

МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ОТСЕЧКИ ШЛАКА ПРИ ВЫПУСКЕ СТАЛИ ИЗ КОНВЕРТЕРА С ВРАЩАЮЩИМСЯ КОРПУСОМ

С. П. ЕРОНЬКО, д-р техн. наук, *ersp@meta.ua*;
Е. В. ОШОВСКАЯ, канд. техн. наук; Б. И. СТАРОДУБЦЕВ
(ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»)

Отсечка конечного технологического шлака во время выпуска металла из кислородного конвертера при производстве качественной стали является обязательной технологической операцией, проводимой с целью исключения действия негативных факторов, связанных с попаданием большого количества агрессивного шлакового расплава в разливочный ковш (интенсивная эрозия верхней части его футеровки, повышенный угар подаваемых в него раскислителей и лигатур, возможная рефосфорация металла) [1].

За последнее десятилетие на большинстве зарубежных металлургических предприятий кислородные конвертеры были оборудованы различными системами отсечки шлака, обеспечивающими его удержание в сталеплавильном агрегате: с помощью шиберного затвора, установленного на выходе выпускного канала [2]; путем динамического воздействия газовой струи, истекающей из сопла пробки, блокирующей этот канал снаружи [3]; посредством запирания канала изнутри агрегата элементом поплавкового типа, предварительно сбрасываемого в жидкую ванну специальным манипулятором [4].

Следует отметить, что указанные системы разрабатывались для кислородных конвертеров, имеющих сталевыпускной канал, продольная ось и место расположения которого жестко привязаны относительно горловины корпуса агрегата. Поэтому они не могут использоваться на конвертере с вращающимся корпусом, так как выпуск металла из него осуществляют путем перелива через край горловины [5]. Поскольку данный тип кислородного конвертера предназначен для получения стали из чугуна, металлического лома и металлосодержащих отходов с высоким содержанием вредных примесей, выводимых по ходу реализуемого технологического процесса в шлак, проблема его отсечки во время выпуска металла из такого агрегата является весьма актуальной и требует создания новых устройств, позволяющих эффективно снижать долю шлако-

вого расплава, попадающего в разливочный ковш [6].

Для успешного решения поставленной задачи необходимо проведение комплексных исследований, включающих изучение гидрогазодинамических процессов, протекающих в ванне конвертера при отделении покровного шлака от жидкой стали, сливаемой через край горловины плавильного агрегата, а также параметров системы, обеспечивающей реализацию данной технологической операции.

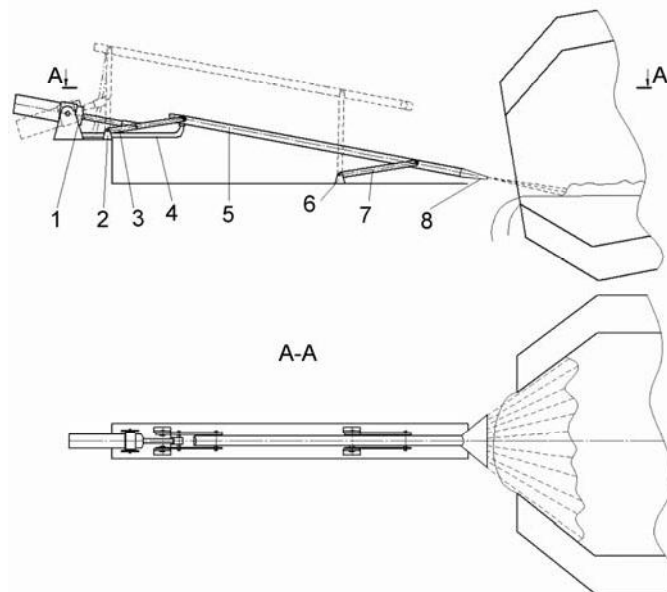


Рис. 1. Кинематическая схема системы газодинамической отсечки конечного шлака

С этой целью сотрудниками кафедры механического оборудования заводов черной металлургии Донецкого национального технического университета разработана новая система газодинамической отсечки шлака и выполнена симуляция ее работы на физической модели, изготовленной в масштабе 1:2 по отношению к 10-т мини-конвертеру с вращающимся корпусом. Мо-

