

МЕТОДИКА РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ ЗАКРУЧЕННЫХ СТРУЙ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ФУРМЕ TSL

Ю.А. Король, U.Korol@mail.ru

АО «Русская медная компания», Екатеринбург, Россия

Аннотация. Фурма типа TSL работает в режиме крутки спутных струй воздуха охлаждения и кислородовоздушной смеси (КВС). Это позволяет обеспечивать её охлаждение при погружении в расплав и организацию высокотемпературных процессов автогенной плавки в условиях печей Аусмелт и Айзасмелт. Вращение дутьевого факела улучшает массообмен в печи и повышает её производительность. Рассмотрение теоретических основ процессов крутки спутных струй, позволило разработать методику расчёта их основных параметров для условий плавки в печи Аусмелт и сделать математический анализ для различных режимов дутья.

В соответствии с выполненной оценкой мы наблюдаем зависимость эффективной крутки как от конструктивной крутки, так и от количества и скорости истечения дутьевой смеси из завихрителей. Увеличение эффективной крутки спутных потоков создаёт предпосылки для образования обратных токов в устье фурмы, диаметр воронки которых становится сопоставимым с диаметрами внутренних труб фурмы. Увеличение диаметра воронки обратных токов сопровождается ростом угла раскрытия струи и уменьшением глубины проникновения в расплав дутьевого факела.

Для оценки эффективности крутки предложена модель её расчёта применительно к печам Аусмелт и Айзасмелт. Контроль параметров крутки позволяет прогнозировать технологические параметры плавки и эффективно управлять процессом переработки сырья. Одновременно с этим при понимании параметров конструктивной крутки для конкретной используемой фурмы оператор на печи по изменению контролируемого приборами противодействия (сопротивления) дутью может контролировать состояние наконечника фурмы, не вынимая её из расплава, тем самым оптимизируя режим плавки и сокращая время простоя для обслуживания фурмы.

Ключевые слова: вертикальная фурма, Аусмелт, Айзасмелт, эффективная крутка, прямоточные струи, закрученные струи, дутьё, штейн, шлак, дутьевой режим, кислород, воздух, КВС, TSL

Для цитирования: 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

Original article
DOI: 10.14529/met250206

METHODOLOGY FOR CALCULATING PARAMETERS OF SWIRLING JETS AS APPLIED TO TSL LANCE

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

JSC Russian Copper Company, Ekaterinburg, Russia

Abstract. The TSL lance operates in the mode of swirling cocurrent jets of cooling air and the oxygen-air mixture (OAM). This ensures its cooling when immersed in the melt and organizing high-temperature autogenous melting processes in Ausmelt® and ISASMELT™ furnaces. Rotation of the blast torch improves mass transfer in the furnace and increases its productivity. Consideration of the theoretical foundations of the cocurrent jet swirling processes allowed developing a method for calculating their main parameters for melting conditions in the Ausmelt® furnace and to make a mathematical analysis for various blast modes.

In accordance with the assessment, the dependence of the effective swirl both on the design swirl and on the amount and speed of the blast mixture flow from the swirlers can be observed. An increase in the effective swirl of cocurrent jets creates the prerequisites for reverse currents forming at the lance mouth; the diameter of its funnel becomes comparable with the diameters of the inner tubes of the lance. An increase

in the diameter of the funnel of reverse currents is accompanied by an increase in the angle of the jet opening and a decrease in the depth of penetration of the blast torch into the melt.

To evaluate the swirling efficiency, a model for its calculation is proposed for Ausmelt® and ISASMELT™ furnaces. Monitoring the swirling parameters allows predicting the process parameters of melting and effectively managing the raw material processing. When understanding the parameters of the design swirl for a specific lance used, a furnace operator can control the condition of the lance tip by changing the backpressure (resistance) controlled by the devices without removing it from the melt, thereby optimizing the melting mode and reducing the downtime for lance maintenance.

Keywords: vertical lance, Ausmelt®, ISASMELT™, efficient swirl, straight-through jets, swirling jets, blasting, matte, slag, blast mode, oxygen, air, OAM, TSL

For citation: 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

При продувке расплавов тяжёлых цветных металлов воздушнокислородными смесями путём частичного погружения фурмы в расплав её наконечник подвергается воздействию высоких температур и агрессивной шлаковоштейновой среды в окислительных условиях дутьевого факела. Использование традиционных приёмов охлаждения стенок фурмы в расплаве с использованием теплоносителя в виде воды и водовоздушных смесей имеет определённые ограничения, связанные с возможным прогаром тела водяной рубашки, попаданием воды под поверхность расплава и последующим взрывом в печи. Для обеспечения безопасности эксплуатации вертикальной фурмы в расплаве разработчики процесса TSL предложили конструкцию фурменной трубы, где в качестве теплоносителя используется воздух. Это исключило возможность попадания воды в расплав, но одновременно снизило теплопередачу от тела фурмы к теплоносителю и резко снизило кампанию последней в условиях автогенной плавки. Снижение показателей по отводу тепла от тела фурмы вызвано тем, что теплопроводность воды при 50 °С составляет 0,647 Вт/(м·К), а воздуха при его нагреве рабочей температуры 200 °С – 0,0395 Вт/(м·К), что ниже чем у воды в 16,4 раза. Кроме того, теплопередача ограничивается формированием ламинарных потоков вдоль стенки, создающих пограничный слой, задерживающим теплоотведение.

Для частичной компенсации этого недостатка исследователями было предложено использовать крутку воздуха внутри фурмы и, соответственно, повышение теплопередачи за счёт уменьшения величины ламинарного воздушного слоя у тела металлической трубы [1]. Этот технологический приём получил название TSL и широко используется в автогенных процессах при переработке концентратов тяжёлых цветных металлов.

Формирование закрученных потоков

Для увеличения теплообмена между поверхностью и воздушным потоком возможно использование различных приёмов и устройств, включая: использование режима турбулентного течения, применение шероховатых поверхностей, повышение скорости течения среды, оребрение поверхности теплообмена, применение турбулизаторов потоков и т. д., и т. п. В технической литературе, относящейся в том числе к описанию фурм для кислородных конвертеров в чёрной металлургии, описаны несколько способов получения закрученных струй [2]: комбинация тангенциальных отверстий для подачи дутья с поворотными лопатками; вращение трубы с подачей дутья; вращение воздушного потока в осевом трубопроводе посредством вращающейся перфорированной пластины с отверстиями, расположенными как параллельно к оси, так и под углом к ней; подача дутья в завихритель в осевом и тангенциальном направлениях, что позволяет регулировать крутку, изменяя соотношения потоков; подача части дутья через лопаточный аппарат, а части – в обход завихрителя. Основную массу завихрителей относят к пяти типам: тангенциальному, улиточному тангенциальному, тангенциальному лопаточному, аксиальному (лопаточному), аксиально-тангенциальному (лопаточному).

