

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ И ПРОФИЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТЕЙ ЗАКРУЧЕННЫХ СТРУЙ, ИХ ВЛИЯНИЕ НА ВАННУ ПЕЧИ

Ю.А. Король, U.Korol@mail.ru

АО «Русская медная компания», Екатеринбург, Россия

Аннотация. Наблюдения за работой печи «Аусмелт» при переработке различных сульфидных материалов в условиях выполнения производственной программы, а также теоретические обоснования на основании разработанных математических моделей позволили оценить влияние эффективной крутки на турбулизацию и пульсацию дутьевой струи фурмы TSL. Оценка пульсаций дутья, вызванных конструктивными особенностями фурмы, физико-химическими свойствами расплава, температурой процесса и возникновением вибрационного горения от сжигания природного газа, дала возможность, при прочих равных условиях, прогнозировать и контролировать глубину погружения фурмы в расплав, оценивать эффективную крутку и её изменение по ходу плавки. В соответствии с выполненными расчётами при увеличении глубины погружения фурмы частота пульсаций снижается и при уменьшении глубины погружения в расплав – увеличивается. При постоянной глубине погружения фурмы с ростом скорости истечения воздушной смеси (степени эффективной крутки) – частота колебаний (пульсаций) дутья растёт. Данные особенности закрученных струй позволяют управлять фурмой по регистрируемым звуковым параметрам, исходящим из печи, как инструментальными методами контроля, так и «на слух» оператора печи. Турбулизация закрученных потоков дутьевых струй предотвращает формирование в ванне печи застойных зон, улучшая массообмен и производительность оборудования за счёт вращения расплава. Исследования по дополнительному увеличению турбулизации за счёт крутки спутных струй в противоположных направлениях на действующей промышленной печи «Аусмелт» не позволили выявить видимого положительного влияния на плавку. Анализ работ в данной области исследований других авторов и их сравнение показал полную сопоставимость результатов и выводов между лабораторными испытаниями, теоретическими обобщениями и промышленными испытаниями.

Ключевые слова: вертикальная фурма, Аусмелт, крутка, прямоточные струи, закрученные струи, штейн, шлак, дутьевой режим, кислород, воздух, TSL, частота пульсаций, турбулентность, вибрационное горение

Для цитирования: 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

Original article
DOI: 10.14529/met250308

TURBULENCE AND VELOCITY DISTRIBUTION PROFILE OF SWIRLING JETS AND THEIR INFLUENCE ON THE FURNACE BATH

Yu.A. Korol, U.Korol@mail.ru

JSC Russian Copper Company, Ekaterinburg, Russia

Abstract. Observations of the Ausmelt furnace operation during the processing of various sulphide materials under the conditions of the production programme, as well as theoretical substantiations based on the developed mathematical models allowed to assess the influence of effective swirl on the turbulence and pulsation of the TSL blast jet. Assessment of the blast pulsations caused by the design features of the lance, physical and chemical properties of the melt, process temperature and the occurrence of vibration combustion from natural gas combustion made it possible (all other conditions being equal) to predict and control the depth of the lance immersion into the melt, and to estimate the effective swirl and its change during

the melting process. According to the calculations performed, the pulsation frequency decreases with increasing immersion depth of the lance and increases with decreasing immersion depth into the melt. At a constant immersion depth of the lance, with increasing air mixture outflow velocity (degree of effective swirl), the frequency of oscillations (pulsations) of the blast increases. These features of swirling jets allow controlling the lance by the recorded sound parameters coming from the furnace, both by instrumental control methods and “by ear” of the furnace operator. Turbulization of swirling flows of blast jets prevents the formation of stagnant zones in the furnace bath, improving mass transfer and equipment productivity due to melt rotation. Studies on additional increase of turbulization by twisting the co-current flow jets in opposite directions on the operating Ausmelt industrial furnace did not reveal any visible positive effect on melting. Analyzing the works and research of other authors in this area and the comparison thereof showed complete comparability of the results and conclusions between laboratory tests, theoretical generalizations and industrial tests.

