

# Металлургия чёрных, цветных и редких металлов Metallurgy of ferrous, non-ferrous and rare metals

Научная статья

УДК 669

DOI: 10.14529/met250401

## ГАЗОНАСЫЩЕННОСТЬ ШТЕЙНО-ШЛАКОВОГО РАСПЛАВА В ПЕЧИ «АУСМЕЛТ» И ОСОБЕННОСТИ СЖИГАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА В НЁМ

**Ю.А. Король**, *U.Korol@mail.ru*

АО «Русская медная компания», Екатеринбург, Россия

**Аннотация.** Обобщение опыта работы АО «Карабашмедь» при эксплуатации автогенного агрегата «Аусмелт», оснащённого вертикальной фурмой TSL, позволяет разрабатывать новые технологические процессы с вертикальным дутьём, совершенствовать и развивать технологии плавки. Теоретический анализ и оценка физико-химических процессов, осуществляемых в шлаково-штейновом расплаве в промышленной печи, позволяет формировать и накапливать базу знаний по этой технологии. В работе была сформулирована двухфазная модель и выполнен анализ состояния ванны, насыщения её газовыми пузырями. Оценка граничных условий по газонасыщению и диаметру газовых включений позволяет контролировать состояние ванны и предотвращать вспенивание расплава при работе, обеспечивающей максимальную производительность оборудования.

На работу фурмы при подаче дутья в расплав оказывают существенное влияние состав смеси КВС и природного газа. АО «Карабашмедь» работает в режиме максимального использования природного газа с целью обеспечения возможности переработки сырья с невысоким содержанием серы. Обработка данных за многолетний период показала, что процесс ведётся в граничных условиях воспламенения природного газа в наконечнике фурмы, что создаёт предпосылки для выхода его из строя.

Представленная методика оценки условий сжигания природного газа в расплаве позволяет осознанно выбирать наилучшие технологические параметры для конкретного состава природного газа и фактических параметров дутья с заданными параметрами крутки.

**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. 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

Original article

DOI: 10.14529/met250401

## GAS SATURATION OF THE MATTE-SLAG MELT IN THE AUSMELT® TSL FURNACE AND THE SPECIAL ASPECTS OF NATURAL GAS COMBUSTION THEREIN

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

JSC Russian Copper Company, Ekaterinburg, Russia

**Abstract.** Summarizing the operating experience of JSC Karabashcopper in the autogenous Ausmelt unit equipped with a TSL enables the development of new vertical blast processes, as well as the refinement and advancement of smelting technologies. Theoretical analysis and evaluation of the physical and chemical processes occurring in the slag-matte melt in an industrial furnace allows to develop and accumulate the knowledge base for this technology. A two-phase model was generated; the bath state and its saturation with gas bubbles was analysed. Evaluating the boundary conditions for gas saturation and the diameter of gas inclusions enables monitoring the bath state and preventing melt foaming during operation, ensuring maximum equipment performance.

© Король Ю.А., 2025

The composition of the oxygen-air mixture/natural gas mixture significantly impacts the performance of the tuyere when injecting blast into the melt. JSC Karabashcopper operates in a mode that maximizes natural gas usage to enable processing low-sulphur feedstock. Data analysis over many years has shown that the process operates under boundary conditions for natural gas ignition at the tuyere tip, which creates the preconditions for its failure.

The presented methodology for assessing natural gas combustion conditions in the melt enables the informed selection of the best process parameters for a specific natural gas composition and actual blast parameters with specified swirl parameters.

**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. 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

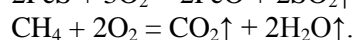
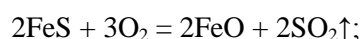
В 2007 г. в России впервые был реализован процесс автогенной плавки в вертикальной печи «Аусмелт» с использованием фурм типа TSL в г. Карабаше. В настоящее время готовится к пуску второй подобный агрегат в компании «УГМК-Холдинг» в г. Красноуральске.

Отсутствие возможности обмена опытом и знаниями между специалистами, обслуживающими печи «Аусмелт» и «Айзасмелт» во всем мире, требует обобщения и широкого освещения практики использования этого процесса плавки, полученного в АО «Карабашмедь» за более чем 15-летний период эксплуатации.

Теоретические основы плавки, практика внедрения процесса, работа основного и вспомогательного оборудования металлургического комплекса, особенности работы фурм типа TSL были детально рассмотрены в работах автора, акцентирующих внимание инженеров на конструктивных особенностях печи, опыте модернизации оборудования, на крутке дутьевого факела, её влиянии на параметры плавки, циркуляцию расплава, способах управляющего воздействия на процесс [1–7].

В настоящей работе представлены исследования по влиянию на технологический процесс автогенной плавки газонасыщения штейношлакового расплава продуктами сгорания природного газа и выделения пузырьков диоксида серы в ходе окислительных процессов между компонентами шихты, элементами расплава и кислородом дутья.

При продувке расплава кислородовоздушной смесью (КВС) и природным газом образуется большое количество газовых пузырьков, связанных с образованием диоксида серы, диоксида углерода и паров воды по основным реакциям:



Уровень, подвижность и стабильность барботажного слоя определяется главным образом размерами газовых пузырьков, равномерностью распределения их в расплаве и характером его движения.

Насыщение расплава пузырьками приводит к увеличению объема поверхностного приконтактного слоя и вспениванию. Возможность покидать барботируемую зону расплава газовыми пузырьками, не создавая его пресыщения, определяет целесообразность проведения процесса при конкретных технологических параметрах. В противном случае происходит выброс расплава из печи и останов плавки.

С другой стороны, максимально возможное повышение количества пузырьков в расплаве делает более эффективными массообменные процессы между шлаком, штейном, компонентами шихты, каплями расплава и кислородом дутья, что повышает производительность оборудования и снижает производственные затраты.

### **Цель исследования**

Выполнить оценку вероятного и допустимого насыщения расплава газовыми пузырьками в печной ванне, диаметра газовых включений и влияние сжигания природного газа в расплаве на процессы массопередачи в печи «Аусмелт».

### **Количество и диаметр газовых пузырьков**

Если представлять вспененный слой в виде газовых пузырьков как твердые шары одинакового размера, то межфазная поверхность будет иметь стабильную величину, опреде-

ляемую размером пузырьков [8]. Свободный объём между пузырьками будет составлять примерно 26 %. Соответственно, газосодержание двухфазного слоя не может быть больше 74 %. При расположении газовых пузырьков в виде цепочек, уложенных рядами, объём между пузырьками будет равен 48 %, что соответствует максимальному газонасыщению, равному 52 %. С целью предотвращения вспенивания расплава и его выброса из печи объём пузырьков в барботируемом расплаве должен оставаться постоянным в пределах 52–74 %.

В условиях барботажа при продувке расплава часть дутья из факела фурмы проходит через него в виде газовых струй (факелов), удаляя из зоны реакций газовые продукты реакций ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) и непрореагировавший кислород, вступающий во взаимодействие с шихтой в вертикальной шахте печи и недоокислёнными элементами газа ( $\text{S}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ).

