра КФЕ-100, снабженных бункерами для сбора пыли. Пыль, осевшая в бункерах, выгружается один раз в 1–3 суток и направляется на операцию шихтовки. Газы, очищенные от пыли, через трубу выбрасываются в атмосферу. Состав выбрасываемых газов представляет смесь воздуха с небольшим количеством водяного пара (образуется вследствие досушки шихты при плавке) и углекислого газа (образуется при восстановительных процессах). Вентилятор отсоса газов от печи отключают не ранее чем через 1 ч после окончания плавки [6].

Расчет выбросов загрязняющих веществ от источников выделения выполнен по формулам согласно [1].

В качестве исходных данных для расчета выбросов используются учетные сведения о выполняемой технологической операции, виде оборудования, годовом фонде рабочего времени:

1. Плавка материала:

- железо содержание в шихте до 30 %;
- никеля – до 5 %;
- меди – до 10 %;
- драгоценные металлы (ДМ) – до 1% (по платине).

2. Печь – дуговая печь постоянного тока.

3. Расход металлической завалки – 450 кг.

4. Время производственного цикла (плавки) – 2–3 ч.

5. Время работы печи – 9 ч/сут.

6. Годовой фонд работы печи – 2268 ч/год.

7. Производительность: 4000 кг/сут. по шихте.

8. Эффективность работы ПГУ:

- циклон ЦГ-10 – 70 %;
- рукавный фильтр КФЕ-100 – 94 %.

Принимая во внимание нестационарность работы печи в зависимости от переплавляемого материала, при определении выбросов были учтены следующие положения:

1. Расчет выбросов осуществлен по всем видам перерабатываемых материалов.

2. За конечный результат были приняты наибольшие значения для максимально-разовых выбросов и суммарные значения для валовых.

3. При определении валового выброса было учтено, что печь по плавке каждого материала работает весь год (252 сут./год).

4. В расчете не учитывается содержание сопутствующих металлов шихте (для железа, меди, никеля) из-за низкого содержания их в расплаве.

5. Из расчета исключена переплавка драгметаллов из-за небольших объемов, т. е. не является приоритетным процессом в образовании загрязняющих веществ отводимых в атмосферу от печи.

Результаты расчетов выбросов в зависимости от видов перерабатываемых материалов представлены в табл. 1–3. Суммарный объем образующихся выбросов представлен в табл. 4.

Таблица 1

Выбросы загрязняющих веществ от переплавки железа

Код	Вещество	Масса (г/с)	Масса (т/год)
0301	Азота диоксид	0,0180000	0,146966
0303	Азот (II) оксид	0,0028750	0,023474
0330	Сера диоксид	0,0200000	0,163296
0337	Углерод оксид	0,0212500	0,173502
2908	Пыль неорганическая: 70-20% SiO ₂	0,0003300	0,002694

Таблица 2

Выбросы загрязняющих веществ от переплавки меди

Код	Вещество	Масса (г/с)	Масса (т/год)
0146	Медь оксид /в пересчете на медь/	0,0006000	0,004899
0301	Азота диоксид	0,0200000	0,163296
0303	Азот (II) оксид	0,0032500	0,026536
0337	Углерод оксид	0,0250000	0,204120

Таблица 3

Выбросы загрязняющих веществ от переплавки никеля

Код	Вещество	Масса (г/с)	Масса (т/год)
0164	Никель оксид /в пересчете на никель/	0,0006000	0,004899
0301	Азота диоксид	0,0200000	0,163296
0303	Азот (II) оксид	0,0032500	0,026536
0337	Углерод оксид	0,0250000	0,204120

