

ТЕОРИЯ МЕХАНИЗМА РАБОТЫ ФУРМ TSL И ЕЁ ПРАКТИЧЕСКОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ

Ю.А. Король¹, *U.Korol@mail.ru*
П.В. Зубов², *zubov_pavel@karmed.ru*
В.А. Евсеев², *evseev_vladimir@karmed.ru*

¹ АО «Русская медная компания», Екатеринбург, Россия

² АО «Карабаשמедь», Карабаш, Россия

Аннотация. В условиях форсирования плавки в печи «Аусмелт» инженеры АО «Карабаשמедь» столкнулись с ситуацией, когда наконечник фурмы, находясь в расплаве, завальцовывался без видимых признаков обгорания. Это явление приводило к нарушению режима плавки и вынужденному останову на замену фурмы.

В технической литературе и доступной мировой практике по эксплуатации фурм TSL авторам не было известно о возникновении подобного явления, в связи с этим была разработана теория этого процесса и способы управляющего воздействия на его проявление и предотвращение возникновения.

Применительно к рассматриваемой конструкции фурмы для упрощения и ускорения анализа крутки предложено использовать выведенные зависимости между эффективной круткой и параметром крутки. Показано и подтверждено на практике испытаний на промышленной печи, что для работы в наиболее эффективном режиме необходимо поддерживать отношение расхода количества охлаждающего воздуха к количеству смеси КВС на уровне 0,45–0,65. В рамках предложенного механизма массообмена доказано, что явление заклепывания возникает при определённых параметрах крутки. Опытным путём была подтверждена гипотеза о влиянии параметров эффективной крутки всех спутных струй фурмы типа TSL на кампанию работы печи, огнеупорной футеровки, наконечника, форму его износа или деформации, кроме того, на содержание меди в штейне и шлаке при прочих равных условиях.

Ключевые слова: вертикальная фурма, «Аусмелт», крутка, прямоточные струи, закрученные струи, завальцовывание наконечника фурмы, штейн, шлак, дутьевой режим, кислород, воздух, TSL

Для цитирования: Король Ю.А., Зубов П.В., Евсеев В.А. Теория механизма работы фурм TSL и её практическое подтверждение // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2025. Т. 25, № 4. С. 20–33. DOI: 10.14529/met250402

Original article
DOI: 10.14529/met250402

THEORY OF TSL TUYERE OPERATION AND ITS PRACTICAL VALIDATION

Yu.A. Korol¹, *U.Korol@mail.ru*
P.V. Zubov², *zubov_pavel@karmed.ru*
V.A. Yevseyev², *evseev_vladimir@karmed.ru*

¹ JSC Russian Copper Company, Ekaterinburg, Russia

² JSC Karabashcopper, Karabash, Russia

Abstract. During accelerated melting in the Ausmelt furnace, engineers at JSC Karabashcopper encountered a situation where the tuyere tip, while immersed in the melt, rolled without any visible signs of burning. This phenomenon led to a disruption in melting conditions and a forced shutdown for tuyere replacement.

The authors were not aware of any similar phenomena in the technical literature or available international practice on the operation of TSL tuyeres. Therefore, a theory of this process was developed, along with methods for controlling its manifestation and preventing its occurrence.

With regard to the design of the tuyere under consideration, in order to simplify and speed up the analysis of twist, it is proposed to use the derived relationships between effective twist and twist parameter. It has been shown and confirmed in practice by tests on an industrial furnace that in order to operate in the most efficient mode, it is necessary to maintain a cooling air to oxygen-air mixture flow rate ratio of 0.45–0.65. Within the framework of the proposed mass transfer mechanism, it was demonstrated that the riveting phenomenon occurs at specific twist parameters. Experimental studies confirmed the hypothesis that the effective twist parameters of all co-current jets of a TSL-type lance influence the furnace operation, refractory lining, tip, its wear or deformation pattern, and also the copper content of the matte and slag, all other things being equal.

Keywords: vertical lance, Ausmelt®, swirl, straight-through jets, swirling jets, matte, slag, tuyere tip rolling, blast mode, oxygen, air, TSL

For citation: Korol Yu.A., Zubov P.V., Yevseyev V.A. Theory of TSL tuyere operation and its practical validation. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy.* 2025;25(4):20–33. (In Russ.) DOI: 10.14529/met250402

Ознакомление с особенностями конструкции и работой фурмы TSL в печи «Аусмелт» на Карабашском медеплавильном комбинате (АО «Карабашмедь»), представленное в работах [1–8], позволяет сделать теоретические обобщения о механизме массообмена в печи и возможностях осознанного управления круткой дутьевого факела.

В условиях первоначальных проектных режимов работы печи в 2007 г. общая эффективная крутка спутных струй должна была быть на уровне 0,72 (см. таблицу), что обеспечивало угол раскрытия струи 51° и предотвращало образование обратных токов [2, 3]. Глубина проникновения дутьевой струи в расплав должна была быть на уровне 400 мм. По причинам как технологического характера

(отсутствие достаточного количества кислорода), так и организационного плана работа на проектных параметрах была недостижима. Поэтому режим работы фурм постоянно уточнялся в привязке к текущим результатам производственного процесса.

В 2011 г. эффективная крутка составляла 0,86, что обеспечивало угол раскрытия струи 56°, минимальную величину воронки обратных токов у устья фурмы диаметром 53 мм и полное смешение потоков на расстоянии 384 мм от её устья.

Для наконечника длиной до 350 мм на выходе из него обратных токов не наблюдалось. Полное сгорание природного газа происходило за пределами наконечника. Глубина дутьевого факела, проникающего в расплав,

Эффективная крутка в устье наконечника фурмы в разные периоды работы печи
Effective twist at the tuyere tip mouth during different periods of furnace operation

Показатели	Ед. изм.	2007 г.	2011 г.	2022 г.	2023 г.
Диаметр наконечника фурмы	мм	450	450	450	450
Конструктивная крутка охлаждения		2,59	2,59	2,59	2,59
Конструктивная крутка КВС		0,64	0,64	0,64	0,64
Воздух охлаждения	тыс. нм ³ /ч	20	20	28	20
КВС	тыс. нм ³ /ч	43,7	33,5	25,5	33,5
Природный газ	м ³ /ч	1000	1800	2200	2200
Общее дутье	тыс. нм ³ /ч	64,7	55,3	55,7	55,7
Общая эффективная крутка	θ	0,72	0,86	1,23	0,85
Диаметр воронки обратных токов	мм	нет	53	144	51
Угол раскрытия струи	°	51	56	67	56
Путь полного смешения струй	калибры	1,10	0,85	0,50	0,86
Путь полного смешения струй	мм	494	384	223	386
Длина наконечника фурмы	мм	350	350	350	350
Удельный вес расплава	кг/м ³	3500	3600	4500	4500
Содержание меди в штейне	%	40	42	55	55
Температура факела на срезе наконечника	°С	≈ 250	> 250	> 250	> 250
Глубина погружения факела в расплав	мм	400	330	280	280