При факельном режиме барботажа высота газожидкостного слоя неодинаковая: в центральной части она больше, чем у периферии. Концентрация газовых пузырьков по высоте слоя наибольшая в поверхностном слое на выходе из расплава. При прекращении дутья двухфазный слой быстро исчезает за счёт выхода пузырьков из расплава в газовую фазу. Газонасыщение в этом случае будет минимальным и определяться ходом обменных химических реакций в глубине ванны, связанных с образованием газообразных продуктов реакции.

Определение межфазной поверхности в условиях барботажа затруднено в связи с тем, что газожидкостный слой находится в непрерывном движении, а газовые пузырьки имеют различные размеры и форму, кроме того, расплав продувается газовыми струями (факелами), уменьшающими его газонасыщение. Для оценки концентрации пузырьков газовой фазы в расплаве необходимо понимание параметров дутьевого факела и их влияние на формирование ванны печи.

Параметры истечения дутьевого факела (диаметр и глубина погружения в расплав) зависят от скорости и давления смеси КВС и природного газа на выходе из наконечника фурмы и критериев крутки [2–4].

При малых подачах газа образующиеся пузырьки насыщают контактный слой расплава, вспенивая его, формируя аэрационный ре-

жим продувки. На поверхности ванны формируется кипящий слой без значимых продувов, соответствующий максимально возможному газонасыщению расплава.

При увеличении дутья смесь сплошным потоком направляется в расплав, отодвигая его от устья сопла, образуя вокруг него газовую оболочку и кольцевую щель, через которую отходящий газ и часть КВС выбрасывается в форме фонтана, разбивается на пузырьки, которые, всплывая и перемешиваясь в слое, увлекают за собой расплав, создавая тем самым перемешивание ванны. При этом газонасыщение расплава снижается, часть кислорода дутья уносится в подсводовое пространство печи, не участвуя в процессах окисления химических элементов штейно-шлаковой массы.

При наблюдении за работой фурмы<sup>1</sup> в печи «Аусмелт» было зафиксировано, что значимая часть дутья движется непосредственно вдоль стенок фурмы в виде больших закрученных газоздушных струй, сопровождающихся выбросами газонасыщенного расплава в подсводовое пространство печи. Объём этих газовых потоков зависит в том числе от расходов дутья, параметров крутки и от глубины проникновения дутьевой струи в расплав. Соответственно, управляя параметрами дутья, возможно регулировать степень насыщения расплава газовыми включениями.

На основании проведённых исследований, математической обработки результатов наблюдений и вывода соответствующих зависимостей автором были установлены параметры дутьевого факела и критерии, его определяющие, для оптимизации процесса плавки с использованием вертикальной фурмы [3, 4].

Одним из способов управляющего воздействия на формирование расплава с максимальным насыщением газовыми пузырями является управление глубиной погружения фурмы в расплав. В работах [1–4] показаны примеры теоретического расчёта этого параметра на основании разработанной математической модели для различного типа прямоточных и закрученных спутных струй. При этом было отмечено, что при прочих равных условиях глубина проникновения в расплав прямоточных струй выше, чем закрученных.

<sup>1</sup>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.

В связи с этим для оценки влияния на образование вспененного слоя при максимальной глубине погружения фурмы в расплав воспользуемся условиями для прямооточного истечения дутья из наконечника фурмы.

Глубину проникновения прямооточной струи в расплав можно оценить по формуле, предложенной С.Н. Гушиным в работе [9]:

$$\frac{l}{d} = 10,7(\text{Fr})^{0,46} \left(\frac{\rho_r}{\rho_p}\right)^{0,35}, \quad (1)$$

где  $l/d$  – калибры, отношение длины струи ( $l$ ) к диаметру сопла ( $d$ );  $\rho$  – плотности газа (1,3) и расплава (3500), кг/м<sup>3</sup>; Fr – модифицированный критерий Фруда или критерий Архимеда:

$$\text{Fr} = \frac{\rho_r W_0^2}{\rho_p g} = \frac{1,3 \cdot 185^2}{3500 \cdot 9,81} = 1,3,$$

где  $\rho$  – плотности газа и расплава, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение силы тяжести, 9,81 м/с<sup>2</sup>;  $W_0$  – скорость истечения газа из сопла при температуре 250 °С.

Для типовых значений дутья: 27 тыс. нм<sup>3</sup>/ч воздуха; 26 тыс. нм<sup>3</sup>/ч кислорода и 2,2 тыс. нм<sup>3</sup>/ч природного газа при внутреннем диаметре фурмы 0,45 м, скорость истечения смеси будет равна

$$(27\ 000 + 26\ 000 + 2200) \times \\ \times (250 + 273)/273/3600/(3,14 \cdot 0,45 \cdot 0,45/4) = \\ = 85 \text{ м/с.}$$

Соответственно найдём максимально возможную длину (в калибрах) прямооточной струи, проникающей в оксидносульфидный расплав:

$$\frac{l}{d} = 10,7 \cdot 1,3^{0,46} \cdot \left(\frac{1,3}{3500}\right)^{0,35} = 0,8$$

или для диаметра наконечника фурмы 0,45 м –  $l = 0,8 \cdot d = 0,36$  м.

Из представленных расчётов следует, что глубина проникновения прямооточной струи в расплав зависит от её скорости, диаметра сопла и соотношения плотностей газа и расплава.

При вдувании в расплав 27 тыс. нм<sup>3</sup>/ч воздуха, 20 тыс. нм<sup>3</sup>/ч кислорода и 2,2 тыс. нм<sup>3</sup>/ч природного газа при температуре дутьевой смеси на выходе из фурмы 250 °С глубина погружения факела в расплав с удельным весом 3500 кг/м<sup>3</sup> будет равна 0,8 калибра или при диаметре наконечника 0,45 м соответствовать 360 мм. Этот расчёт выполнен для прямооточных струй, для закрученных струй глубина погружения в расплав будет меньше и зависеть от степени крутки [3, 4].

Небольшая глубина проникновения струи в расплав, высокий удельный вес расплава, наличие продувов в виде газовых факелов по-

зволяет рекомендовать для расчётов кинетических характеристик процесса плавки газонасыщение расплава по минимальному уровню в 50 %. При этом обратим внимание, что в соответствии с вышеуказанными формулами химических реакций количество молей вдуваемого в расплав воздушнокислородного дутья и природного газа сопоставимо с количеством молей отходящего газа и равно как 6 к 5. Учитывая то, что скорость окислительных реакций имеет конечную величину, то в расплаве всегда будет присутствовать часть кислородных газовых пузырей, не вступивших во взаимодействие с компонентами расплава или шихты, поэтому количество пузырей отходящего газа и непрореагировавшего кислорода можно условно сопоставлять с количеством пузырей, образующихся при вдувании газовой смеси в расплав. Данное допущение позволяет рассчитать средний диаметр пузырей для условий максимального насыщения расплава в условиях кипящего слоя через понимаемое и управляемое количество дутья.

