

- conversion with the use of the statistical method]. *Metall i lit'e Ukrainy – Metal and casting of Ukraine*, 2016, no. 7, pp. 11-17. (Rus.)
8. Bondar V.I., Tarasyuk L.I. Issledovanie protsessa kislorodnogo konvertirovaniia metodami matematicheskoi statistiki [The study of the process of oxygen conversion by methods of mathematical statistics]. *Visnik Priazovs'kogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu. Seriya: Tekhnicheskie nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical science*, 2016, no. 33, pp. 21-33. (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 03.04.2018

УДК 669.184.14

doi: 10.31498/2225-6733.36.2018.142513

© Лухтура Ф.И.\*

### О СТЕПЕНИ УСВОЕНИЯ КИСЛОРОДА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ВАННОЙ ПРИ ВЕРХНЕМ ВДУВЕ В LD-КОНВЕРТЕРЕ

*Рассмотрены вопросы усвоения кислорода конвертерной ванной в период продувки во время взаимодействия кислородной струи с окружающей газовой средой и шлаком при ее истечении в полости конвертера верхнего дутья без учета дожигания конвертерных газов в шлаке и газовой полости конвертера. Показана зависимость степени усвоения от параметров истечения кислородного потока из сопел фурм верхнего дутья и других параметров продувки.*

**Ключевые слова:** фурма, сопло, сверхзвуковой поток, кислород, конвертерные газы, эжекция, расплав.

**Лухтура Ф.И. Про ступень засвоєння кисню металевою ванною при верхньому вдутті в LD-конвертері.** Розглянуто причини та ступінь існуючого засвоєння конвертерною ванною дуттєвого потоку окисного газу (кисню) для рафінування розплаву в період продувки. Показано, що ступінь засвоєння кисню дуття металевою ванною пов'язана з фактом відображення периферійної частини кисневого струменя на її довжині від вихідного перетину сопла до поверхні металевого розплаву через наявність зустрічних потоків конвертерних газів в газовій порожнині конвертера і шару шлаку. При цьому ступінь засвоєння кисню через зазначені чинники зменшується на 5-35% в залежності від режимних параметрів, конструкції дуттєвих пристроїв, переносних властивостей надзвукових струменів високотемпературної газової порожнини конвертера із зустрічними потоками конвертерних газів і розплавів, від висоти розташування фурми над металевим розплавом та ін. На процес засвоєння також впливає режим взаємодії газового струменя з рідким розплавом при верхньому дутті, який різний при різній інтенсивності дуття і висоти розташування фурми – ламінарний, перехідний або турбулентний. Показано, що на режим взаємодії газу з розплавом, в свою чергу, впливає існуюча можливість передачі збурень з навколишньої атмосфери в струмінь. Наведено відповідні аналітичні співвідношення для визначення та приклади розрахунку ступеня засвоєння кисню металевим розплавом в 160-т і 350-т конвертерах верхнього дуття при взаємодії потоків окислювача з конвертерними газами і шлакометалевим розплавом. Встановлено, що в основний час продувки ступінь засвоєння кисню збільшується з ростом інтенсивності дуття, швидкості окислювача в ефективному (ізо-

\* ст. преподаватель, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

баричному) перерізі, при збільшенні характерних розмірів (діаметрів) сопел і зменшенні їх числа, опусканні фурми і зниженні відстані від кореня струменів, які витікають, до поверхні металевої ванни.

**Ключові слова:** фурма, сопло, надзвуковий потік, кисень, конвертерні гази, ежекція, розплав.

**F.I. Lukhtura. On the degree of oxygen of metal bath with upper blow in the LD converter.** The reasons and the degree of the existing assimilation by the converter bath of the blast stream of oxidizing gas (oxygen) for refining the melt during the purging period have been considered. It has been shown that the degree of oxygen absorption from the blast of a metal bath is related to the fact that the peripheral part of the oxygen jet is reflected lengthwise from the exit section of the nozzles to the surface of the metallic melt because of the converter gases counterflows in the converter gas space and the slag layer. As this takes place the degree of oxygen uptake due to these factors is reduced by 5-35% depending on the regime parameters, on the design of the blowing devices, the portable properties of supersonic jets in the high-temperature gas cavity of the converter with counter flows of converter gases and melt, on the height of the tuyere position above the metallic melt and etc. The assimilation process is also influenced by the interaction of the gas jet with the liquid melt at the top injection, which is different for different intensity of blasting and the height of the location of the lance - laminar, transient or turbulent. It is shown that the existing mode of transferring disturbances from the surrounding atmosphere into the jet affects the regime of gas interaction with the melt. Appropriate analytical relationships for the determination and examples of calculation of the degree of oxygen assimilation by a metal melt in 160-t and 350-t converters of the upper blast during the interaction of oxidant flows with converter gases and slagmetallic melt are given. It has been found that during the main blowing time, the degree of oxygen uptake increases with increasing blast intensity, oxidizer speed in the effective (isobaric) section, with increasing characteristic sizes (diameters) of the nozzles and reducing their number, with lowering the tuyere and decreasing the distance from the root of the escaping jets to the metal surface bath.

**Keywords:** lance, nozzle, supersonic flow, oxygen, converter gases, ejection, melt.

**Постановка проблеми.** В сложном комплексе явлений, протекающих в ванне кислородного конвертера, процесс взаимодействия газовой струи окислителя с расплавом является первичным и определяющим фактором в прохождении физико-химических и тепломассообменных процессов при плавке. Поэтому одним из высокоэффективных энергоресурсосберегающих направлений, позволяющих достаточно быстро и без значительных финансовых затрат существенно улучшить технико-экономические показатели производства конвертерной стали, является совершенствование дутьевых режимов и устройств кислородных конвертеров. Установление оптимального дутьевого и шлакового режимов плавки и выбор оптимальной конструкции кислородно-конвертерной фурмы, в соответствии с изменяющимися задачами и условиями производства, должны основываться на определении необходимой совокупности аэродинамических характеристик дутьевых струй с комплексом процессов, протекающих как в зоне взаимодействия струй с расплавом (шлаком и металлом), так и в основной части ванны. В связи с вышесказанным, кислородный конвертер можно отнести к гидрогазодинамическому объекту с тепловым режимом работы. Поэтому для правильной организации процессов струйного рафинирования и выбора перспективных направлений в проектировании фурменных устройств требуется, в первую очередь, не только разработка физико-химической модели этого передела, но и четкое представление о характере распространения струйных течений в полости агрегата и расплаве (газовой и жидкой фазе) – обмене энергией, импульсом и т.п. кислородной струи с газовой фазой и «металлической ванной». Переход на более рациональные оптимизированные дутьевые режимы, которые бы обеспечивали решение проблем снижения расходов энергоресурсов (в т.ч. кислорода) на плавку, выбросов, брызгообразования и пылевыноса, окисленности шлака, стойкости фурменных наконечников, футеровки и др., также невозможен без глубокого

исследования действительных физических процессов в струях и их взаимодействия с конвертерными газами, жидкими шлаком и металлом. Кроме того, при оптимизации дутьевого режима плавки и реконструкции или модернизации сопел продувочных устройств исследователи при целенаправленном устранении некоторых недостатков процесса кислородного конвертирования больше обращают внимание на повышение некоторых технологических показателей плавки (улучшение шлакового режима плавки, увеличение выхода годного, стойкости фурменных наконечников и сопел и др.). Вопросы степени усвоения (количеству усвоенного) кислорода металлическим расплавом из общего количества кислорода, расходуемого на плавку, не уделяют должного внимания. При улучшении некоторых показателей плавки, рост расхода кислорода на плавку может свести к минимуму (или «на нет») технико-экономические показатели кислородно-конвертерной плавки. В конечном итоге это приводит к появлению тенденций в изучении широкого круга вопросов по данному направлению, в которых игнорируется часть известных экспериментальных исследований и данных, т.к. они не вписываются в рамки многих предлагаемых методик расчета и теорий. В лучшем случае используются адаптивные (настроечные) [1] коэффициенты, не отражающие физической сущности явлений, происходящих в конвертерной ванне.