Конструктивные особенности фурмы на АО «Карабашмедь»

Фурма TSL российского производителя, используемая в печи Аусмелт, состоит из трёх труб, расположенных соосно одна в другой (рис. 1). По центральной внутренней трубе 1 осуществляется подача природного газа, КВС поступает по трубе 2, которая оснащена завихрителями потока для воздуха охлаждения (рис. 2). Труба для подачи природного газа

оборудована завихрителями КВС (см. рис. 2). На рис. 3. показано взаимное размещение завихрителей потока воздуха охлаждения и смеси КВС со стороны наконечника фурмы.

Рассматриваемый тип завихрителей относится к аксиально лопаточному. Завихритель для воздуха охлаждения (рис. 4) имеет восемь лопастей с углом наклона к оси фурмы $44,2^\circ$ [3]. Завихритель для смеси КВС (рис. 5)

оснащён четырьмя лопастями с углом наклона к оси фурмы $21,4^\circ$.

Задача завихрителей, расположенных на теле фурмы по её длине, заключается в создании предварительной крутки струи перед её взаимодействием с завихрителями на головке фурмы и выходом воздуха в наконечник фурмы, обеспечения эффективного теплообмена между воздухом, движущимся вдоль трубы,

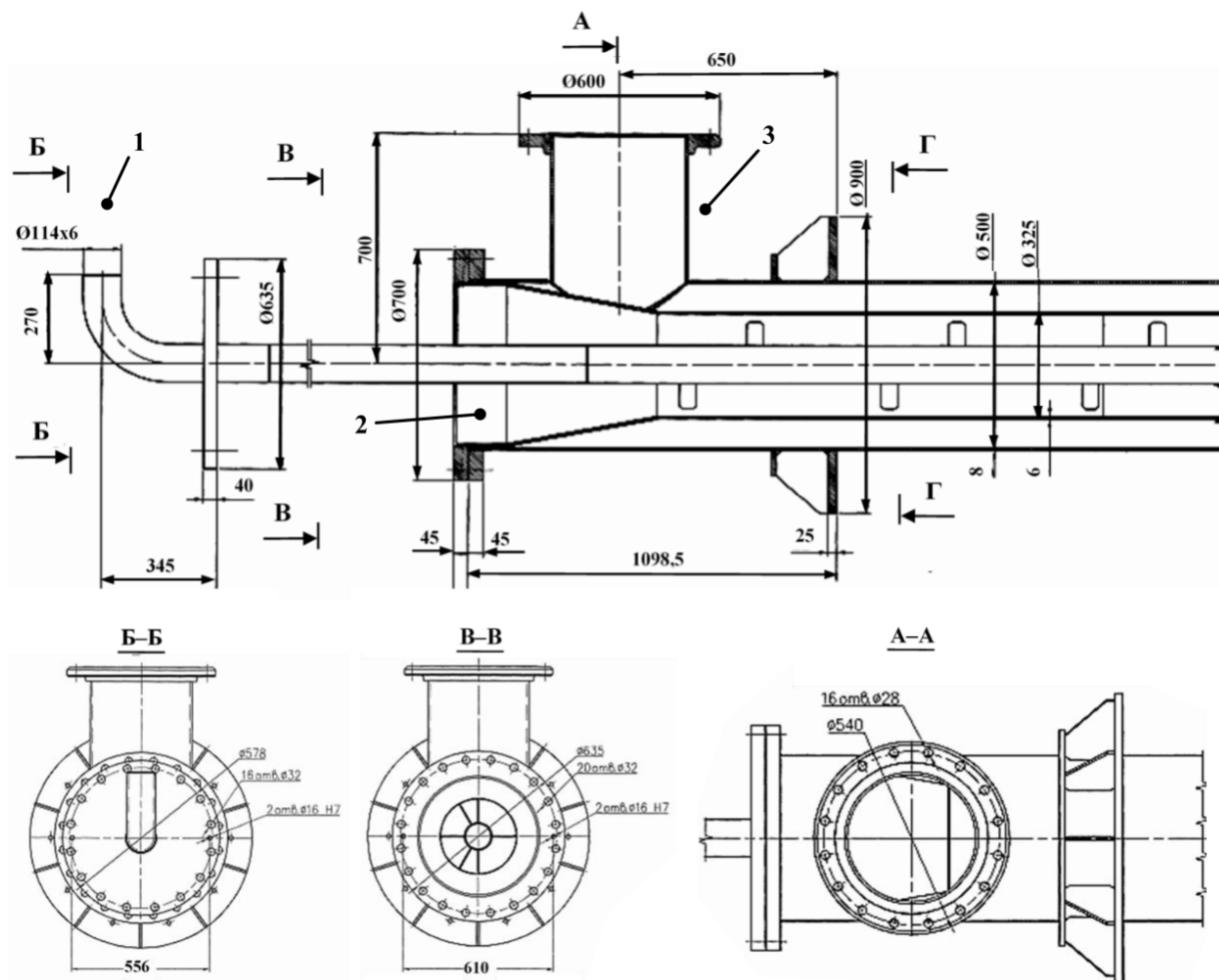


Рис. 1. Фурма TSL АО «Карабашмедь»: 1 – труба для подачи природного газа; 2 – труба для вдувания КВС; 3 – труба для подачи воздуха охлаждения

Fig. 1. TSL tuyere of JSC Karabashmed: 1 – pipe for supplying natural gas; 2 – pipe for injection of KVS; 3 – pipe for supplying cooling air

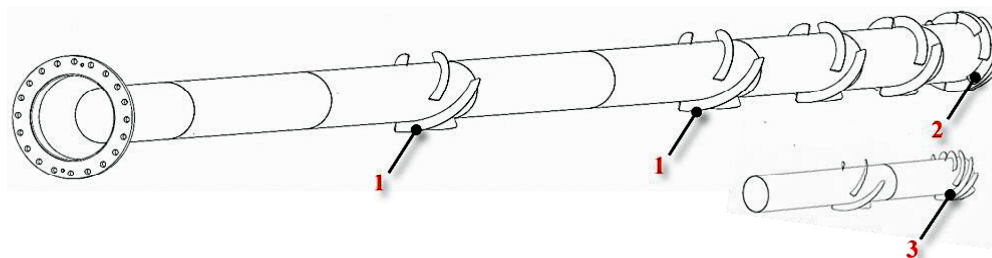


Рис. 2. Конструкция коаксиально-лопаточных завихрителей фурмы АО «Карабашмедь»: 1 – завихрители воздуха для охлаждения фурмы; 2 – завихрители наружного воздуха охлаждения; 3 – завихрители КВС

Fig. 2. Design of coaxial-blade swirlers of the tuyere of JSC Karabashmed: 1 – air swirlers for tuyere cooling; 2 – external air cooling swirlers; 3 – KVS swirlers



Рис. 3. Завихрители воздушных потоков со стороны наконечника фурмы
Fig. 3. Air flow swirls from the tuyere tip side