дель системы, схематично показанная на рис. 1, включает пустотелую цилиндрическую штангу 5, несущую на переднем конце распределительную камеру, снабженную щелевым соплом 8. Штанга шарнирами соединена с двумя парами стоек 3 и 7, установленных в подшипниковых опорах 2 и 6 на металлоконструкции и образующих в совокупности параллелограммный механизм, приводимый в действие пневматическим цилиндром 1. Задний конец штанги связан с гибким газоподводящим рукавом 4. Такая кинематическая схема системы отсечки шлака обеспечивает возможность плоскопараллельного перемещения пустотелой штанги в вертикальной плоскости и постоянство угла атаки плоской газовой струи, истекающей из щелевого сопла и оттесняющей слой шлакового расплава от края горловины конвертера в направлении его донной части.

Эффективность удержания шлака с помощью такой системы во время слива металла из плавильного агрегата в разливочный ковш в значительной мере зависит от кинематических параметров струи истекающего газа. При этом положение в пространстве свободной струи газа определяют ее углы раскрытия в горизонтальной γ и вертикальной β плоскостях. Лучами этих углов являются ось и граничные линии струи в соответствующих плоскостях. Дальностью струи считают расстояние от среза сопла, на котором скорость на оси струи становится равной скорости окружающей среды [7]. В математическом плане газовая струя определяется двумя функциями: распределением скорости в поперечном сечении струи и изменением осевой скорости потока вдоль его движения. Эти две функции позволяют оценить интенсивность массообмена между газовой струей и отсекаемым ею шлаковым расплавом во время выпуска стали из плавильного агрегата.

Поскольку информацию о профиле скорости и действительных размерах струи теоретическим путем получить проблематично, оценку значений указанных параметров выполнили на специально изготовленном стенде, структурная схема которого отображена на рис. 2. В его состав входит несущая поворотная балка 5 квадратного сечения, одним концом шарнирно связанная со стойкой 2, установленной на левой опоре 3 и фиксирующей в горизонтальном положении газораспределительную камеру с щелевым соплом 4, закрепленную на пустотелой цилиндрической штанге 1. Второй конец балки 5 снабжен осью с посаженным на нее колесом 9, опирающимся на поверхность правой опоры 10, благо-

даря чему сама балка может совершать поворот в горизонтальной плоскости относительно стойки 2. На балке размещен ползун 8, имеющий возможность относительного продольного перемещения и удерживающий штатив 7 с закрепленным в нем зондом 6 для контроля скорости газовой струи, истекающей из сопла 4. Штатив позволяет изменять положение зонда по вертикали относительно оси газовой струи. Зонд включает тензорезисторный преобразователь — миниатюрную пластинку с наклеенными фольговыми тензодатчиками, соединенными по полумостовой схеме. Верхний конец пластинки закреплен внутри прозрачного баллончика, а нижний связан с металлическим стержнем, проходящим через резиновый колпачок и удерживающим приемный элемент — диск диам. 10 мм. Тензометрический преобразователь подключен к измерительной системе, содержащей усилитель переменного тока, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и ЭВМ.

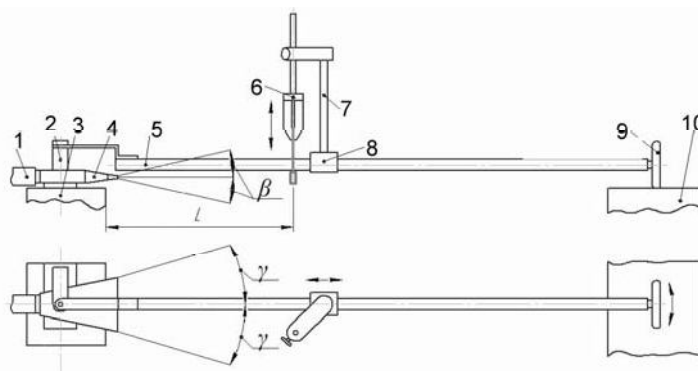


Рис. 2. Конструктивная схема стенда для контроля скоростей газовых струй

При расположении приемного элемента перпендикулярно направлению движения газового потока на него действует скоростной напор, значение которого прямо пропорционально плотности и квадрату скорости движущейся газовой среды. Сила, вызванная динамическим напором газового потока на диск, воздействуя на стержень, изгибает пластинку и деформирует датчики, в результате чего происходит разбалансировка моста сопротивлений. Регистрируемый при этом в режиме реального времени электрический сигнал позволяет судить о мгновенных значениях скорости газовой струи в заданной точке пространства. Предварительно по методике и с учетом рекомендаций, приведенных в работе [8], выполнили тарировку тензорезисторного преобразователя. В результате статистической обработки полученной информации с ис-