Keywords: vertical lance, Ausmelt®, swirl, straight-through jets, swirling jets, matte, slag, blast mode, oxygen, air, TSL, pulsation frequency, turbulence, vibrating combustion

For citation: 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

Крутка газовоздушного потока в вертикальной погружной фурме для продувки расплава тяжёлых цветных металлов при реализации автогенных процессов является наиболее эффективным способом интенсификации плавки и повышения производительности оборудования [1–7]. Вращение дутьевой струи в фурме и соответствующее вращательное перемещение расплава отличается некоторыми характерными особенностями, отличающими его от печей с прямоточным погружным дутьём. Рассмотрим далее некоторые из них.

Турбулентность и пульсации закрученной струи

Наиболее распространённым типом течения жидкости или газа является турбулентное течение. О. Рейнольдс считал, что основным признаком турбулентного течения является нерегулярное изменение параметров течения или неповторяемость значений скорости в каждый момент в определённой точке потока. При вращении струи она взаимодействует с граничными слоями неподвижной среды, образуя вихри, тем самым интенсифицируя турбулентность и создавая колебания в струе в виде пульсаций.

Для стабилизации потока, уменьшения или увеличения влияния пульсаций применяют турбулизаторы в виде сеток или решёток, вращающихся поперёк струи дисков, наложение звуковых колебаний и т. д., и т. п. В связи с тем, что интенсивность турбулентности в закрученной струе выше значений интенсивности турбулентности, взятых в тех же точках прямоточной струи, наибольшее распростра-

нение получил способ интенсификации массообмена закручиванием струи.

В сечении незакрученной струи существуют вихри примерно одинакового масштаба. В закрученных струях размеры вихрей изменяются значительно: вблизи от оси преобладают мелкие вихри, а ближе к границе струи и в зоне максимальных скоростей – крупные вихри (крупномасштабная турбулентность). Действие крутки как турбулизатора заключается в интенсивном образовании и распаде вихрей. Эффект турбулизации для слабо закрученных струй проявляется до 15 калибров от устья фурмы. Увеличение крутки, с одной стороны, приводит к увеличению поперечных градиентов скорости, которые благодаря вязкости массы с удалением от сопла выравниваются, с другой стороны, крутка стабилизирует турбулентность. В связи с этим влияние явления турбулизации для этого типа струй отмечается до 5 калибров от сопла [8].

Важной турбулентной характеристикой дутья является частота пульсаций. Пульсации возникают как вследствие вращения расплава и движения газовых струй, так и в результате горения газообразного топлива, подаваемого в фурму для обеспечения теплового баланса плавки. Неравномерное горение, характеризующееся определённой периодичностью колебаний всех параметров процесса – давление в зоне горения, до неё и за ней, скорости газов, состава смеси, температуры, скорости горения и других, – называют вибрационным (пульсационным) горением. Частота пульсаций колеблется от нескольких единиц до нескольких тысяч колебаний в секунду. Воз-

можно одновременное существование колебаний низкой и высокой частоты [9, 10].

Вибрационное горение сопровождается повышенным шумом, механическими колебаниями, тряской, вибрацией, как следствие, нарушением герметичности соединений и запорной арматуры на фурме, что создаёт определённые неудобства при эксплуатации и требует понимания для минимизации последствий от этого явления.

В работе [9] выделяют несколько видов вибрационного горения:

- в системе вначале появляются малые возмущения, постепенно приводящие к усилению колебаний («поющее» пламя);
- колебания в системе устанавливаются с одинаковой и постоянной амплитудой;
- частота колебаний не является постоянной величиной и изменяется скачкообразно.

Вибрационное горение может быть вызвано множеством причин, в том числе: особенностями конструкции фурмы (соотношением диаметров труб, степенью крутки, соотношением скоростей спутных потоков, конструкцией завихрителей и т. д.); резкими пульсациями давления горючей смеси перед выходом в наконечник фурмы; гидродинамической неустойчивостью вблизи переходных режимов от ламинарного к турбулентному потокам; пульсациями, характерными горению во фронте пламени; изменениями объёмов газов вследствие их нагрева и расширения, теплоотводом, видом и составом топлива, степенью обогащения дутья кислородом. При увеличении расхода топлива или при повышении концентрации кислорода возможен рост скорости горения смеси, что приводит к увеличению частоты колебаний. С уменьшением скорости горения частота пульсаций снижается.