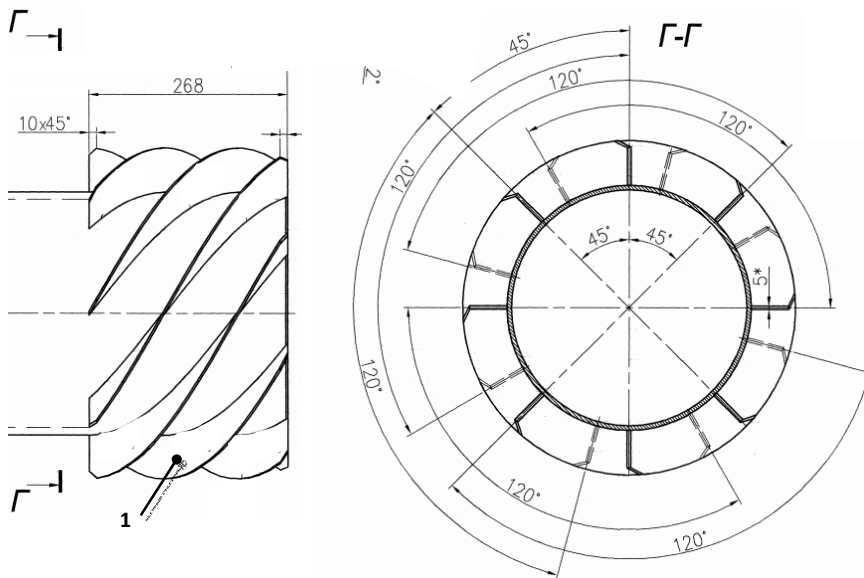


Рис. 4. Конструкция завихрителя для воздуха охлаждения (восемь лопастей) при угле наклона лопаток к оси завихрителя (α) – 44,2°, где 1 – лопатка завихрителя
Fig. 4. Design of a swirler for cooling air (eight blades) with an angle of inclination of the blades to the swirler axis (α) of 44.2°, where 1 – swirler blade

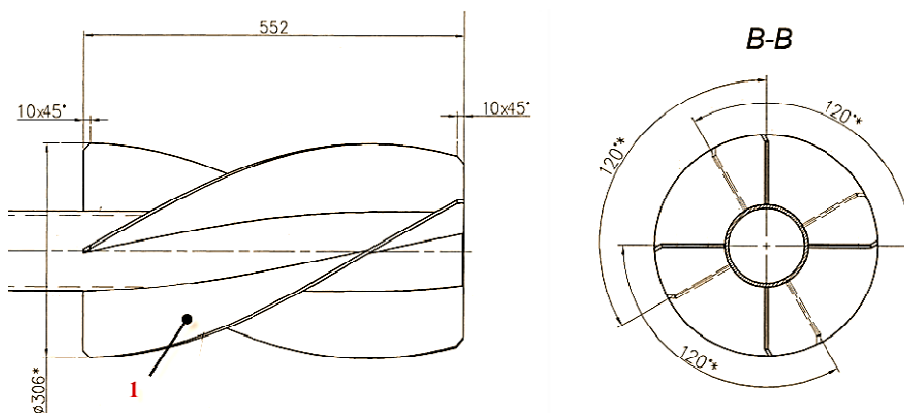


Рис. 5. Конструкция завихрителя для смеси КВС (четыре лопасти) при угле наклона лопаток к оси завихрителя (α) – 21,4°, где 1 – лопатка завихрителя
Fig. 5. Design of a swirler for a KVS mixture (four blades) with an angle of inclination of the blades to the swirler axis (α) of 21.4°, where 1 – swirler blade

и внутренней поверхностью наружной трубы, защищающим фурму от воздействия высоких температур в печи Аусмелт.

Изменяя угол наклона лопаток завихрителей к оси цилиндрического канала, можно задавать необходимую степень крутки, определяющую аэродинамические характеристики струи: угол раскрытия, зону обратных токов, дальность, эжектирующую способность струи, равномерность распределения скорости по сечению сопла струи.

Цель исследования

В печах Аусмелт и Айзасмелт дутьевые фурмы TSL работают в режиме крутки спутных струй. Несмотря на то, что в технической литературе имеется множество описаний принципов работы этого типа фурмы с закрученными потоками, детальные изложения режимов её работы и влияние степени крутки на технологические параметры плавки крайне редки и ограничены по объёму рассматриваемой информации [3–10]. В связи с этим, опираясь на практику работы печи Аусмелт на АО «Карабашмедь», ниже представлена информация по особенностям закрученных струй при верхней продувке газозвушной смесью расплавленного медного штейна, а также предложена математическая модель расчёта закрученных спутных струй для данного типа плавильных агрегатов.

Зависимость теплообмена от скорости и турбулентности среды

Интенсивность теплообмена между воздухом и стенкой фурмы можно оценить через число Нусельта (Nu) в зависимости от турбулентности и скорости движения среды, определяемой критерием Рейнольдса (Re) [11].

А. Сударевым, В. Антоновским и Л. Кузнецовым был изучен локальный теплообмен в трубе длиной $l/d = 100$ с закруткой воздуха аксиально-лопаточным завихрителем с прямыми лопатками с углом крутки от 50 до 78° и соотношением диаметров внутренней и внешней труб от $0,65$ до $0,83$ [12].

Для числа Рейнольдса от 105 до 107 ими была предложена следующая зависимость числа Нусельта от угла крутки α :

$$Nu = 0,026K \cdot (1 + \operatorname{tg}\alpha)^{0,77} \cdot Re^{0,8} \times \exp(0,42 \cdot d^{-3}), \quad (1)$$

где $K = (W_{\max}/W_x)^{0,8}$ – параметр, отражающий изменение максимальной осевой скорости по

длине фурмы к скорости в рассматриваемом сечении.

Результаты определения критерия Нусельта для углов наклона лопаток от 15 до 75° , числа Рейнольдса от 10^4 до $9 \cdot 10^4$ и длины трубы 60 калибров представлены зависимостью

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_0}\right)^{0,25} \times (1 + 0,147 \cdot \alpha^{-0,82}). \quad (2)$$

Во всех рассмотренных случаях для аксиально-лопаточных завихрителей с увеличением скорости движения потока и угла наклона лопаток происходит увеличение интенсивности конвективного теплообмена между потоком воздуха и поверхностью трубы, что приводит к её охлаждению и снижению теплового воздействия на внешнюю трубу высокой температуры газовой атмосферы и расплава в печи.

В соответствии с расчётами и выводами, изложенными в работе [13], аксиально-лопаточный завихритель увеличивает интенсивность конвективного теплообмена в сравнении с гладкой трубой в несколько раз.

Особенности закрученных струй

Закрученная струя характеризуется тремя составляющими скорости – радиальной, аксиальной и тангенциальной, причём около сопла все эти три составляющие могут быть соизмеримы. Радиальная скорость направлена перпендикулярно оси струи, аксиальная – вдоль оси, а тангенциальная – по касательной к окружности вокруг оси струи. В закрученных струях имеется градиент давления как вдоль, так и поперёк струи. В отличие от прямоточных струй, давление во всём объёме закрученной струи ниже давления в окружающей среде.

