

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВДУВАНИЯ ГАЗОПОРОШКОВЫХ СМЕСЕЙ В ВАННУ 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»)*

Выплавка стали в кислородном конвертере с вращающимся корпусом, позволяющем перерабатывать некачественную шихту, предполагает вдувание в его ванну через водоохлаждаемую фурму газопорошковых смесей различного химического и фракционного состава. При этом фурма может совершать качательное движение в назначенном секторе под заданным углом атаки к поверхности расплава [1]. Эффективность глубокого рафинирования выплаваемого металла от вредных примесей определяется полнотой использования вводимых реагентов, которая может быть обеспечена за счет их быстрого и равномерного распределения во всем объеме жидкой ванны такого плавильного агрегата. Скорость распространения твердых частиц в расплаве в значительной мере зависит от условий их взаимодействия на границе раздела газ – металл, размера частиц и их концентрации в газопорошковой струе, конструктивных параметров и траектории движения сопла фурмы, вязкости шлака и толщины его слоя на поверхности жидкой стали.

Поскольку ранее полученные результаты теоретического анализа процесса взаимодействия газопорошковой струи с жидким металлом, приведенные в работах Т. Ленера, Т.А. Энга, В.А. Щербакова, относятся к частному случаю продувки, когда фурма находится в статическом состоянии под определенным углом к зеркалу металла, а ее сопло имеет круглое поперечное сечение [2], выданные авторами рекомендации не могут быть использованы при разработке усовершенствованной системы вдувания газопорошковых смесей, конструктивной особенностью которой является использование в ней фурмы, имеющей сопло с сечением, отличным от круглого, и совершающей в пространстве движение по сложной траектории. В связи с этим требуется проведение комплексных исследований, направ-

ленных на обоснование конструктивных и технологических параметров продувочной системы, обеспечивающей повышение эффективности функционирования плавильного агрегата, предназначенного для получения стали из металлолома и металлосодержащих отходов, включающих в значительной концентрации вредные примеси [3, 4].

В соответствии с планом работ по созданию модернизированного конвертера, позволяющего реализовать технологию переработки некачественного сырья, сотрудниками кафедры механического оборудования заводов черной металлургии Донецкого национального технического университета предложена усовершенствованная система верхней продувки для такого агрегата.

Конструктивная схема данной системы приведена на рис. 1. Предложенная система содержит механизм перемещения фурмы и устройство дозированной подачи мелкодисперсного материала. Механизм перемещения фурмы включает каретку 5, снабженную двумя парами ходовых роликов 4, установленными на наклонные рельсы 3 (угол наклона 30 град.). Перемещение фурменной каретки осуществляется винтовым приводом, состоящим из ходового винта 18, вращаемого в подшипниковых опорах мотором-редуктором 17. Гайка винтовой передачи размещена в специальном корпусе, который прикреплен к нижней части каретки с возможностью самостоятельного центрирования относительно винта. Фурма 1 верхней своей частью закреплена на опорном диске в муфте 8 и с помощью кривошипно-шатунного механизма 6 может совершать вместе с диском качательное движение относительно каретки в пределах продолговатого отверстия колпака 2, жестко связанного с кареткой и снабженного патрубком для подсоединения газоотводящего тракта. В свою очередь, обойма 8 вместе с удерживаемой ею фурмой 1

имеет возможность поворота относительно опорного диска в вертикальной плоскости на определенный угол с помощью кулачка 7, установленного на выходном валу мотор-редуктора 9, закрепленного на самом диске. Таким образом, благодаря наличию кривошипно-рычажного и кулачкового механизмов фурме, снабженной в нижней своей части соплом, обеспечена возможность качательных движений относительно каретки в двух плоскостях одновременно, когда включены в работу оба механизма, или порознь, если привод одного из них отключен. В зависимости от комбинации амплитуд и частот качаний фурмы в двух взаимно перпендикулярных плоскостях результирующая траектория движения ее сопла имеет формы, показанные в табл. 1. Приведенные восемь возможных вариантов реализуемых пространственных движений сопла фурмы позволяют по ходу ведения сталеплавильного процесса задавать ей такой закон качания относительно поверхности ванны расплава, при котором в наибольшей мере повышается эффективность и показатели тепловой работы технического агрегата.