В зависимости от газовой нагрузки, равной объёмному расходу дутьевой смеси к единице площади поперечного сечения аппарата, средний размер образующихся пузырей смеси КВС и природного газа можно оценить по формуле, представленной в работах [9–12]:

$$d_{\text{пуз}} = 0,091 \left(\frac{\sigma}{\rho_p}\right)^{0,5} \cdot U_s^{0,44}, \text{ м}, \quad (2)$$

где  $d_{\text{пуз}}$  – диаметр пузырей, см;  $\sigma$  – поверхностное натяжение расплава, 356,3 мН/м;  $\rho_p$  – плотность расплава, 3500 кг/м<sup>3</sup>;  $U_s$  – дутьевая нагрузка, см<sup>3</sup>/(см<sup>2</sup>·с):

$$U_s = \frac{V_{\text{квс}} \cdot (t+273)}{S \cdot 273 \cdot 3600}, \text{ см}^3/(\text{см} \cdot \text{с}), \quad (3)$$

где  $S$  – площадь внутреннего сечения печи по футеровке, см<sup>2</sup>:

$$S = \frac{\pi \cdot D_{\text{печи}}^2}{4}, \quad (4)$$

где  $D_{\text{печи}}$  – внутренний диаметр печи Аусмелт на АО «Карабашмедь» по футеровке, равный 413 см.

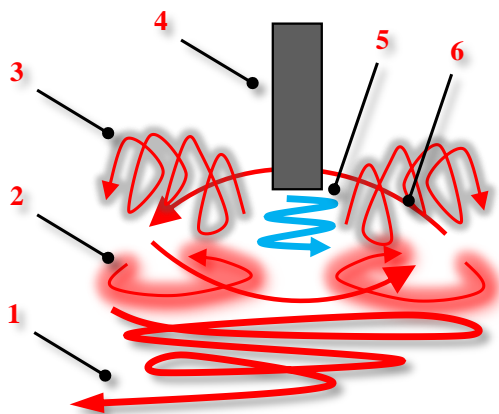
Отсюда найдём дутьевую нагрузку на печь:

$$U_s = \frac{4 \cdot ((55\ 200 - 523)/(273 - 3600))}{3,14 \cdot 413 \cdot 413} = 21,94 \text{ см}^3/(\text{см} \cdot \text{с}).$$

При рассмотрении шлакового расплава с удельным весом 3500 кг/м<sup>3</sup> и поверхностном натяжении для принятых условий в печи «Аусмелт» (расход дутьевой смеси 55 200 нм<sup>3</sup>/ч при температуре 250 °С), равным 356,3 мН/м, средний диаметр газовых пузырей будет в пределах 0,11 см.

Относительно высокая газонасыщенность расплава и мелкая взвесь газовых включений определяют два фактора: большую скорость протекания окислительных процессов в расплаве, связанную с большой поверхностью контакта между кислородом в мелких пузырях с компонентами шихты и расплава, высокую подвижность последнего под действием дутьевого факела.

Движение газовых пузырей приводит к интенсивному перемешиванию штейна и шлака. Образующаяся штейношлаковая эмульсия, в которой основной фазой является шлак, формирует потоки, закручиваемые дутьевыми струями как в поперечном направлении, так и вертикальной плоскости (рис. 1).



**Рис. 1. Схема движения потоков в ванне печи:**  
1 – движение расплава в ванне к выходу из печи;  
2 – движение расплава вдоль профиля обратных токов;  
3 – зона интенсивного барботажа закрученными потоками;  
4 – фурма; 5 – дутьевая смесь; 6 – вращение ванны расплава в горизонтальной плоскости

**Fig. 1. Flow diagram in the furnace bath:**  
1 – melt flow in the bath towards the furnace outlet;  
2 – melt flow along the reverse flow profile;  
3 – zone of intense bubbling with swirling flows;  
4 – tuyere;  
5 – blast mixture;  
6 – rotation of the melt bath in a horizontal plane

При нарушении параметров дутья и переводе работы фурмы в режим пересыщения расплава газовыми пузырями, продувкой с выбросами дутьевых факелов и массы расплава в подсводовое пространство, как уже указывалось ранее, на периферии ванны будет наблюдаться режим кипения, а в центральной части – интенсивный барботажи, с формированием пузырей большого диаметра, формы и размеров, снижающих реакцию способность дутьевого факела и производительность печи. Соответственно, попытки обслуживающего персонала интенсифицировать процесс плавки за счёт увеличения дутья и увеличения газонасыщения расплава не могут улучшить

показатели работы агрегата и приводят только к ухудшению работы последующего газоочистного оборудования и росту затрат передела.

Представленная формула для расчёта диаметра газовых включений позволяет количественно оценить влияние плотности и вязкости расплава на газонасыщение ванны и выявлять критические условия для её вспенивания при передуве.

При насыщении ванны магнетитом происходит рост удельного веса расплава и его вязкость, что при сохраняющейся скорости образования газовых включений как продуктов реакции окисления приводит к формированию большего количества мелких пузырьков, не способных преодолеть сопротивление более вязкого расплава и выходить в атмосферу печи. Так, для шлако-штейнового расплава, содержащего более 20 % магнетита плотностью более  $4500 \text{ кг/м}^3$ , средний диаметр газовых полостей становится менее 1 мм, что приводит к существенным затруднениям для всплытия мелких пузырьков, вспениванию массы и её выбросу из печи.

### Особенности сжигания природного газа в расплаве

Практика освоения печи «Аусмелт» на АО «Карабашмедь» показала, что при проектной уставке расхода воздуха на охлаждение внешней трубы на уровне  $5000\text{--}7500 \text{ м}^3/\text{ч}$ , воздуха на технологию –  $20\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$ , кислорода –  $26\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$  и природного газа –  $1800 \text{ м}^3/\text{ч}$  не обеспечивается работоспособность фурмы выше 4–5 часов эксплуатации – она прогорает. В связи с этим после многочисленных экспериментов было принято кардинально противоположное решение об уставке в  $5000\text{--}7500 \text{ м}^3/\text{ч}$  для технологического воздуха, формирующего смесь КВС с кислородом, а по трубе охлаждения должна направляться разница между требуемым количеством воздуха для ведения процесса и тем количеством, которое поступает по внутренней трубе в соответствии с уставкой. Позднее на охлаждение фурмы сделали уставку по воздуху в размере от 20 до 25 тыс.  $\text{м}^3/\text{ч}$ , остальное расчётное количество воздуха вводили со смесью КВС. В соответствии с материальным балансом процесса горения при сжигании в печи природного газа при этих параметрах дутья образуется  $1800 \text{ м}^3/\text{ч}$   $\text{CO}_2$  и  $3600 \text{ м}^3/\text{ч}$   $\text{H}_2\text{O}$ , при этом потребляется  $5400 \text{ м}^3/\text{ч}$  кислорода из дутьевого факела.