Одновременное решение всей «лестницы» задач оптимизации дутьевого режима плавки практически трудноосуществимо. Поэтому обычно решают отдельные, не связанные, задачи оптимизации различных классов (по различным критериям) с последующим пересчетом результатов. При таком подходе возникает вопрос об оценке «погрешностей» в решениях задач широкого (одного) класса и влияние этих погрешностей на отклонения от точных решений в задачах других классов. Такая оценка, даже приближенная, дает возможность проанализировать свойство экономической устойчивости оптимальных решений, т.е. оценить изменение приведенных затрат при изменении исходных данных.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В настоящее время существуют, по крайней мере, два взгляда [2,3] на проблему усвоения кислорода конвертерной ванной при верхней продувке (не учитывая растворения части кислорода в металлической ванне). В первом случае [2] предполагают, что часть кислорода основного дутьевого потока не достигает ванны из-за отражения от поверхности раздела фаз, во втором [3] предполагают «потери» в самой реакционной зоне (первичной), т.к. не вся масса кислорода реагирует с каплями металла в реакционной зоне по причине наличия «сопротивления» переносу через шлаковые оболочки капель, и близкое, в некотором роде, к первому и последнему мнению предположение [4,5] о зависимости степени усвоения кислорода конвертерной ванной от высоты расположения фурмы над металлическим расплавом по причине различных величин заглужения струи в расплав и длины пути ее перемещения. Кроме того, в подавляющем большинстве случаев при совершенствовании и оптимизации фурменных наконечников, дутьевого и шлакового режимов плавки часто практически игнорируют существование этой проблемы, и напрямую отсутствуют технические решения по сокращению расхода кислорода на плавку в этих перечисленных вариантах. К тому же, при составлении теплового баланса плавки, баланса кислорода конвертерной плавки, как в [1-5], необходимо знание «количества» кислородных потоков, участвующих, соответственно, в формировании дожигания конвертерных газов, окисленности шлака при верхней продувке, шлака, окислительного рафинирования металлического расплава и др. Необходимо отметить, что при донной продувке коэффициент усвоения кислорода в первичной реакционной зоне близок к единице [3], что указывает на близкий к тотальному окислению кислородом капель металла, диспергированных сверхзвуковым турбулентным потоком. Это обстоятельство ставит под сомнение превалирование второго из приведенных выше механизмов «усвоения» кислорода расплавом при верхнем вдуве и указывает на то, что причина скорее кроется в различных способах подачи дутья в ванну кислородного конвертера и известном различии гидрогазодинамики взаимодействия кислородной струи с жидким расплавом в агрегате в этих вариантах продувки.

Одним из основных сдерживающих факторов для выбора того или иного взгляда, или существования всех предложенных механизмов усвоения кислорода или определенного преимущественного механизма, оценки степени усвоения кислорода конвертерной ванной являются вопросы распространения турбулентных незатопленных сверхзвуковых нерасчетных струй, истекающих из сопел Лаваля различной геометрии. Со временем сложилась парадоксальная

ситуация: увеличение количества работ и, соответственно, числа публикаций в этом направлении не давало качественного скачка-продвижения в достаточно полном использовании характеристик дутьевого потока для анализа процесса рафинирования расплава, в более глубоком понимании механизма взаимодействия сверхзвуковой нерасчетной струи кислорода с жидкими шлаком и металлом, и, в частности, усвоения кислорода жидким расплавом. Одним из основных, сдерживающих решение всей задачи, является многофакторность эффектов влияния, некоторая непредсказуемость в выборе дутьевых устройств из-за большого «парка» используемых наконечников и продувочных сопел Лавалья, а также вопрос о «приспособлении» нерасчетных струй к условиям окружающей среды. Последняя проблема для газовых течений в одномерной постановке успешно решена в [6], где важную роль играют, кроме числа Маха сопла  $M_a$  и степени нерасчетности истечения  $n$ , такие параметры и характеристики как показатели «энергетического» совершенства сопла: угол раствора сопла  $2\gamma_a$ , отрыв потока от стенок сопла; так и вязкие эффекты на начальном участке струи (первая «бочка»), наличие спутного (встречного) потока, нарастающее давление из-за наличия жидкой фазы и т.п. До сих пор существующие подходы для определения степени усвоения кислорода в реакционной зоне конвертерной ванны (например [2-5]) опираются, в большинстве своем, на косвенные данные либо на балансовые уравнения, не учитывающие действительные расходы кислорода в реакционной зоне. В свою очередь, это также приводит к появлению тенденций в изучении круга вопросов по данному направлению, в которых игнорируется большая часть известных экспериментальных исследований, т.к. они не вписываются в рамки предлагаемых методик расчета. Вследствие этого исследователи при выборе способа продувки или конструкции наконечника фурмы и сопел применяют эмпирические подходы. В сложившейся ситуации наиболее важно создание надежной методики расчета степени усвоения ванной кислородного потока, учитывающей перечисленные недостатки в теории конвертерных процессов. Оптимизация дутьевого режима плавки должна основываться на комплексном экономически выгодном подходе к сокращению расходов энергоресурсов на плавку. Немаловажную роль играют также экологические вопросы, связанные с определенным недостатком кислорода в атмосфере вокруг промышленных районов при сложившейся ситуации в металлургической промышленности Украины, что негативно влияет на жизнедеятельность человека.

**Цель статьи** – уточнить механизм усвоения кислорода металлической ванной на основе анализа механизма взаимодействия кислородного потока со встречными потоками конвертерных газов, с жидкими шлаком и металлом при верхней продувке ванны в режиме глубокого внедрения (проникновения) кислородной струи и, на основе этого, предложить пути сокращения расхода кислорода на плавку.

**Изложение основного материала.** Механизм взаимодействия кислородной струи с расплавом сложен, в первую очередь, из-за не менее сложного механизма турбулентного переноса импульса, вещества и энергии (механизма эжекции) в используемых для продувки расплава сверхзвуковых нерасчетных струях в условиях кислородного конвертирования, в процессе которого наблюдаются встречные им потоки конвертерных газов, изменяются состав и температура последних и гидромеханические условия конвертерной ванны (распространение кислородной сверхзвуковой струи в среде с нарастающим давлением под уровнем шлака и металла с переменными плотностью или удельным весом по высоте слоя и времени продувки плавки) и др.