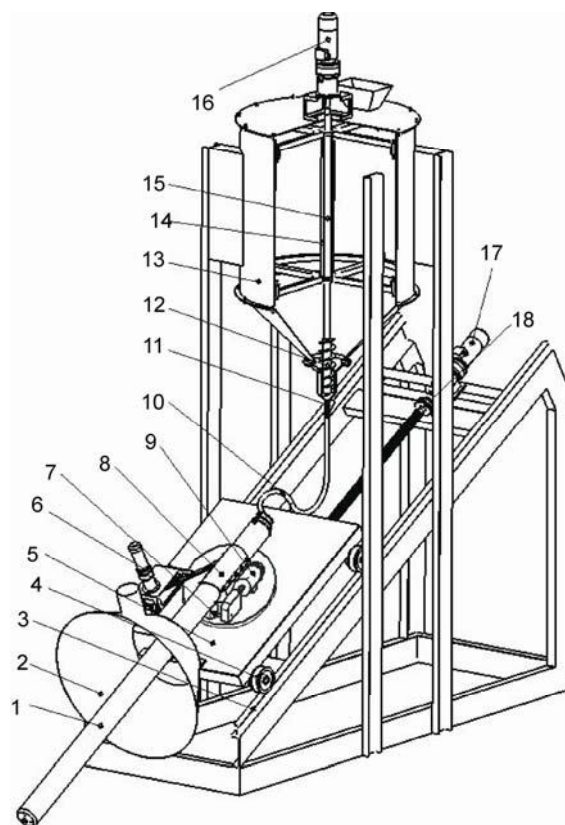


Рис. 1. Конструкция предложенной системы верхней продувки газопорошковыми смесями ванны кислородного конвертера

ТАБЛИЦА 1. ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ СОПЛА ФУРМЫ В ПРОСТРАНСТВЕ, ОБЕСПЕЧИВАЕМЫЕ СИСТЕМОЙ ВЕРХНЕЙ ПРОДУВКИ ВАННЫ КИСЛОРОДНОГО КОНВЕРТЕРА

Частота качания фурмы в плоскостях		Форма траектории движения сопла	Частота качания фурмы в плоскостях		Форма траектории движения сопла
f_1	f_2		f_1	f_2	
0	1		1	0	
1	1		2	1	
1	2		3	1	

Частота качания фурмы в плоскостях		Форма траектории движения сопла	Частота качания фурмы в плоскостях		Форма траектории движения сопла
f_1	f_2		f_1	f_2	
1	3		4	1	

В состав устройства дозирования порошкообразной извести входит герметичный бункер 13, закрепленный на четырех колоннах над наклонными рельсами и снабженный размещенным внутри питателем. Этот питатель состоит из мотор-редуктора 16, связанного с вертикальным пустотелым валом 15, установленным в подшипниковых опорах в полости защитной трубы 14 и несущим на хвостовике шнек 12. Нижняя часть шнека, снабженная соплом 11, размещена в смесительной камере, соединенной посредством гибкого трубопровода 10 со штуцером кислородной фурмы 1. При подаче газообразного кислорода в полость вертикального вала, вращаемого мотор-редуктором с постоянной заданной угловой скоростью, связанный с ним шнек выдает в смесительную камеру расчетное количество порошкообразной извести, где ее частицы захватываются кислородной струей, истекающей из сопла, и по трубопроводу уносятся в тракт фурмы, смешиваясь с основным количеством окислителя, вдуваемого в ванну конвертера.

