

7. Peer A.E. Edwards reference cycle for the internal and external combustion / A.E. Peer // Proceedings of the higher educational institutions and associations of the CIS energy. Energy. – 2014. – № 3. – Pp. 62-66. (Rus.)

Рецензент: В.О. Маслов
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 08.04.2015

УДК 532.525.2:533.6.011.5

© Лухтура Ф.И.*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СВЕРХЗВУКОВЫХ НЕРАСЧЕТНЫХ СТРУЙ ГАЗА

Проанализированы влияния режимных параметров (полный перепад давлений, избыточный импульс, расход и др.) на изменение характеристик дутьевого потока (дальнобойности струи, присоединенной к струе массы газа из окружающей среды, и др.) в условиях истечения без эффекта обратной акустической связи из сопел с различными числами Маха и углами между образующей и осью расширяющейся части сопла. Получены соответствующие зависимости для затопленных (изотермических) струй, которые практически совпадают с экспериментальными данными. Приведены области режимов, нежелательные для практического использования при продувке сталеплавильной ванны.

Ключевые слова: фурма, сопло, сверхзвуковой поток, эжекция, присоединенная масса, дальнобойность.

Лухтура Ф.И. Дослідження параметрів надзвукових нерозрахункових струменів газу. Проаналізовані впливи режимних параметрів (повний перепад тиску, надлишковий імпульс, витрата та др.) на змінення характеристик дутьевого потоку (дальнього бою струмини, присєднаної до струменя маси газу з навколишнього середовища, та ін.) в умовах витікання без ефекту зворотного зв'язку з сопел з різними числами Маху і кутами між твірною й віссю дифузора сопла. Отримані відповідні залежності для затоплених (ізотермічних) струменів, які практично збігаються з експериментальними даними. Приведені області режимів, небажаних (нездатних) для практичного використання при продувці сталеплавильної ванни.

Ключові слова: фурма, сопло, надзвуковий потік, ежекція, присєднана маса, дальній бій струменя.

F.I. Lukhtura. Supersonic gas jets parameters research. *The influences of regime parameters (total pressure differential, surplus impulse, consumption etc.) on change of the blowing stream characteristics (hitting range of the jet joined to the gas mass jet from the surrounding medium, etc.) in discharge conditions without acoustic feedback through the nozzles with different Mach numbers, the generatrix and the widening nozzle axis forming an angle have been analyzed. The corresponding dependencies for submerged (isothermal) jets have been received which practically coincide with the experimental data. The regimes undesirable for blowing have been shown. These results and the analyses of the parameters of the supersonic jet as a function of the melting blowing regime refers to the jet penetrating the liquid with the difference that it is necessary to take into account such additional factors as the gas composition and temperature of the gases surrounding the jet, opposite streams of gases, the availability of the second phase, and so on. The received results must be taken into account in designing, improving and operating blowing*

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

devices and burners. The received dependences to define the hitting range, additional mass, the jet section diameter on various factors, that is discharge parameters, blowing devices design and others can be used in choosing the peculiarities of the nozzle design in blowing devices and blowing regimes optimization.

Keywords: *a tuyere, nozzle, supersonic flow, ejection, additional mass, hitting range.*

Постановка проблеми. В сложном комплексе явлений, протекающих в конвертерной ванне, процесс взаимодействия газовой струи с расплавом является первичным и определяющим фактором в прохождении физико-химических и тепломассообменных процессов плавки. Установление оптимального дутьевого режима и выбор оптимальной конструкции кислородно-конвертерной фурмы должны основываться на определении необходимой совокупности аэродинамических характеристик последней с комплексом процессов, протекающих как в зоне взаимодействия струй с расплавом, так и в основной части ванны. Поэтому для правильной организации процессов струйного рафинирования и выбора перспективных направлений в проектировании подобных агрегатов требуется комплексная разработка, как физико-химической модели этого передела, так и точного физического представления характера распространения и взаимодействия, организованных дутьевыми фурмами, струйных течений с конвертерными газами и металлическим расплавом в полости агрегата. Переход на более рациональные дутьевые режимы, которые бы обеспечивали решение проблемы выбросов, брызгообразования и пылевывноса, окисленности шлака, стойкости футеровки и др., также невозможен без глубокого исследования действительных физических процессов в струях [1].

Анализ последних исследований и публикаций. Для внедрения струи кислорода в металл на достаточную глубину необходимо иметь очень высокий начальный импульс струи, что возможно при высоких давлениях кислорода в фурме перед соплами, обеспечивающих сверхкритическое истечение. В результате неустойчивости начального давления и непостоянства расхода через фурму, особенно в условиях ступенчатой продувки, применяемые сопла фурмы (обычно конические сопла Лавалья) практически работают на нерасчетных режимах. Истечение из сопел на перерасширенных режимах приводит к явлению, когда поток в расширяющейся части сопла в некотором его сечении может оторваться от стенок сопла при взаимодействии системы скачков уплотнения с пограничным слоем, образующегося вследствие поверхностного трения [2]. Это приводит к изменению параметров истекающего потока. Несовершенство внутренней геометрии сопла, особенно конфузальной части [3], также приводит, вследствие потерь давления, к существенному изменению динамических характеристик сопел Лавалья. Кроме того, одним из факторов, способных влиять на глубину внедрения струи в металл в незаглубленном режиме продувки, является возможность возникновения эффекта акустической обратной связи (АОС) при истечении сверхзвуковых струй из сопел [4]. Взаимодействие звуковых волн с корнем струи, в особенности после отражения от твердой поверхности [5] (например, от торцевой поверхности фурмы), способно вызвать изменение интенсивности смещения и более резкое падение продольной составляющей скорости вдоль оси струи на данном режиме истечения и, следовательно, способности струи проникать в металлический расплав. Немаловажную роль в образовании и поддержании АОС играет также количество, размеры и взаимное расположение сопел в головке фурмы, представляющей собой многосопловой блок [6].