Для осуществления операции горения природного газа в наконечнике фурмы необходимо создать условия для воспламенения смеси газа и КВС. Воспламенение может быть произвольным или вынужденным. Под самопроизвольным принято понимать прогрессирующее ускорение химических реакций, в результате которого медленно протекающий в начальной стадии процесс достигает больших скоростей и на завершающей стадии протекает практически мгновенно [13]. Вынужденное воспламенение вызвано внесением внешнего источника тепла, повышающего температуру смеси выше её точки воспламенения, в нашем случае – запальника, предварительно набранного расплава, факела и т. д.

Процесс самовоспламенения характеризуется границами, за пределами которых воспламенение не наступает при стандартных условиях. При небольшом содержании в смеси природного газа теплоты, выделившейся при его горении, недостаточно для доведения соседних слоёв до воспламенения и распространения пламени. При большом содержании газа недостаток кислорода приводит к снижению температуры и затуханию процесса горения.

Этим двум границам соответствуют нижний и верхний пределы воспламеняемости смесей газов и воздуха (табл. 1).

В соответствии с этими данными уменьшение концентрации кислорода в дутье и разбуживание факела инертными газами приводит к снижению в основном верхнего интервала воспламенения. Повышение температуры приводит к расширению интервала пределов воспламенения.

Пределы взрываемости горючих смесей не являются стабильными величинами, так как зависят от температуры, ёмкости сосуда и материала, из которого он сделан, давления и силы импульса, вызывающего воспламенение, а также от содержания кислорода и нейтральных газов [8].

Предел взрываемости конкретной смеси газов рассчитывается по формуле

$$L = \frac{100}{\frac{x_1}{l_1} + \frac{x_2}{l_2} + \dots + \frac{x_n}{l_n}}, \quad (5)$$

где  $L$  – верхний или нижний предел взрываемости смеси горючих газов, %;  $x_n$  – процентное содержание горючих компонентов в смеси, %;  $l_n$  – верхний или нижний предел взрываемости  $n$ -го компонента, %.

Для используемого на АО «Карабаш-медь» природного газа, содержащего, % об.: 94,0  $\text{CH}_4$ ; 2,0  $\text{C}_2\text{H}_6$ ; 0,5  $\text{C}_3\text{H}_8$ ; 0,1  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ; 0,1  $\text{C}_5\text{H}_{12}$ ; 0,1  $\text{C}_6\text{H}_{14}$ ; 3,0  $\text{N}_2$ ; 0,2  $\text{CO}_2$ , нижний предел взрываемости равен 5,33 % об., верхний – 14,38 % об.

$$L_{\text{нижний}} = 100 / (94/5,3 + 2,0/3,2 + 0,5/2,1 + 0,1/1,86 + 0,1/1,4 + 0,1/1,25) = 5,33 \%$$

$$L_{\text{верхний}} = 100 / (94/14 + 2,0/12,5 + 0,5/9,5 + 0,1/7,8 + 0,1/6,9 + 0,1/8,41) = 14,38 \%$$

В рассматриваемых вариантах расчёта содержание природного газа в дутьевой смеси не превышает 3,4 %, что ниже пределов воспламенения и позволяет сделать вывод об отсутствии условий для зажигания газа внутри наконечника фурмы.

В ходе эксплуатации печи «Аусмелт» сложившиеся среднемесячные содержания природного газа в дутьевой смеси нередко превышают или чаще равны нижнему пределу

Пределы воспламеняемости газов в смеси с воздухом и  $\text{O}_2$  [13]

Таблица 1

Table 1

Flammability limits of gases mixed with air and  $\text{O}_2$  [13]

Газы	% газа в смеси с воздухом		% газа в смеси с $\text{O}_2$	
	нижний	верхний	нижний	верхний
Водород	4,1	74,2	4,0	94,0
Окись углерода	12,5	74,2	15,5	94,0
Метан ( $\text{CH}_4$ )	5,3	14,0	5,1	61,0
Коксовый газ	5,6	31,0		
Природный газ	4,5	17,0	5,15	58,9
Доменный газ	35,0	74,0		
Этан ( $\text{C}_2\text{H}_6$ )	3,2	12,5		
Пропан ( $\text{C}_3\text{H}_8$ )	2,10	9,5		
Бутан ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ )	1,86	8,41		
Пентан ( $\text{C}_5\text{H}_{12}$ )	1,40	7,80		
Гексан ( $\text{C}_6\text{H}_{14}$ )	1,25	6,90		

воспламенения используемого природного газа (рис. 2). При обогащении дутья кислородом нижний предел воспламенения может снижаться с 5,33 до 5,1 % об., что ещё больше повышает количество случаев работы выше этого предела.

Соответственно, на АО «Карабашмедь» воспламенение природного газа возможно не только на срезе наконечника фурмы, но и при достижении определённой температуры и скорости подачи газовой смеси уже внутри наконечника.

Сложившаяся практика работы на предприятии с увеличенным расходом природного газа противоречит первоначальному проекту печи «Аусмелт» для АО «Карабашмедь» и отличается от типовых значений для процессов «Аусмелт» и «Айзасмелт», равных по нижнему пределу воспламенения 3,26 % об. и 1,7 % об. соответственно.

На предприятиях, использующих печи «Айзасмелт», природный газ в наконечнике гарантированно не горит, на других предприятиях с печами «Аусмелт» доля природного газа в дутье постоянно меньше нижнего предела воспламенения газа в наконечнике и он, как правило, в нём не горит. Возможно, это является одной из дополнительных причин того, что наконечники фурм, использующих природный газ, служат в процессах «Айзасмелт» до 28 дней, в процессах «Аусмелт» – до 14 дней, а на АО «Карабашмедь» – не больше 3–5 суток.

Температура воспламенения горючих га-

зов зависит от ряда факторов, в том числе от их содержания в смеси, давления, способа нагрева смеси и т. д.

Воспламенение природного газа в смеси с воздухом возможно при достижении температуры в фокусе дутья 560 °С. Температура воспламенения в атмосфере чистого кислорода 650–750 °С. По данным А.И. Евдокименко [14], самые низкие температуры воспламенения компонентов природного газа соответствуют, °С: метан – 642; этан – 527; пропан – 507, бутан – 487. Различные температуры показывают зависимость конкретной точки воспламенения от состава рассматриваемого природного газа.

В зависимости от состава газовой смеси при резком торможении потока газа,двигающегося к фронту пламени, из-за трения при его контакте со стенками трубы возможен скачкообразный рост амплитуды ударной волны и температура сжатия достигает точки воспламенения, что приводит к мгновенной вспышке – хлопку, сопровождающемуся микровзрывами и ударными волнами.

Возникновение гидродинамических волн может привести к детонационному горению, характеризующемуся постоянными хлопками и взрывами. Скорость детонационного горения очень большая и достигает 3–4 км/с. Опасность возникновения детонационного горения требует от персонала особых мер предосторожности при повторной подаче газа в «горячую» фурму после непродолжительного простоя и без предварительной продувки фурмы.