Средняя частота колебаний при пульсационном горении обратно пропорциональна размеру среднего вихря, соответственно, определяя частоту пульсаций, можно оценивать масштаб турбулентности. Многочисленные натурные исследования показали, что наибольшая частота пульсаций характерна для незакрученных струй. Небольшое закручивание приводит к резкому снижению частоты пульсаций, при дальнейшем увеличении крутки частота пульсаций возрастает вновь [8].

Пульсация дутьевого факела приводит к периодическим возмущениям ванны расплава. В работе [11] показаны частоты пульсации

расплава при проведении замеров на опытной плавильной печи диаметром 0,9 м. В условиях пузырькового режима истечения без крутки струи частота пульсаций составляла 5–6 Гц. При крутке она снижалась на 0,5 Гц.

Для оценки взаимосвязи между скоростью потока, глубиной его погружения и частотой пульсаций факела дутья используют число Струхалия Sh , равное для однофазного потока 0,73.

$$Sh = \frac{f \cdot h}{w} = 0,73 \text{ или } f = 0,73 \cdot \frac{w}{h}, \quad (1)$$

где f – частота пульсаций, Гц; h – глубина погружения в расплав, м; w – скорость дутья, м/с.

Для условий рассмотренной автором фурмы TSL [12, 13] при подаче дутья через внутреннюю трубу с аксиально-лопаточными завихрителями для конструктивной крутки, равной 0,43, средняя расчётная частота пульсаций в секунду в зависимости от расстояния от сопла в калибрах будет равна, Гц [11]:

расстояние x/d :	0,3	1,0	2,0	5,0
частота пульсаций f :	380	320	260	210

В соответствии с данным расчётом и числом Струхалия, равным 0,73, при увеличении глубины погружения фурмы частота пульсаций снижается и при уменьшении глубины погружения в расплав – увеличивается.

При постоянной глубине погружения фурмы с ростом скорости истечения воздушной смеси (степени эффективной крутки) частота колебаний (пульсаций) дутья растёт.

Данные особенности закрученных струй позволяют управлять фурмой по регистрируемым звуковым параметрам, исходящим из печи, как инструментальными методами контроля, так и «на слух» оператора печи. По этим косвенным признакам плавильщики могут оценивать ход плавки, состояние фурмы, степень крутки, прогнозировать управляющие воздействия на работу оборудования.

Профиль закрученной струи

Профиль распределения скорости в точной части фурмы зависит от типа и конструкции завихрителя. Наиболее простая форма наблюдается внутри цилиндрического канала при прямотоке, характерном для подачи природного газа по центральной трубе фурмы TSL. В этом случае скорость газа вдоль стенки канала равна нулю и затем резко увеличивается в направлении к оси канала, выравниваясь на определённом расстоянии от стенки. Во всех точках поперечного сечения плоско-

параллельного потока значения статического давления сопоставимы.

Угол наклона лопаток (3) в фурме (рис. 1) оказывает непосредственное влияние на структуру потока, выраженную через показатель крутки [12, 13]. С увеличением интенсивности крутки возрастают значения тангенциальных составляющих скорости. Уменьшение угла наклона лопаток (α) относительно оси фурмы приводит к тому, что максимум скоростей внутри горелки смещается ближе к оси вращения. Эта особенность позволяет подбором угла наклона лопаток и интенсивности крутки получать любые размеры зоны рециркуляции (обратных токов) вплоть до её полного устранения.

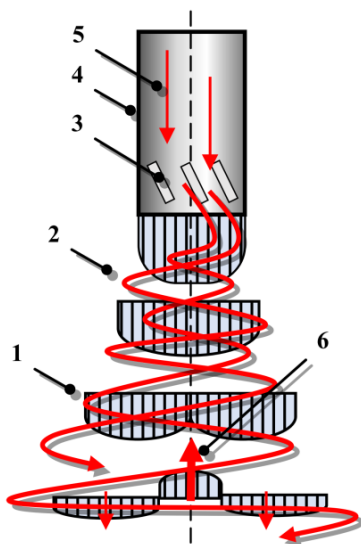


Рис. 1. Профиль скоростей закрученного потока: 1 – профиль скорости; 2 – направление крутки; 3 – лопатки; 4 – фурма; 5 – дутьё; 6 – обратный ток
Fig. 1. Velocity profile of swirling flow: 1 – velocity profile; 2 – direction of swirl; 3 – blades; 4 – tuyere; 5 – blast; 6 – reverse current