В слабо закрученных струях аксиальных лопаточных завихрителей имеется максимум аксиальной скорости на оси струи. В расплаве умеренно закрученные струи отличаются от слабо закрученных тем, что в них радиальное движение к оси больше. Жидкая масса в этом случае вращается сильнее, так как максимальная тангенциальная скорость может иметь такой же порядок величины, как и осевая. От сильно закрученных струй умеренно закрученные отличаются тем, что в них зона обратного течения занимает узкую область перед соплом, а затухание скорости происходит медленнее.

Закрученные струи для условий плавки в печах Аусмелт и Айзасмелт можно охарактеризовать следующими параметрами:

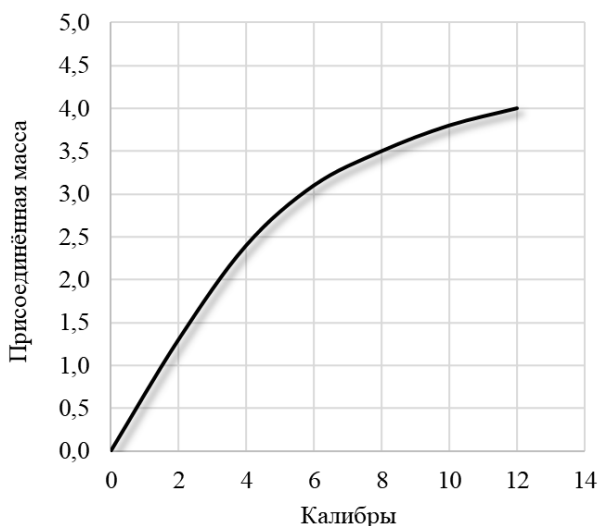
- угол раскрытия (ϕ);
- аэродинамическая длина струи (L) – длина струи вдоль оси до сечения, в котором максимальное значение скорости равно 20 % от скорости струи в устье сопла, измеряемое в долях диаметра цилиндрического канала сопла (калибрах) или в долях эквивалентного диаметра, если сечение отверстия не круглое;
- зона обратных токов в сильно закрученных струях образует течение в приосевой области струи, направленное противоположно основному движению;
- эжектирующая способность струи связана с непрерывным ростом её массы за счёт присоединения масс окружающей среды.

Эжектирующая способность струи

При оценке прироста массы для разного типа струй удобно использовать методику Г. Шлихтинга [11]. Для незакрученной струи объём присоединённой массы ΔM линейно увеличивается с ростом расстояния от устья (x/d) в соответствии с формулой

$$\Delta M = 0,32 \frac{x}{d} \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}}, \quad (3)$$

где ρ – плотность воздуха и расплава, кг/м^3 .



а)

Графическая зависимость эжектирующей способности струи, построенная для незакрученной струи по формуле (3), представлена на рис. 6а. Для неё характерен пропорциональный прирост эжектируемой массы в начальных этапах распространения дутья с постепенным выравниванием на 6–12 калибрах длины струи.

Для закрученной струи количество присоединённой массы зависит от параметра крутки. С увеличением крутки присоединённая масса резко возрастает, причём темп прироста меняется в зависимости от расстояния от устья фурмы. Так, для x/d менее 5 темп больше, чем после 5 калибров, где значение крутки заметно падает (рис. 6б).

Эжектирующая способность закрученной струи может быть оценена по выражению

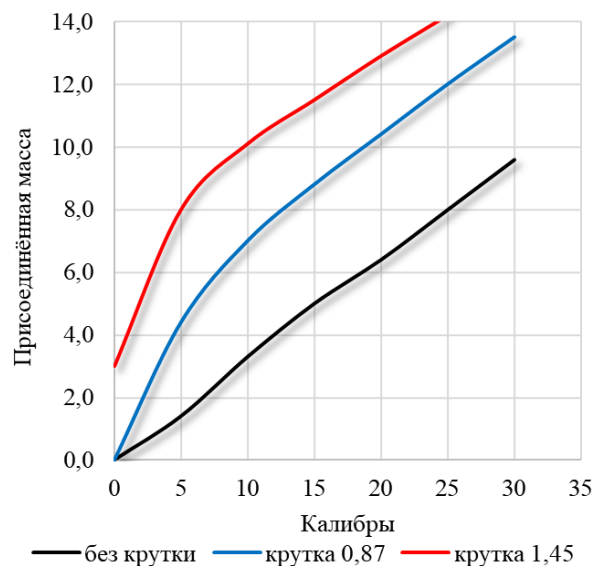
$$\Delta M = (0,32 \frac{x}{d} + kn) \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}}, \quad (4)$$

где ρ – плотность воздуха и расплава, кг/м^3 ;
 k – константа, зависящая от эффективности крутки, экспериментальная величина, равная 4,4, начиная с 10 калибров;

n – показатель крутки.

Для более точного расчёта количества эжектируемой массы на расстоянии до 5 калибров Д.Н. Ляховским [11] предложено использовать формулу

$$\Delta M = (0,5n + 0,207(1 + n) \frac{x}{d}). \quad (5)$$



б)

Рис. 6. Количество присоединённой массы для незакрученной и закрученных струй:
 а – расчёт для прямой струи по формуле (3); б – расчёт для закрученной струи по формуле (4)

Fig. 6. The amount of added mass for non-swirled and swirled jets:
 а – calculation for a straight-through jet using formula (3); б – calculation for a swirled jet using formula (4)

Параметры крютки

Представление о степени закрученной струи даёт эффективный параметр крютки θ , определяемый выражением

$$\theta = \frac{M}{K \cdot R}, \quad (6)$$

где M – момент количества движения струи, постоянный вдоль струи;

K – количество движения струи или осевой импульс струи;

R – размер, характеризующий сопло (радиус, диаметр, гидравлический диаметр).

Коэффициенты M и K находят из выражений:

$$M = 2\pi \int_0^R r^2 \cdot W_a W_\varphi dr; \quad (7)$$

$$K = 2\pi \int_0^R r \cdot (\rho \cdot W_a^2 + P) dr, \quad (8)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³;

P – статистическое давление в точке, где замеряется скорость, кПа;

r – текущее значение радиуса, м;

W_a – аксиальная скорость, м/с;

W_φ – тангенциальная скорость, м/с.

Из рассмотренных зависимостей видно, что параметр крютки зависит как от радиуса выходного сечения фурмы и статического давления в факеле дутья, так и от абсолютных значений и соотношения аксиальной и тангенциальной скоростей.

Рассматривая соотношение аксиальной и тангенциальной скоростей на выходе из сопла через n_p и интегрируя указанные выше формулы, можно получить следующее выражение для эффективного параметра крютки:

$$\theta = \frac{M}{K \cdot R} = \frac{\frac{1}{2} n_p}{1 - \frac{1}{4} n_p^2}, \quad (9)$$

где $n_p = \frac{W_\varphi}{W_a}$ – конструктивный параметр крютки.