Для создания более совершенной модели распространения кислородных струй в высокотемпературном газовом пространстве полости конвертера, имеющее к тому же неоднородный состав, необходимо учитывать всю сложность взаимодействия в системе струя - газовая фаза - жидкая фаза (расплав), где существует еще ряд условий, которые способны влиять как на дальность кислородных струй, так и на способность проявления некоторых вышеуказанных факторов. Это наличие в полости конвертера второй фазы (мелко- и крупнодисперсные капли металла и шлака), формирование встречных потоков отходящих газов, горение этих газов в потоке кислорода и др.

В настоящее время накоплен большой фактический материал по влиянию различных параметров (число Маха сопла, степень нерасчетности, угол между образующей и осью сопла и др.) на геометрические, динамические и акустические характеристики струй [2-17]. В результате обобщения экспериментальных данных либо теоретическим путем выведено множество аналитических и эмпирических зависимостей, в ряде случаев достаточно удовлетвори-

тельно описывающих характеристики сверхзвуковых струй. В основном они являются громоздкими, имеют довольно узкий круг применения [7] или недостаточно корректны [8-12]. В настоящее время оптимизация дутьевого режима плавки осуществляется практически на основе промышленных испытаний продувочных устройств, конструкция которых выбирается интуитивно или в соответствии с приобретенным опытом исследователей и проектировщиков, в т. ч. различных сторонних. Выбор на основе точных технических расчетов невозможен, в первую очередь, в связи с отсутствием относительно законченной теории турбулентных нерасчетных струй, истекающих из сопел Лаваля различной геометрии, и расчетов как параметров течения в высокотемпературной неоднородной среде кислородного конвертера, так и параметров взаимодействия с жидкими шлаком и Fe-расплавом. В настоящее время в связи с появлением публикаций [13-15] появилась надежная база для оптимизации по различным критериям дутьевого режим конвертерной плавки с целью сокращения энерго- и металлоемкости выпускаемой продукции.

Цель статьи – на первом этапе создания достаточно объемлющей модели распространения струй в газовой полости конвертера, провести, на основе [13], анализ дальнобойности¹ изотермических сверхзвуковых струй однородного состава (затопленных струй), изменения присоединенной массы газа из окружающей среды к струе и толщины пограничного слоя последней. Незнание этих характеристик струи может привести к погрешностям при оценке динамического воздействия высокоскоростных струй на жидкую ванну при внедрении их в жидкость, эжектирующей способности струй на участке от наконечника фурмы до ванны, глубины проникновения кислородной струи в расплав, критической концентрации углерода в конвертерной ванне и др. Кроме того, с точки зрения практики полезно использовать характерный размер сверхзвуковой нерасчетной струи, например, длину сверхзвукового ядра для определения критической концентрации углерода в ванне кислородного конвертера по соотношениям, представленными в [16], которая указывает на связь масштабов свободной турбулентности с эффектами перемешивания расплава.

Изложение основного материала. В [13, 15] показано, что сверхзвуковая нерасчетная струя действительно близка к расчетной за изобарическим сечением, находящимся в конце первой «бочки» ударно-волновой структуры нерасчетной (или расчетной с неравномерным распределением параметров по выходному сечению сопла и наличием радиальной составляющей скорости) струи. Однако, при этом для расчета параметров в изобарическом сечении необходим учет вязких эффектов – эжекции газа окружающей среды на участке от максимального сечения первой «бочки» до изобарического сечения. Число Маха для таких полностью расширенных нерасчетных струй, истекающих в движущийся поток из сопел любой конфигурации поперечного сечения, можно определить по соотношению

$$M_{ex} = \sqrt{\left(\frac{d_a}{d_{ex}}\right)^N \frac{1}{k_{ex}} \left[\frac{k_a M_a^2 n (1 - w_\infty/w_a) + n - 1}{(1 - w_\infty/w_{ex})} \right]}, \quad (1)$$

полученного на основе исследований, приведенных в [12]. Для струй, истекающих в неподвижную среду ($w_\infty=0$),

$$M_{ex} = \sqrt{\left(\frac{d_a}{d_{ex}}\right)^N \frac{k_a}{k_{ex}} \left(M_a^2 n + \frac{n-1}{k_a} \right)}. \quad (2)$$

Характерный размер изобарического сечения реальной (вязкой) сверхзвуковой струи d_{ex} определяют исходя из предположений о равенстве его максимальному размеру первой «бочки» ударно-волновой структуры и отсутствия эжекции газа из окружающей среды на участке от выходного сечения сопла до максимального сечения первой «бочки» [13], размер которой не

¹ Под дальнобойностью понимается расстояние L от среза сопла до сечения струи с выбранной скоростью w_x , либо безразмерной (относительной) скоростью λ_x на оси.

зависит от скорости внешнего потока. При этом значение относительной присоединенной массы в струе получают отнесением абсолютного значения этой величины к массе газа в изобарическом сечении. Для расчетной струи в отсутствие радиальной составляющей скорости $w_{ex} = w_a$ и изобарическое сечение совпадает с выходным сечением сопла.

Из [17] известно выражение, полученное на основе точного решения уравнений пограничного слоя и описывающее, в том числе, распределение продольной составляющей средней скорости на оси струи, которое для изотермической струи однородного состава можно представить в следующем виде

$$\frac{w_x}{w_{ex}} = \frac{\lambda_x}{\lambda_{ex}} = 1 - \exp[\alpha/(1 - x/x_c)], \quad (3)$$

где w_{ex} , λ_{ex} – соответственно абсолютная и приведенная эффективные скорости в сечении полного расширения [12, 13];

λ_x – приведенная скорость на оси струи в рассматриваемом сечении;

α – коэффициент, зависящий от начальных условий истечения (интенсивности турбулентности, степени ламинаризации, числа Рейнольдса Re , наличия резонансного эффекта АОС и т.п.);

x – относительное расстояние от среза сопла;

x_c – относительная длина ядра потенциальной скорости.