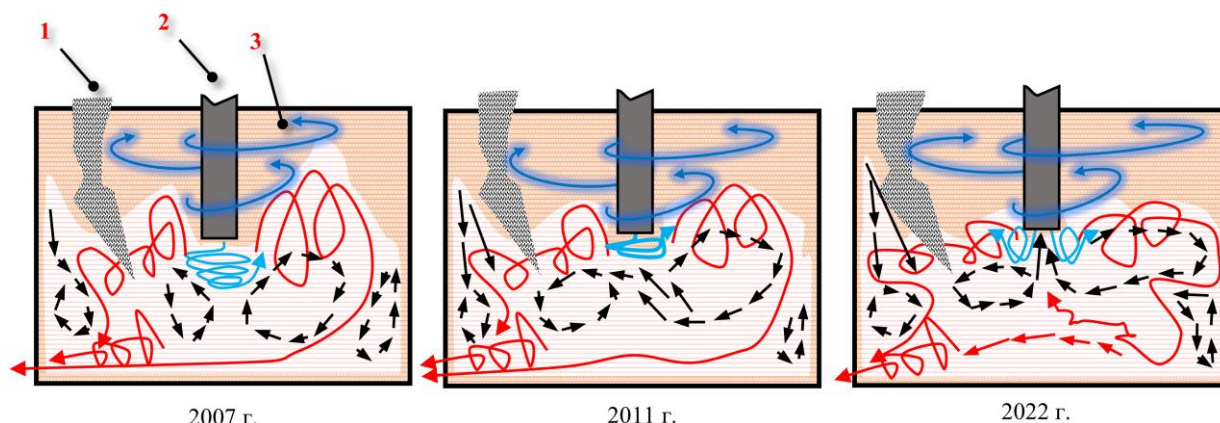


Рис. 1. Схема движения потоков дутья и расплава: 1 – загрузка шихты на ванну расплава; 2 – дутьевая фурма; 3 – потоки отходящего газа, красным цветом обозначены потоки сульфидного расплава; черным – зоны циркуляции штейно-шлакового расплава; синим – потоки дутьевого воздуха и отходящих газов
Fig. 1. Schematic diagram of blast and melt flows: 1 – charge loading into the melt bath; 2 – blast tuyere; 3 – waste gas flows, with sulfide melt flows marked in red; black – areas of slag melt circulation; blue – blast air and waste gas flows

достигала 330 мм. Кампания работы наконечника составляла 3–7 сут, основной причиной его замены являлось прогорание и/или горение материала наконечника. Пропуская многочисленные режимы за период с 2011 по 2022 г., отметим, что после последней модернизации основного и вспомогательного оборудования печи «Аусмелт» в фурму подаётся воздух на охлаждение на уровне 28 тыс. $\text{нм}^3/\text{ч}$, КВС – 25,5 тыс. $\text{нм}^3/\text{ч}$ и 2,2 тыс. $\text{нм}^3/\text{ч}$ природного газа.

Параметры фурмы варианта 2022 г. обеспечивали эффективную крутку спутных струй 1,23, угол раскрытия 67° , воронку обратных токов в устье наконечника диаметром 144 мм.

В этом случае дутьевая струя размыкалась и формировала потоки, растекающиеся под углом от оси фурмы, не смыкающиеся на определённом удалении от наконечника. Фактически форма дутьевого факела в этом случае напоминала тор с зоной отрицательных давлений в центре. Полное смешение воздуха и природного газа достигалось на расстоянии 223 мм от устья фурмы, на внутренней границе наконечника.

На рис. 1 показаны три схемы потоков дутья и расплава для вариантов 2007, 2011 и 2022 гг.

После проведённой модернизации и изменения режимов дутья, повлёкших увеличение эффективной крутки, кампания работы наконечника упала до 1–2 сут. Главной причиной замены стало его механическое повреждение с практически полным отсутствием на нём следов оплавления или окисления (рис. 2).

Такое состояние фурмы специалисты предприятия не наблюдали ни на одном из заводов мира, и оно не описано в международной технической литературе, рассматривающей теорию и практику работы фурм TSL в сульфидных расплавах. Специалисты АО «Карабашмедь» назвали это механическое повреждение фурмы без оплавления и обгорания в зависимости от степени перекрытия устья фурмы «завальцовывание» или «заклепывание» (при максимальном сужении устья наконечника).



Рис. 2. Заклёпывание наконечника фурмы
Fig. 2. Rolling over of the tuyere tip

Цель исследования

Возникновение явления завальцовывания и резкое снижение рабочей кампании наконечника, отсутствие общедоступной информации о подобных явлениях привело к необ-

ходимости выявления причины механического повреждения фурмы при нахождении её в расплаве, разработки и обоснования мероприятий по борьбе с этим явлением и выработки способов управляющего воздействия на предотвращение его возникновения.

Влияние крутки на кампанию фурмы

В 2007 г. предполагалась классическая работа фурмы с умеренной круткой, не допускающей обратных токов и глубиной погружения дутьевого факела в расплав на 400 мм от среза наконечника. При этом полное смешение спутных струй было возможно на расстоянии 494 мм от устья фурмы, что меньше длины наконечника и глубины погружения в расплав $350 + 400 = 750$ мм и не могло влиять на эффективность химических процессов в дутьевом факеле при необгоревшем наконечнике. Уменьшение длины наконечника более чем на 100 мм приводило к снижению полноты химического взаимодействия в дутьевом факеле.

По проектному варианту объём всплесков и их высота достигали умеренных значений, полностью улавливаемых во внутреннем пространстве печи. Односторонняя загрузка шихты создавала две зоны циркуляции в этой области (см. рис. 1, 2007 г.). Потоки расплава с двух сторон фурмы, практически не соприкасаясь, выводились из печи через сифонное отверстие в боковой стенке в закручивающейся воронке. Часть шихты прижималась потоками вращающегося отходящего газа к стенке шахты печи со стороны загрузки, окислялась, плавилась и стекала по поверхности огнеупора вниз в зону расплава.

Именно это воздействие окисленных и расплавленных частиц шихты, характерное для всех вариантов циркуляции,двигающихся по огнеупору, растворяло его с образованием шлаковых фаз, разрушая футеровку в зоне загрузки. После полного разрушения огнеупора в этой зоне начиналось окисление кессонных плит охлаждения, не сдерживаемое периодически образующейся настелью из магнетита. В связи с этим данная зона кессонирования печи должна была иметь повышенную циркуляцию охлаждающей жидкости (воды) с минимально возможно низкой температурой на входе [6].