В последнее время в печати появились оригинальные работы [6-12], позволившие на их основе практически решить проблемы распространения нерасчетных сверхзвуковых струй в затопленном пространстве и в среде с различными теплофизическими свойствами (дальнобойность, турбулентная вязкость, присоединенная масса, поперечные размеры струи и др.). Эти результаты позволили достаточно точно определять параметры в любом сечении сверхзвуковых нерасчетных струй, истекающих в пространство с различной температурой и составом [10, 11] в диапазоне изменения относительной плотности (параметра неоднородности, неизотермичности)  $\theta = 0,0041 \div 25$  [10, 11]. Кроме того, впервые аналитически полученные закономерности распространения газовых струй в жидкости позволили использовать с достаточной точностью закономерности распространения гомогенных газовых струй для определения основных параметров газожидкостного потока: присоединенную массу жидкости к струе (или концентрацию компонентов в газожидкостной смеси), скорости газовой и жидкой фаз, которые

отличаются друг от друга в среднем почти на один-два порядка, и др. [13-15]. Все перечисленные достижения в газодинамике истечения окислителя в незатопленное пространство и в жидкость, вместе с особенностями гидрогазодинамики взаимодействия кислородного потока с расплавом при верхнем вдуве, были использованы для анализа процесса усвоения кислорода ванной при рафинировании расплава. При этом учитывались следующие гидрогазодинамические особенности кислородного рафинирования металла: многовариантность компоновок и числа сопел в наконечнике фурмы и их геометрических размеров, режимов истечения кислородной струи (интенсивность продувки и/или полное давление); величины скорости встречных конвертерных газов; наличие, толщина и плотность (удельный вес) слоя шлака и др.

Картину взаимодействия при верхнем вдуве окислителя, в общем случае, можно представить следующим образом. Начиная от среза сопла наконечника фурмы, при незаглубленной продувке высокоскоростная кислородная струя распространяется в высокотемпературной среде встречных конвертерных газов. К струе подмешиваются мелкодисперсные капли металла и шлака, которые слабо изменяют ее переносные свойства. Так как профиль скорости в струе неравномерный и скорость максимальна на оси струи, а в периферийной части – стремится к скорости встречных газов, то часть кислородного потока со скоростью, равной или меньшей скорости встречных газов, разворачивается (область 3), не достигая жидкости (шлака, металла) (рис.).

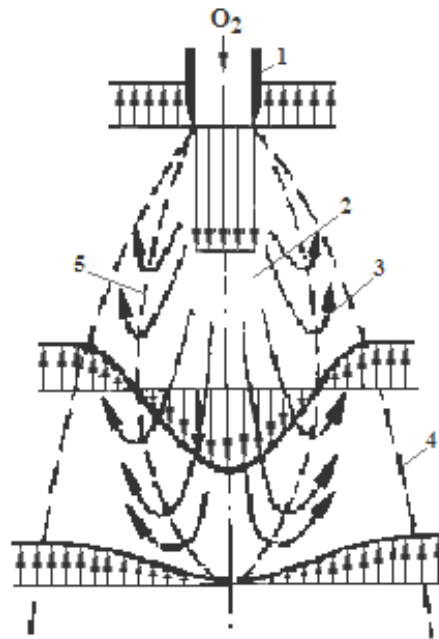


Рисунок – Общий характер взаимодействия газоструйных течений со встречными потоками газов и жидкостями: 1 – сопло; 2 – струйный участок; 3 – отраженная струя; 4 – граница струи; 5 – линия постоянной скорости ( $w = 0$ ) или кривая равновесия полного (или динамического) давления в струе и абсолютного (или пьезометрического) давления жидкости

Оставшийся нисходящий кислородный поток после достижения поверхности расплава (шлака, металла) распространяется в жидкости при нарастающем гидростатическом давлении со стороны шлака и металла вдоль струи. Подобно предыдущей картине взаимодействия потока с конвертерными газами, часть струи газа с полным избыточным давлением, равным или меньшим давлению гидростатического столба жидкости ( $P_{0\text{обс}} \leq P_{\text{атм}} + \rho g H$ ), не может распространяться в жидкости в направлении движения, а разворачивается, образуя обратную струю (обратный поток), аналогичную той картине, которая представлена на рисунке. Таким образом, решение проблемы «усвоения» кислорода металлической ванной при верхней продувке сводится, в первую очередь, к определению количества кислорода, достигающего поверхности раздела шлак-металл, и только затем – количества (величины) «неусвоенного» кислорода непо-

средственно металлической ванной. Для решения этой задачи необходимо знать величины и характер распределения основных параметров (полного давления, скорости, концентрации и энтальпии) в поперечном сечении струи кислорода, а также характерные размеры последней (диаметр внедряющейся в жидкость нисходящей струи и ее диаметр без учета роста гидростатического давления в жидкости) на этой поверхности раздела.

Анализ взаимодействия газа с жидкостью [13-15] позволил установить кроме двух режимов движения газа в жидкости (ламинарного и турбулентного), в зависимости от угла наклона оси сопел в наконечнике к оси фурмы при верхнем вдуве кислорода, два различных условия течения газожидкостной струи при глубоком ее проникновении в расплав. При малых углах наклона – изобарическое («пробойное»), при больших – неизобарическое («беспробойное»). В первом случае давление в струе равно давлению в газовой атмосфере над жидкостью в связи с передачей возмущений из окружающей атмосферы в струю, во втором случае давление в струе распределяется по гидростатическому закону и отлично от атмосферного. В соответствии с этим, в первом случае границей нисходящей струи служит поверхность, форма которой определяется из условия равенства полного избыточного давления в газовой фазе и гидростатического давления в жидкости в каждой точке этой поверхности. При этом при верхней продувке жидкой ванны при отсутствии «окутывания, обволакивания» встречными отраженными потоками ШГМЭ нисходящей («падающей») струи окислителя, что наблюдается при больших углах наклона оси сопел к оси фурмы, из-за нарастания гидростатического давления в жидкости граница прямой струи может определяться согласно условию

$$w_{zp} = \sqrt{\frac{2(\rho_{жс} - \rho_{ex})gh_x}{\rho_{ex}}}, \quad h_x = x - H_{\phi}.$$

При малых углах наклона оси сопел  $\alpha_{накл}$  и окутывании потока окислителя отраженными потоками шлако-газометаллической эмульсии (ШГМЭ)

$$w_{zp} = w_{zx} \cong \frac{w_{ex}}{c \cdot \bar{x}_{pac}} \sqrt{\frac{\rho_{ex}}{\rho_{ex}}} = \frac{w_{ex}}{c \cdot (\bar{H}_{\phi} + 2\bar{H}_{загл}^{pac})} \sqrt{\frac{\rho_{ex}}{\rho_{ex}}},$$

где  $\rho_{жс}$ ,  $\rho_{ex}$ ,  $\rho_{ex}$  – соответственно плотность жидкости и газа в рассматриваемой точке (сечении), и газа в изобарическом сечении;

$w_{ex}$  – скорость потока окислителя в изобарическом сечении сверхзвуковой струи [6];

$c$  – постоянная перемешивания газовой струи;

$\bar{H}_{\phi}$  – относительная высота расположения фурмы над металлическим расплавом;

$\bar{H}_{загл}^{pac}$  – относительное заглубление струи окислителя в расплав.

Количество окислителя, направляющегося в металлическую ванну и первично ею используемого, согласно автоточности профиля скорости в поперечных сечениях струи окислителя, можно определить из соотношения, полученного автором в квазиодномерной постановке на основе анализа представленного разделения потоков

$$\bar{m}'_{ex} \cong \frac{m'_{ex}}{m_{ex}} = \frac{D - B}{A - B}. \quad (1)$$

Количество отраженного дутья (без учета отраженного дутья в поверхностных слоях металла)

$$\bar{m}''_{ex} \cong \frac{m''_{ex}}{m_{ex}} = \frac{A - D}{A - B}, \quad (2)$$

где  $1/A$ ,  $1/B$ ,  $1/D$  – относительные средние скорости (средняя скорость, отнесенная к максимальной), соответственно, на толщине прямой, отраженной и всей струи:

$$\frac{1}{A} \cong \bar{w}_{zx} + \frac{\bar{w}_{zx}^{\max} - \bar{w}_{zx}}{2} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\bar{w}_{zx}^{\max}}{2} \right);$$

$$\frac{1}{B} \cong \frac{\bar{w}_{zx}}{2}; \quad \frac{1}{D} \cong \frac{\bar{w}_{zx}^{\max}}{2} = \frac{1}{2}.$$

Скорость на границе дутьевого потока, направляющегося в металлическую ванну,  $w_{ex} = w_{zp}$ .