Для турбулентных струй с естественной начальной турбулентностью при $Re > 10^5$ коэффициент $\alpha = 1,55$ [12].

Длину сверхзвукового ядра затопленной струи при условии слабого влияния на течение эффекта акустической обратной связи можно определить, следуя [12] с учетом $k = k_{ex}$, из выражения:

$$\frac{X_{36}}{D_{ex}} = 13\sqrt{M_{ex}^2 - 1}, \quad M_{ex} = \sqrt{\frac{F_a}{F_{ex}} \left(M_{ex}^2 n \cdot \cos^2 \alpha_a + \frac{n-1}{k} \right)}, \quad (4)$$

диаметр звукового сечения

$$\frac{D_{36}}{D_{ex}} = 2,738 \cdot M_{ex}, \quad (5)$$

где M_{ex} – число Маха потока при полном его расширении до давления окружающей среды в изобарическом сечении;

M_a – число Маха сопла;

F_{ex} – площадь эффективного (изобарического) сечения струи, принятая равной площади максимального сечения первой «бочки» F_m ударно-волновой структуры [12];

F_a – площадь выходного сечения сопла;

α_a – среднemasсовый угол наклона вектора выходной скорости к оси сопла [12];

$k = C_p/C_v$ – показатель адиабаты истекающего газа;

$n = P_a/P_\infty$ – степень нерасчетности струи;

$P_a = P_0 \cdot \pi(M_a)$ – статическое давление на срезе сопла;

P_0 – давление торможения;

$\pi(M_a)$ – известная функция M [3].

В связи со сложностью расчетного определения D_{ex} и отношения F_a/F_{ex} , можно воспользоваться приближенным выражением [13] для определения диаметра эффективного сечения (диаметр первой «бочки») $\bar{D}_{ex} \equiv D_{ex}/D_a = \sqrt{F_{ex}/F_a} = q(M_a)/q(M_j)$, которое хорошо аппроксимирует теоретические и экспериментальные данные при $M_a < M_j < 3$ и $\alpha_a \rightarrow 0$, или эмпирической зависимостью [18], справедливой лишь для $M_a \gg 1$: $\bar{D}_{ex} = \bar{D}_m = (1 + 0,57 \cdot \text{tg} \gamma_a) n^{0,6}$, где $q(M)$ – известная газодинамическая функция [3, 7]; M_j – число Маха струи, рассчитанное по полному перепаду Π_0 [13]; γ_a – полуугол раствора сопла.

Длина ядра потенциальной скорости из (1) с учетом (2) и $\lambda_s = 1$

$$\bar{x}_c = \frac{13\sqrt{M_{ex}^2 - 1}}{1 - \alpha/\ln(1 - 1/\lambda_{ex})}. \quad (6)$$

Тогда выражение для определения изменения дальности струи примет вид

$$\bar{X} = \frac{X}{D_{ex}} = \frac{13\sqrt{M_{ex}^2 - 1}}{1 - \alpha/\ln(1 - 1/\lambda_{ex})} \left[1 - \frac{\alpha}{\ln(1 - \lambda_x/\lambda_{ex})} \right]. \quad (7)$$

Для дальнего следа струи из (3) можно получить упрощенное выражение $\bar{X} = 13\sqrt{M_{ex}^2 - 1}/\lambda_x$. Последнее выражение хорошо описывает кривую затухания продольной составляющей скорости уже в начале основного участка струи (в среднем, при $X > (1,5 \div 2)x_c$ для сопел и режимов истечения, используемых в металлургии).

Для оценки изменения параметров сверхзвуковой нерасчетной струи (дальности, размера поперечного сечения струи и присоединенной массы газа окружающей среды к струе) от начальных условий истечения выберем сечение с числом Маха на оси $M_x = 1$, находящееся на расстоянии $\bar{X}_{зб}$ от конца начального газодинамического участка (участка адаптации) [13], характеризующее длину сверхзвукового участка струи. При этом значения плотности потока избыточного импульса $I/(p_\infty \cdot F_x) = k_x M_x^2$ и полного давления на оси p_{0x} в этом сечении для всех рассматриваемых вариантов струй практически постоянны (не изменяются).

Большой практический интерес представляет случай влияния числа Маха сопла M_a (или коэффициента скорости λ_a) на параметры (дальность, диаметр характерного сечения и др.) струи, когда секундный расход через фурму или сопло и начальные параметры газа (P_0 , T_0) сохраняются постоянными. Это условие для сопел может быть реализовано, если при постоянной площади критического сечения сверхзвукового сопла $F_{кр}$ изменять площадь выходного сечения F_a , при постоянном массовом расходе через наконечник фурмы с числом сопел z . Характер зависимости дальности от величины M_a в этом случае позволит определить рациональную степень расширения сопла для фурмы с заданными параметрами и расходом газа. В дальнейшем целесообразно оперировать не степенью нерасчетности истекающей струи, а располагаемым перепадом давлений перед соплом $\Pi_0 = P_0/P_\infty$, который в большинстве задач задан и связан с массовым m (или объемным $V_{н.у}$ при н.у.) расходом через наконечник фурмы. Например, для наконечника фурмы, состоящего из z сопел площадью выходного сечения F и n сопел площадью выходного сечения f , полный перепад давления можно определить из выражения

$$\Pi_0 = \frac{m\sqrt{RT_0}}{A \cdot p_\infty \{z[Fq(\lambda_a)]_z + n[fq(\lambda_a)]_n\}}; \quad A = \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}; \quad m = \rho_{н.у} V_{н.у}, \quad (8)$$

где $\rho_{н.у}$, $V_{н.у}$ – соответственно плотность и объемный расход газа при нормальных условиях.