По мере удаления от сопла фурмы зона максимальных скоростей всё больше перемещается к периферии, а абсолютные значения максимальных скоростей постепенно уменьшаются. Во всех случаях значения аксиальных скоростей выше, чем тангенциальных, и это различие тем больше, чем больше угол наклона лопаток. В работе [5] при анализе конструктивных особенностей аксиальных завихрителей утверждается, что для определённого типа фурменных устройств при угле наклона лопаток от 0 до 40° обратного тока в приосевой зоне не возникает.

Для затопленных закрученных струй исследователи отмечают, что в поле вихря су-

ществует разрежение, максимальное на оси струи и приближающееся к давлению окружающей среды на границах струи; угол раскрытия факела зависит от интенсивности крутки и может быть более 100°; вдоль и поперёк закрученной струи имеется градиент скоростей и отрицательных давлений; при сильной крутке в осевой зоне струи наблюдается обратное течение (обратный ток).

Наблюдения за работой завихрителей показали, что на выходе из межлопаточного канала линии тока на некотором расстоянии сохраняют направление, заданное углом наклона лопаток, а затем движутся по гиперболической спирали в направлении оси вращения. Чем больше угол наклона лопаток, тем быстрее убывает радиус кривизны этой спирали, который увеличивается также с ростом интенсивности начальной крутки. Такой характер движения закрученного потока возникает при воздействии внешних сил, определяемых кинетической энергией струи, вытекающей из фурмы.

На большем расстоянии от завихрителя действие внешних сил, уравнивающих центробежные силы, возникающие в закрученном потоке, ослабевает, и поток деформируется таким образом, что спираль, по которой движется поток, начинает постепенно увеличивать свою кривизну – раскручиваясь. Вместе с этим появляется зона обратных токов, характерная для сильно закрученных струй. С увеличением кривизны спирали растут потери энергии на внутреннее трение из-за крутого поворота всё больших и больших масс потока. Давление в закрученной струе меняется как поперёк её оси, так и вдоль.

Как уже указывалось ранее в работе [13], исследования и наблюдения за работой фурмы TSL автором с коллективом инженеров¹ проводились на действующей плавильной печи «Аусмелт», что накладывало определённые ограничения на представительность результатов работы. Теоретические расчёты и миллионы параметров замеров не дают полной информации по ходу протекания массообменных процессов в ванне печи. Наблюдения через технологические отверстия в печи за поведением ванны расплава в различные

¹ В работе принимали активное участие инженерно-технические работники АО «Карабашмедь»: Пономарёв С.Е., Зубов П.В., Орлов Е.Г., Евсеев В.А., Кадышев С.В., Кувшинников Н.В., Маркин И.А., Смирнов В.В. и др.

периоды и стадии технологического процесса позволяют контролировать только поверхность расплава и моделировать материальные потоки на основании теоретических прогнозов. Несмотря на то, что фурма TSL используется с 1972 г., единственная, возможно, работа, исследующая эту тему в реальных расплавах, а не в модельных жидкостях, была выполнена и выложена в свободный доступ коллективом авторов под руководством D. Obiso в 2021 г. [11]. В этом исследовании, посвящённом изучению параметров закрученных и прямооточных струй на опытной печи высотой 2,5 м, диаметром 0,9 м, внутренним диаметром наружной фурмы 28 мм, наружным диаметром газовой фурмы 14 мм, внутренним – 12 мм и угле наклона лопаток завихрителя 65° , было отмечено следующее:

– в режиме плавки без завихрителей глубина проникновения струи в расплав больше, она имеет вытянутый профиль (рис. 2а);

– для фурмы с круткой характерен сферический профиль дутьевого факела с меньшей глубиной погружения.