Формула (9) справедлива для n_p менее 0,3, при большем соотношении рекомендуется использовать выражение

$$\theta = \frac{M}{K \cdot R} = \frac{\frac{1}{2} n_p}{1 - \frac{1}{2} n_p}. \quad (10)$$

Конструктивный параметр крютки (n_p), который при слабых крютках ($n_p < 0,4$) определяется отношением максимального значения тангенциальной скорости (W_φ) к средней аксиальной скорости (W_a): $n_p = W_\varphi / W_a$.

Для более высокой степени закрутки кон-

структивный параметр крютки n_p определяется по формуле

$$n_p = \frac{8 \cdot M_{cp}}{\pi \cdot K_{cp} \cdot D}. \quad (11)$$

С учётом представленного материала и рекомендации в работе [11], представим методику и выполним расчёт параметров закрученных струй вертикальной фурмы для печи Аусмелт в соответствии с конструктивными особенностями, указанными на рис. 1, 2, 4, 5, и используемыми технологическими режимами плавки (табл. 1).

Для расчёта завихрителя воздуха при охлаждении внешней трубы и для смеси КВС используем формулы:

$$\frac{W_\varphi}{W_a} = \operatorname{tg} \alpha \cdot \frac{D_1^2}{(D_1^2 - d_0^2)}; \quad (12)$$

$$n = \frac{8}{3\pi} \cdot \frac{D_1}{1} \cdot \frac{D_1^3 - d_0^3}{(D_1^2 - d_0^2)^2} \operatorname{tg} \alpha. \quad (13)$$

Угол раскрытия струи φ будет равен $\varphi = 144 \left(\frac{n-0,14}{6,46} \right)^{0,43}$. Относительный диаметр обратных токов в устье канала рассчитаем по формуле

$$\frac{d_{обр}}{D_1} = \left(\frac{n-0,8}{4,37} \right)^{0,49} \quad (14)$$

при $0,85 < n < 1,65$.

Относительная аэродинамическая длина струи L/d :

$$\frac{L}{D_1} = \left(\frac{11}{n} \right)^{0,68} \text{ при } d_0/D_1 = 0,25^1 \quad (15)$$

Аэродинамическую длину струи по представленным формулам не рассчитываем из-за несоответствия отношения диаметров труб заданным критериям. Рассматриваемая конструкция фурмы крютку струй обеспечивает аксиально-лопаточными завихрителями с перпендикулярной к поверхности труб установкой лопаток под углом α к продольной оси фурмы. Для воздуха охлаждения угол α равен 44,2°, для смеси КВС – 21,4°.

Соответственно, конструктивный параметр крютки для воздуха охлаждения будет равен 2,48, угол раскрытия струи – 93°, воронка обратных токов расплава диаметром 0,63 калибра или 282 мм (см. табл. 1). Для смеси КВС конструктивный параметр крютки равен 0,43, струя не имеет обратных токов, угол раскрытия струи – 38°.

¹Для других соотношений диаметров целесообразно применять формулу С.Н. Гущина, описываемую далее.

Таблица 1

Расчёт параметров аксиальных лопаточных завихрителей
для различных углов α

Table 1

Calculation of parameters of axial vane swirlers for different angles α

Трубы	Диаметр внутренний внешней трубы, мм	Диаметр наружный внутренней трубы, мм	Отношение диаметров	Угол наклона лопатей $\alpha, ^\circ$	$\frac{W_\phi}{W_a}$	Конструк- тивный параметр крутки n_p	Угол раскрытия $\phi, ^\circ$	$\frac{d_{обр}}{D_1}$
Охлаж- дения	$D_1 = 450$	$d_0 = 337$	0,75	5	0,20	0,22	22	
				10	0,40	0,45	39	
				15	0,61	0,68	50	
				20	0,83	0,93	58	0,18
				25	1,06	1,19	66	0,31
				30	1,31	1,47	73	0,40
				35	1,59	1,79	80	0,48
				40	1,91	2,14	87	0,56
				44,2¹	2,21	2,48	93	0,63
				50	2,71	3,04	102	
				60	3,94	4,42	121	
70	6,24	7,00	148					
Смесь КВС	$D_2 = 325$	$d_3 = 126$	0,39	5	0,10	0,10		
				10	0,21	0,20	19	
				15	0,32	0,30	29	
				21,4	0,46	0,43	38	
				25	0,55	0,52	42	
				30	0,68	0,64	48	
				35	0,82	0,78	53	
				40	0,99	0,93	58	0,18
				45	1,18	1,11	64	0,27
				50	1,40	1,32	69	0,35
				60	2,04	1,92	83	0,51
70	3,23	3,04	102	0,72				

¹ Жирным шрифтом выделены данные для рассматриваемого варианта фурмы.**Профиль скоростей закрученных потоков**

При схематичном изображении векторов скоростей (рис. 7) учитываем движение дутьевых смесей по концентричным окружностям. На первом этапе анализа эпюры скоростей показаны последовательно для каждой смеси и без учёта наконечника фурмы – в её устье. Угол раскрытия струи представлен с определённой условностью, так как внутри наконечника струя не раскрывается и ограничена стенками наружной трубы.

В соответствии с нормативным документом (ОСТ 24.030.26–72) по проектированию топливных горелок эффективную величину крутки рекомендуется рассчитывать по формуле

$$\theta = \frac{4M}{KD_{рв}}, \quad (16)$$

где $M = 2\pi \int_0^{r_{тр}} \rho W_a W_{\phi m} r^2 dr$ – величина главного вектора момента количества движения;

$K = 2\pi \int_0^{r_{тр}} (\Delta p_{ст} + \rho W_a^2) r dr$ – величина проекции главного вектора количества движения на ось струи;

$D_{рв}$ – диаметр круга, равновеликого выходному сечению кольцевого канала, м,

$$D_{рв} = \sqrt{D^2 - d^2};$$

ρ – плотность среды, кг/м³;

W_a – аксиальная составляющая скорости потока, м/с;

$W_{\phi m}$ – тангенциальная составляющая скорости потока, м/с;

$\Delta p_{ст}$ – разность статистических давлений в струе и окружающей среде, н/м²;

$r_{тр}$ – радиус границы струи, определяемый условно при значении $W_a/W_0 = 0,1$.