пользованием прикладной программы Table Curve установили тарировочную зависимость

$$y = -6 \times 10^{-7} x^2 + 0,0038x,$$

где x — код АЦП; y — скорость потока, м/с.

График тарировочной зависимости показан на рис. 3. При этом коэффициент корреляции составил $R = 0,975$.

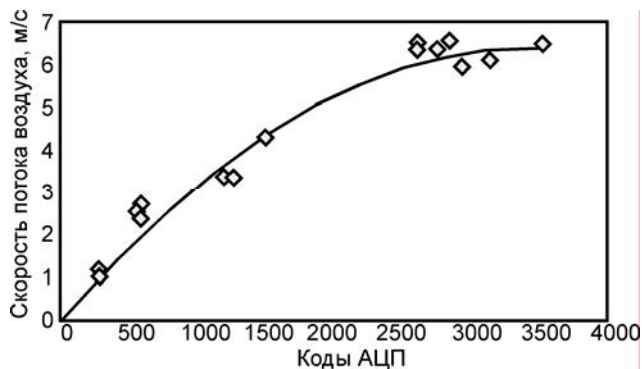


Рис. 3. Тарировочная зависимость для измерительного зонда

Исследование параметров плоских воздушных струй проводили с использованием щелевых сопел, имеющих размеры на выходе 120×1 и 120×2 мм. Ширину сопел назначили в соответствии с размером горловины модели 10-т мини-конвертера, для которого разрабатывается система газодинамической отсечки конечного шлака. Размеры щелевых зазоров сопел выбраны с учетом имевшихся возможностей обеспечения их постоянства при изготовлении.

Для визуализации формы струи с целью установления размеров ее участков с различными кинематическими характеристиками в подводящий трубопровод вблизи сопла с помощью шприца подавали белую пудру, частицы которой, двигаясь в воздушном потоке, обозначали его границы в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Анализ рис. 4 и 5, полученных с помощью скоростной видеосъемки, показал, что при истечении воздуха из щелевых сопел шириной 120 мм под давлением $P = 1,1 P_{\text{окр.ср}}$ струя в начальном своем участке длиной 150 мм характеризуется постоянством статического давления во всей области течения, благодаря чему в потенциальном ядре струи скорость оставалась неизменной и имела при щелевых зазорах 1 и 2 мм значения 3,8 и 2,4 м/с соответственно. Углы раскрытия струи при указанных щелевых зазорах в вертикальной и горизонтальной плоскостях со-

ставляли: $\beta = 6$ град., $\gamma = 20$ град. и $\beta = 10$ град., $\gamma = 20$ град. соответственно.