На рис. 3 показаны контуры распределения усреднённых скоростей газовых потоков в жидкой фазе для условий крутки и без неё, смоделированные по результатам качественной оценки проведённых экспериментов [11]. В обоих случаях вращательное движение чётко развивается в верхней части ванны и вокруг дутьевого факела, где эффект волн раз-

вит сильнее. В вихревой конфигурации он простирается почти до низа лабораторной печи, предотвращая (существенно уменьшая) образование застойных зон.

Путём расчёта среднего по объёму этих распределений исследователями определена усреднённая по времени скорость завихрения шлаковой фазы, равная 0,0185 м/с для конфигурации без завихрения и 0,0345 м/с – для фурмы с завихрителем. Наличие завихрителя в воздушной фурме вызывает в ванне вращательное движение с удвоенной интенсивностью по сравнению с конфигурацией без него, что приводит к улучшению скорости смешивания и эффективности массообмена.

D. Obiso с соавт. для визуализации массовых потоков в ванне печи использовал соответствующие индикаторы (трассеры), позволившие получить данные, представленные на рис. 4. Смешение ванны анализировалось путём введения жидкого индикатора с теми же свойствами, что и шлак, в расплав и отслеживание его распределения по времени.

По результатам наблюдений было подтверждено, что при крутке наблюдается более интенсивное смешивание масс и более равномерное распределение индикатора по объёму расплава. Одной из причин этого различия является вращательное движение ванны.

В ходе продувки ванны наблюдается формирование за счёт дутья, образования за счёт химических реакций, отделение и подъём газо-



Рис. 2. Качественная оценка многофазового потока в печи: а – без завихрителя; б – с завихрителем [11]

Fig. 2. Qualitative assessment of multiphase flow in a furnace: a – without a swirler; b – with a swirler [11]

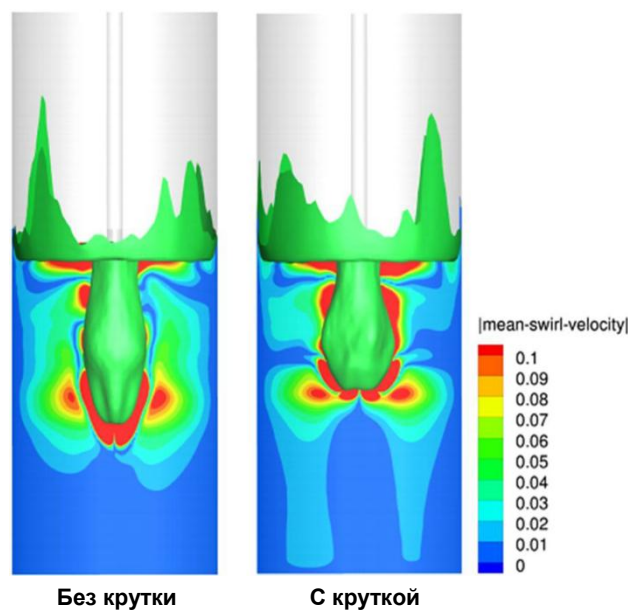


Рис. 3. Усреднённая по времени скорость крутки в шлаковой фазе [11]

Fig. 3. Time-averaged twist rate in the slag phase [11]