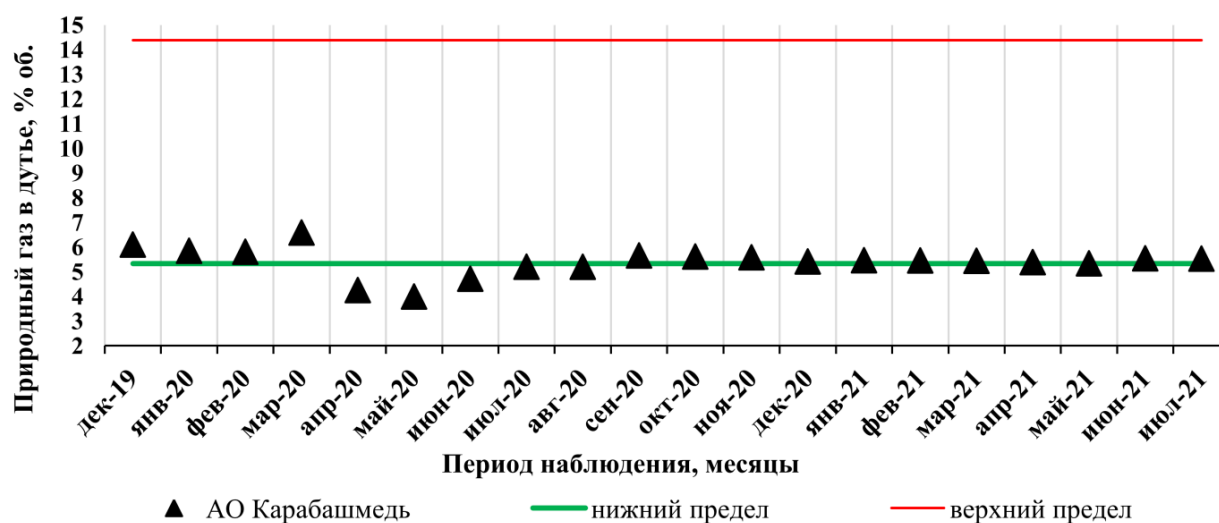


Рис. 2. Доля природного газа в дутье в период наблюдений на АО «Карабашмедь» на печи «Аусмелт» по сравнению с нижним и верхним пределами воспламенения природного газа

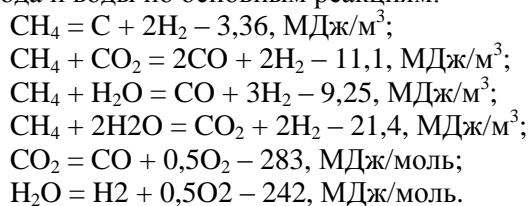
Fig. 2. The proportion of natural gas in the blast during the observation period at JSC Karabashcopper at the Ausmelt furnace compared to the lower and upper limits of ignition of natural gas

**Оценка температуры сгорания газа  
в наконечнике**

Теоретическая температура факела при сжигании одного объёма природного газа может быть найдена по формуле и данным по теплоёмкостям составляющих газа, представленным в работе [8] (табл. 2).

$$t_{\text{ф}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{п}} + Q_{\text{кис}} + Q_{\text{азот}} + Q_{\text{газ}}}{\Sigma V \cdot c_p}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (6)$$

Данная формула справедлива для температур до 1600 °С. При более высоких температурах необходимо учитывать затраты тепла на разложение природного газа, диоксида углерода и воды по основным реакциям:



Для реакции разложения метана наибольшее количество сажистых образований (до 100 г/м<sup>3</sup> метана) получается уже при температурах 1047–1147 °С за временной интервал 0,3–0,5 с.

Все рассматриваемые реакции идут с существенным поглощением тепла, предотвращая перегрев факела при сжигании метана, даже в атмосфере технического кислорода и подогреве дутья, выше 2700 °С. Несмотря на то, что продукты разложения при окислении

выделяют тепло, общая температура в зоне горения практически не увеличивается из-за выноса из неё продуктов разложения, кроме того, сжигание кубометра водорода или окиси углерода выделяет меньшее количество тепла, чем горение кубометра метана:

$$\begin{aligned} Q_{\text{н}} \text{ для } \text{H}_2 &- 2566 \text{ ккал/м}^3; \\ Q_{\text{н}} \text{ для } \text{CO} &- 3018 \text{ ккал/м}^3; \\ Q_{\text{н}} \text{ для } \text{CH}_4 &- 8529 \text{ ккал/м}^3. \end{aligned}$$

В соответствии с материалами, представленными в работе [14], температура горения метана при коэффициенте избытка кислорода, равном единице, и концентрациях кислорода в дутье 20, 40, 60, 80 и 98 % равна соответственно 2300, 2700, 2900, 3100, 3400 К.

По данным источника [9], для природного газа с низшей теплотворной способностью в пределах 31 400–37 700 кДж/м<sup>3</sup> температура пламени при сгорании в технически чистом кислороде равна 2200 °С при максимальной скорости распространения пламени в смеси с кислородом 3,3 м/с. Увеличение температуры дутья с 20 до 500 °С приводит к росту температуры горения метана до 2400 °С.

В рассматриваемой конструкции фурмы количество кислородного дутья, поступающее в зону горения, значительно превышает необходимое количество для сжигания природного газа. Избыточный кислород и азот выносятся из зоны реакции тепло, снижая тем самым температуру горения метана в факеле.

Таблица 2

Объёмная теплоёмкость, ккал/(м<sup>3</sup>·град) [8]

Table 2

Volumetric heat capacity, kcal/(m<sup>3</sup>·deg) [8]

Температура, °С	Метан	Воздух	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>
0	0,3702	0,3098	0,3119	0,3821	0,3569	0,3092
100	0,3922	0,3106	0,3147	0,4061	0,3595	0,3095
200	0,4201	0,3122	0,3189	0,4269	0,3636	0,3104
300	0,4505	0,3146	0,3239	0,4449	0,3684	0,3121
400	0,4814	0,3174	0,3290	0,4609	0,3739	0,3144
500	0,5112	0,3207	0,3339	0,4750	0,3797	0,3171
600	0,5400	0,3240	0,3384	0,4875	0,3857	0,3201
700	0,5677	0,3274	0,3426	0,4988	0,3920	0,3233
800	0,5957	0,3306	0,3463	0,5090	0,3984	0,3265
900	0,6216	0,3338	0,3498	0,5181	0,4050	0,3295
1000	0,6447	0,3367	0,3529	0,5263	0,4115	0,3324
1100	0,6655	0,3395	0,3557	0,5338	0,4180	0,3352
1200	0,6838	0,3422	0,3584	0,5407	0,4244	0,3378
1300		0,3447	0,3608	0,5469	0,4306	0,3404
1400		0,3470	0,3631	0,5526	0,4366	0,3427
1500		0,3492	0,3653	0,5578	0,4425	0,3449
1600		0,3513	0,3673	0,5626	0,4481	0,3470
1700		0,3532	0,3693	0,5671	0,4537	0,3490

С определённой долей условности выполним оценку возможной температуры дутьевого факела в устье наконечника фурмы. Для этого по данным практики примем, что температура природного газа в устье газовой трубы равна 100 °С; температура КВС перед зоной смешения равна 120 °С, а температура воздуха охлаждения 200 °С.