Проектная дутьевая нагрузка при соблюдении условий загрузки не допускала передувания расплава за счёт его переокисле-

ния и образования избыточных количеств магнетита.

Недостаток технического кислорода, трудности освоения вспомогательного и сопутствующего оборудования печи [6, 8] привели к тому, что через четыре года в 2011 г. был отработан несколько иной дутьевой режим, позволивший стабилизировать процесс с увеличением удельной производительности печи «Аусмелт». В этом варианте дутья (см. рис. 1, 2011 г.) увеличение эффективной крутки с 0,72 до 0,86 (см. таблицу) привело к расширению дутьевой зоны с одновременным уменьшением глубины взаимодействия с ванной расплава. Брызгоунос значительно снизился. Дутьевой конус находился на уровне устья наконечника, при этом формировалась воронка с обратными токами диаметром до 53 мм, что приводило к «подтягиванию» циркулирующего расплава к наконечнику фурмы. Такое явление положительно сказывалось на эффективности окислительных процессов, так как часть расплава из зоны циркуляции, противоположной загрузке шихты, втягивалась во вторую зону, подвергаясь дополнительному взаимодействию с дутьевым факелом. За счёт отсутствия явления передувания при интенсивной циркуляции расплава возрастало содержание меди в штейне без увеличения её содержания в шлаке. Данный режим работы фурмы обеспечивал вовлечение в циркуляцию до 80 % объёма ванны расплава, что способствовало удержанию гарнисажа на боковых стенках печи, за исключением зоны загрузки, при наличии магнетита в шлаке на уровне 6–8 %.

В этом режиме работы общая длина наконечника и глубины погружения больше длины пути полного смешения $(350 + 330) > 384$ мм, что позволяет сделать вывод о максимальном использовании химического потенциала процессов горения, мало зависящего от остаточной длины наконечника [3–5].

Кампания наконечника увеличилась до 3–7 сут в работе под дутьём непосредственно в режиме плавки.

В 2022 г. в компании была завершена реконструкция и модернизация металлургического передела с расширением мощности кислородных станций, закончено строительство второго сернокислотного цеха, увеличены производительности обогатительных фабрик по получению богатых концентратов из порфиновых руд, расширены коммуникации по передаче энергоресурсов на печь и увеличена

производительность миксера с одновременным повышением надёжности котла-утилизатора. Все это потребовало увеличения производительности металлургического передела.

С 2022 г. печь «Аусмелт» работает на новых дутьевых параметрах с увеличенным расходом кислорода и воздуха. Увеличение дутья привело к соответствующему увеличению эффективной крутки спутных струй до 1,23, а это, в свою очередь, существенно изменило характер дутьевых и массообменных циркуляций в печи (см. рис. 1, 2022 г.). Угол раскрытия струи увеличился до 67° . Дутьевая струя разомкнулась с образованием тора вокруг наконечника, в результате чего воронка обратных токов диаметром до 144 мм «зашла» внутрь тора и наконечника, создавая зону отрицательных давлений в его устье. В связи с этим часть потока циркуляции стала затягиваться в полость наконечника, воздействуя на него, создавая условия для переокисления расплава при нарушении стабильной загрузки шихты в печь. Циркуляция расплава по поверхности увеличилась, охватывая все внутренне пространство печи, но глубина зоны перемешивания снизилась. Окислительные процессы «переместились» в верхнюю зоны ванны. По содержанию меди штейны стали стабильно богаче, а содержание магнетита в шлаке возросло до уровня не менее 10%. Брызгонос в печи увеличится по сравнению с предыдущим режимом. Обогащение дутья кислородом и увеличение его количества, подаваемого в расплав, увеличили производительность печи.

В варианте 2022 г. длина пути полного смешения спутных струй позволяет завершить все химические реакции в наконечнике и образующейся воронке расплава в его устье. Увеличение циркуляции привело к тому, что доля расплава, стекающего вниз и взаимодействующего со стенкой печи, увеличилась, это ускорило разрушение футеровки. В этой зоне на кессонах гарнисаж не держится, и они работают с оголённой поверхностью, подвергаясь интенсивной коррозии.

В то же время кампания работы наконечника заметно снизилась, в отдельные периоды до уровня одних суток. При этом он не горел, а завальцовывался внутрь, формируя диафрагму в устье наконечника. Форма завальцовки имела, как правило, от 5 до 8 граней, часть наконечников трескалась по шву (рис. 3).



Рис. 3. Завальцовывание наконечника фурмы с разрывом
Fig. 3. Rolling over of the tuyere tip with a break

На рис. 4 представлен график изменения крутки дутьевого факела для фурмы № 3, работавшей в режиме высокой крутки, что привело к её завальцовыванию. По результатам 730 замеров с интервалом в одну минуту при среднеарифметической крутке 0,88 кампания наконечника фурмы составила 0,57 сут. Завальцовка наконечника вызвала появление диафрагмы в его устье примерно на 500-й минуте.



Рис. 4. Изменение крутки при завальцовывании наконечника
Fig. 4. Twist change when the tip is rolled over

Появление заужения на наконечнике привело к уменьшению крутки, резкому снижению противодавления воздуху и природному газу, незначительному увеличению глу-

бины погружения факела, сопровождающегося уменьшением объёма циркуляции расплава по поверхности, снижению степени усвоения кислорода дутья, повышению брызгоуноса и изменению частоты вибрации фурмы.

Как следствие, масса из печи выходила холодная и вязкая при одновременно высокой температуре отходящих газов. Процесс плавки затормаживался, печь переставала «брать» воздух.

Изменение параметров дутья сопровождается появлением эффекта «ударов по фурме» внутри печи с повышенными вибрациями трубы, толчками и изменением звукового фона, сопутствующего дутью. Это обстоятельство вынуждает технологов останавливать плавку и менять фурму.

Не имея возможности непосредственного контроля за циркуляцией расплава в реально работающем плавильном агрегате, авторы на основании косвенных признаков и по результатам наблюдений за работой печи по ежесекундно выполняемым замерам 476 параметров, характеризующих плавку и работу оборудования, выдвинули гипотезу о причинах возникновения и механизме завальцовывания (заклепывания) наконечника фурмы в расплаве.

По мнению авторов данный эффект проявляется из-за высокой крутки дутья, что приводит к размыканию струи, формированию тороидальной формы дутьевого факела, соз-

дающего большую воронку отрицательных токов в устье наконечника [2]. Циркуляционные потоки у устья наконечника способствуют затягиванию под поверхность расплава обрывающихся с охлаждаемой поверхности тела фурмы настылей и корок. Под действием разряжения и восходящих потоков расплава в устье фурмы корки поднимаются вверх к наконечнику и ударяют по его размягчённому торцу, заминая и завальцовывая последний (рис. 5).