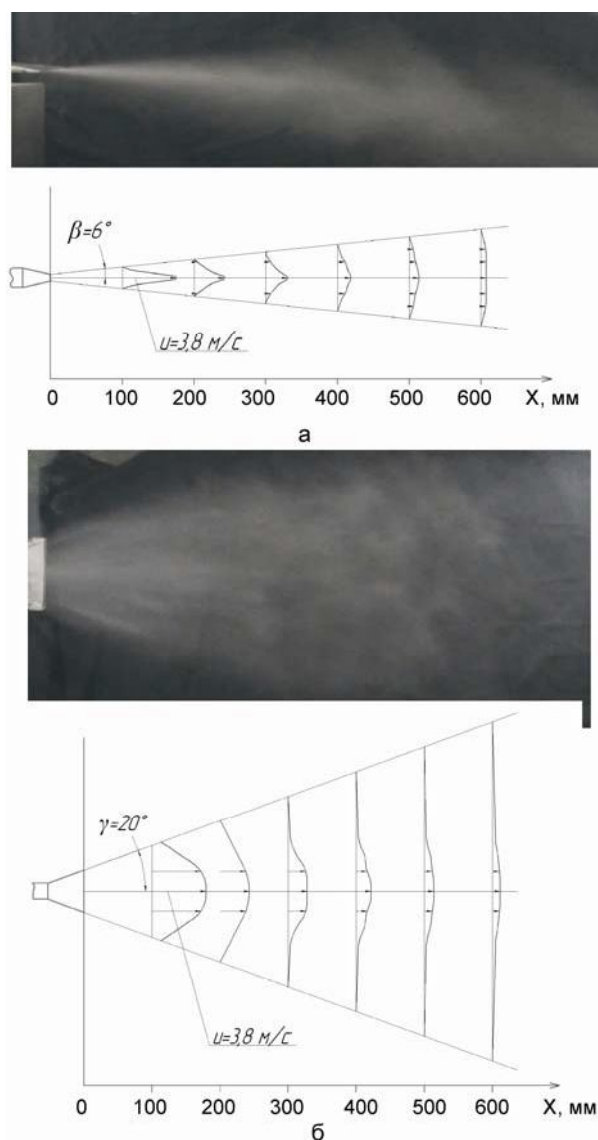


Рис. 4. Форма и профили скорости струи в вертикальной (а) и горизонтальной (б) плоскостях на различном удалении от щелевого сопла с выходным сечением 120×1 мм

За пределами начального участка происходит размывание струи, выражающееся в ее утолщении в вертикальной плоскости (см. рис. 4, а, и 5, а) и в изменении скорости вдоль оси в горизонтальной плоскости (см. рис. 4, б, и 5, б). Уменьшение скорости на оси струи происходит не только на переходном участке, следующем за начальным, но и на основном. При этом длина этих участков составила 250 и 300 мм соответственно. Графики зависимостей, отображающих уменьшение осевых скоростей плоских воздушных струй в функции расстояния от среза сопла, показаны на рис. 6. На основании приведенной информации был сделан вывод о том, что для

эффективного воздействия на слой шлака при его оттеснении от края горловины в направлении донной части корпуса конвертера во время слива жидкой стали в разливочный ковш щелевое сопло должно находиться от верхнего торца корпуса агрегата на удалении, не превышающем сумму длин начального и переходного участков плоской струи газа.

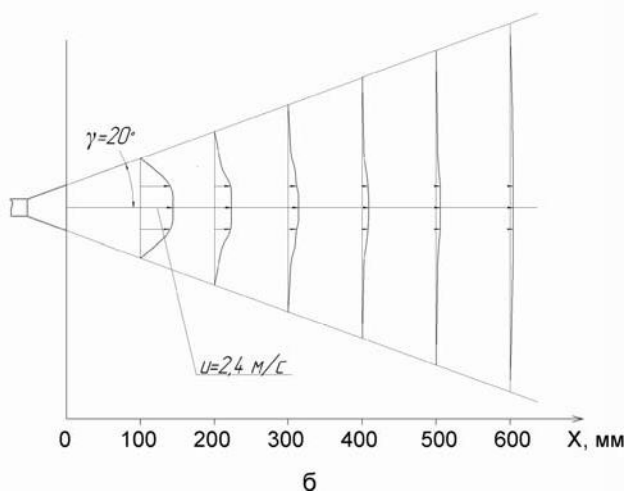
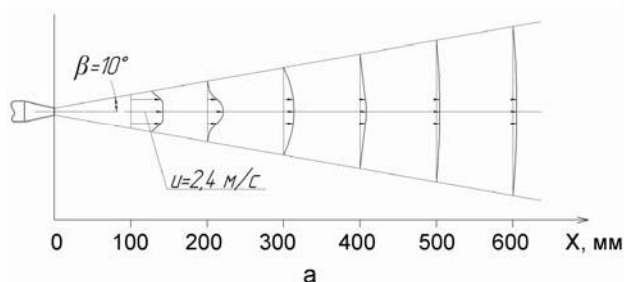


Рис. 5. Форма и профили скоростей струи в вертикальной (а) и горизонтальной (б) плоскостях на различном удалении от щелевого сопла с выходным сечением 120×2 мм

Практическую проверку справедливости данной рекомендации осуществили путем симуляции газодинамической отсечки конечного шлака,

для чего изготовили в масштабе 1:5 плоские модели 10-т конвертера и разливочного ковша с прозрачными стенками. В качестве имитатора жидкой стали использовали чистую воду, так как их кинематические вязкости одинаковы и равны $1,01 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ соответственно при 1550 и 20 °С. Для имитации шлака вязкостью $(10\text{--}33) \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ при 1595 °С применили минеральное масло вязкостью $35 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ и плотностью 870 кг/м³ при 20 °С.