Таблица 4

Суммарные выбросы загрязняющих веществ от печи плавки

Код	Вещество	ПДК _{м.р.} , мг/м ³	ПДК _{с.с.} , мг/м ³	ОБУВ, мг/м ³	Класс опас- ности	Выброс вещества	
						г/с	т/год
0146	Медь оксид /в пересчете на медь/	–	0,002	–	2	0,0006000	0,004899
0164	Никель оксид /в пересчете на никель/	–	0,001	–	2	0,0006000	0,004899
0301	Азота диоксид (двуокись азота; пероксид азота)	0,200	0,040	–	3	0,0200000	0,473558
0304	Азот (II) оксид (азота моноксид)	0,400	0,060	–	3	0,0032500	0,076546
0330	Сера диоксид	0,500	0,050	–	3	0,0200000	0,163296
0337	Углерод оксид (углерод окись; углерод моноокись; угарный газ)	5,000	3,000	–	4	0,0250000	0,581742
2908	Пыль неорганическая, содержащая двуокись кремния, в %: 70–20	0,300	0,100	–	3	0,0003300	0,002694
ИТОГО: 7						0,0697800	1,307634
из них твердых: 3						0,0014530	0,012492
из них газообразных/жидких: 4						0,0682500	1,295142

Используя расчетный метод, определили состав и мощность выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от РДППТ.

Полученные данные о составе и мощности выбросов от печи РДППТ соответствуют расчетной методике, а при изменении технологии или увеличении мощности печи потребуются корректировка документации и подтверждение выбросов инструментальным методом в соответствии с ГОСТ 17.2.4.06–90 и ГОСТ 17.2.4.07–90.

Список источников

1. Инструкция Ростехнадзора. Расчетная инструкция (методика). Удельные показатели образования вредных веществ, выделяющихся в атмосферу от основных видов технологического оборудования для предприятий радиоэлектронного комплекса (шифр 1011) / Федеральное агентство по промышленности. СПб. : ООО «ЭВИОН», 2006.

2. Николаева Е. П. Обзор технологий и оборудования для пирометаллургической переработки богатых концентратов драгоценных металлов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2011. № 9(56). С. 142–148.

3. Воронова Н. А., Артемов А. В. Особенности определения качественного и количественного состава выбросов линии сращивания при производстве мебели // *Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века : материалы XX Международного евразийского симпозиума, Екатеринбург, 13-15 октября 2025 года. Екатеринбург : Уральский государственный лесотехнический университет, 2025. С. 116–121.*

4. Рубцов В. П., Хомяков И. В., Чурсин А. Ю. Разработка модели системы управления руднотермической печью с поддержанием сопротивления шлаковой ванны // *Вестник МЭИ. 2020. № 1. С. 82–88. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-1-82-88.*

5. Елизаров К. А., Нехамин И. С. Многофункциональные дуговые печи малой емкости для литейных производств и исследовательских центров // *Главный механик. 2016. № 1. С. 17–23.*

6. Кочнов М. Ю., Шульц Л. А., Кочнов Ю. М. Анализ экологических показателей загрязнения атмосферного воздуха при работе крупнотоннажных дуговых сталеплавильных печей // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2010. № 5. С. 59–67.*

References

1. Instruction of Rostekhnadzor Calculation Instruction (Methodology). Specific indicators of the formation of harmful substances emitted into the atmosphere from the main types of technological equipment for enterprises of the radioelectronic complex (cipher 1011) / Federal Agency for Industry. St. Petersburg : LLC “EVION”, 2006.

2. Nikolaeva E. P. Review of technologies and equipment for pyrometallurgical processing of rich concentrates of precious metals // *Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2011. № 9 (56). P. 142–148.*

3. Voronova N. A., Artyomov A. V. Features of determining the qualitative and quantitative composition of emissions from the splicing line in furniture production // *Woodworking: Technologies, Equipment, Management of the XXI Century : materials of the XX International Eurasian Symposium, Ekaterinburg, October 13–15, 2025. Ekaterinburg : Ural State Forest Engineering University, 2025. P. 116–121.*

4. Rubtsov V. P., Khomyakov I. V., Chursin A. Yu. Development of a control system model for an ore-thermal arc furnace with maintenance of the resistance of the slag bath // *Bulletin of MPEI. 2020. № 1. P. 82–88. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-1-82-88.*

5. Elizarov K. A., Nekhamin I. S. Multifunctional arc furnaces of small capacity for foundry production and research centers // *Chief Mechanic. 2016. №. 1. P. 17–23.*

6. Kochnov M. Yu., Shults L. A., Kochnov Yu. M. Analysis of environmental indicators of atmospheric air pollution during the operation of large-capacity arc steelmaking furnaces // News of Higher Educational Institutions. Ferrous Metallurgy. 2010. № 5. P. 59–67.