Часть отраженного дутья (с каплями металла и шлака) с первично неиспользуемым кислородом металлической ванны взаимодействует со слоем шлака и вынесенными каплями газошлакометаллической эмульсии, которые дополнительно окисляются, образуя также  $CO_2$  и изменяя окисленность шлака. На степень усвоения кислорода конвертерной ванны влияет также скорость обезуглероживания [14]. При максимальной скорости обезуглероживания степень усвоения кислорода максимальна (см. [15] на примере образования  $CO_2$  при продувке расплава).

В результате нестабильности режима дутья или ряда других технологических причин полное давление перед соплами не соответствует расчетному режиму истечения и степень нерасчетности истечения  $n \neq 1$ . Кроме того, в качестве продувочных сопел обычно используются конические сопла Лаваля с углом раствора диффузора  $2\gamma_a = 5-10^\circ$ . Поэтому кроме потерь на трение существуют потери полного давления (газодинамические потери) из-за неравномерности и непараллельности параметров по поперечному сечению сопла, потери на «рассеяние» в выходном сечении сопла и др. Это приводит к обязательному образованию и постоянному присутствию в струе ударных волн, влияние которых на начальном газодинамическом участке на характеристики течения велико [6-9]. Поэтому прежде чем рассчитывать параметры струи на поверхности раздела фаз, необходимо, следуя вышеупомянутой методике, определить эффективные параметры нерасчетных струй по [6-9].

Ниже в табл. 1 приведены характерные размеры типовых наконечников фурм, сопел и параметры режимов истечения, используемых обычно в кислородно-конвертерных цехах (ККЦ) на 160-т и 350-т конвертерах верхнего дутья, и в качестве примера в табл. 2 приведены эти эффективные параметры при истечении из сопел наконечников «базовых» (исходных) и модернизированных фурм для 160-т конвертеров.

Таблица 1

Параметры дутьевых режимов

Параметры	Базовая фурма	
	160-т конвертер	350-т конвертер
Рабочий диапазон интенсивности дутья, $V_{ny}^2$ , м <sup>3</sup> /мин	300-550	1050-1250
Полный перепад давлений $P_0$ (средний) на соплах	10,604	12,64
Степень нерасчетности истечения $n$	2,02	1,02(п); 3,44(ц)
Число Маха сопла $M_a$	1,73	2,29(п); 1,5(ц)
Число сопел	5п	5п+1ц
Угол раствора сопла $2\gamma_a$	7	10(п); 7(ц)
Угол наклона оси сопла к оси фурмы $\beta$	20	15(п); 0(ц)
Диаметр критического сечения $d_*$ , мм	30	42(п); 30(ц)
Диаметр выходного сечения $d_a$ , мм	35	62(ц); 36(ц)

(п – периферийное сопло; ц – центральное сопло).

Таблица 2

Параметры сверхзвуковых струй окислителя в изобарическом сечении, истекающих из «базовых» (5-ти сопловых) и «модернизированных» (4-х сопловых) наконечников фурм

Параметры в эффективном сечении струи	Базовая и «модернизированная» фурма
Относительный диаметр максимального сечения (изобарического сечения) струи на начальном газодинамическом участке $d_{ex}/d_a$	1,463
Число Маха в изобарическом сечении $M_{ex}$	1,795
Скорость газа $w_{ex}$ , м/сек	495,3
Полный перепад давлений $P_{0ex}$ в изобарическом сечении	5,701

Продолжение таблицы 2

Температура торможения $T_{0ex}$	343,4
Молекулярная масса газа $\mu_{ex}$	31,92
Показатель адиабаты $k_{ex}$	1,4

Для анализа описанной модели распространения сверхзвуковых струй окислителя в высокотемпературной неоднородной среде и жидкости можно использовать методы численного решения, применяющиеся на современных ЭВМ (электронно-вычислительных машинах), с привлечением различных известных гипотез турбулентного переноса. Однако, в первом приближении, можно также воспользоваться следующей последовательностью расчета параметров сверхзвуковой нерасчетной струи, используя точное решение уравнений пограничного слоя, каковым является слой смешения струи. Допустим, что переносные свойства газовой струи при внедрении в жидкость не изменяются и соответствуют гомогенному течению совершенного газа, что близко соответствует действительности [16]. Используем аналитическое решение системы уравнений сохранения движения, количества вещества и энергии в струе [17]. При этом законы сохранения для осесимметричного течения без градиента давления могут быть записаны в обобщенных координатах Мизеса [17] в следующей форме:

$$\partial P_k / \partial \xi_k = (1/\psi)(\partial / \partial \psi)[\psi(\partial P_k / \partial \psi)], \quad (3)$$

где под  $P_k$  можно понимать любую из следующих величин: скорость, энтальпию торможения или концентрацию (массовую долю химического элемента);  $\psi$  – функция тока;  $\xi$  – некоторая продольная координата.

Решение уравнения (3) соответствует заданию ступенчатого начального профиля функции. Для типичного случая решение можно представить в виде

$$P_k = \frac{1}{2\pi\xi_k} \int_0^{+\frac{\pi}{2}} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\pi} \exp\left(-\frac{\psi^2 + r^2 - 2\psi r \sin \varphi}{4\xi_k}\right) r dr d\varphi.$$

В этом соотношении  $r$  – расстояние от центра сопла до произвольной точки в плоскости среза сопла,  $\varphi$  – угол между вектором  $r$  и горизонталью, индекс  $k$  указывает, соответственно, рассматривается ли динамическая, тепловая или диффузионная задача.

Интеграл в правой части соотношения можно выразить через  $P$ -функции Мастера или представить в виде ряда:

$$P_k = \exp\left(-\frac{1+\psi^2}{4\xi_k}\right) \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{\psi}\right)^n I_n\left(\frac{\psi}{2\xi_k}\right) \quad \text{при } \psi > 1; \quad (4)$$

$$P_k = 1 - \exp\left(-\frac{1+\psi^2}{4\xi_k}\right) \sum_{n=0}^{\infty} \psi^n I_n\left(\frac{\psi}{2\xi_k}\right) \quad \text{при } \psi < 1; \quad (5)$$

$$I_n(x) = i^{-n} I_n(ix) = \sum_{\nu=0}^{\infty} \frac{1}{\nu! \Gamma(n+\nu+1)} \left(\frac{x}{2}\right)^{2\nu+n};$$

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{z-1} dt \quad (\operatorname{Re} z > 0),$$

где  $I_n$  – функция Бесселя 1-го рода  $n$ -го порядка чисто мнимого аргумента;  $\Gamma$  – функция.