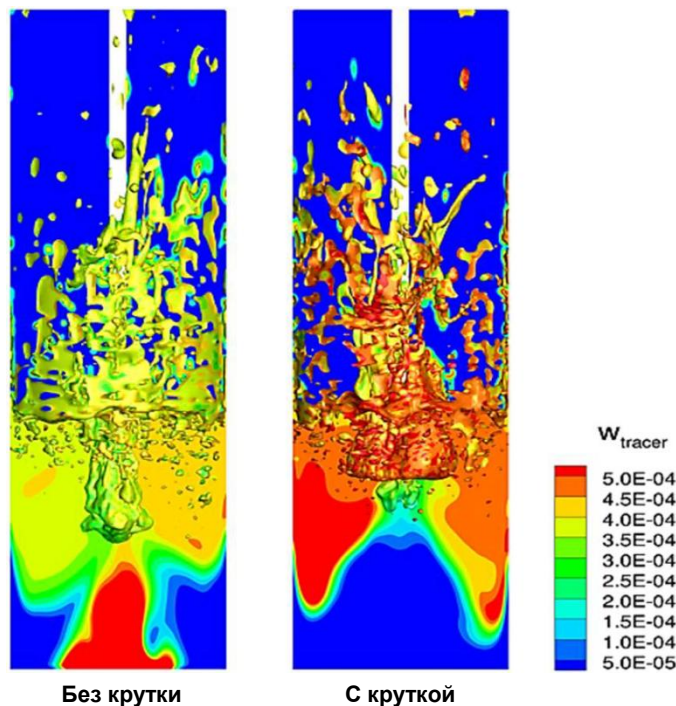


Рис. 4. Распределение массовой доли трассера [11]
Fig. 4. Distribution of the mass fraction of the tracer [11]

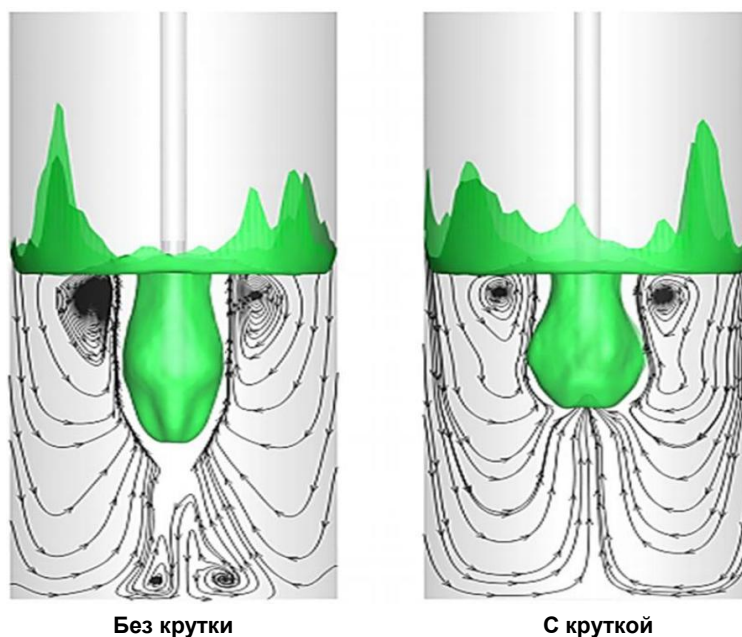


Рис. 5. Направление движения потоков в ванне печи [11]
Fig. 5. Direction of flow in the furnace bath [11]

вых пузырьков из массы расплава в газовую среду. Их циркуляция приводит к массопереносу внутри печи как поперёк сечения, так и вдоль её оси. На рис. 5. смоделировано движение материальных потоков по результатам наблюдения за распределением индикаторов и оценкой скоростей движения газовых потоков.

Из представленного анализа видно, что при поднятии газового пузырька, окружающая жидкость (расплав) утягивается вверх, и в то же время другая жидкость засасывается снизу в след пузыря и, следовательно, заменяется жидкостью из соседних областей. При крутке дутья в ванне печи отсутствуют застойные условно независимые зоны циркуля-

ции, вся ванна хорошо перемешивается. При прямоточном дутье наблюдаются зоны застоя, не участвующие в общем массообмене.

Вращение ванны расплава

Наблюдения за работой печи «Аусмелт» позволили выявить эффект видимого вращения ванны расплава в печи, даже при отсутствии вращения дутьевого факела, связанного, по-видимому, с истечением расплава через нижнее боковое отверстие сифона. Направление вращения является чисто случайным фактором или определяется условиями первоначального импульса касательно к объёму ванны. Направление этого импульса определяется конструкцией печи, геометрическими параметрами внутренних объёмов, отверстия, уровня расплава в печи и на выходе из сифона. Без внешней крутки на параметры вращения будут оказывать влияние плотность и вязкость расплава, площадь отверстия, давление и температура в печи.

Исследования на лабораторной печи [11] позволили увидеть аналогичный эффект, но авторы этой работы не выявили (не обозначили) причины возникновения этого явления, а лишь констатировали, что независимо от наличия завихрителей в фурме при верхней продувке расплава он вращается, только при крутке его интенсивность увеличивается и все соответствующие характеристики изменяются.