После удара изнутри по краю наконечника настель отскакивает и увлекается потоками расплава сначала вниз с одновременным поворотом по радиусу вращения расплава в печи и затем она вновь затягивается в устье наконечника восходящими потоками в сторону воронки отрицательных токов и повторно ударяет по концу наконечника. Цикл неоднократно повторяется до полного разрушения настели, образуя на конце наконечника различные многогранные фигуры со вмятием внутрь трубы. Удар происходит именно со стороны воронки обратных токов под воздействием восходящих засасываемых отрицательным давлением потоков расплава (рис. 6). Заклепывание фурмы приводит к уменьшению крутки (см. рис. 4) и переходу печи в режим плавки по механизму, представленному на рис. 1, 2011 г., и снижением эффективности процессов массообмена.

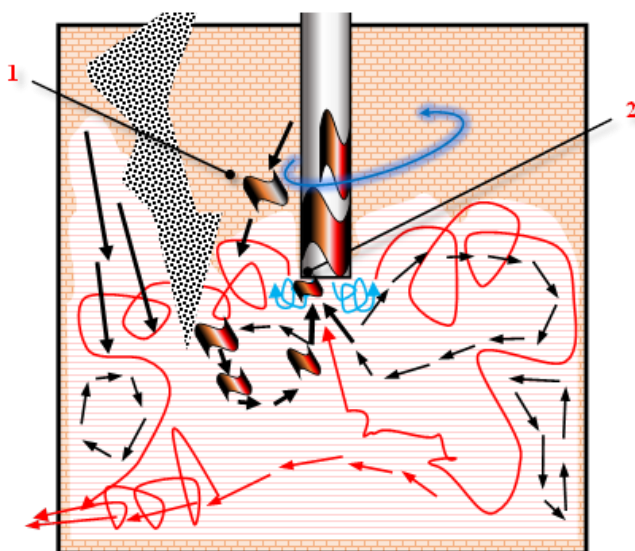


Рис. 5. Механизм завальцовывания наконечника фурмы:
1 – настель с охлаждаемого тела трубы фурмы;
2 – место удара корки по наконечнику
Fig. 5. The tuyere tip rolling mechanism: 1 – crust from the cooled body of the tuyere pipe; 2 – the point of impact of the crust on the tip

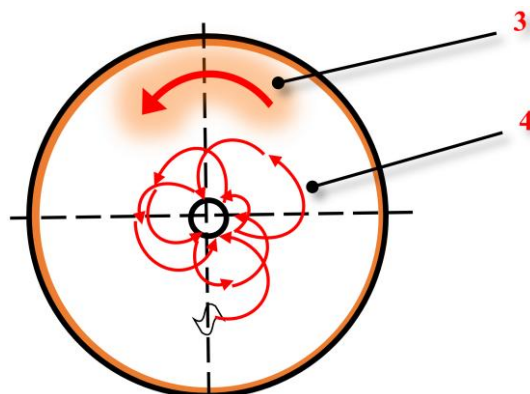


Рис. 6. Циркуляция настели (4) по кругу под действием вращения ванны расплава (3)
Fig. 6. Circulation of the crust (4) in a circle caused by rotation of the melt bath (3)

Предотвращение заклёпывания наконечника

Понимание механизма взаимодействия фурмы с расплавом даёт возможность влиять на её работу без внесения конструктивных изменений в оборудование.

Как вариант управляющего воздействия на параметры крутки, необходимо перераспределить потоки воздуха между наружной

и внутренней трубой фурмы. В соответствии с выполненным расчётом (см. таблицу, 2023 г.) при сохранении общего количества дутья 55,7 тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$ подача на охлаждение 20,0 тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$ вместо 28,0 $\text{м}^3/\text{ч}$ воздуха, а на смешение с кислородом – дополнительное введение 8,0 тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$ воздуха для сохранения общего баланса позволит обеспечить общую эффективную крутку на уровне до 0,85

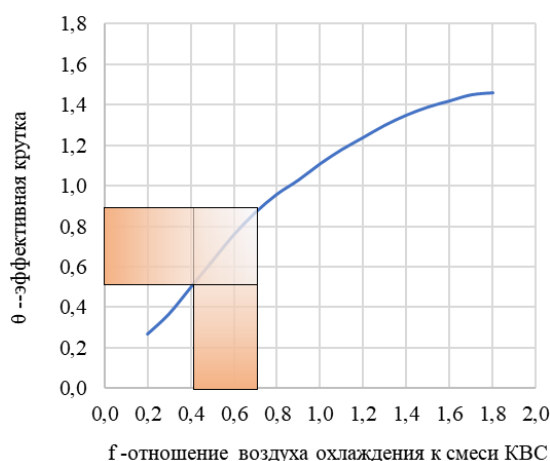


Рис. 7. Диаграмма для определения соотношений эффективной крутки (θ) и параметра крутки (f)
Fig. 7. Diagram for determining the relationship between effective twist (θ) and twist ratio (f)

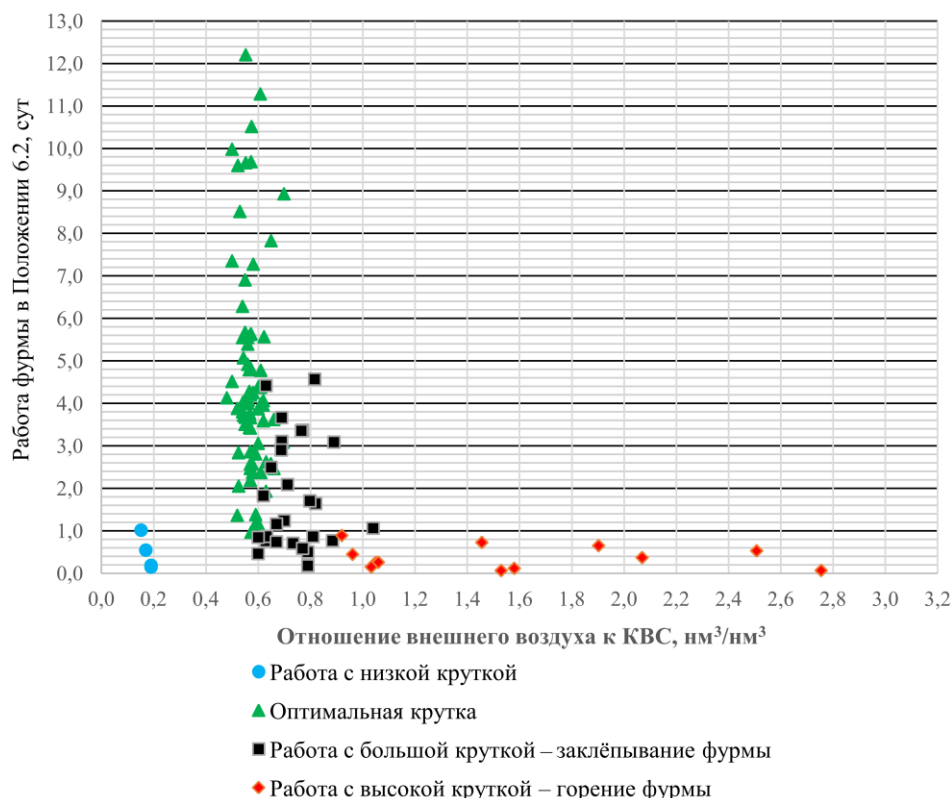


Рис. 8. Зависимость кампании фурмы от параметра крутки за 2023–2025 гг.
Fig. 8. Dependence of the tuyere campaign on the twist parameter for 2023–2025