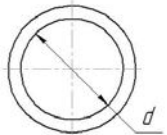
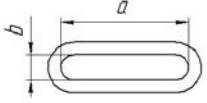
Предварительную проверку эффективности технических решений, заложенных в усовершенствованную систему верхней продувки газопорошковыми смесями для 10-т кислородного конвертера, выполнили на ее действующей модели, изготовленной в масштабе 1:2 относительно промышленного образца.

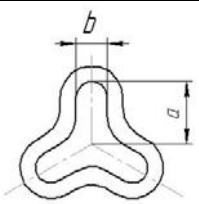
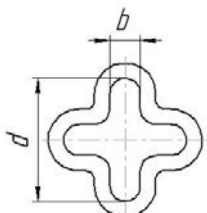
Эксперименты проводили в два этапа. На первом этапе оценили степень влияния формы

сопла на кинематические параметры струи истекающего из него газа и характер движения газовых потоков при различных траекториях перемещения фурмы в пространстве. Вторым этапом был связан с изучением процесса взаимодействия с жидкой ванной газопорошковой струи в зоне ее удара о свободную поверхность.

В ходе экспериментов опробованы четыре варианта конструктивного исполнения сопла фурмы (табл. 2). При этом размеры элементов сопел обеспечивали близкие значения площадей их проходных сечений. Во время проводившихся опытов на выходном конце горизонтально закрепленной фурмы поочередно устанавливали сопла с различной конфигурацией среза и осуществляли через них продувку воздухом при неизменных динамических параметрах — давлении 0,11 МПа и расходе 30 л/мин. Для визуализации формы газовой струи в процессе ее формирования в подающий тракт фурмы вводили белую пудру, позволяющую получить на кадрах видеосъемки четкие очертания границ образующегося факела (рис. 2). На основании полученного видеоматериала установлено, что наиболее компактную форму при минимальном угле раскрытия имела струя воздуха, истекавшего из крестообразного сопла. Поэтому последующие опыты проводили с использованием фурмы, снабженной соплом, имеющим на выходе крестообразное сечение.

ТАБЛИЦА 2. ФОРМА И РАЗМЕРЫ СОПЕЛ, ИСПОЛЬЗОВАВШИХСЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ВЕРХНЕЙ ПРОДУВКИ ВАННЫ КОНВЕРТЕРА

Сечение и расположение сопла фурмы	d, мм	a, мм	b, мм	Площадь проходного сечения, мм ²
	6,5	—	—	32,7
	—	15	2	29,2

Сечение и расположение сопла фурмы	d, мм	a, мм	b, мм	Площадь проходного сечения, мм ²
	—	6	2	30,7
	9	—	2	30,4