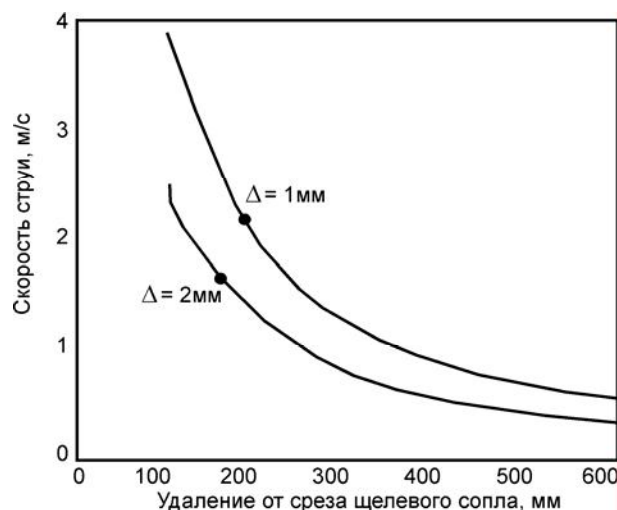


Рис. 6. Зависимость уменьшения осевой скорости плоских воздушных струй при различном щелевом зазоре сопла

В ходе исследований моделировали два варианта выпуска стали из конвертера в ковш: без удержания шлака в плавильном агрегате и с газодинамической отсечкой. Путем поворота модели конвертера с помощью электромеханического привода с заданной угловой скоростью обеспечивали плавный перелив жидкости в модель разливочного ковша. При этом вели видеосъемку наблюдавшихся картин взаимодействия слоев воды и масла в обеих емкостях, а также контролировали объемы имитатора шлака, оставшегося в модели конвертера и попадавшего в модель ковша, для каждого из моделируемых вариантов реализации выпуска плавки.

Обработка и анализ отснятого видеоматериала и контрольных измерений перераспределения объемов имитатора шлака между моделями конвертера и сталеразливочного ковша позволили установить следующие особенности протекания гидрогазодинамических процессов для двух вариантов реализации слива металла. Во время симуляции выпуска металла без удержания имитатора шлакового расплава в модели конвертера (рис. 7, а) большая его часть попала в модель разливочного ковша уже в начальный период слива имитатора жидкой стали (рис. 8, а). В этом случае вблизи свободной поверхности жидкой ванны в зоне внедрения струи,

истекающей из модели конвертера, получал развитие процесс эмульгирования с образованием крупных и мелких капель масла, увлекаемых нисходящим потоком воды вглубь. По мере наполнения модели ковша интенсивность этого процесса ослабевала из-за постепенного

уменьшения геометрического перепада (разности отметок) уровней жидкости в обеих моделях. Несомненно, подобные гидродинамические явления будут иметь место в реальных условиях выпуска металла, что может вызвать его частичную рефосфорацию.