Переход в (4) и (5) к физическим переменным – радиусу струи  $r$  и расстоянию  $x$  от изобразительного (эффективного) сечения – осуществляется по формулам

$$\bar{r}^2 = \int_0^{\psi} \frac{\psi d\psi}{\rho u} \quad \text{или} \quad \bar{r} = \sqrt{\int_0^{\psi} \frac{\psi d\psi}{\rho u}} \quad (6)$$

и



$$\xi_k = \int_0^x 2(A_k \bar{\rho} \bar{\varepsilon})_{\xi,0} d\bar{x} \quad \text{или} \quad \bar{x} = \int_0^{\xi} \frac{d\xi_k}{2(A_k \bar{\rho} \bar{\varepsilon})_{\xi,0}}, \quad (7)$$

где турбулентная вязкость – произведение  $\bar{\rho} \bar{\varepsilon}$  – предполагается зависящей только от безразмерного расстояния  $\bar{x} = x/d_{ex}$  [7, 16].

В силу линейности уравнений, записанных в переменных ( $\psi$ ,  $\xi$ ), справедлив принцип суперпозиции решений. Поэтому профили скорости, концентрации или энтальпии могут быть получены при использовании переменной  $\psi$  в результате наложения профилей.

Так как турбулентная вязкость предполагается зависящей только от осевого расстояния, то процедура вычисления параметров течения выглядит следующим образом. Предварительно вычисляются параметры (скорость, энтальпия торможения и массовая концентрация) на оси затопленной струи по (5). Затем учитывается изменение температуры и состава смеси и, так как происходящие процессы смешения изменяют переносные свойства газовой струи, далее методом последовательных приближений определяют новое значение турбулентной вязкости и, соответственно, новые значения скорости, концентрации и энтальпии на оси струи, от которых зависит также распределение этих параметров в поперечных ее сечениях, в том числе концентрации элементов и температура. Поперечная координата (радиус) струи определяется уже с учетом изменения плотности (в связи с соответствующими изменениями скорости, концентрации и температуры) газа на этой координате из выражения (6), осуществляющего переход к физическим переменным.

Результаты расчета параметров в рассматриваемых сечениях сверхзвуковой осесимметричной струи, истекающей из сопел «базовых» и «модернизированных» фурм 160-т конвертеров, полученные при реализации данного подхода на ПЭВМ, приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Параметры в струе, истекающей из базового сопла фурмы 160-т конвертера, на поверхности раздела шлак-металл

Параметры	Расстояние от оси струи, $\psi$						
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,963	1,0
Относительная скорость $w/w_{ex}$	0,963	0,947	0,89	0,78	0,621	0,488	0,462
Относительная концентрация $O_2$	0,91	0,888	0,821	0,711	0,571	0,453	0,428
Температура торможения, К	502,7	541,2	626,3	841,7	1073	1262	1301
Статическая температура, К	379,1	422,2	552	762,6	1024	1232	1274
Полное давление в струе, бар	2,690	2,391	1,837	1,415	1,181	1,089	1,077
Давление, создаваемое столбом жидкого шлака, бар	1,089	1,089	1,089	1,089	1,089	1,089	1,089
Плотность газа, $кг/м^3$	1,013	0,91	0,696	0,503	0,375	0,312	0,301
Скорость газа, м/с	477,3	469,0	440,8	386,2	307,6	241,6	228,9
Относительный радиус струи	0	0,211	0,459	0,786	1,242	1,752	1,887
Радиус струи, мм	0	10,80	23,50	40,25	63,60	89,71	96,62

Таблица 4

Параметры в струе, истекающей из модернизированного сопла, на поверхности раздела шлак-металл

Параметры	Расстояние от оси струи, $\psi$						
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	1,0
Относительная скорость $w/w_{ex}$	0,982	0,969	0,921	0,816	0,652	0,564	0,491
Относительная концентрация $O_2$	0,942	0,921	0,855	0,742	0,593	0,514	0,442
Температура торможения, К	445,9	483,1	597,8	790,1	1037	1164,1	1279
Статическая температура, К	317,2	358	485,6	703,2	982,8	1123,6	1248
Полное давление в струе, бар	3,3	2,861	2,074	1,507	1,209	1,133	1,089

Продолжение таблицы 4

Давление, создаваемое столбом жидкого шлака, бар	1,089	1,089	1,089	1,089	1,089	1,089	1,089
Плотность газа, кг/м <sup>3</sup>	1,211	1,073	0,791	0,546	0,391	0,342	0,308
Скорость газа, м/с	486,2	479,9	456,1	404,0	322,8	279,4	243,2
Относительный радиус струи $R/d_{ex}$	0	0,193	0,422	0,73	1,169	1,478	1,797
Радиус струи $R$ , мм	0	11,05	37,25	41,79	66,92	84,611	102,9

При расчете учитывалось влияние давления столба жидкого шлака на параметры (поперечные размеры) кислородной струи. Заштрихованные ячейки указывают на равновесие между полным давлением в струе и абсолютным давлением жидкости в данной точке потока, которая является границей «прямой» струи. При высоте расположения фурмы над зеркалом металла  $H = 1$  м расстояние от наконечника базовой фурмы до уровня металла составлял 19,5 калибров сопла, от модернизированного наконечника – 17,5 калибров. Расход кислорода через фурму при этом одинаков для базовых и модернизированных (4-х сопловых) фурм вследствие увеличения диаметра критического и выходного сечений при неизменном числе Маха сопел, так что  $5 \cdot \Sigma F_{a \text{ баз.}} = 4 \cdot \Sigma F_{a \text{ модерни.}}$ . Толщина слоя (не вспененного и жидкоподвижного) шлака определялась, исходя из параметров реального процесса выплавки стали в 160-т конвертерах:

$$H_{\text{шл}} = \frac{4V_{\text{шл}}}{\pi d_{\text{конв}}^2} = \frac{4M_{\text{шл}}}{\rho_{\text{шл}} \pi d_{\text{конв}}^2} = \frac{4 \cdot \frac{9,82}{100} \cdot 160 \cdot 10^3}{2500 \cdot \pi \cdot 4,7^2} = 0,362 \text{ (м)},$$

- где  $V_{\text{шл}}$  – объем конвертера, занимаемый шлаком, м<sup>3</sup>;  
 $M_{\text{шл}}$  – масса образуемого в конвертере шлака, кг;  
 $d_{\text{конв}}$  – диаметр конвертера ( $d_{\text{конв}} = 4,7$  м);  
 $\rho_{\text{шл}}$  – плотность шлака ( $\rho_{\text{шл}} \cong 2500$  кг/м<sup>3</sup>);  
 9,82/100 – количество шлака на 100 кг выплавляемой стали (на основе расчета теплового баланса кислородно-конвертерной плавки).

Из табл. 3 и 4 видно (заштрихованные ячейки), что граница прямой струи, истекающей из базового сопла, находится на расстоянии 89,7 мм от оси струи ( $\psi = 0,963$ ). Эта величина меньше радиуса кислородной струи в случае истечения в газовое пространство, т. е. часть кислородного потока, не доходя до металлического расплава, разворачивается в слое шлака. Граница струи, истекающей из модернизированного сопла, находится на большем расстоянии от ее оси и составляет 102,9 мм ( $\psi = 1$ ), что очевидно, т. к. диаметр сопла больше. Исходя из представленных данных в табл. 3 и 4 и анализа профилей скорости и концентрации кислорода в поперечном сечении струи, видно, что диаметр струйного «пятна» на поверхности металлической ванны больше у струи, истекающей из модернизированного наконечника, профили более наполнены. Это указывает на больший (более высокий) расход кислорода через поперечное сечение струи в этом случае, что не противоречит физическим представлениям.

Для получения более полной информации о величинах расхода окислителя через поперечные сечения рассматриваемых струй при истечении из базовых и модернизированных сопел фурм воспользуемся следующим аналитическим подходом для определения их значений.