В соответствии с формулой (6) теплоёмкости продуктов горения необходимо принимать методом подбора, как итог этих расчётов возьмём их значения при 930 °С (см. табл. 2).

Найдём температуру сгорания всего объёма природного газа в объёме дутьевой смеси для ранее полученных условий:

*приход тепла:*

– низшая рабочая теплота сжигания куба природного газа:

$$Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 36\,720 \text{ кДж/нм}^3 \text{ или на весь объём газа } 66\,096\,000 \text{ кДж};$$

– тепло, вносимое с 4200 м<sup>3</sup> кислорода с воздухом охлаждения:

$$Q_{\text{кис}} = 4200 \cdot 0,3239 \cdot 4,19 \cdot 200 = 1\,139\,998 \text{ кДж};$$

– тепло, вносимое с 15 800 м<sup>3</sup> азота с воздухом охлаждения:

$$Q_{\text{азот}} = 15\,800 \cdot 0,3144 \cdot 4,19 \cdot 200 = 4\,162\,782 \text{ кДж};$$

– приход тепла с 1800 м<sup>3</sup> газа:

$$Q_{\text{газ}} = 1800 \cdot 0,3922 \cdot 4,19 \cdot 100 = 295\,797 \text{ кДж};$$

– тепло, вносимое с 27 575 м<sup>3</sup> кислорода с КВС:

$$Q_{\text{кис}} = 27\,575 \cdot 0,3239 \cdot 4,19 \cdot 120 = 4\,490\,780 \text{ кДж};$$

– тепло, вносимое с 5925 м<sup>3</sup> азота с КВС:

$$Q_{\text{азот}} = 5925 \cdot 0,3144 \cdot 4,19 \cdot 120 = 936\,626 \text{ кДж};$$

*расход тепла с продуктами сгорания природного газа:*

– количество CO<sub>2</sub> – 1800 нм<sup>3</sup>, его теплоёмкость 0,5338 · 4,19 = 2,237 кДж/(нм<sup>3</sup>·град), количество тепла при 930 °С будет равно 3 744 105 кДж;

– количество H<sub>2</sub>O – 3600 нм<sup>3</sup>, её теплоёмкость 0,418 · 4,19 = 1,751 кДж/(нм<sup>3</sup>·град), количество тепла при 930 °С будет равно 5 863 754 кДж;

– количество O<sub>2</sub> – 31 775 – 3600 = 28 175 нм<sup>3</sup>, его теплоёмкость 0,3352 · 4,19 = 1,490 кДж/(нм<sup>3</sup>·град), количество тепла при 930 °С будет равно 39 052 133 кДж;

– количество N<sub>2</sub> – 21 725 нм<sup>3</sup>, его теплоёмкость 0,3352 · 4,19 = 1,404 кДж/(нм<sup>3</sup>·град), количество тепла при 930 °С будет равно 28 376 627 кДж.

Итого, в случае воспламенения и горения природного газа в наконечнике фурмы температура факела на выходе из него составит

$$t_{\text{ф}} = \frac{66\,096\,000 + 1\,139\,998 + 4\,162\,782 + 295\,797 + 4\,490\,780 + 936\,626}{2,237 \cdot 1800 + 1,751 \cdot 3600 + 1,490 \cdot 28\,175 + 1,404 \cdot 21\,725} = 931 \text{ °С}.$$

### Скорость распространения пламени

Кроме пределов и температуры воспламенения не менее важной характеристикой сжигания газа, определяющей и конструкцию, и работу фурмы, является скорость распространения пламени.

Для расчёта скорости распространения пламени Д.А. Франк-Каменецкий и Я.Б. Зельдович рекомендовали использовать формулу [14]:

$$U_T = \sqrt{\frac{4\lambda K_0 C_0}{\rho(T_k - T_0)^2} \left(\frac{RT}{E}\right)^3 e^{-\frac{E}{RT_k}}}, \quad (7)$$

где  $U_T$  – нормальная скорость распространения пламени, м/с;  $\rho$  – плотность смеси, г/см<sup>3</sup>;  $\lambda$  – теплопроводность, кал/(см·с·град);  $K_0$  – константа скорости реакции;  $C_0$  – константа, характеризующая начальную концентрацию газа;  $T_k$  – конечная температура газа, К;  $T_0$  – начальная температура газа, К;  $R$  – газовая постоянная, кал/моль;  $E$  – энергия активации химической реакции, кал/моль.

В табл. 3 показаны результаты расчётов нормальной скорости распространения пламени в смесях горючих газов.

Нормальная скорость распространения пламени в смесях  
горючих газов с воздухом, м/с [14]

Table 3

Normal flame propagation speed in mixtures  
of flammable gases with air, m/s [14]

Газы	Содержание, % об.			Смесь с максимальной скоростью, % об.		
	газ	воздух	$U_n$	газ	воздух	$U_n$ макс.
Водород	29,5	70,5	1,60	42	58	2,67
СО	29,5	70,5	0,30	43	57	0,42
Метан	9,5	90,5	0,28	10,6	89,5	0,37

Опытным путём установлено, что скорость распространения пламени снижается как при обогащении газом горючей смеси, так и при её обеднении. Наибольшая скорость получается для смеси, несколько более богатой газом, чем смесь стехиометрического состава.

С ростом давления метановоздушной смеси скорость распространения пламени снижается. Так, при давлении 1 кгс/см<sup>2</sup> она равна 0,38 м/с, но уже при давлении 2,5 кгс/см<sup>2</sup> скорость распространения пламени уменьшается до 0,25 м/с.

На скорость фронта горения существенное влияние оказывает турбулентность потока: чем она выше, тем выше скорость перемещения пламени и тем более широким оно становится.

Скорость распространения пламени увеличивается с ростом температуры его подогрева.

Для ламинарного течения, характерного для движения газа в газовой трубе, зависимость скорости распространения пламени от подогрева смеси выражается формулой, приведённой в работе [14]:

$$U_T = U_{293} \left( \frac{T}{293} \right)^{1,8}, \text{ м/с}, \quad (8)$$

где  $U_{293}$  – нормальная максимальная скорость при температуре 293 К

При этом скорость распространения пламени при ламинарном течении является физико-химической константой, зависящей только от температуры и давления, как и величина ширины зоны горения, равная 0,5–1,0 мм.

При турбулентном горении скорость распространения пламени не является величиной постоянной и зависит как от физико-химических свойств смеси, так и от физических, гидродинамических свойств турбулентного движения: пульсационной скорости, масшта-

ба турбулентности, масштаба времени, интенсивности турбулентности и коэффициента турбулентного обмена.

Для оценки скорости истечения газа из сопла горелки  $W_c$  Я.Б. Зельдович и Д.А. Франк-Каменецкий предложили использовать эмпирическую формулу [14]:

$$W_c = U_T \sqrt{b^2 + r^2}, \text{ м/с}, \quad (9)$$

где  $U_T$  – скорость распространения пламени для рассматриваемой смеси, см/с;  $b$  – высота конуса факела, см;  $r$  – радиус горелки.