При введении в расплав фурмы с завихрителями дутья он получает дополнительный импульс, усиливающий все критерии вращательного движения и ванны, и газовой среды над ванной.

В рассматриваемой фурме [12, 13] направление вращения дутья определено её конструкцией и направлено справа налево или против часовой стрелки при наблюдении вдоль оси фурмы сверху. Соответственно, расплав вращается также – справа налево. Автор предполагает, что разработчики печи «Аусмелт» выбрали направление вращения справа налево, исходя из взаимного расположения загрузочной воронки, сифона, фурмы и газового аптека, формирующих первоначальный импульс для вывода расплава из печи в этом направлении.

С 2007 и вплоть до 2022 г. инженеры компании АО «Карабашмедь» десятки раз экспериментировали с фурмами, имеющими разнонаправленные крутки для воздуха охлаждения и смеси КВС. При этом вращение в

трубе охлаждения всегда было справа налево. Цель данной работы состояла в улучшении массообмена в печи за счёт формирования спутных потоков с противоположным вращением. По результатам исследований на промышленной печи в условиях её эксплуатации инженерами компании было сделано заключение о бесперспективности этого направления модернизации печи. Высокая и хаотичная турбулизация дутьевых потоков приводили к тому, что кампания наконечника фурмы, а нередко и основного тела фурмы, не превышала 1,0–1,5 суток. В печи наблюдалось повышенное брызгообразование и каплеунос, при этом стабильного и видимого увеличения производительности печи не фиксировалось.

Заключение

Наблюдения за работой печи «Аусмелт» в реальном режиме времени при переработке различных сульфидных материалов в условиях выполнения производственной программы, а также теоретические обоснования на основании разработанных математических моделей позволили оценить влияние эффективной крутки на турбулизацию и пульсацию дутьевой струи фурмы TSL.

Оценка пульсаций дутья, вызванных конструктивными особенностями фурмы, физико-химическими свойствами расплава, температурой процесса и возникновением вибрационного горения от сжигания природного газа дала возможность, при прочих равных условиях, прогнозировать и контролировать глубину погружения фурмы в расплав, оценивать эффективную крутку и её изменение по ходу плавки.

В соответствии с выполненными расчётами при увеличении глубины погружения фурмы частота пульсаций снижается и при уменьшении глубины погружения в расплав – увеличивается, что увязано с прямой зависимостью между частотой пульсаций и глубиной погружения рассматриваемой фурмы. Так, при частоте пульсации 380 Гц устье наконечника фурмы находится на глубине 0,3 калибра, при частоте 210 Гц – на глубине 5 калибров.

При постоянной глубине погружения фурмы с ростом скорости истечения воздушной смеси (степени эффективной крутки) – частота колебаний (пульсаций) дутья растёт.

Данные особенности закрученных струй позволяют управлять фурмой по регистрируемому звуковым параметрам, исходящим из

печи, как инструментальными методами контроля, так и «на слух» оператора печи. По этим понимаемым, а не интуитивным косвенным признакам плавильщики могут оценивать ход плавки, состояние фурмы, степень крутки, прогнозировать управляющие воздействия на работу оборудования.

Турбулизация закрученных потоков дутьевых струй предотвращает формирование в ванне печи застойных зон, улучшая массообмен и производительность оборудования за счёт вращения расплава.

Исследования по дополнительному увеличению турбулизации за счёт крутки спутных струй в противоположных направлениях на действующей промышленной печи «Аусмелт» не позволили выявить видимого положительного влияния на плавку.

Анализ работ в данной области исследований других авторов и их сравнение показали полную сопоставимость результатов и выводов между лабораторными испытаниями, теоретическими обобщениями и промышленными испытаниями.