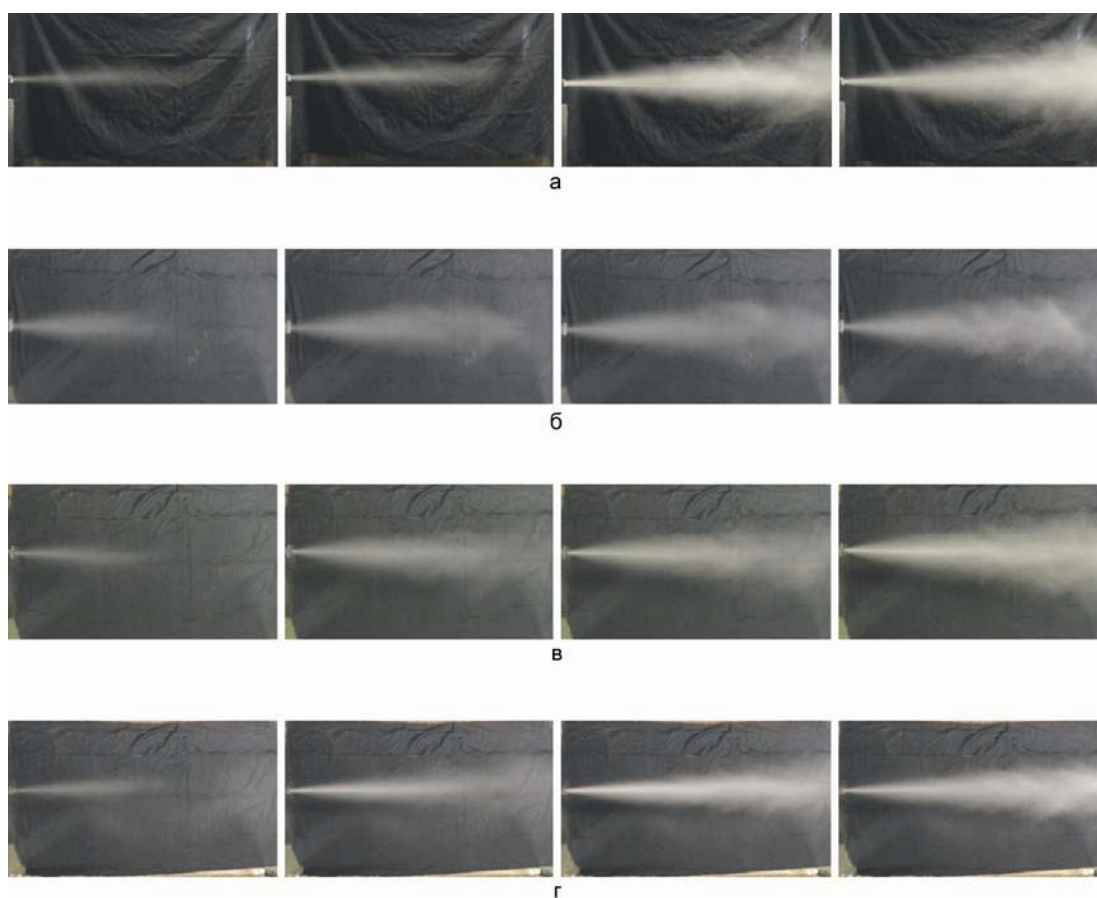


Рис. 2. Картины развития струй газа, истекающих из круглого (а), щелевого (б), трехлучевого (в) и крестообразного (г) сопел

Характер движения газовых потоков в рабочем пространстве сталеплавильного агрегата во многом определяет его тепловую работу независимо от температурного уровня реализуемого технологического процесса. Только при непрерывной смене объемов газа за счет правильной организации траекторий его движения можно обеспечить сохранение требуемых высоких температур ванны конвертера благодаря интенсив-

ному теплообмену между газовой и жидкой средами. В связи с этим значительный практический интерес представляет информация о влиянии реализуемого закона движения сопла фурмы на размер газового облака, формируемого в пространстве истекающей газовой струей. С целью оценки степени этого влияния выполнили видеозапись процесса развития в открытом пространстве заполненных газом зон, формируемых кре-

стообразным соплом фурмы, совершающей колебательные движения при отдельной и одновременной работе механизмов ее качания. В качестве примера на рис. 3 показаны картины, наблюдавшиеся при неподвижной фурме (см. рис. 3, а) и во время ее качательного движения в вертикальной плоскости (см. рис. 3, б); в плоскости, наклоненной к горизонту (см. рис. 3, в); а также в случае ее перемещения по боковой поверхности конуса, обеспечиваемого благодаря одновременной работе двух механизмов качания (см. рис. 3, г). Как видно из приведенных снимков, сообщение фурме качательного движения способствует заметному увеличению объема зоны пространства, занимаемой газом, истекающим из ее сопла. Указанный эффект в наибольшей степени проявляется, когда фурма перемещается по образующей конуса.