Следуя [10], определим диаметр выходного сечения сопла из уравнения массового расхода газа m через z сопел наконечника фурмы [7], выраженного через параметры торможения

$$D_a = \sqrt{\frac{4m(RT_0)^{1/2}}{z\pi P_0 \cdot q(M_a) \cdot \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}}, \quad (9)$$

где R – газовая постоянная;
 T_0 – температура торможения истекающего газа,
 z – число сопел в головке фурмы.

Подставив (8) и (9) в (4) и (5), получим

$$\frac{X_{зб}}{\sqrt{m}} = 13 \cdot K \frac{D_{ex}}{D_a} \sqrt{\frac{F_a}{F_{ex}} \left[\frac{M_a^2 \cos^2 \alpha_a}{1/\pi(M_a)} + \frac{1}{k_{ex}/\pi(M_a)} - \frac{1}{\Pi_0 k_{ex}} \right] - \frac{1}{\Pi_0}}; \quad (10)$$

$$\pi(M_a) = \left[\left(1 + \frac{k-1}{2} M_a^2 \right)^{\frac{k}{k-1}} \right]^{-1}; \quad K = \left(\frac{B\sqrt{RT_0}}{p_{\infty}q(M_a)} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad B = 4 \left[z\pi \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \right]^{-1};$$

$$\frac{D_{зв}}{\sqrt{m}} = K' \sqrt{\left[\frac{M_a^2 \cos^2 \alpha_a}{1/\pi(M_a)} + \frac{1}{k_{ex}/\pi(M_a)} - \frac{1}{\Pi_0 k_{ex}} \right]}; \quad K' = 2,738 \left(\frac{B\sqrt{RT_0}}{p_{\infty}q(M_a)} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (11)$$

Из результатов расчета по соотношению (10), (11) (принято $z = 1$) (рис. 1, 2) следует, что для каждого конкретного перепада давления перед соплом зависимость дальности струи от числа Маха (или приведенной скорости λ_a) сопла имеет максимум. Дальность максимальна у сопла, для которого при заданном перепаде давлений реализуется полное расширение газа в сопле, т.е. при расчетном режиме истечения. Однако характер функциональной зависимости дальности от числа Маха таков, что даже при заметном снижении величины M_a по сравнению со значением на расчетном режиме величина дальности уменьшается незначительно. Это позволяет в некоторых случаях применять сопла с неполным расширением газа, а при небольших сверхкритических перепадах давления использовать даже простые нерасширяющиеся сопла, в которых $M_a = 1$. Наряду с этим, как видно из рис. 1, при $M_a > M_{арасч}$ дальность резко уменьшается, т.е. режимы работы сопла с перерасширением газа в нем применять нецелесообразно. Нецелесообразно их применять также по причине существования на этих режимах отрыва потока от стенок сопла [19] (область пере-

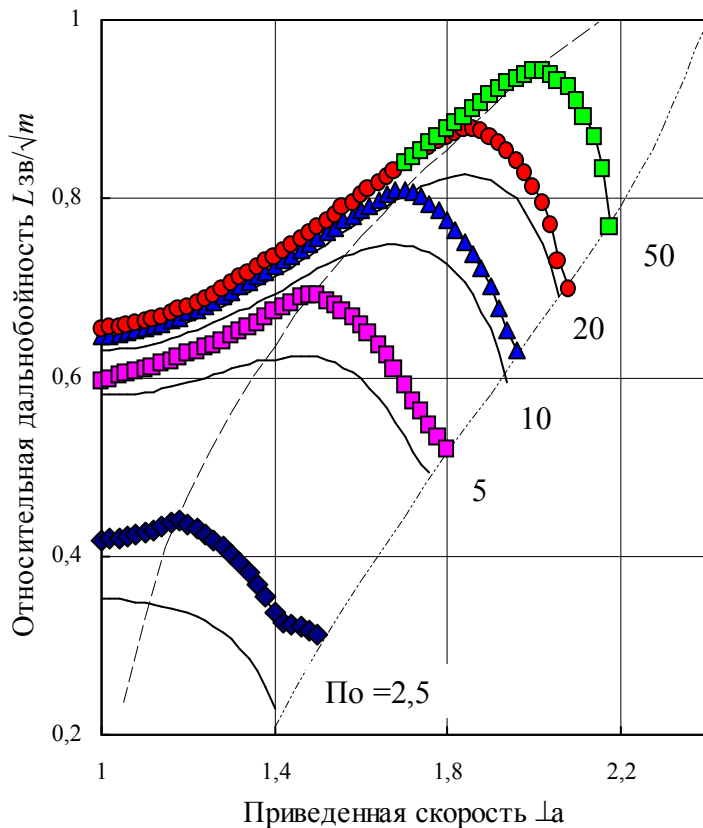


Рис. 1 – Зависимость длины сверхзвукового ядра от полного перепада давления для сопел с различной геометрией

расширенных режимов, находящаяся справа от штриховой линии расчетного режима истечения), приводящего при наличии «агрессивных» сред (металла и шлака) в эжектированном из окружающей среды газе к сокращению стойкости сопловых устройств [20]. Использование сопел с углом между образующей конической части и осью более 12° несколько расширяет диапазон безотрывного режима истечения [19, 20] (рис. 1). Эта область отрыва находится правее экстремума на кривых для этих сопел.