с диаметром воронки обратных токов не выше 51 мм. В этом случае полное смешение смеси обеспечивается у устья наконечника. Дутьевая струя – сомкнутая.

Для быстрого и оперативного расчёта и оценки крутки в пределах от 0,4 до 0,9 (рис. 7) предложено использовать следующую формулу [2]:

$$\theta = \frac{1}{0,85} \cdot \frac{V_{\text{воздух охлаждения}}}{V_{\text{КВС}}} =$$
$$= 1,18 \cdot \frac{V_{\text{воздух охлаждения}}}{V_{\text{КВС}}} = 1,18 \cdot f,$$

где f – параметр крутки – отношение воздуха охлаждения к смеси КВС, $\text{нм}^3/\text{нм}^3$.

Исследования 2024–2025 гг. подтвердили, что при прочих равных условиях, влияющих на работу печи и фурмы, наибольшая кампания достигается при параметре крутки от 0,45 до 0,7 (рис. 8).

На основании ранее сделанных теоретических обобщений в работах [9–11], проведения исследований за период 2023–2025 гг. и расчётов, выполненных в рамках рассматриваемых моделей [3–4], можно сделать вывод, что для работы в наиболее эффективном режиме (θ на уровне 0,5–0,9)¹ необходимо поддерживать отношение расхода количества охлаждающего воздуха к количеству смеси КВС (f) на уровне 0,45–0,65.

Под работой фурмы в положении 6.2. подразумевается её кампания в период нахождения под дутьём в расплаве [6]. В данный замер не входит режим простоя, режим использования фурмы как топливной горелки и режим плавки настывлей в печи без погружения фурмы в расплав.

Результаты исследования

В соответствии с анализом массива данных из 760 млн значений за указанный период, отражающих различные этапы исследований и наблюдений за работой печи «Аусмелт» в реальном режиме плавки, можно сделать следующие выводы:

1. При f выше 1,0 ($\theta \approx 1,18$) время работы наконечника фурмы не превышало 0,5–0,7 сут, как правило, он обгорал из-за интенсивного перемешивания расплава при высокой крутке, нередко сопровождающегося и

¹ В более ранних работах по меньшему количеству наблюдений указывался интервал θ на уровне 0,5–0,8 и, соответственно, f на уровне 0,4–0,60. Уточнение интервала устойчивой работы фурмы было произведено на основании базы данных наблюдений и исследований за 2025 г.

прогаром тела трубы охлаждения фурмы. Характерный вид наконечника в этом режиме представлен на рис. 9.



Рис. 9. Обгорание наконечника и прогар тела фурмы
Fig. 9. Burning of the tip and burnout of the tuyere body

2. При соотношении воздуха охлаждения к смеси КВС на уровне 0,7–0,9 кампания наконечника составляла 0,5–2,0 сут, редко – 3–4 сут за счёт использования операторами печи специальных приёмов, рассмотренных ниже.

Наконечник не горел, а заклёпывался, наиболее характерный вид для этого режима представлен на рис. 2.

В качестве относительно длительной кампании работы фурмы в режиме завальцовывания (4,53 сут при $f = 0,81$) покажем 6530 замеров по фурме № 1 в мае 2024 г. (рис. 10). В этом случае операторы печи своевременно реагировали на начало процесса завальцовывания, не допуская заклёпывания наконечника, и использовали режим работы фурмы с оптимальным параметром крутки 0,5–0,6, что приводило к обгоранию замятого наконечника и продолжению его кампании.

Причины, побуждающие работать в режиме высокой крутки, подробно изложены в работе [6] и поэтому далее не анализируются.

После выполнения анализа и выработки гипотезы возникновения завальцовывания или заклёпки наконечника на предприятии стали осознанно бороться с этим явлением, управляя процессом крутки, продлевая тем самым

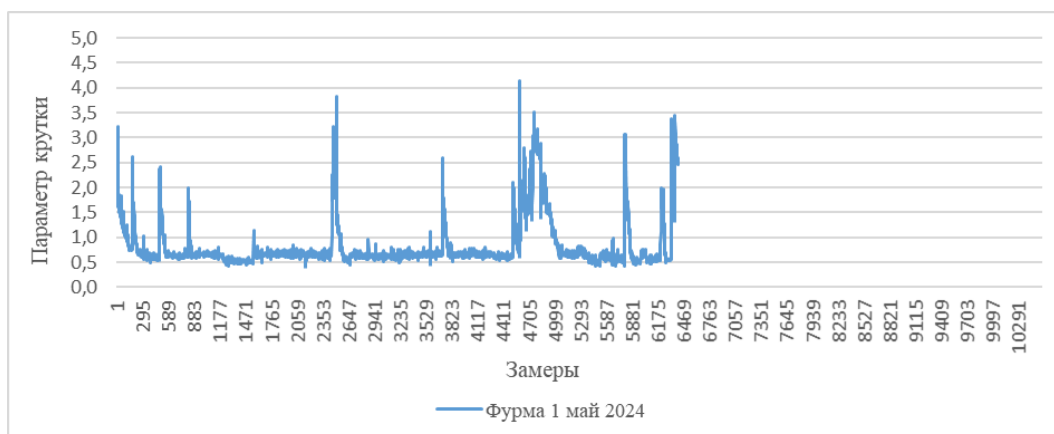


Рис. 10. График работы фурмы в режиме завальцовки и восстановление её работоспособности путём перевода в оптимальный режим продувки
Fig. 10. Graph of the tuyere's operation in rolling mode and restoration of its operability by switching to the optimal blowing mode