Достаточно широкий выбор режимов функционирования усовершенствованной системы верхней продувки модернизируемого конвертера, обусловленный возможностью изменения удаления сопла фурмы от зеркала расплава в ванне агрегата, а также реализации нужного закона ее движения в его полости, позволит активно влиять на технологические параметры и достигать максимальной эффективности протекания всей совокупности физических и химических процессов. При опускании головки фурмы к поверхности расплава и требуемой подаче кислорода должны улучшиться условия протекания окисления углерода и образования CO . В случаях подъема головки фурмы или уменьшения угла, под которым подается в ванну струя кислорода, следует ожидать снижения интенсивности обезуглероживания и окисления выделяющегося монооксида углерода до CO_2 , т. е. повышения температуры в рабочем пространстве конвертера. Организация потоков газов в конвертере, обеспечиваемая сложным законом движения фурмы, будет способствовать увеличению площади контакта газовой фазы с футеровкой и оседанию на ней образующейся плавильной пыли, сразу же возвращаемой в ванну агрегата благодаря вращению его корпуса. Это позволит минимизировать потери железа.

Для проведения проектных работ по созданию усовершенствованной продувочной системы необходимо также иметь информацию о влиянии на процесс взаимодействия частиц материала с жидкой ванной расстояния между срезом сопла фурмы и свободной поверхностью жидкости, угла атаки истекающей из сопла газопорошковой струи, плотности и долевого содержания составляющих вдуваемой смеси, а также ее массового расхода.

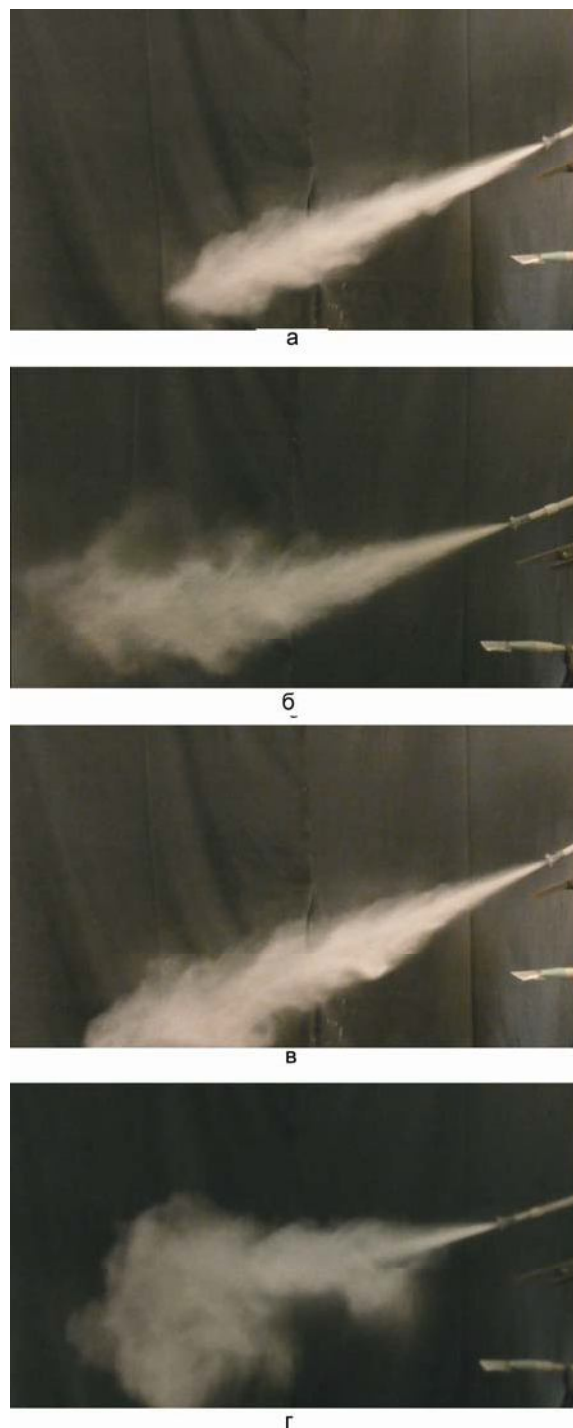


Рис. 3. Визуализированные формы зон, заполненных газом, при его истечении из крестообразного сопла фурмы, находящейся в статическом состоянии (а) и совершающей движение при отдельной (б и в) и совместной (г) работе механизмов

Качественную оценку степени влияния отмеченных факторов на динамическое взаимодействие твердой и жидкой фаз в зоне силового контакта струи с ванной плавильного агрегата выполнили на его прозрачной объемной модели, изготовленной из органического стекла.