Для данной геометрии сопла ($M_a - \text{const}$) с увеличением полного перепада давления дальность струи увеличивается, в т. ч. при постоянном расходе истекающего газа (достигается уменьшением размера горла сопла). Прирост максимальной дальности за счет увеличения числа Маха сопла ($M_a = 1 \div 2,5$) составляет примерно 20-40%.

Сравнение расчетных данных показало, что для струй, истекающих при одном и том же значении полного перепада давления (например, $\Pi_0 = 10$) и одинаковых начальных расходах переход от сопла с числом Маха $M_a = 1$ к соплу с $M_a = 2,3$ приводит к увеличению значения X_s

примерно на 20-27% в зависимости от угла раствора сопла. При этом же значения Π_0 дальнейший рост числа Маха сопла до $M_a = 3$ приводит к уменьшению дальности на 30%, приближаясь практически к дальности при истечении из сопла с $M_a = 1$. Таким образом,

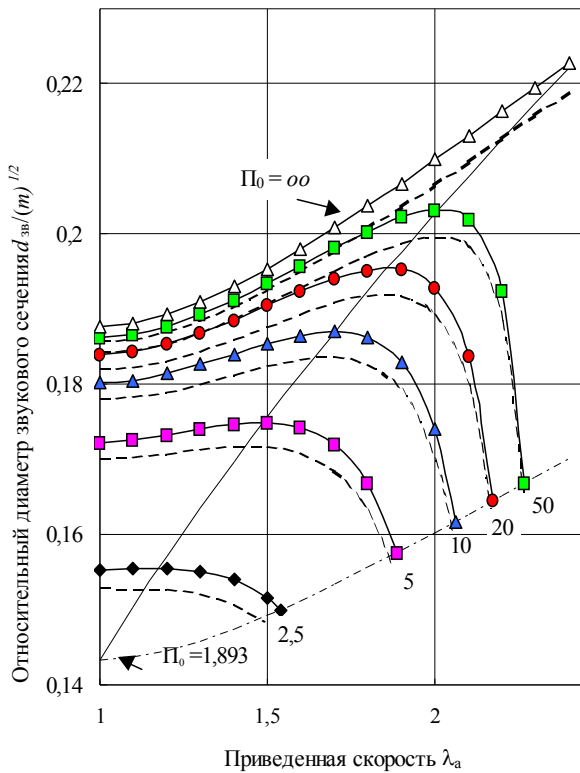


Рис. 2 – Зависимость диаметра сверхзвукового ядра от полного перепада давления для сопел с различной геометрией

полученные данные указывают на ошибочность выводов работ [9 и др.] о монотонном (безэкстремальном) увеличении дальности струи с ростом числа Маха сопла при $\Pi_0 = \text{const}$, т.к. при этом необходимо (следует) оговаривать, что понимается (подразумевается, предполагается) под термином «дальность» – относительная ее величина или абсолютная.

С ростом угла раствора сопла дальность струи уменьшается во всем диапазоне изменения полного перепада давления (или степени нерасчетности). При этом кривая изменения дальности более сглаженная и максимум дальности смещается в область перерасширенных режимов истечения.

Сверхзвуковой поток из сопла с числом Маха M_a с минимальной дальностью X_{min} реализуется при минимальном перепаде Π_{0min} . При этом перепаде, ошибочно отнесенного в [9, 10] к режиму начала отрыва потока от стенок сопла, обеспечивается критическое (звуковое) течение из сопла [14]. При меньшем перепаде наблюдается дозвуковой режим истечения из сопел (без скачков уплотнения в струе) за начальным участком струи («мостообразным» скачком). Для определения значения $X_{min} = X_c$ достаточно в уравнения (5) и (6) подставить зна-

чение

$$\Pi_{0min} = \frac{k_{ex} + 1}{kM_a^2 + 1} \left(1 + \frac{k-1}{2} M_a^2 \right)^{k/k-1} \quad (12)$$

Из рассмотрения уравнения сохранения количества движения вдоль оси струи в квазидномерном приближении [15] следует, что присоединенная масса является функцией продольного распределения скоростей (дальности). В связи с этим характер зависимости присоединенной массы от числа Маха сопла при постоянном перепаде давления следует ожидать аналогичным характеру изменения дальности. Из [15] следует, что относительная присоединенная масса в звуковом сечении

$$g \equiv \frac{m_\infty}{m_{ex}} = \frac{2w_{ex}}{w_x} - 1 = \frac{2\lambda_{ex}}{\lambda_x} - 1 = 2\lambda_{ex} - 1 = 2M_{ex} \sqrt{\frac{(k_{ex} + 1)/2}{1 + \frac{k_{ex} - 1}{2} M_{ex}^2}} - 1 \quad (13)$$

На рис. 3 представлены расчетные данные ($z = 1$) по присоединенной массе нерасчетных струй, которые указывают на прогнозируемый выше (аналогичный с характером изменения дальности) характер изменения этой величины с ростом числа Маха сопла при постоянном полном перепаде.

Определенный практический интерес представляет также анализ зависимости дальности от внутренней геометрии сопла (числа Маха) при постоянном значении плотности потока импульса I/F_a истекающего газа или отношения плотности потока импульса к статиче-

скому давлению окружающей среды – $I/(p_\infty \cdot F_a)$.

Избыточный импульс потока в продольном направлении на выходе из сопла представим в виде

$$\begin{aligned} I &= mw_a \cos \alpha_a + (p_a - p_\infty)F_a = \\ &= p_\infty F_a [\Pi_0 f(M_a) - 1]; \\ f(M_a) &= \left(kM_a^2 \cos^2 \alpha_a + 1 \right) \pi(M_a). \end{aligned} \quad (14)$$

Тогда полный располагаемый перепад составит $\Pi_0 = (1 + I_a / p_\infty F_a) / f(M_a)$.