В случае зажигания газа в наконечнике фурмы понимание скорости распространения пламени очень важно для обеспечения устойчивости горения, что позволяет обеспечивать его неподвижность относительно устья фурмы. Это явление наблюдается в определённом интервале скоростей истечения газовой смеси из фурмы. Когда скорость распространения пламени в какой-либо точке фронта горения превысит скорость истечения газовой смеси, возникает проскок пламени внутрь фурмы. В тех случаях, когда скорость смеси превысит скорость распространения пламени, происходит его отрыв. Отрыв пламени не происходит резко, первоначально наблюдаются пульсирующие срывы горения по периферии в основании факела, которые увеличиваются и учащаются с возрастанием скорости истечения газовой смеси.

На отрыв пламени существенное влияние оказывают: состав газа и газовой смеси, диаметр фурмы, режим истечения смеси и конструктивные особенности завихрителей [13]. Соответственно, чем выше скорость распространения пламени, зависящая от состава газа, тем возможна большая скорость выхода смеси из устья фурмы без отрыва пламени.

Для природного газа, используемого в фурме «Аусмелт», скорость распространения пламени низкая (0,28–0,37 м/с), что, как правило, приводит к его отрыву при истечении газозооной смеси из наконечника фурмы с гораздо большими скоростями (от 100 до 300 м/с) и, соответственно, отсутствию горения природного газа в фурме и её наконечнике.

В то же время Д.И. Чижов и А.В. Гречко в своей монографии [15] отмечают, что большое обогащение дутья кислородом (более 50 %) и улучшенное смешение природного газа с окислителем за счёт закрутки потоков на выходе из фурмы приводит к появлению стуков, щелчков, треска, а иногда и к проскоку пламени и горению газа внутри фурмы (наконечника в нашем случае). Исследователи отмечают, что это явление возникает при скоростях истечения потока из фурмы, превышающих 100–200 м/с, что выше скорости нормального распространения пламени при сжигании природного газа. Объяснение этому авторы предлагают искать в появлении факторов, периодически вызывающих преждевременное воспламенение смеси на срезе или в полости наконечника фурмы, или значительно ускоряющих распространение пламени. К таким факторам можно отнести поджигание горючей смеси каплями расплава, затягиваемыми внутрь наконечника, предварительным нагревом смеси перед фронтом пламени за счёт передачи тепла из атмосферы печи и/или появления волн сжатия и последующей ударной волны с переходом в детонационный режим (взрывное горение, когда скорость распространения пламени достигает 3000 м/с). Скорость распространения пламени может увеличиваться и за счёт автотурбулизации потока в результате его крутки.

При сжигании природного газа в условиях окисления сульфидных расплавов слышны неупорядоченные удары, стуки внутри фурмы, отмечаются «хлопки», микровзрывы газа в ванне и в наконечнике, нарушающие равномерность перемешивания. При переокислении шлакового расплава эти явления усиливаются, появляется вибрация, толчки, над расплавом идёт догорание газа. При сжигании газа в сульфидном штейно-шлаковом расплаве и обогащении дутья кислородом до определённого предела горение происходит

более спокойно и ровно. При перерыве дутья и возобновлении его вновь стуки и удары усиливаются в первоначальный период с постепенным затуханием до стандартных значений.

Д.И. Чижов объясняет это явление тем, что при сжигании газа в расплаве возникают гидродинамические пульсации в результате взаимодействия струи с расплавом. Кроме того, пульсации усиливаются в результате избирательной диффузии реагентов образованием плёнки вокруг газовых пузырьков и последующим их схлопыванием. В отличие от окисленного, в сульфидном расплаве наличие сульфидов способствует ассимиляции кислорода ванной с локальным выделением дополнительного тепла, являющегося демпфирующим фактором для отрицательных возмущений [15]. Наличие избыточного кислорода в дутье в сульфидный расплав уменьшает пульсации во фронте горения при сжигании газа.

Процесс горения газового топлива в дутьевом факеле в устье наконечника состоит из нескольких стадий: смешения с воздухом, нагрева полученной смеси до температуры воспламенения, её зажигания и реакции горения, сопровождающейся выделением тепла. Учитывая то, что реакция окисления проходит практически мгновенно, лимитирующими стадиями, определяющими скорость горения, будет подвод в зону реакции кислорода и газа, смешение компонентов и отвод продуктов горения.

#### **Классификация газового факела по пламени**

В технической литературе приводится классификация газовых пламен по следующим признакам [13]:

- в зависимости от режима движения – ламинарный или турбулентный факел;
- по способу образования горючей смеси – гомогенный и диффузионный факел;
- по геометрии факела – свободный и ограниченный;
- по аэродинамической схеме движения – спутный и встречный факел.

Диффузионный факел – характерный для фурмы TSL – отличается от гомогенного тем, что процессы смешения смеси и горения протекают одновременно в реакционном объёме факела в устье наконечника фурмы, причём

лимитирующей стадией является смесеобразование.

Отсутствие предварительного перемешивания смеси КВС и природного газа при прямой струе делает факел более протяжённым, чем в условиях крутки потоков воздуха и газа. Регулируя интенсивность смешения, можно добиваться изменения конфигурации и длины пламени.

В работе [13] авторы отмечают, что при отсутствии крутки смешение двойных концентрических струй заканчивается только в сечении, удалённом от устья наконечника на 12 калибров, в то время как при интенсивности крутки 1,54 – на 0,8 калибра [3, 4].

Зависимости пути смешения двух концентрических струй от параметра эффективной крутки можно описать выражением

$$x = c \cdot \theta^{-1,5}, \quad (10)$$

где  $c$  – константа, равная 1,3 или 1,9 в зависимости от толщины газового кольца.

В основе процесса горения лежат химические реакции соединения топлива с окислителем. В соответствии с ранее выполненным расчётом по методике С.Н. Гущина глубина проникновения струи соответствует 0,8 калибра, что тождественно крутке от 0,8 до 0,9 или углу наклона лопаток от 40 до 50° [2, 3].

Горение природного газа относится к гомогенным реакциям. В соответствии с законом действующих масс скорость любой химической реакции зависит от концентрации реагирующих веществ и температуры. Для образования продуктов горения необходимо расщепление молекул исходных веществ, т. е. преодоление внутримолекулярных сил сцепления с затратой определённого уровня энергии. Этот уровень называют энергией активации. Зависимость скорости реакции от температуры описывается уравнением Аррениуса:

$$\omega = k_0 e^{-\frac{E}{RT}} f(C), \quad (11)$$

где  $k_0$  – предэкспоненциальный множитель;  $E$  – энергия активации, кДж/кмоль;  $R$  – газовая постоянная, кДж/(кмоль·К);  $T$  – абсолютная температура, К;  $C$  – концентрация реагирующих веществ.