Известно, что распределения избыточных скорости, концентрации и энтальпии (температуры) вдоль толщины (радиуса) газовой струи неравномерны (рис.) и соответствуют известному профилю Шлихтинга [7, 8]

$$\Delta \bar{P} \equiv (P - P_{\infty}) / (P_{x \text{ max}} - P_{\infty}) = \left[ 1 - (A \cdot R / R_{x \text{ max}})^{1,5} \right]^2,$$

- где  $P$  – любой из рассматриваемых параметров – скорость  $w$ , концентрация  $c$  (газосодержание), энтальпия  $i$ , на расстоянии  $R$  от оси струи;  
 $P_{x \text{ max}}$  – максимальное значение их на оси струи в сечении  $x$ ;  
 $R_{x \text{ max}}$  – максимальная полутолщина динамического сдвигового слоя струи в рассматриваемом сечении;

$A$  – коэффициент, зависящий от типа рассматриваемых параметров:  $A = 1$  при описании профиля скорости,  $A = Sc = Pr \cong 0,86$  – профилей концентрации (газосодержания) и избыточной энтальпии истекающего газа.

Тогда расход кислорода через поперечное сечение радиусом  $R$  единичной струи можно определить по зависимости (при допущении  $Sc = Pr \approx 1$ )

$$m = \int_F \rho w c dF = 2\pi \int_0^R \rho w c r dr \approx 2\pi w_m c_m \int_0^R \rho \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{1,5} \right]^4 r dr,$$

где  $w_m$  и  $c_m$  – скорость газа и массовая концентрация окислителя на оси струи;

$\rho$  – плотность газа в струе окислителя;

$R$  – полутолщина сдвигового (динамического) слоя струи;

$r$  – текущий радиус струи.

Решение этого интеграла численным методом позволило определить расход кислорода через сопло фурмы в металлическую ванну: для базового сопла –  $m_6 = 1,227$  кг/с; для модернизированного сопла –  $m_m = 1,64$  кг/с.

При этом расход кислорода через сопло в первом случае составляет (исходя из принятых размерах сопел и режимов истечения)  $m_{a6} = 1,8587$  кг/с, во втором случае –  $m_{am} = 2,3233$  кг/с. Расход через фурму  $m_{\Sigma}$  и в том и другом случае одинаков и равен:  $5 \cdot 1,8587 = 4 \cdot 2,3233 = 9,2935$  кг/с, а расход кислорода, поступающего в металлическую ванну, соответственно,  $5 \cdot 1,227 = 6,135$  кг/с и  $4 \cdot 1,64 = 6,56$  кг/с. Степень «усвоения» кислорода для базовых сопел составляет  $6,135/9,2935 = 0,66$ , для модернизированных:  $6,56/9,2935 = 0,706$ .

Используя соотношения (1) и (2), были получены следующие результаты, качественно не противоречащие представленным выше. По данным табл. 3

$$\bar{w}_{ex} = \frac{241,6}{477,3} = 0,50618,$$

по данным табл. 4

$$\bar{w}_{ex} = \frac{243,2}{486,2} = 0,5002,$$

тогда степень усвоения кислорода ванной (количество окислителя, направляющегося в металлическую ванну и первично ею используемого) в первом случае

$$\bar{m}'_{ex} \equiv \frac{m'_{ex}}{m_{ex}} = \frac{D - B}{A - B} = \frac{2 - \bar{w}_{ex} - \bar{w}_{ex}^2}{2 - \bar{w}_{ex}} = 0,82848,$$

во втором:

$$\bar{m}'_{ex} \equiv \frac{m'_{ex}}{m_{ex}} = \frac{D - B}{A - B} = \frac{2 - \bar{w}_{ex} - \bar{w}_{ex}^2}{2 - \bar{w}_{ex}} = 0,83317.$$

Полученные величины хорошо согласуются с данными [3] по степени усвоения, находящимися в диапазоне  $0,65 \div 0,95$ .

Таким образом, при использовании фурм, состоящих из пяти сопел в среднем, только  $6,135 \div 7,7$  кг/с попадает в металлическую ванну, а  $(9,2935 - 6,135 \div 7,7) = 3,1585 \div 1,6$  кг/с не достигает ее, а коэффициент «усвоения» составляет лишь  $66 \div 82,8\%$ . Применение 4-х сопловой фурмы позволяет сократить расход кислорода, не достигающего ванны (неусвоенного ванной), до  $(9,2935 - 6,56 \div 7,74) = 2,7335 \div 1,55$  кг/с (коэффициент «усвоения» –  $70,6 \div 83,3\%$ ). Экономия расхода кислорода составит  $0,425 \div 0,05$  кг/с ( $4,573 \div 3,125\%$ ). За одну плавку –  $(0,425 \div 0,05) \cdot 20 \cdot 60 = 510 \div 60$  кг, что составляет  $357 \div 42$  нм<sup>3</sup> или  $2 \div 0,263$  нм<sup>3</sup>/т стали, что эквивалентно экономии средств в кислородно-конверторном цеху (ККЦ) такого типа при работе 3-х конвертеров в годовом исчислении свыше 1 млн. грн. (в ценах 2004 г.). При этом не учитывался процесс взаимодействия (массообмен) между шлаком и металлом, при котором возможен возврат части кислорода из шлака в металлическую ванну, что приводит к повышению степени усвоения кислорода. В конечном итоге, сокращение расхода кислорода на плавку также положительно сказывается на экологии.

Какие же дополнительные изменения происходят при использовании наконечников фурм с меньшим количеством сопел (например, 4-х сопловых)? Первое – это то, что уменьшение количества неувоенного кислорода однозначно ведет к уменьшению окисленности шлака и степени дожигания конвертерных газов при всех остальных равных условиях кислородного рафинирования. Второе – снижается брызгообразование вследствие уменьшения суммарной поверхности контакта газовой струи с расплавом при даже существующем росте скорости отраженной струи при всех остальных равных условиях, третье – увеличивается стойкость наконечников фурм и др. Кроме того, представленный учет гидрогазодинамики взаимодействия струи с жидкой ванной ставит под сомнение результаты [18] моделирования процессов дожигания конвертерных газов в слое шлака и определения эжекционных свойств кислородных струй [19]. Исходя из механизма взаимодействия кислородного потока со шлаком и металлом, кроме приведенного метода снижения расхода кислорода на плавку существуют также следующие. Это изменение параметрических характеристик дутья (увеличение числа Маха сопла, полного давления газа перед соплом или степени нерасчетности истечения), уменьшение высоты расположения фурмы над ванной, снижение уровня шлака посредством, например, скачивания шлака или уменьшения его плотности, если это не противоречит технологии соответствующей плавки, возможно и др. Однако, в силу технологических условий плавки, последние мероприятия не всегда желательны, т. к. могут привести, например, к снижению стойкости наконечников фурм, или практически невозможны.

Уменьшение количества сопел в наконечнике фурм не всегда возможно, в силу технологических причин, и не всегда приводит к увеличению эффективности продувки (или хотя бы к ее неизменной эффективности). Поэтому такое техническое решение должно быть апробировано под соответствующие режим продувки и технологию выплавки, исходя из параметров садки конвертера, состояния футеровки, стойкости фурм и многое др. [20, 21].