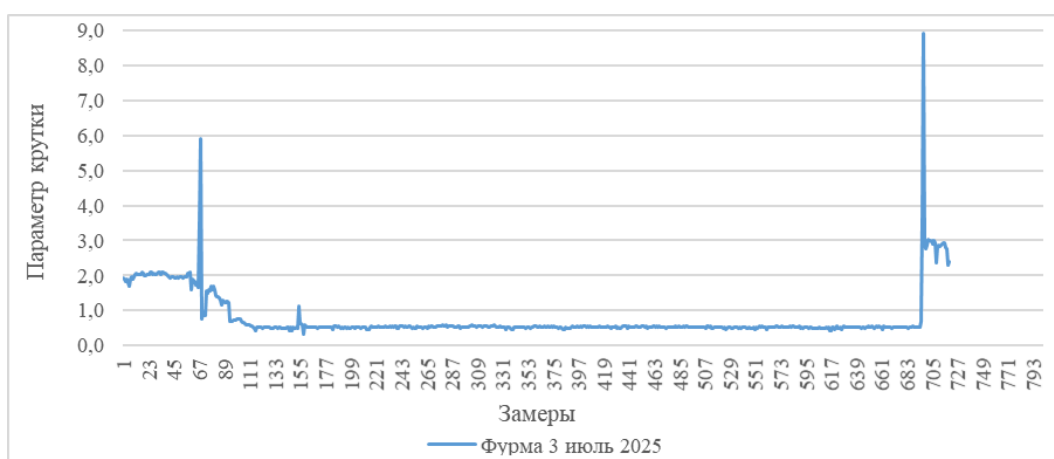


Рис. 11. График работы фурмы в режиме завальцовки
Fig. 11. Graph of the tuyere's operation in rolling mode

кампанию фурмы. Характерным примером этого управляющего воздействия является работа фурмы № 3 в июле 2025 г. (рис. 11).

Работа с первоначальной высокой круткой, связанной с разогревом холодной ванны печи, с 90-й минуты была переведена в оптимальный режим, и фурма устойчиво работала до 718-го замера. Замена фурмы была произведена в связи с остановом печи для очистки ремонта котла-утилизатора.

3. Рассматривая интервал работы фурмы при f , равном 0,4–0,7 (см. рис. 8), отметим, что при росте кампании фурм до 12 сут наблюдаются периоды с низкой длительностью её функционирования.

Эта ситуация возникает в связи с многочисленными остановами печи из-за прогаров кессонов, нарушения работы котла-утилизатора, сбоев подачи шихты, ремонтов основного и вспомогательного оборудования, очистки

котла от пыли и т. д., и т. п. В соответствии со сложившейся практикой работы на печи «Аусмелт» в АО «Карабашмедь» при останове длительностью более двух часов фурму в печи меняют на новую независимо от её состояния.

Принятие решения об изменении режима работы фурмы было осуществлено после рассмотрения и принятия гипотезы её работы, подтверждённой практикой наблюдений за печью в процессе выполнения производственной программы и выработке способов управления круткой, в феврале 2024 г. В первоначальный период наблюдалось устойчивое повышение средней кампании фурмы с 3 до 6 сут (рис. 12, точки 1–34), но далее сложилась тенденция по снижению её кампании до достигнутого ранее уровня (см. рис. 12, точки 35–73). Причиной этого явления стало аварийное состояние печи, приводящее почти

к ежедневным остановкам для текущего ремонта оборудования. Несмотря на ровный и стабильный ход работы фурмы по уровню

крутки в отдельные периоды отсутствия аварийных ситуаций (рис. 13, 14), общая тенденция приводила к снижению кампании фурмы



Рис. 12. График кампании фурм за период с 04.2024 г. по 08.2025 г., работающих в оптимальном режиме f , равном 0,4–0,7, с линейной линией тренда изменения кампании их работы
Fig. 12. Graph for the tuyere campaigns for the period from April 2024 to August 2025, operating in optimal mode f equal to 0.4 to 0.7, with a linear trend line showing changes in their operation

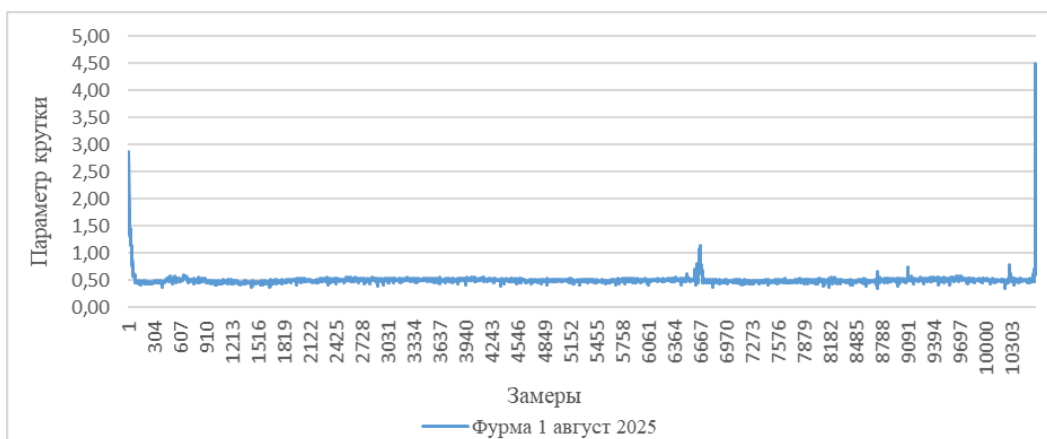


Рис. 13. Кампания фурмы № 1 в августе 2025 г. – 7,35 сут при $f = 0,5$
Fig. 13. Tuyere No. 1 campaign in August 2025 – 7.35 days at $f = 0.5$

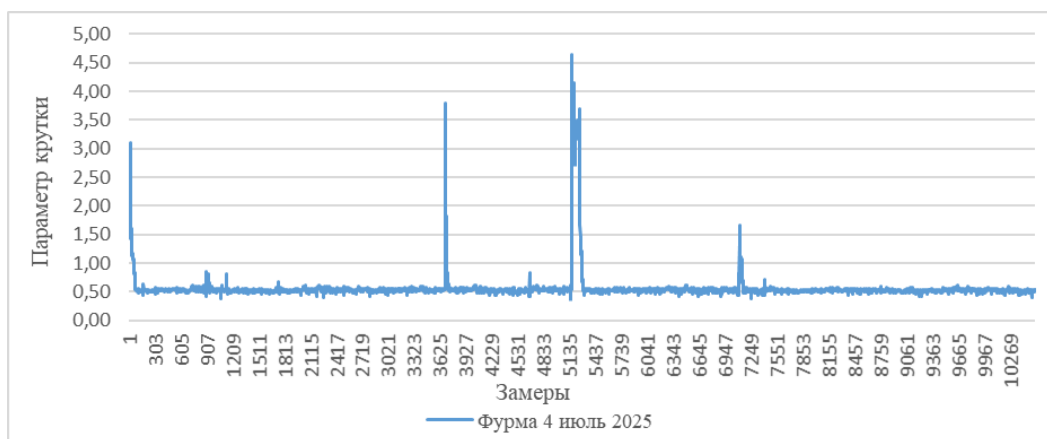


Рис. 14. Кампания фурмы № 4 в июле 2025 г. – 7,83 сут при $f = 0,65$
Fig. 14. Tuyere No. 4 campaign in July 2025 – 7.83 days at $f = 0.65$



Рис. 15. Фурма № 4; $f = 0,54$; 5,65 сут
Fig. 15. Tuyere No. 4; $f = 0,54$; 5.65 days



Рис. 16. Фурма № 1; $f = 0,54$; 2,99 сут
Fig. 16. Tuyere No. 1; $f = 0,54$; 2.99 days

даже в оптимальном режиме плавки. После выполнения капитального ремонта печи и основного оборудования кампания фурмы при работе в оптимальном режиме стала стабильно возрастать, достигая в отдельные периоды сентября – октября 7–10 сут.