Список литературы

1. Extractive Metallurgy of Copper / M.E. Schlesinger, K.C. Sole, W.G. Davenport, G.R.F. Alvear Flores. Sixth Edition. Elsevier Ltd., 2022. 573 p. ISBN 978-0-12-821875-4.
2. Wood J., Matuszewicz R. Decarbonisation of the Outotec® Ausmelt Process // Conference Proceedings of Copper 2019. Vancouver, Canada, 2019. URL: <https://www.researchgate.net/publication/343097593.3>.
3. Copper Smelting: 2019 Copper Smelting Data / S. Wang, S.P. Yao, T. Gonzalez, A. Siegmund // 9th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-72138-5>.
4. Joubert H., Nikolic S., Mc Dougall I. Design, Construction and Performance of the Copper Cooling System Installed in the First ISACONVERT™ Copper Converting Furnace // International Conference. Santiago, Chile, 2023.
5. Baldock B.R., Short W.E. Australian Technology on the World Scene – Update on Ausmelt Plants and Projects // MINPREX 2000: International Congress on Mineral Processing and Extractive Metallurgy, Melbourne, Australia, September 11–13, 2000. P. 169–174.
6. Matuszewicz R., Baldock B.R., Robert J.S. Ausmelt Technology for Recycling of Computer Boards and Other High Value Materials // EMC 2001, 18–21 September, 2001, Friedrichshafen, Germany. Vol. 2. P. 151–163.
7. URL: https://www.researchgate.net/publication/270337912_AUSMELT_TECHNOLOGY-DEVELOPMENTS_IN_COPPER.
8. Аэродинамика закрученной струи / Р.Б. Ахмедов, Т.Б. Балагула, Ф.К. Рашидов, А.Ю. Сакаев; под ред. Р.Б. Ахмедова. М.: Энергия, 1977. 240 с.
9. Евдокименко А.И., Костерин В.В. Природный газ в цветной металлургии. М.: Металлургия, 1972. 240 с.
10. Сизов А. М. Газодинамика и теплообмен газовых струй в металлургических процессах. М.: Металлургии, 1987. 256 с.
11. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11663-021-02233-3>.
12. 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
13. 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

References

1. Schlesinger M.E., Sole K.C., Davenport W.G., Alvear Flores G.R.F. *Extractive Metallurgy of Copper*. Sixth Edition. Elsevier Ltd., 2022. 573 p. ISBN 978-0-12-821875-4.
2. Wood J., Matuszewicz R. Decarbonisation of the Outotec® Ausmelt Process. In: *Conference Proceedings of Copper2019*. Vancouver, Canada, 2019. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/343097593.3>.

3. Wang S., Yao S.P., Gonzalez T., Siegmund A. Copper Smelting: 2019 Copper Smelting Data. In: *9th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing*. Available at: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-72138-5>.

4. Joubert H., Nikolic S., McDougall I. Design, Construction and Performance of the Copper Cooling System Installed in the First ISACONVERT™ Copper Converting Furnace. In: *International Conference*. Santiago, Chile, 2023.

5. Baldock B.R., Short W.E. Australian Technology on the World Scene – Update on Ausmelt Plants and Projects. In: *MINPREX 2000: International Congress on Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. Melbourne, Australia, September 11–13, 2000. P. 169–174.

6. Matusiewicz R., Baldock B.R., Robert J.S. Ausmelt Technology for Recycling of Computer Boards and Other High Value Materials. In: *EMC 2001*, September 18–21, 2001, Friedrichshafen, Germany. Vol. 2. P. 151–163.

7. Available at: https://www.researchgate.net/publication/270337912_AUSMELT_TECHNOLOGY-DEVELOPMENTS_IN_COPPER.

8. Akhmedov R.B., Balagula T.B., Rashidov F.K., Sakaev A.Yu. *Aerodinamika zakruchennoy strui* [Aerodynamics of a Swirling Jet]. Moscow: Energiya, 1977. 240 p. (In Russ.)

9. Evdokimenko A.I., Kosterin V.V. *Prirodnyy gaz v tsvetnoy metallurgii* [Natural gas in non-ferrous metallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 1972. 240 p. (In Russ.)

10. Sizov A.M. *Gazodinamika i teploobmen gazovykh struy v metallurgicheskikh protsessakh* [Gas Dynamics and Heat Transfer of Gas Jets in Metallurgical Processes]. Moscow: Metallurgiya, 1987. 256 p. (In Russ.)

11. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11663-021-02233-3>.

12. Korol Yu.A. 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

13. 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

Информация об авторе

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

Information about the author

Yuriy A. Korol, Engineer, JSC Russian Copper Company. Ekaterinburg, Russia; U.Korol@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 28.05.2025

The article was submitted 28.05.2025