### Выводы

1. Установлено, что наличие встречных потоков конвертерных газов приводит к увлечению ими части кислорода из периферийных участков струи. С ростом скорости конвертерных газов увеличивается количество кислорода, не достигающего ванны. Кроме того, наличие (увеличение толщины и плотности) слоя шлака приводит к тем же эффектам. Более того, с ростом слоя шлака растет доля кислорода «отражаемого» этим слоем (из периферийных участков кислородной струи), которая преимущественно и окисляет первичные конвертерные газы и шлак. Расчет доли отраженного дутья с учетом реального выхода конвертерных газов и реальной величины слоя шлака в ванне 160-т кислородного конвертера показал хорошее соответствие с результатами исследований [3], в которых получено, что степень усвоения кислорода составляет в среднем 0,65-0,95.
2. Показаны пути сокращения расхода кислорода на плавку, в т.ч. уменьшением количества сопел в головке фурмы при неизменной интенсивности продувки. Некоторые из этих результатов\* апробированы на 350-т кислородном конвертере верхнего дутья. Получено экспериментальное подтверждение факту уменьшения расхода кислорода на плавку при уменьшении числа сопел в наконечнике фурмы.
3. Игнорирование факта уменьшения расхода кислорода в металлическую ванну в процессе взаимодействия кислородной струи с конвертерной ванной приводит к некоторому завышению присоединенной к струе массы FeC-расплава в первичной реакционной зоне.

### Список использованных источников:

1. Совершенствование методики и разработка прикладной программы для расчета баланса кислорода конвертерной плавки / А.В. Сущенко, Е.С. Попов, Р.С. Сидорчук, М.П. Орличенко, А.С. Кучерявенко, А.С. Гриценко // Университетская наука-2013 : в 3 т. : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. (Мариуполь, 14-16 апреля 2013 г.) / ДВНЗ «ПГТУ». – Мариуполь, 2013. – Т. 2. – С. 48-50.
2. Бигеев А.М. Metallurgy of steel / А.М. Бигеев. – М. : Metallurgy, 1988. – 480 с.

\* Совместно с А.В. Сущенко

3. Сущенко А.В. Совершенствование дутьевых режимов и устройств кислородных конвертеров на основе исследования процессов в реакционной зоне : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.02 / Сущенко Андрей Викторович; Приазов. техн. ун-т. – Мариуполь, 2002. – 20 с.
4. Бойченко Б.М. Конвертерне виробництво сталі / Б.М. Бойченко, В.Б. Охотський, П.С. Харлашин. – Дніпропетровськ : РВА «Дніпро-ВАЛ», 2004. – 454 с.
5. Баптизмманский В.И. Конвертерные процессы производства стали. Теория, технология, конструкция агрегатов / В.И. Баптизмманский, М.Я. Меджибожский, В.Б. Охотский. – Киев; Донецк : Вища школа, 1984. – 343 с.
6. Lukhtura F.I. One-dimensional theory of off-design supersonic gas jets / F.I. Lukhtura // Fluid Dynamics, 1993. – V. 28, № 1. – P. 35-40.
7. Капустин Е.А. Одномерная теория струй / Е.А. Капустин, Ф.И. Лухтура // Вісник Приазовського державного технічного університету : Зб. наук. пр. / ПДТУ. – Мариуполь, 2001. – Вип. 11. – С. 243-249.
8. Лухтура Ф.И. О закономерностях затопленных струйных течений / Ф.И. Лухтура // Вісник Приазовського державного технічного університету : Зб. наук. пр. / ДВНЗ «ПДТУ». – Мариуполь, 2015. – Вип. 30, т. 1. – С. 202-212. – (Серія : Технічні науки).
9. Лухтура Ф.И. Исследование параметров сверхзвуковых нерасчетных струй газа / Ф.И. Лухтура // Вісник Приазовського державного технічного університету : Зб. наук. пр. / ДВНЗ «ПДТУ». – Мариуполь, 2015. – Вип. 30, т. 1. – С. 192-202. – (Серія : Технічні науки).
10. Лухтура Ф.И. Длина потенциального ядра осесимметричных свободных струйных течений / Ф.И. Лухтура // Университетская наука-2013 : в 3 т. : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. (Мариуполь, 14-16 апреля 2013 г.) / ГВУЗ «ПГТУ». – Мариуполь, 2013. – Т. 2. – С. 72-73.
11. Лухтура Ф.И. О закономерностях течения незатопленных струй / Ф.И. Лухтура // Университетская наука-2016 : в 4 т. : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. (Мариуполь, 19-20 мая 2016 г.) / ГВУЗ «ПГТУ». – Мариуполь, 2016. – Т. 2. – С. 166-168.
12. Лухтура Ф.И. О влиянии спутного потока на распространение турбулентных струй / Ф.И. Лухтура // Университетская наука-2016 : в 4 т. : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. (Мариуполь, 19-20 мая 2016 г.) / ГВУЗ «ПГТУ». – Мариуполь, 2016. – Т. 2. – С. 168-170.
13. Лухтура Ф.И. О критической концентрации углерода в расплаве конвертера / Ф.И. Лухтура // Вісник Приазовського державного технічного університету: Зб. наук. пр. / ДВНЗ «ПДТУ». – Мариуполь, 2012. – Вип. 24. – С. 49-56. – (Серія : Технічні науки).
14. Лухтура Ф.И. О глубине внедрения струи окислителя в расплав кислородного конвертера / Ф.И. Лухтура, А.В. Линник // Вісник Приазовського державного технічного університету: Зб. наук. пр. / ДВНЗ «ПДТУ». – Мариуполь, 2015. – Вип. 30, т. 1. – С. 122-135. – (Серія : Технічні науки).
15. Лухтура Ф.И. О степени дожигания конвертерных газов в конвертерах верхнего дутья / Ф.И. Лухтура // Вісник Приазовського Державного технічного університету: Зб. наук. пр. / ДВНЗ «ПДТУ». – Мариуполь, 2015. – Вип. 30, т. 1. – С. 111-121. – (Серія : Технічні науки).
16. Капустин Е.А. О газовой струе, истекающей в жидкость / Е.А. Капустин, В.Е. Давидсон, В.Н. Евченко // Гидроаэромеханика и теория упругости. – Днепропетровск : ДГУ, 1981. – Вып. 27. – С. 85-95.
17. Kleinstein G. Mixing in turbulent axially symmetric free jets / G. Kleinstein // J. Spacecraft. – 1964. – V. 1, № 4. – Pp. 403-408.
18. Сущенко А.В. Моделирование процесса дожигания монооксида углерода в кислородном конвертере при различных вариантах подвода дутья / А.В. Сущенко, А.С. Безчерев // Вісник Приазовського державного технічного університету: Зб. наук. пр. / ПДТУ. – Мариуполь, 2004. – Вип. 14. – С. 44-47.
19. Сущенко А.В. Об эжекционных свойствах кислородных струй при заглубленной продувке сталеплавильной ванны / А.В. Сущенко, Е.А. Капустин, В.Н. Евченко // Вісник Приазовського державного технічного університету: Зб. наук. пр. / ПДТУ. – Мариуполь, 2002. – Вип. 12. – 2002. – С. 189-193.
20. Совершенствование конструкции кислородной фурмы, дутьевого и шлакового режимов конвертерной плавки в 160-т конвертерах ОАО «ММК им. Ильича» / А.В. Сущенко [и др.] // Металл и литье Украины. – 2005. – № 3-4. – С. 64-67.

21. Сущенко А.В. Оптимизация дутьевого и шлакового режимов конвертерной плавки в ККЦ ОАО «ММК им. Ильича» / А.В. Сущенко [и др.] // Университет городу-2005: тез. докл. XII регион. науч.-техн. конф. – Мариуполь, 2005. – Т. 2. – С. 105-107.