Негативный опыт работы АО «Карабаш-медь», связанный с отказом от выпуска расплава из печи в период длительной остановки и отсутствия топливной горелки для поддержания расплава в жидкотекучем виде, приводит к тому, что при последующем разогреве печи фурма работает в режиме «кислородного резака» с максимальной степенью крутки и обогащением дутья в Положении 6.2, это, в свою очередь, создаёт условия для преждевременного износа наконечника.

Но даже в этот период неустойчивой работы печи выявлено, что снижение крутки резко изменило характер износа наконечника. Процесс заклепывания видимо уменьшился, и фурма начала «гореть». Прекращение плавки из-за падения противодавления по количеству случаев снизилось, печь стала работать в более ровном режиме. На рис. 15, 16 показаны обгоревшие наконечники фурм после их замены.

Фактически уменьшение крутки за счёт перераспределения воздуха между воздухом охлаждения и подаваемым на формирование смеси КВС, сохраняющее общий баланс по кислороду дутья, позволяет обеспечивать работу наконечника без значимого заклепывания наконечника, обеспечивая его работоспособность по мере обгорания. При ровной работе печи кампания наконечника «вернулась» к показателям 2011–2021 гг., то есть 3,5–8 сут при увеличенных параметрах кислородного дутья.

4. Работа в интервале крутки ниже 0,4 приводит к снижению кампании наконечника до уровня менее половины суток, что связано с его обгоранием из-за недостатка воздуха на охлаждение внешней трубы фурмы [2, 3].

Обобщая результаты наблюдений за работой фурмы, плановыми и достигнутыми показателями, промышленными испытаниями в период с февраля 2024 г. по август 2025 г., можно сделать следующие выводы:

- работа фурмы в Положении 6.2. с высокой круткой (f на уровне 1–3) при прочих равных условиях будет приводить к обгоранию её наконечника и кампании, не превышающей одни сутки;

- работа фурмы в Положении 6.2. с большой круткой (f на уровне 0,65–0,8) будет приводить к повреждению и завальцовыванию её наконечника без обгорания, кампании от одних до 4 сут;

- работа фурмы в Положении 6.2. при параметре крутки f на уровне 0,4–0,7 будет обеспечивать равномерное обгорание наконечника и максимальную кампанию при благоприятных условиях эксплуатации;

- работа фурмы в Положении 6.2. при параметре крутки f на уровне 0,1–0,3 снижает кампанию наконечника и самой внешней трубы фурмы из-за её обгорания при недостатке воздуха для охлаждения наружной трубы фурмы.

Заключение

В условиях форсирования плавки в печи «Аусмелт» инженеры столкнулись с ситуацией, когда наконечник фурмы, находясь в расплаве в период его продувки кислородовоздушной смесью, завальцовывался или заклепывался без видимых признаков обгорания.

Это явление приводило к нарушению режима плавки, уменьшению производительности печи и вынужденному останову процесса на замену фурмы, её кампания при этом снизилась с 3–6 до 1–3 сут.

Для объяснения этого явления и выработки мер противодействия была разработана гипотеза о механизме процессов массообмена во вращающей ванне печи. На ее основании предложены методы управляющего воздействия на крутку дутьевого факела с целью ликвидации явления заклёпывания. Кроме того, были разработаны рекомендации для операторов печи по управлению круткой в случаях вынужденной работы в неоптимальных режимах плавки и высокой крутке.

Применительно к рассматриваемой конструкции фурмы для упрощения и ускорения анализа крутки предложено использовать зависимость между эффективной круткой и параметром крутки, предложенным авторами для анализа процессов вращения дутья.

Показано и проверено на практике в ходе более чем годичных испытаний на промышленной печи, что для работы в наиболее эффективном режиме (θ на уровне 0,5–0,8) необходимо поддерживать отношение расхода количества охлаждающего воздуха к количеству смеси КВС на уровне 0,45–0,65.

В рамках предложенного механизма массообмена в печи предложено и доказано практикой проведения процесса, что закрученная струя кислородовоздушной смеси, выходящая из устья наконечника фурмы, создаёт в ванне печи несколько зон циркуляции: с отсутствием загрузки шихты; загрузкой шихты; зоны стекания в ванну печи расплава с её огнеупорной футеровки.

Подчеркнём, что вращение расплава со стороны, противоположной загрузке шихты, вторично попадает в зону взаимодействия с дутьевым факелом в связи с формированием отрицательных давлений ниже уровня наконечника. Это способствует повторному взаимодействию кислорода дутья с неокисленными сульфидами железа, повышая тем самым сульфидизацию расплава и обогащая штейновую массу по меди.

При эффективной крутке не выше 0,7–0,8 возникающие обратные токи могут формировать воронку с минимальным диаметром, расплав внутри наконечника не затягивается. Взаимодействие настлы с устьем наконечника не носит систематический характер. Периодически возникающие незначительные эффекты заклёпывания наконечника фурмы самоуничтожаются при его обгорании, создавая условия для колебаний противодавления на устье фурмы и накладывая дополнительные гармоники на явления пульсации дутьевого факела.

Вихревые газовые потоки частично отклоняют падающую шихту, отбрасывая её на стенку печи в районе загрузки, где она плавится и стекает по ней в ванну расплава, формируя свою зону циркуляции.

При движении потока расплавленной шихты по огнеупору она продолжает окисляться кислородом атмосферы печи, создавая условия для возникновения зон высоких температур, взаимодействует со шлакообразующими соединениями в огнеупорном кирпиче и разрушает его как химическим, так и механическим воздействием.