Подставляя последнее выражение в (10) после преобразований получим

$$\frac{X_{зг}}{\sqrt{m}} = K \frac{D_{ex}/D_a}{\left(1 + \frac{k-1}{2} M_a^2\right)^{\frac{k}{2(k-1)}}} \sqrt{\frac{F_a}{F_{ex}} \left[M_a^2 \cos^2 \alpha_a + \frac{1}{k_{ex}} \left(1 - \frac{kM_a^2 \cos^2 \alpha_a + 1}{1 + \frac{I}{p_\infty F_a}} \right) \right]} - \frac{kM_a^2 \cos^2 \alpha_a + 1}{\left(1 + \frac{I}{p_\infty F_a}\right)}. \quad (15)$$

Результаты расчетов по (15) показывают, что для перерасширенных режимов истечения дальнобойность струй (расстояние до характерного сечения отнесено к выходному диаметру сопла) одинакова при равенстве отношений плотности потока импульса к статическому давлению окружающей среды. С ростом нерасчетности, начиная с расчетного режима, относительная дальнобойность снижается.

Определенный практический интерес представляет изменение параметров дутья на поверхности металлической ванны при неизменной высоте расположения наконечника фурмы над ванной X и изменении параметров истечения из сопел фурмы. Тогда выражения (10), (11), (13) можно представить соответственно как (16), (19), (20).

$$\frac{X}{\sqrt{m}} = 13 \cdot \frac{K D_{ex}}{\lambda_x D_a} \sqrt{\frac{F_a}{F_{ex}} \left[\frac{M_a^2 \cos^2 \alpha_a}{1/\pi(M_a)} + \frac{1}{k_{ex}/\pi(M_a)} - \frac{1}{\Pi_0 k_{ex}} \right]} - \frac{1}{\Pi_0}. \quad (16)$$

Приведенная скорость на оси струи на поверхности ванны

$$\lambda_x = 13 \cdot \frac{K \sqrt{m} D_{ex}}{X D_a} \sqrt{\frac{F_a}{F_{ex}} \left[\frac{M_a^2 \cos^2 \alpha_a}{1/\pi(M_a)} + \frac{1}{k_{ex}/\pi(M_a)} - \frac{1}{\Pi_0 k_{ex}} \right]} - \frac{1}{\Pi_0}. \quad (17)$$

Число Маха

$$M_x = \lambda_x \sqrt{\frac{2/(k_x + 1)}{1 - \frac{k_x - 1}{k_x + 1} \lambda_x^2}}; \quad (18)$$

$$\pi(M_a) = \left[\left(1 + \frac{k-1}{2} M_a^2 \right)^{\frac{k}{k-1}} \right]^{-1}; \quad K = \left(\frac{B \sqrt{RT_0}}{p_\infty q(M_a)} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad B = 4 \left[z \pi \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \right]^{-1}.$$

Диаметр сечения струи на поверхности ванны

$$\frac{D_x}{\sqrt{m}} = \frac{K'}{M_x} \sqrt{\left[\frac{M_a^2 \cos^2 \alpha_a}{1/\pi(M_a)} + \frac{1}{k_{ex}/\pi(M_a)} - \frac{1}{\Pi_0 k_{ex}} \right]}; \quad K' = 2,738 \left(\frac{B \sqrt{RT_0}}{p_\infty q(M_a)} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (19)$$

Присоединенная к струе масса газа окружающей среды

$$g \equiv \frac{m_\infty}{m_{ex}} \equiv \frac{2w_{ex}}{w_x} - 1 = \frac{2\lambda_{ex}}{\lambda_x} - 1 = 2 \frac{M_{ex}}{M_x} \sqrt{\frac{1 + \frac{k_x - 1}{2} M_x^2}{1 + \frac{k_{ex} - 1}{2} M_{ex}^2}} - 1. \quad (20)$$

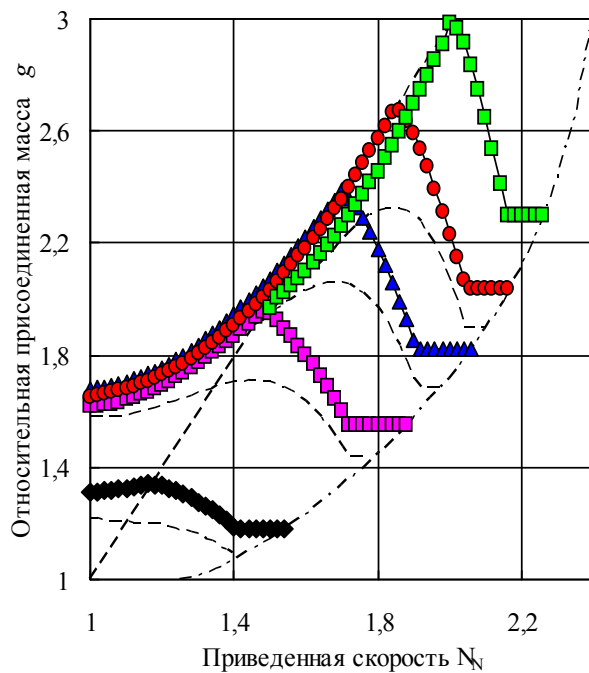


Рис. 3 – Зависимость присоединенной массы к сверхзвуковой струе от полного перепада давления для сопел с различной геометрией (условные обозначения как на рис. 1)

Анализ последних соотношений указывает на то, что при неизменном уровне расположения фурмы над расплавом, с ростом полного давления при любом числе Маха сопла скорость на поверхности ванны растет, диаметр струи и присоединенная масса к струе снижаются. При изменении числа Маха сопла при неизменном полном давлении экстремум наблюдается на расчетном режиме истечения. При этом скорость (приведенная скорость) максимальна, диаметр струи и присоединенная масса минимальны.