**References:**

1. Sushchenko A.V., Popov Ye.S., Sidorchuk R.S., Orlichenko M.P., Kucheryavenko A.S., Gritsenko A.S. Sovershenstvovanie metodiki i razrabotka prikladnoi programmy dlia rascheta balansa kisloroda konverternoi plavki. *Anotatsii dopovidei Mizhn. nauk.-tekhn. konf. «Universitetskaya nauka-2013»* [Perfection of the methodology and development of an application program for calculating the oxygen balance of converter fusion. Abstracts of Int. Sci.-Tech. Conf. «University science-2013»]. Mariupol', vol. 2, 2013, pp. 48-50. (Rus.)
2. Bigeyev A.M. *Metallurgiya stali* [Metallurgy of steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1988. 480 p. (Rus.)
3. Sushchenko A.V. *Sovershenstvovaniye dut'yevykh rezhimov i ustroystv kislorodnykh konverterov na osnove issledovaniya protsessov v reaktsionnoy zone*. Avtoref. diss. kand. techn. nauk [Improvement of blowing regimes and devices of oxygen converters on the basis of research of processes in the reaction zone. Thesis of cand. tech. sci. diss.]. Mariupol', 2002. 20 p. (Rus.)
4. Boychenko B.M., Okhots'kiy V.B., Kharlashin P.S. *Konverterne virobnytstvo stali* [Converter steel production]. Dnipropetrovs'k, RVA «Dnipro-VAL» Publ., 2004. 454 p. (Rus.)
5. Baptizanskiy V.I., Medzhibozhskiy M.Ya., Okhotskiy V.B. *Konverternyye protsessy proizvodstva stali. Teoriya, tekhnologiya, konstruktsiya agregatov* [Converter processes of steel production. Theory, technology, design of aggregates]. Kiyev, Donetsk, Vishcha shkola Publ., 1984. 343 p. (Rus.)
6. Lukhtura F.I. One-dimensional theory of off-design supersonic gas jets. *Fluid Dynamics*, 1993, vol. 28, no. 1, pp. 35-40.
7. Kapustin Ye.A., Lukhtura F.I. Odnomernaya teoriya struy [One-dimensional jet theory]. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Reporter of the Priazovskyi State Technical University*, 2001, iss. 11, pp. 243-249. (Rus.)
8. Lukhtura F.I. O zakonomernostyakh zatoplennykh struynykh techeniy [On the regularities of flooded stream flows]. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2015, iss. 30, vol. 1, pp. 202-212. (Rus.)
9. Lukhtura F.I. Issledovaniye parametrov sverkhzvukovykh neraschetnykh struy gaza [Investigation of parameters of supersonic non-calculating gas jets]. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2015, iss. 30, vol. 1, pp. 192-202. (Rus.)
10. Lukhtura F.I. Dlina potentsial'nogo iadra osesimmetrichnykh svobodnykh struynykh techenii. *Anotatsii dopovidei Mizhn. nauk.-tekhn. konf. «Universitetskaya nauka-2013»* [Length of the potential core of axisymmetric free jet flows. Abstracts of Int. Sci.-Tech. Conf. «University science-2013»]. Mariupol', vol. 2, 2013, pp. 72-73. (Rus.)
11. Lukhtura F.I. O zakonomernostiakh techeniia nezatoplennykh strui. *Anotatsii dopovidei Mizhn. nauk.-tekhn. konf. «Universitetskaya nauka-2016»* [On the regularities of the flow of non-heated jets. Abstracts of Int. Sci.-Tech. Conf. «University science-2016»]. Mariupol', vol. 2, 2016, pp. 166-168. (Rus.)
12. Lukhtura F.I. O vliianii sputnogo potoka na rasprostraneniye turbulentnykh strui. *Anotatsii dopovidei Mizhn. nauk.-tekhn. konf. «Universitetskaya nauka-2016»* [On the effect of a wakeful flow on the propagation of turbulent jets. Abstracts of Int. Sci.-Tech. Conf. «University science-2016»]. Mariupol', vol. 2, 2016, pp. 168-170. (Rus.)
13. Lukhtura F.I. O kriticheskoy kontsentratsii ugleroda v rasplave konvertera [On the critical concentration of carbon in the converter melt]. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2012, iss. 24, pp. 49-56. (Rus.)
14. Lukhtura F.I., Linnik A.V. O glubine vnedreniya strui okislitelya v rasplav kislorodnogo konvertera [On the depth of introduction of the oxidizer stream into the melt of the oxygen converter].

- Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki – Reporter of the Priazovskiy State Technical University. Section: Technical sciences*, 2015, iss. 30, vol. 1, pp. 122-135. (Rus.)
15. Lukhtura F.I. O stepeni dozhiganiya konverternykh gazov v konverterakh verkhnego dut'ya [On the degree of afterburning of converter gases in converters of upper blast]. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki – Reporter of the Priazovskiy State Technical University. Section: Technical sciences*, 2015, iss. 30, vol. 1, pp. 111-121. (Rus.)
  16. Kapustin Ye.A., Davidson V.Ye., Yevchenko V.N. O gazovoy struye, istekayushchey v zhidkost' [On a gas jet flowing into a liquid]. *Gidroaeromekhanika i teoriya uprugosti – Hydroaeromechanics and the theory of elasticity*, Dnepropetrovsk, 1981, iss. 27, pp. 85-95. (Rus.)
  17. Kleinstein G. Mixing in turbulent axially symmetric free jets. *J. Spacecraft*, 1964, vol. 1, no. 4, pp. 403-408.
  18. Sushchenko A.V., Bezcherev A.S. Modelirovaniye protsessa dozhiganiya monooksida ugleroda v kislorodnom konvertere pri razlichnykh variantakh podvoda dut'ya [Simulation of the afterburning process of carbon monoxide in the oxygen converter with different versions of the blast-feeder]. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Reporter of the Priazovskiy State Technical University*, 2004, iss. 14, pp. 44-47. (Rus.)
  19. Sushchenko A.V., Kapustin Ye.A., Yevchenko V.N. Ob ezheksionnykh svoystvakh kislorodnykh struy pri zaglublennoy produvke staleplavil'noy vanny [On the ejection properties of oxygen jets with a deeper purge of a steel-melting bath]. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Reporter of the Priazovskiy State Technical University*, 2002, iss. 12, pp. 189-193. (Rus.)
  20. Sushchenko A.V., Larionov A.A., Klimanchuk V.V. Sovershenstvovaniye konstruksii kislorodnoy furny, dut'yevogo i shlakovogo rezhimov konverternoy plavki v 160-t konverterakh OAO «MMK im. Il'icha» [Improvement of the construction of an oxygen tuyere, blowing and slag regimes of converter melting in 160-ton converters of Ilyich iron and steel works of Mariupol]. *Metal i lit'ye Ukrainy – Metal and casting in Ukraine*, 2005, no. 3-4, pp. 64-67. (Rus.)
  21. Sushchenko A.V., Larionov A.A., Klimanchuk V.V. Optimizatsiia dut'evogo i shlakovogo rezhimov konverternoi plavki v KKTs OAO «MMK im. Il'icha». *Anotatsii dopovidei XII Region. nauch.-tekhn. konf. «Universitet gorodu-2005»* [Optimization of blowing and slag regimes of converter melting in the KCC of Ilyich iron and steel works of Mariupol. Abstracts of XII Region. Sci.-Techn. Conf. «University to the city-2005»]. Mariupol', 2005, vol. 2, pp. 105-107. (Rus.)

Рецензент: С.Л. Макуров  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 07.05.2018