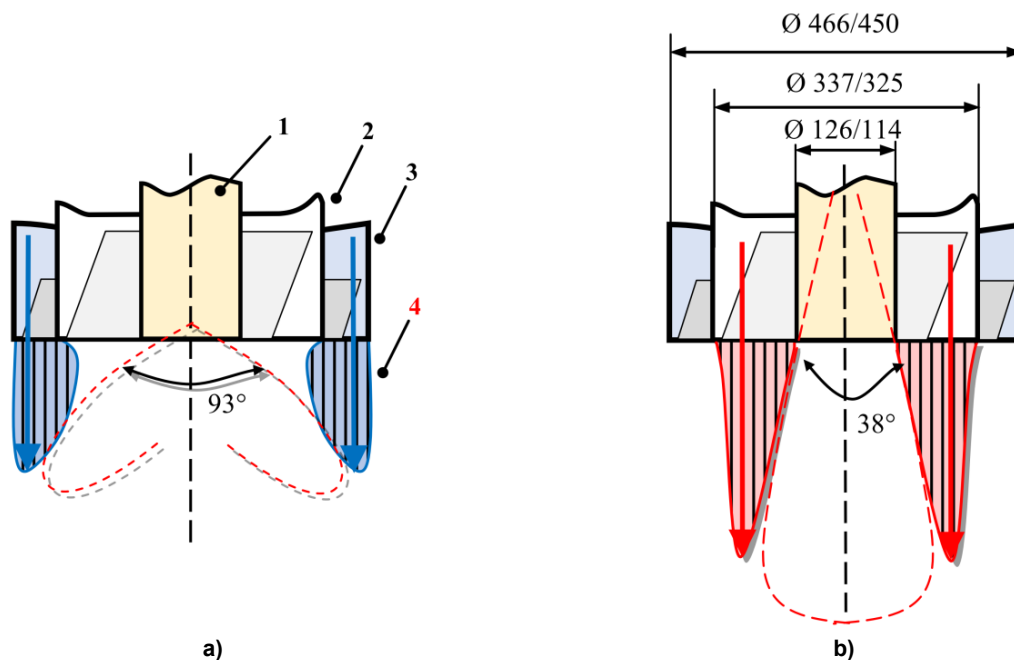


Рис. 7. Схема профиля скоростей дутьевых факелов фурмы Аусмелт: а – воздух охлаждения, крутка 2,48; б – смесь КВС, крутка 0,43; 1 – сопло трубы для подачи природного газа; 2 – сопло трубы для КВС; 3 – сопло трубы для подачи воздуха охлаждения; 4 – профиль векторов скорости
Fig. 7. Scheme of the velocity profile of the blast flares of the Ausmelt tuyere: а – cooling air, twist 2.48; б – KVS mixture, twist 0.43; 1 – pipe nozzle for feeding natural gas; 2 – pipe nozzle for KVS; 3 – pipe nozzle for feeding cooling air; 4 – velocity vector profile

Спутные струи

Струи, выходящие из сопла фурмы, оказывают взаимное влияние на параметры закрученных струй, в связи с чем уточним их характеристики с учётом совместного и одновременного истечения из кольцевых зазоров труб.

Средняя по количеству движения скорость потока W_0 (м/с) на выходе из фурмы нескольких спутных струй определим по формуле

$$W_0 = \frac{\sum_{i=1}^p W_i^2 F_i \rho_i}{\sum_{i=1}^p W_i F_i \rho_i}, \quad (17)$$

где W_i , F_i , ρ_i – соответственно среднерасходная скорость; выходное сечение одиночных кольцевых струй, составляющих одну сложную, и плотность в выходном сечении i -го канала фурмы;

p – число соосных кольцевых струй;

Для аксиального лопаточного завихрителя конструктивный параметр крутки может определяться и по формуле

$$n_p = \frac{2\pi R_d D_{рв}}{E z_n (D-d)} \operatorname{tg} \varphi = \frac{\sqrt{2(D^2 + d^2)}}{D_{рв}} \operatorname{tg} \varphi, \quad (18)$$

где D , d – наружный и внутренний диаметры кольцевого канала, м.

φ – угол наклона лопаток, °,

$$\varphi = \operatorname{arccctg} \left[\frac{2\pi R_d D_{рв}}{n E z_n (D_1 - D_2)} \right];$$

$$E \approx \frac{\pi(D_1 + D_2)}{2z_n};$$

z_n – число лопаток, шт.;

$$R_d = \sqrt{\frac{D_1 + D_2}{8}}.$$

Результирующий параметр крутки для струи, выходящей из фурмы и состоящей из нескольких кольцевых струй, закрученных в одном направлении, может определяться по выражению

$$\theta_{\text{сум}} = \frac{\sum_{i=1}^p (n_i \cdot \rho_i \cdot W_i^2 F_i D_{iрв})}{D_{г.рв} \sum_{i=1}^p (\rho_i W_i^2 F_i)}, \quad (19)$$

где $D_{iрв}$ – диаметр круга, площадь которого равна выходному сечению кольцевого канала i струи, м;

$D_{г.рв} \approx \sqrt{D_1^2 - D_2^2}$ – диаметр круга, площадь которого равна выходному сечению.

При расчёте эффективной крутки спутных струй учитывается вклад количества продуваемого воздуха через каждую систему завихрителей с последующим приведением к диаметру объединённого сопла в устье фурмы.

Применение методики расчёта для определения параметров дутьевого факела печи Аусмелт

Выполним далее оценочный анализ обобщённой крутки в устье фурмы для различных параметров кислородовоздушного дутья, результаты которого сгруппируем в табл. 2.

Расчёт параметров объединённых воздушных потоков в устье фурмы

Таблица 2

Calculation of parameters of combined air flows at the mouth of the tuyere

Table 2

Труба охлаждения	Диаметр внешний	$D_1, \text{ м}$	0,450						
	Диаметр внутренний	$d_0, \text{ м}$	0,337						
	Диаметр равновеликий	$D_{г.равн.}, \text{ м}$	0,298						
	Сечение кольца	м^2	0,07						
	Плотность воздуха	$\rho, \text{ кг/м}^3$	1,28						
	Воздух	$\text{нм}^3/\text{ч}$	20 000	22 000	24 000	26 000	28 000	30 000	32 000
	Температура	$^{\circ}\text{C}$	200						
	Воздух	$\text{м}^3/\text{ч}$	34 652	38 117	41 582	45 048	48 513	51 978	55 443
	Воздух	$\text{м}^3/\text{с}$	9,63	10,59	11,55	12,51	13,48	14,44	15,40
	Скорость истечения	м/с	138	152	165	179	193	207	221
Крутка, n_p		2,59							
Труба для подачи КВС	Диаметр внешний	$D_1, \text{ м}$	0,325						
	Диаметр внутренний	$d_0, \text{ м}$	0,126						
	Диаметр равновеликий	$D_{г.равн.}, \text{ м}$	0,300						
	Сечение кольца	м^2	0,7						
	Плотность КВС	$\rho, \text{ кг/м}^3$	1,32						
	КВС	$\text{нм}^3/\text{ч}$	33 500	31 500	29 500	27 500	25 500	23 500	21 500
	Температура	$^{\circ}\text{C}$	120						
	КВС	$\text{м}^3/\text{ч}$	48 225	45 346	42 467	39 588	36 709	33 830	30 951
	КВС	$\text{м}^3/\text{с}$	13,40	12,60	11,80	11,00	10,20	9,40	8,60
	Скорость истечения	м/с	190	179	167	156	145	133	122
Крутка, n_p		0,64							
Общая система подачи кислородовоздушной смеси									
Диаметр равновеликий	 м	0,432							
Общая эффективная крутка	θ	0,90	1,00	1,10	1,20	1,29	1,38	1,46	
Диаметр воронки обратных токов	 м	0,067	0,094	0,116	0,133	0,148	0,161	0,172	
Угол раскрытия струи	$^{\circ}$	57	60	63	66	69	71	73	

Температурой дутьевых смесей зададимся с некоторой долей условности, предполагая, что воздух охлаждения в устье фурмы имеет температуру 200 °С, а смесь КВС – 120 °С.