Все приведенные результаты и анализ изменения параметров от основных влияющих факторов дутьевого режима плавки в равной мере касается и струи, внедряющейся в жидкость, с той лишь разницей, что в последнем случае при выяснении влияния начальных параметров истечения на характеристики дутья, необходимо учитывать комплекс не учитываемых выше факторов, такие как температура и состав газов окружающего струю пространства, встречные потоки отходящих из реакционной зоны газов, наличие второй (жидкой) фазы и др.

Выводы

1. Приведенные результаты целесообразно учитывать при проектировании, совершенствовании и эксплуатации дутьевых, горелочных устройств и других струйных аппаратов.
2. Полученные зависимости для определения дальности присоединенной массы, диаметра характерного (звукового) сечения и др. от различных факторов: режимных параметров истечения, геометрии дутьевых устройств и др., могут использоваться для выбора конструктивных особенностей сопел в дутьевых устройствах металлургических агрегатов и оптимизации соответствующих дутьевых режимов.
3. При дальнейших исследованиях в рассматриваемом направлении целесообразным является дополнительный учет комплекса не учитываемых выше факторов, такие как температура и состав газов окружающего струю пространства, встречные потоки отходящих из реакционной зоны газов, возможное проявление эффекта акустической обратной связи, наличие второй фазы и др., которые достаточно существенно влияют на распространение струй и их динамические характеристики, что позволит получить более полную картину распространения сверхзвуковых нерасчетных струй окислителя и разработать более эффективные мероприятия по рациональному использованию дутьевых струй для продувки расплава в кислородных конвертерах.

Список использованных источников:

1. Бигеев А.М. Металлургия стали / А.М. Бигеев. – М. : Металлургия, 1988. – 480 с.
2. Капустин Е.А. Совершенствование гидродинамики газовых потоков промышленных печей с интенсификацией тепловых и технологических процессов / Е.А. Капустин, Ф.И. Лухтура, А.В. Сущенко // Тезисы докладов научно-технической конференции. – Свердловск, 1990. – С. 11-12.
3. Дейч М.Е. Техническая газодинамика / М.Е. Дейч. – М. : Энергия, 1974. – 592 с.
4. Powell A. On the mechanism of shoked jet noise / A. Powell // Proc. Phys. Soc. – 1953. – V.B66. Pt.128. – P. 1039-1056.
5. Антонов А.Н. Влияние дискретной составляющей акустических колебаний на течение в нерасчетной сверхзвуковой струе / А.Н. Антонов, С.П. Шалаев, М.Я. Юделович // Изв. АН

- СССР. МЖГ. – 1973. – № 4. – С. 142-148.
6. Горбунов В.Н. О дискретной составляющей в спектре аэродинамического шума двух параллельных сверхзвуковых струй / В.Н. Горбунов, В.А. Куприянов, В. М. Купцов // Изв. АН СССР. МЖГ. – 1976. – № 5. – С. 172-174.
 7. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика / Г.Н. Абрамович. – М. : Наука, 1969. – 824 с.
 8. Бойченко Б.М. Конвертерное производство стали: теория, технология, качество стали, конструкции агрегатов, рециркуляция материалов и экология / Б.М. Бойченко, В.Б. Охотский, П.С. Харлашин. – Днепропетровск : Днепр-ВАЛ, 2006. – 454 с.
 9. Нещерет П.А. К оценке дальности сверхзвуковой газовой струи / П.А. Нещерет, И.А. Ленцов // Изв. ВУЗов. Энергетика. – 1988. – № 10. – С. 84-88.
 10. Ленцов И.А. Исследование и расчет геометрических характеристик сверхзвукового участка нетурбулизованных газовых струй / И.А. Ленцов, В.А. Серебряков // Газодинамика и акустика струйных течений. – Новосибирск, 1987. – С. 38-42.
 11. Нещерет П.А. К расчету течения в основном участке сверхзвуковой струи с учетом влияния торца сопла / П.А. Нещерет, Е.А. Капустин, О.Э. Шлик // ПМТФ, 1984. – № 5. – С. 81-85.
 12. Шири Дж.В. Длина сверхзвукового ядра высокоскоростных струй / Дж.В. Шири, Дж.Г. Себолд // РТК. – 1967. – Т.5. – № 11. – С. 198-199.
 13. Лухтура Ф.И. Одномерная теория сверхзвуковых нерасчетных струй газа / Ф.И. Лухтура // Изв. РАН. МЖГ. – 1993. – № 1. – С. 48-56.
 14. Lukhtura F.I. Critical gas outflow from nozzles / F.I. Lukhtura // Fluid Dynamics. – 1993. – V.29, № 4. – P. 585-588.
 15. Капустин Е.А. Одномерная теория струй газа / Е.А. Капустин, Ф.И. Лухтура // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2001. – Вип. № 11. – С. 243-249.
 16. Лухтура Ф.И. О критической концентрации углерода в расплаве конвертера / Ф.И. Лухтура // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2012. – Вип. № 24. – С. 49-56.
 17. Kleinstein G. Mixing in turbulent axially symmetric free jets / G. Kleinstein // J. Spacecraft. – 1964. – V.1, № 4. – P. 403-408.
 18. Анцупов А.В. Исследование параметров нерасчетной сверхзвуковой струи газа / А.В. Анцупов // Журнал технической физики, 1974. – Т.44, № 2. – С. 372-379.
 19. Лухтура Ф.И. Об эрозийном износе продувочных сопел фурм кислородных конвертеров верхнего дутья / Ф.И. Лухтура, А.В. Сущенко, В.Н. Евченко // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2003. – Вип. № 13. – С. 244-250.
 20. Сопла кислородно-конвертерных фурм с повышенной стойкостью против эрозионного износа / А.В. Сущенко, Ф.И. Лухтура, А.Б. Ковура, А.В. Гнедаш, В.И. Ганошенко // Сталь, 2005. – № 9. – С. 20-24.