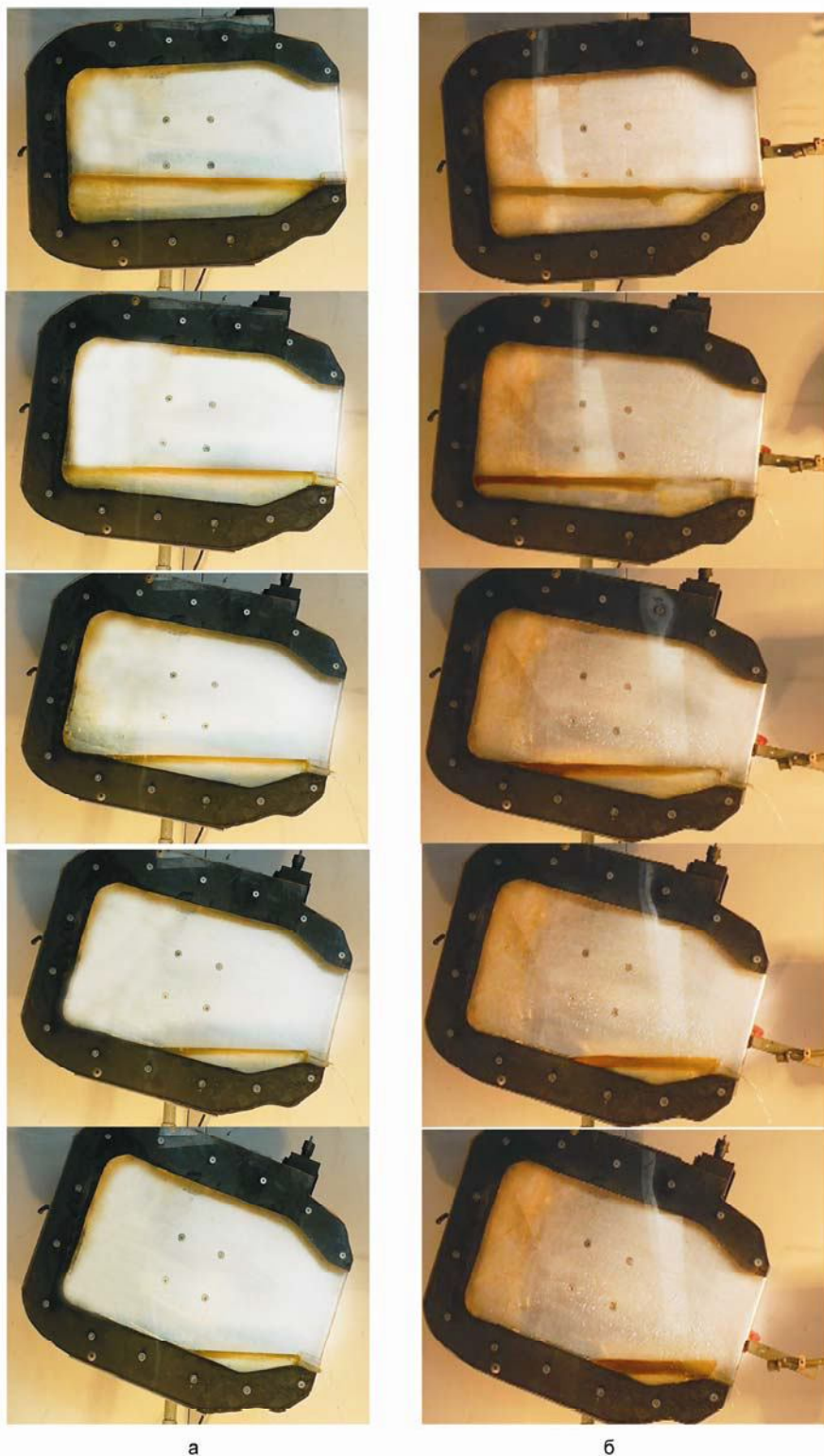


Рис. 7. Распределение слоя имитатора шлакового расплава в модели конвертера при симуляции выпуска стали без удержания (а) и с газодинамической отсечкой (б) конечного шлака

Совершенно иную картину наблюдали, когда симулировали выпуск стали с применением газодинамической отсечки конечного конвертерного шлака. Под воздействием скоростного напора плоской воздушной струи, истекающей из удаленного на рекомендуемое расстояние щелевого сопла и направленной к свободной поверхности жидкой ванны под углом атаки (30–40 град.), слой имитатора шлакового расплава весьма эффективно оттеснялся от горловины модели конвертера в сторону ее донной части в течение всего выпуска (см. рис. 7, б), благодаря чему в модель разливочного ковша попадала незначительная часть масла, покрывавшего тонкой пленкой толщю воды (см. рис. 8, б). Как показали результаты контрольных замеров, выпол-

ненных в ходе 10 модельных опытов, благодаря газодинамической отсечке, выполнявшейся с применением щелевых сопел шириной 40 мм с зазорами 1 и 2 мм, количество имитатора шлака, оказавшегося в модели разливочного ковша, составило 3–7 % от его общего объема, находившегося в модели конвертера до начала выпуска из нее имитатора стали (см. таблицу). Следует отметить, что эффективность удержания в модели плавильного агрегата минерального масла за счет газодинамического воздействия на него воздушной струи была заметно больше, когда ее истечение происходило из сопла с щелевым зазором 1 мм. Это обусловлено разницей значений скоростей плоских струй, зафиксированных для сопел с указанными выше щелевыми зазорами.