Конструктивный параметр крутки для каждой трубы рассчитан по формуле (18) и соответствует 2,59 и 0,64, что сопоставимо с расчётом по формуле (13), где крутки равны 2,48 и 0,43. В этом случае для первого варианта расходов (воздух охлаждения 20 тыс. нм³/ч, смесь КВС – 33,5 тыс. нм³/ч) в устье фурмы:

$$D_{г.рв} \approx \sqrt{D_1^2 - D_2^2} = \sqrt{450^2 - 126^2} = 432 \text{ мм};$$

$$\theta_{\text{сум}} = \frac{(2,59 \cdot 1,28 \cdot 138 \cdot 138 \cdot 0,07 \cdot 298) + (0,64 \cdot 1,32 \cdot 190 \cdot 190 \cdot 0,07 \cdot 300)}{432 \cdot ((1,28 \cdot 138 \cdot 138 \cdot 0,07) + (1,32 \cdot 190 \cdot 190 \cdot 0,07))} = 0,90.$$

Для рассмотренных двух спутных струй эпюра скоростей схематично может выглядеть так, как представлено на рис. 8. Практически для дутьевых параметров, представленных в табл. 2, применяемых в настоящее время на печи Аусмелт, по центру фурмы на её устье образуется зона обратных токов.

Эффективная крутка для двух спутных потоков будет в первом варианте равна 0,90. При увеличении в дутье доли воздуха на охлаждение через наружную трубу увеличиваются крутка, диаметр воронки обратных токов и угол раскрытия струи. Подача прямоочной струи природного газа в количестве 2200 нм³/ч с температурой в устье фурмы 100 °С, плотностью 0,6 кг/м³

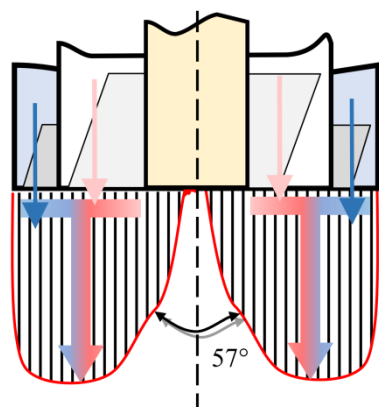


Рис. 8. Схематичное изображение двух соосных спутных струй воздушного дутья и смеси КВС на устье фурмы
Fig. 8. Schematic representation of two coaxial cocurrent jets of air blast and KVS mixture at the tuyere mouth

Таблица 3

Расчёт эффективной крутки в устье фурмы Аусмелт

Table 3

Calculation of effective twist at the mouth of the Ausmelt tuyere

Воздух охлаждения	нм ³ /ч	20 000	22 000	24 000	26 000	28 000	30 000	32 000
Температура	°С	200						
Воздух	м ³ /ч	34 652	38 117	41 582	45 048	48 513	51 978	55 443
Воздух	м ³ /с	9,63	10,59	11,55	12,51	13,48	14,44	15,40
Скорость истечения	м/с	138	152	165	179	193	207	221
Крутка, n_p		2,59						
КВС	нм ³ /ч	33 500	31 500	29 500	27 500	25 500	23 500	21 500
Температура	°С	120						
КВС	м ³ /ч	48 225	45 346	42 467	39 588	36 709	33 830	30 951
КВС	м ³ /с	13,40	12,60	11,80	11,00	10,20	9,40	8,60
Скорость истечения	м/с	190	179	167	156	145	133	122
Крутка, n_p		0,64						
Природный газ	нм ³ /ч	2200	2200	2200	2200	2200	2200	2200
Температура	°С	100						
Природный газ	м ³ /ч	3006	3006	3006	3006	3006	3006	3006
Природный газ	м ³ /с	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83
Скорость истечения	м/с	81,8	81,8	81,8	81,8	81,8	81,8	81,8
Крутка, n_p		0,00						
Общая система подачи дутьевой смеси								
Диаметр равновеликий	м	0,450						
Общая эффективная крутка	θ	0,85	0,95	1,04	1,14	1,23	1,31	1,39
Диаметр воронки обратных токов	м	0,051	0,085	0,109	0,128	0,144	0,158	0,169
Диаметр воронки обратных токов	калибры	0,11	0,19	0,24	0,28	0,32	0,35	0,38
Угол раскрытия струи	°	56	59	62	64	67	69	71
Путь полного смешения струй	калибры	0,86	0,73	0,63	0,56	0,50	0,45	0,41

уменьшает эффективную крутку с 0,90 до 0,85 для первого варианта расчётов и – незначительно – область обратных токов для последующих вариантов (табл. 3).

Потеря напора в фурме определяется по формуле

$$\Delta p = \zeta \frac{\rho W^2}{2}, \text{ Н/м}^2, \quad (20)$$

где: ζ – коэффициент гидравлического сопротивления;

W – среднерасходная скорость на входе из канала фурмы, м/с.

Коэффициент гидравлического сопротивления центральной трубы фурмы при прямом движении природного газа равен двум. Для каналов подачи воздуха или смеси КВС с учётом параметра крутки его можно принимать по графику, представленному на рис. 9 [14].

Для условий АО «Карабашмедь» для различных режимов технологического дутья рассчитаны параметры крутки спутных струй и определены характеристики дутьевого факела и параметры образующей воронки в расплаве (см. табл. 3).

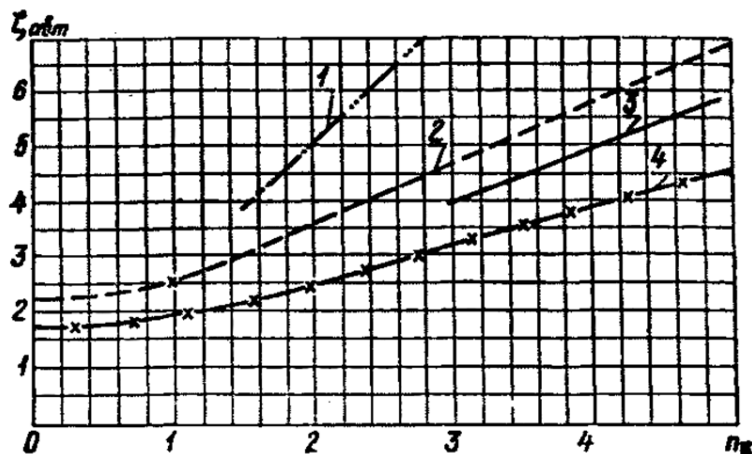


Рис. 9. Коэффициент гидравлического сопротивления каналов горелок в зависимости от параметра крутки при различных типах завихрителей: 1 – аксиальный лопаточный завихритель с прямыми лопатками; 2 – тангенциальный лопаточный завихритель с прямыми лопатками; 3 – улиточный завихритель; 4 – аксиальный лопаточный завихритель с профилированными лопатками [14]
Fig. 9. Coefficient of hydraulic resistance of burner channels depending on the swirl parameter for different types of swirlers: 1 – axial vane swirler with straight vanes; 2 – tangential vane swirler with straight vanes; 3 – snail swirler; 4 – axial vane swirler with profiled vanes [14]

При подаче в фурму 20 тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$ воздуха охлаждения в межтрубное пространство и 33,5 тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$ смеси КВС по основной трубе во взаимодействии с 2,2 тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$ природного газа образуется дутьевой факел с эффективной круткой 0,85, формируя воронку обратных токов 0,051 м при угле раскрытия струи 56° . Наконечник диаметром 0,45 м обеспечивает полное смешение спутных струй на расстоянии 0,86 калибра, то есть при длине наконечника 1 м, формирование гомогенной струи из спутных струй формируется на расстоянии 0,39 м от устья фурмы.