Bibliography:

1. Bigeyev A.M. Metallurgy of steelmaking / A.M. Bigeyev. – М. : Metallurgiya, 1988. – 480 p. (Rus.)
2. Kapustin E.A. Perfection of hydrodynamics of gas streams of industrial ovens with intensification thermal and master schedules / E.A. Kapustin, F.I. Lukhtura, A.V. Sushchenko // The theses of the reports of a technological conference. – Sverdlovsk, 1990. – P. 11-12. (Rus.)
3. Deitsh M.E. Technical gas dynamics / M.E. Deitsh. – М. : Energiya, 1974. – 592 p. (Rus.)
4. Powell A. On the mechanism of shoked jet noise / A. Powell // Proc. Phys. Soc. – 1953. – V.B66. Pt.128. – P. 1039-1056.
5. Antonov A.N. Influence of a discrete component of acoustic oscillations on flow in off-design supersonic jet / A.N. Antonov, S.P. Shalayev, M.Ya. Yudelovitch // Izv. AN SSSR. MZhG, 1973. – № 4. – P. 142-148. (Rus.)
6. Gorbunov V.N. About a discrete component in a spectrum of an aerodynamic noise of two parallel supersonic jets / V.N. Gorbunov, V.A. Kupriyanov, V.M. Kuptsov // Izv. AN SSSR. MZhG. – 1976. – № 5. – P. 172-174. (Rus.)
7. Abramovitch G.N. Applied gas dynamics / G.N. Abramovitch. – М. : Nauka, 1969. – 824 p. (Rus.)
8. Boychenko B.M. BOF steelmaking theory: technology, quality steel, construction aggregates, recycling of materials and ecology / B.M. Boychenko, V.B. Okhotskyi, P.S. Kharlashin. – Dne-

- propetrovsk : Dnepr-VAL, 2006. – 454 p. (Rus.)
9. Neshtsheret P.A. To an estimate of a hitting range of a supersonic gas jet / P.A. Neshtsheret, I.A. Lentsov // Izv. VUZov. Energetika. – 1988. – № 10. – P. 84-88. (Rus.)
 10. Lentsov I.A. Exploration and calculation of the geometrical characteristics of a supersonic segment not perturbed gas jets / I.A. Lentsov, V.A. Serebryakov // Gazodynamika i akustika struinikh tetshenii. – Novosibirsk, 1987. – P. 38-42.
 11. Neshtsheret P.A. К расчету течения в основном участке сверхзвуковой струи с учетом влияния торца сопла / P.A. Neshtsheret, E.A. Kapustin, O.E. Shlik // PMTF, 1984. – № 5. – P. 81-85. (Rus.)
 12. Shirie J.W. Length of a supersonic core high-speed jet / J.W. Shirie, J.G. Seubold // RTK. – 1967. – V.5. – № 11. – P. 198-199. (Rus.)
 13. Lukhtura F.I. One-dimensional theory of off-design supersonic gas jets / F.I. Lukhtura // Fluid Dynamics, 1993. – V.28, № 1. – P. 35-40. (Rus.)
 14. Lukhtura F.I. Critical gas outflow from nozzles / F.I. Lukhtura // Fluid Dynamics. – 1993. – V.29, № 4. – P. 585-588.
 15. Kapustin E.A. One-dimensional theory of jets / E.A. Kapustin, F.I. Lukhtura // Reporter of the Priazovskyi state technical university. – 2001. – Issue 11. – P. 243-249. (Rus.)
 16. Lukhtura F.I. About the critical concentration of carbon in a melt of converter / F.I. Lukhtura // Reporter of the Priazovskyi state technical university. – 2012. – Issue 24. – P. 49-56. (Rus.)
 17. Kleinstein G. Mixing in turbulent axially symmetric free jets / G. Kleinstein // J. Spacecraft. – 1964. – V.1, № 4. – P. 403-408.
 18. Antsupov A.V. Exploration of parameters of an off-design supersonic gas jet / A.V. Antsupov // Jurnal tekhnitsheskoj fiziki. – 1974. – T.44, № 2. – P. 372-379. (Rus.)
 19. Lukhtura F.I. About erosive wearing of purge nozzles of tuyeres of LD converters of the upper blast / F.I. Lukhtura, A.V. Sushchenko, V.N. Yevtshenko // Reporter of the Priazovskyi state technical university. – 2003. – Issue 13. – P. 244-250. (Rus.)
 20. Nozzles of LD converters tuyeres with boosted stability against erosive wearing / A.V. Sushchenko, F.I. Lukhtura, A.B. Kovura, A.V. Gnedash, V.I. Ganoshenko // Stal, 2005. – № 9. – P. 20-24. (Rus.)

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

Статья поступила 07.05.2015

УДК 533.6.011.72:681.121.089

© Лухтура Ф.И.*

О ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ ЗАТОПЛЕННЫХ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ

Представлена методика расчета параметров свободных струйных течений в квазиодномерной постановке, наиболее доступной для решения прикладных инженерных задач. Приведены основные закономерности и связи продольного затухания скорости с присоединенной массой и нарастанием толщины сдвигового слоя. Достоинство данной методики – универсальность и возможность использования для определения параметров как ламинарных, так и турбулентных (с различной степенью начальной турбулентности) дозвуковых и сверхзвуковых струйных течений из сопел различной конфигурации.

Ключевые слова: сопло, струя, поток, скорость, эжекция, присоединенная масса.

Лухтура Ф.И. Про закономірності затоплених струйних течій. Наведена методика розрахунку параметрів вільних струйних течій у квазіодновимірній постановці, найбільш доступній для рішення прикладних інженерних задач. При-

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