Энергия активации реакций горения большинства газовых смесей лежит в пределах от 83,74 до 167,48 МДж/кмоль. С увеличением температуры скорость реакции воз-

растает. Для метановоздушных смесей при  $E = 67,48$  МДж/кмоль и  $R = 8374$  кДж/(кмоль·К) повышение абсолютной температуры в два раза приводит к увеличению скорости реакции в  $5 \cdot 10^8$  раз.

Подводя итог анализа возможности горения газа внутри наконечника фурмы, отметим большую вероятность периодического возникновения этого явления, что вызвано высокой долей природного газа в дутье, близкой к нижнему пределу его самовоспламенения, большой вероятностью наличия обратных токов, приводящих к попаданию расплава внутрь фурмы [3] и возможностью детонационного горения в наконечнике при высоком содержании кислорода в дутье. Горение природного газа в наконечнике будет приводить к увеличению эффективной крутки и расширению зоны обратных токов как по диаметру воронки, так и разряжению на срезе наконечника. В то же время высокая скорость истечения газовой смеси и низкая скорость горения природного газа способствуют работе фурмы с отрывом пламени и формированию факела за пределами наконечника.

Соответственно, наличие взаимоисключающих факторов приводит к тому, что воспламенение природного газа в наконечнике фурмы носит случайный характер, зависящий от объёмов подаваемого дутья, количества природного газа в нём, уровне ванны, глубиной проникновения факела в расплав и другими воздействиями на работу фурмы в ходе плавки.

Наибольшее влияние на механизм сжигания природного газа в фурме и газовом факеле оказывает крутка дутья.

### **Заключение**

Обобщение опыта работы при эксплуатации автогенного плавильного агрегата «Аусмелт», оснащённого вертикальной фурмой TSL, позволяет разрабатывать новые технологические процессы с вертикальным дутьём, совершенствовать и развивать осваиваемые технологии плавки в печи в условиях санкций и ограничений в доступе к мировому опыту использования подобного оборудования. Теоретический анализ и оценка физико-химических процессов, осуществляемых в процессе плавки медесодержащего сырья в агрегатах с вертикальным дутьём, позволяет формировать

и накапливать базу знаний по этой технологии. В представленной работе была сформулирована модель массообменных процессов и выполнен анализ шлаково-штейновой ванны, насыщения её газовыми пузырями, состоящими как из компонентов дутья, так и продуктов окислительных реакций. Оценка пограничных условий по газонасыщению и диаметру газовых включений позволяет контролировать состояние ванны и предотвращать вспенивание расплава при работе в условиях форсированной плавки.

При работе без выбросов дутьевого факела уменьшение диаметра газовых пузырей с 1,1 мм за счёт изменения вязкости и плотности расплава до менее чем 0,9 мм при его передувке и насыщении магнетитом приводит к неизбежному вспениванию и прекращению плавки. Это вызвано условно постоянным объёмом газовых включений на уровне 50 %, раздробление пузырей на большее количество при меньшем их диаметре приводит к подъёму ванны.

На работу фурмы при подаче дутья в расплав оказывают существенное влияние состав смеси КВС. С целью обеспечения возможности переработки сырья с невысоким содержанием серы АО «Карабашмедь» работает в режиме максимального использования при-

родного газа. Обработка данных за многолетний период показала, что процесс ведётся в граничных условиях воспламенения природного газа в наконечнике фурмы, что создаёт дополнительные предпосылки для выхода его из строя.

Сопоставление режимов плавки с мировыми аналогами подтверждает возможность этого влияния на кампанию фурмы, составляющую 3–5 сут, в сравнении с зарубежными предприятиями, где кампания фурмы достигает 28 сут.

Представленная методика оценки условий сжигания природного газа в расплаве позволяет осознанно выбирать наилучшие технологические параметры для конкретного состава природного газа и фактических параметров дутья для условий реальной фурмы с заданными параметрами крутки.

Теоретическая оценка причин «шумной»<sup>2</sup> работы фурмы, позволила персоналу получить дополнительный инструмент контроля работы печи и управлять процессом, понимая причины, приводящие к появлению возмущений, их резким колебаниям в интенсивности и частоте проявлений.

<sup>2</sup> При продувке расплава в фурме слышны стуки, шелчки, треск, гидроудары, наблюдается вибрация тела фурмы различной интенсивности.

### 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. Аусмелт. В 4 т. Т. 3: Теория и модели расчёта. Екатеринбург: Издательство АМБ, 2024. 360 с.
8. Удыма П.Г. Аппараты с погружными горелками. Изд. 2-е, доп. и перераб. М.: Машиностроение, 1973. 272 с.
9. Гушин С.Н., Агеев Н.Г., Крючков Ю.В. Теоретические основы энерготехнологических процессов цветной металлургии: учеб. для вузов / науч. ред. Ю.Г. Ярошенко. Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2000. 312 с.

10. 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.
11. Халатов А.А., Борисов И.И., Щевцов С.В. Тепломассообмен и теплогидравлическая эффективность вихревых и закрученных потоков. Киев, 2005. 500 с.
12. Numerical Study of Bath Dynamics in the Industrial-Scale Top Submerge Lance Furnaces / Z. Wan, S. Yang, D. Kong et al. // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2023. Vol. 54. P. 2159–2173. DOI: 10.1007/s11663-023-02823-3
13. Иссерлин А.С. Основы сжигания газового топлива: справочное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Недра, 1987. 336 с.
14. Евдокименко А.И., Костерин В.В. Природный газ в цветной металлургии. М.: Металлургия, 1972. 240 с.
15. Чижов Д.И., Гречко А.В. Отопительно-дутьевые устройства на природном газе в пирометаллургии. М.: Металлургия, 1986. 152 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: 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.)
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. *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.)
8. Udyma P.G. *Apparaty s pogruzhnymi gorelkami* [Apparatus with immersion burners]. 2nd edition, revised and supplemented. Moscow: Mashinostroenie, 1973. 272 p. (In Russ.)
9. 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.)
10. 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.)
11. Khalatov A.A., Borisov I.I., Shchevtsov S.V. *Teplomassoobmen i teplogidravlicheskaya effektivnost' vikhrevykh i zakruchennykh potokov* [Heat and Mass Transfer and Thermal-Hydraulic Efficiency of Vortex and Swirling Flows]. Kyiv, 2005. (In Russ.)
12. Wan Z., Yang S., Kong D. et al. Numerical Study of Bath Dynamics in the Industrial-Scale Top Submerge Lance Furnaces. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2023;54:2159–2173. DOI: 10.1007/s11663-023-02823-3
13. Isserlin A.S. *Osnovy szhiganiya gazovogo topliva: sprav. posobie* [Fundamentals of Gas Fuel Combustion. Reference Book]. 2nd ed., revised and enlarged. Leningrad: Nedra, 1987. 336 p. (In Russ.)

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

15. Chizhov D.I., Grechko A.V. *Otopitel'no-dut'evye ustroystva na prirodnom gaze v piro-metallurgii* [Natural gas heaters and blowers in pyrometallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 1986. 152 p. (In Russ.)

*Информация об авторе*

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

*Information about the author*

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

*Статья поступила в редакцию 10.10.2025*

*The article was submitted 10.10.2025*