При подаче в фурму 32 тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$ воздуха охлаждения и 21,5 тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$ смеси КВС в смеси с 2,2 тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$ природного газа образуется дутьевой факел с эффективной круткой 1,39, формируя воронку обратных токов 0,169 м при угле раскрытия струи 71° . Наконечник диаметром 0,45 м обеспечивает полное смешение спутных струй на расстоянии 0,41 калибра, то есть при длине наконечника 1 м, формирование гомогенной струи из спутных струй формируется на расстоянии 0,18 м от устья фурмы. В этих условиях воронка обратных токов размеров 0,38 калибра создаёт предпосылки для затягивания расплава внутрь наконечника и настывлеобразования на его внутренней поверхности, что и наблюдается на практике в процессе эксплуатации фурмы.

Заключение

С целью обеспечения возможности работы наконечника вертикальной фурмы типа TSL в условиях высокотемпературной циркуляции окисьюльфидных расплавов автогенной плавки тяжёлых цветных металлов для охлаждения конструкции применяется дутьевой воздух. В печи Аусмелт АО «Карабашмедь» для улучшения теплопередачи от тела фурмы к теплоносителю, воздушная смесь закручивается аксиальными лопаточными завихрителями.

Оценка особенностей истечения спутных закрученных воздушных и кислородовоздушных струй в комбинации с прямоточными струями природного газа в соответствии с предложенным математическим аппаратом, позволила уточнить зависимость эффективной крутки как от конструктивной крутки, так и от количества и скорости истечения дутьевой смеси из завихрителей.

Увеличение эффективной крутки спутных потоков создаёт предпосылки для образования обратных токов в устье фурмы, диаметр воронки которых становится сопоставимым с диаметрами внутренних труб фурмы. Увеличение диаметра воронки обратных токов сопровождается ростом угла раскрытия струи и уменьшением глубины проникновения в расплав дутьевого факела, что ведёт к снижению

эффективности плавки. Уменьшение параметров крутки ниже установленного проектного уровня снижает массообмен в ванне и приводит к уменьшению производительности печи.

Контроль параметров крутки в соответствии с предложенной математической моделью позволяет прогнозировать технологические параметры плавки и управлять процессом переработки сырья.

Список литературы

1. Король Ю.А. Аусмелт. В 4 т. Т. 1: Автогенные процессы для переработки медного сырья. Екатеринбург: Издательство АМБ, 2024. 320 с.
2. Король Ю.А. Аусмелт. В 4 т. Т. 2: Внедрение и освоение. Екатеринбург: Издательство АМБ, 2024. 456 с.
3. URL: https://www.researchgate.net/publication/270337912_AUSMELT_TECHNOLOGY-DEVELOPMENTS_IN_COPPER.
4. Wood J., Matusiewicz R. Decarbonisation of the Outotec® Ausmelt Process // Conference Proceedings of Copper 2019. Vancouver, Canada, 2019. URL: <https://www.researchgate.net/publication/343097593.3>.
5. 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>.
6. 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.
7. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11663-021-02233-3>.
8. 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.
9. Matusiewicz 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.
10. Extractive Metallurgy of Copper / M.E. Schlesinger, K.C. Sole, W.G. Davenport, G.R.F. Alvear Flores. Sixth Edition. ISBN 978-0-12-821875-4. Elsevier Ltd., 2022. 573 p.
11. 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.
12. Халатов А.А., Борисов И.И., Щевцов С.В. Тепломассообмен и теплогидравлическая эффективность вихревых и закрученных потоков. Киев, 2005. 500 с.
13. Влияние геометрии интенсификатора – спиральных канавок на конвективную теплоотдачу в трубах / А.И. Рзаев, Л.Л. Филатов, Г.В. Циклаури и др. // Теплоэнергетика. 1992. № 2. С. 53–55.
14. Разработка и исследование выходных раскручивающих устройств для циклонных камер / С.А. Тагер, Б.Б. Смирнов, В.И. Сенчагова, Р.Ю. Талумаа // Энерготехнологические циклонные процессы и установки. Материалы V научно-технического совещания в Москве в ноябре 1968 г. М.: ЦНИИТЭИЦМ, 1970. С. 74–82.

References

1. Korol Yu.A. *Ausmelt. V 4 t. T. 1: Avtogennyye 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.)
2. 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.)
3. Available at: https://www.researchgate.net/publication/270337912_AUSMELT_TECHNOLOGY-DEVELOPMENTS_IN_COPPER.
4. Wood J., Matusiewicz R. Decarbonisation of the Outotec® Ausmelt Process. In: *Conference Proceedings of Copper 2019*. Vancouver, Canada, 2019. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/343097593.3>.

5. 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>.
6. 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.
7. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11663-021-02233-3>.
8. 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.
9. Matuszewicz 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.
10. Schlesinger M.E., Sole K.C., Davenport W.G., Alvear Flores G.R.F. *Extractive Metallurgy of Copper*. Sixth Edition. ISBN 978-0-12-821875-4. Elsevier Ltd., 2022. 573 p.
11. 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.)
12. Khalatov A.A., Borisov I.I., Shchevtsov S.V. *Teplomassoobmen i teplogidravlicheskaya effektivnost' vikhreyukh i zakruchennykh potokov* [Heat and Mass Transfer and Thermal-Hydraulic Efficiency of Vortex and Swirling Flows]. Kyiv, 2005. (In Russ.)
13. Rzyayev A. I., Filatov L. L., Tsiklauri G. V. et al. [Influence of Geometry of Intensifier – Spiral Grooves on Convective Heat Transfer in Pipes]. *Thermal Engineering*. 1992;(2):53–55. (In Russ.)
14. Tager S.A., Smirnov B.B., Senchagova V.I., Talumaa R.Yu. [Development and Study of Output Spinning Devices for Cyclone Chambers]. In: *Energy-Engineering Cyclone Processes and Installations. Proceedings of the V Scientific and Technical Conference in Moscow in November 1968*. Moscow, 1970. P. 74–82. (In Russ.)

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 04.04.2025

The article was submitted 04.04.2025