В условиях закрученной дутьевой струи при оптимальной эффективной крутке 0,5–0,8 массообмен в ванне печи улучшается, брызгонос капель расплава в газоходную систему снижается, печь работает более ровно, ликвидируется зона застоя в области противоположной загрузки печи, что снижает вероятность вспенивания расплава при работе на массу с высоким содержанием магнетита в нём, при обогащении дутья кислородом выше 50 % и работе на богатые по меди штейны. Между наружной стенкой фурмы и расплавом количество продувов и выбросов газовых струй в атмосферу печи снижается.

Таким образом, опытным путём была подтверждена гипотеза о характере влияния параметров эффективной крутки всех спутных струй фурмы типа TSL на кампанию работы печи, огнеупорной футеровки, наконечника, форму его износа или деформации, кроме того, и на содержание меди в штейне, шлаке при прочих равных условиях. При θ на уровне от 0,5 до 0,8 фурма работает без завальцовывания (заклёпывания) наконечника.

Список литературы

1. Король Ю.А. Методика расчёта параметров закрученных струй применительно к фурме TSL // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2025. Т. 25, № 2. С. 64–77. DOI: 10.14529/met250206
2. Король Ю.А. Особенности работы вертикальной фурмы в прямоточном режиме // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2025. Т. 25, № 2. С. 51–63. DOI: 10.14529/met250205
3. Король Ю.А. Влияние наконечника на обратные токи закрученного дутья в фурме TSL // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2025. Т. 25, № 3. С. 73–81. DOI: 10.14529/met250307
4. Король Ю.А. Турбулентность и профиль распределения скоростей закрученных струй, их влияние на ванну печи // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2025. Т. 25, № 3. С. 82–90. DOI: 10.14529/met250308
5. Король Ю.А. Аусмелт. В 4 т. Т. 1: Автогенные процессы для переработки медного сырья. Екатеринбург: Издательство АМБ, 2024. 320 с.
6. Король Ю.А. Аусмелт. В 4 т. Т. 2: Внедрение и освоение. Екатеринбург: Издательство АМБ, 2024. 456 с.
7. Король Ю.А. Газонасыщенность штейно-шлакового расплава в печи «Аусмелт» и особенности сжигания природного газа в нём // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2025. Т. 25, № 4. С. 5–19. DOI: 10.14529/met250401
8. Король Ю.А. Аусмелт. В 4 т. Т. 3: Теория и модели расчёта. Екатеринбург: Издательство АМБ, 2024. 360 с.
9. Удыма П.Г. Аппараты с погружными горелками. Изд. 2-е, доп. и перераб. М.: Машиностроение, 1973. 272 с.
10. Гущин С.Н., Агеев Н.Г., Крюченков Ю.В. Теоретические основы энерготехнологических процессов цветной металлургии: учеб. для вузов / науч. ред. Ю.Г. Ярошенко. Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2000. 312 с.
11. Шалыгин Л.М. Исследование гидроаэромеханики и тепловые расчёты конверторов цветной металлургии и пути их совершенствования: дис. ... д-ра техн. наук. Л.: Горный ин-т им. Г.В. Плеханова, 1965. 398 с.

References

1. Methodology for calculating parameters of swirling jets as applied to TSL lance. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2025;25(2):64–77. (In Russ.) DOI: 10.14529/met250206
2. Korol Yu.A. Features of vertical lance operation in direct-flow mode. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2025;25(2):51–63. (In Russ.) DOI: 10.14529/met250205
3. Korol Yu.A. Effect of tip on swirling blast reverse currents in a TSL lance. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2025;25(3):73–81. (In Russ.) DOI: 10.14529/met250307
4. Korol Yu.A. Turbulence and velocity distribution profile of swirling jets and their influence on the furnace bath. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2025;25(3):82–90. (In Russ.) DOI: 10.14529/met250308
5. Korol Yu.A. *Ausmelt. V 4 t. T. 1: Avtogennye protsessy dlya pererabotki mednogo syr'ya* [Ausmelt. In 4 volumes. Vol. 1: Autogenous Processes for Processing Copper Raw Materials]. Ekaterinburg: AMB Publ., 2024. 320 p. (In Russ.)
6. Korol Yu.A. *Ausmelt. V 4 t. T. 2: Vnedrenie i osvoenie* [Ausmelt. In 4 volumes. Vol. 2: Implementation and Development]. Ekaterinburg: AMB Publ., 2024. 456 p. (In Russ.)
7. Korol Yu.A. Gas saturation of the matte-slag melt in the Ausmelt® TSL furnace and the special aspects of natural gas combustion therein. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2025;25(4):5–19. (In Russ.) DOI: 10.14529/met250401
8. Korol Yu.A. *Ausmelt. V 4 t. T. 3: Teoriya i modeli rascheta* [Ausmelt. In 4 volumes. Vol. 3: Theory and Calculation Models]. Ekaterinburg: AMB Publ., 2024. 360 p. (In Russ.)
9. Udyma P.G. *Apparaty s pogruzhnymi gorelkami* [Apparatus with immersion burners]. 2nd edition, revised and supplemented. Moscow: Mashinostroenie, 1973. 272 p. (In Russ.)
10. Gushchin S.N., Ageev N.G., Kryuchenkov Yu.V. *Teoreticheskie osnovy energotekhnologicheskikh protsessov tsvetnoy metallurgii: ucheb. dlya vuzov* [Theoretical framework of energy-

technological processes in non-ferrous metallurgy: textbook for universities]. Ekaterinburg: USTU–UPI, 2000. 312 p. (In Russ.)

11. Shalygin L.M. *Issledovanie gidroaeromekhaniki i teplovye raschety konvertorov tsvetnoy metallurgii i puti ikh sovershenstvovaniya: dis. d-ra tekhn. nauk* [Study of Hydro-Aeromechanics and Thermal Calculations of Non-Ferrous Metallurgy Converters and Ways to Improve Them. Doct. sci. diss.]. Leningrad: Plekhanov Mining Institute, 1965. 398 p. (In Russ.)

Информация об авторе

Король Юрий Александрович, канд. техн. наук, инженер, АО «Русская медная компания», Екатеринбург, Россия; U.Korol@mail.ru.

Зубов Павел Викторович, инженер, АО «Карабашмедь», Карабаш, Россия; zubov_pavel@karmed.ru.

Евсеев Владимир Александрович, инженер, АО «Карабашмедь», Карабаш, Россия; evseev_vladimir@karmed.ru.

Information about the author

Yuriy A. Korol, Cand. Sci. (Eng.), Engineer, JSC Russian Copper Company. Ekaterinburg, Russia; U.Korol@mail.ru.

Pavel V. Zubov, Engineer, JSC Karabashcopper, Karabash, Russia; zubov_pavel@karmed.ru.

Vladimir A. Yevseyev, Engineer, JSC Karabashcopper, Karabash, Russia; evseev_vladimir@karmed.ru.

Статья поступила в редакцию 10.10.2025

The article was submitted 10.10.2025