Рис. 8. Распределение слоя имитатора шлакового расплава в модели разливочного ковша при симуляции выпуска стали без удержания (а) и с газодинамической отсечкой (б) конечного шлака

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМОВ ИМИТАТОРОВ СТАЛИ И ШЛАКОВОГО РАСПЛАВА В МОДЕЛЯХ
КОНВЕРТЕРА И РАЗЛИВОЧНОГО КОВША ПРИ СИМУЛЯЦИИ ВЫПУСКА ПЛАВКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ
ОТСЕЧКИ ШЛАКА**

Номер опыта	Размер щелевого сопла, мм	В модели конвертера, см ³				В модели ковша после слива жидкостей, см ³		Степень отсечки имитатора шлака, %
		перед сливом жидкостей		после слива жидкостей		вода	масло	
		вода	масло	вода	масло			
1	40×1	2500	250	10	242	2490	8	96,8
2				8	243	2492	7	97,2
3				12	240	2488	10	96,0
4				10	241	2490	9	96,4
5				8	243	2492	7	97,2
6	40×2			12	235	2488	15	94,0
7				14	237	2486	13	94,8
8				16	233	2484	17	93,2
9				15	232	2485	18	92,8
10				14	235	2486	15	94,0

Таким образом, проведенные модельные исследования позволили выполнить предварительную проверку правильности технических решений, заложенных в предложенную систему газодинамической отсечки шлака, и получить исходную информацию для расчета ее конструктивных и технологических параметров с учетом размеров кислородного конвертера, для которого она предназначена. Речь идет о форме и размерах щелевого сопла фурмы и его удалении

от торца горловины сталеплавильного агрегата, которое следует поддерживать во время слива из него металла в сталеразливочный ковш, а также о кинематических характеристиках плоской газовой струи, обеспечивающих надежное удержание шлакового расплава в полости кислородного конвертера, применяемого для переработки шихты с повышенным содержанием вредных примесей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бойченко, Б. М. Конвертерное производство стали: теория, технология, качество стали, конструкции агрегатов, рециркуляция металлов и экология [Текст] / Б. М. Бойченко, В. Б. Охотский, П. С. Харлашин. — Днепропетровск: РВА «Днепро-ВАЛ», 2006. — 454 с.
2. Греф, У. Бесшлаковый выпуск плавки с помощью затвора выпускного отверстия TAP 120 при производстве чистой стали [Текст] / У. Греф, А. Бергхофер, Г. Амслер [и др.] // Сталь. — 2005. — № 7. — С. 51–54.
3. Энкер, Б. Новая стопорная система для шлака кислородно-конвертерного производства стали [Текст] / Б. Энкер, А. Пастер, Й. Швельбергер // Metallurgическое производство и технологии металлургических процессов. — 2002. — № 5. — С. 12–20.
4. Howanski, William S. Optimizing B.O.F. Slag control through the application of refractory darts [Text] / William S. Howanski, T. Kalep, T. Swift [et al.] // AISTech Proceedings. — 2006. — № 1. — P. 601–609.
5. Еронько, С. П. Мини-конвертер для переработки высокофосфористого чугуна [Текст] / С. П. Еронько, Д. И. Федяев, О. В. Афаунова [и др.] // Металлургические процессы и оборудование. — 2010. — № 3. — С. 40–46.
6. Еронько, С. П. Перспективы использования и проблематика создания мини-агрегата для переработки некачественной шихты и металлосодержащих отходов [Текст] / С. П. Еронько, Н. А. Климович // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». — 2016. — № 5. — С. 26–31.
7. Аверин, С. И. Механика жидкости и газа [Текст] / С. И. Аверин, А. Н. Минаев, В. С. Швыдкий [и др.] — М.: Металлургия, 1987. — 304 с.
8. Еронько, С. П. Физическое моделирование процессов внепечной обработки и разлива стали [Текст] / С. П. Еронько, С. В. Быковских. — Киев: Техніка, 1998. — 136 с.