В ходе моделирования важно было обеспечить соотношение плотностей имитаторов флю-

сов и жидкой стали, близкое по значению к производственным условиям. Как известно, для десульфурации используют кальцинированную соду, а для дефосфорации — флюс на основе извести и оксида железа (43 % CaO, 43 % окалина, 14 % CaF₂) [5], т. е. отношение плотностей указанных материалов к плотности расплава составляет 0,3 и 1,1. Поэтому в условиях лабораторного эксперимента для поддержания в отмеченных пределах отношения плотностей имитаторов компонентов флюсовой смеси и воды, моделирующей жидкий металл, необходимы материалы с плотностью 0,3 и 1,1 г/см³ соответственно. Кроме того, эти материалы должны иметь цвет, который позволял бы получать контрастную картину протекающих процессов, фиксируемую при видеосъемке. Отмеченным условием в наибольшей мере отвечали измельченные частицы древесного угля и полиэтилена плотностью 0,25 и 1,05 г/см³. Размер частиц находился в пределах 0,1–1 мм. В качестве имитатора шлакового расплава использовали минеральное масло, имеющее плотность 0,8 г/см³. Во время моделирования работы продувочной системы фурма находилась в стационарном состоянии. В каждом последующем опыте при заданной скорости истечения газопорошковой струи дискретно изменяли удаление от поверхности модельной жидкости фурменного сопла, угол атаки струи, а также процентное содержание ингредиентов, входящих в состав смеси, имитирующей флюс. В частности, были смоделированы варианты вдувания одной извести и смесей, включавших в разных пропорциях известь и окалину.

Покадровый просмотр отснятых видеозаписей позволил установить следующие особенности газогидродинамических процессов, протекающих в полости сталеплавильного агрегата при различном сочетании учитывавшихся параметров.

Когда срез сопла фурмы находится на незначительном удалении (100–200 мм) от поверхности жидкой ванны, на ней под действием динамического напора истекавшей со скоростью 15 м/с газопорошковой струи образуется кратер, глубина которого соизмерима с толщиной имитатора шлакового расплава. При этом в случае моделирования процесса вдувания в полость конвертера мелкодисперсной извести имитировавшие ее частицы древесного угля, плотность которых была в несколько раз меньше плотности воды, после удара об ее поверхность отражались от нее под различным углом и продолжали движение в направлении донной части модели плавильного агрегата (рис. 4, а). Изменения угла атаки газопорошковой струи в пределах 25–45 град. не вносили заметных изменений в наблюдавшуюся картину взаимодействия твердой и жидкой фаз на поверхности ванны модели агрегата. Если в состав газопорошковой смеси на-

ряду с имитатором извести (измельченным древесным углем) входили частицы полиэтилена (имитатора окалины) с плотностью, близкой к плотности воды, моделировавшей жидкий металл, некоторая часть легковесного материала увлекалась частицами полиэтилена на небольшую глубину относительно границы раздела вода – масло. При наличии в смеси 25 % частиц полиэтилена и 75 % частиц древесного угля заглубление последних в воду составляло порядка 5–8 мм (см. рис. 4, б). С увеличением доли частиц полиэтилена в смеси, имитировавшей флюс, вдуваемый с целью дефосфорации выплавляемого металла, глубина проникновения частиц древесного угля в толщу воды увеличивалась. Например, для смеси, включавшей в равных долях частицы полиэтилена и древесного угля, глубина проникновения имитатора извести в воду достигала 20–25 мм (см. рис. 4, в).

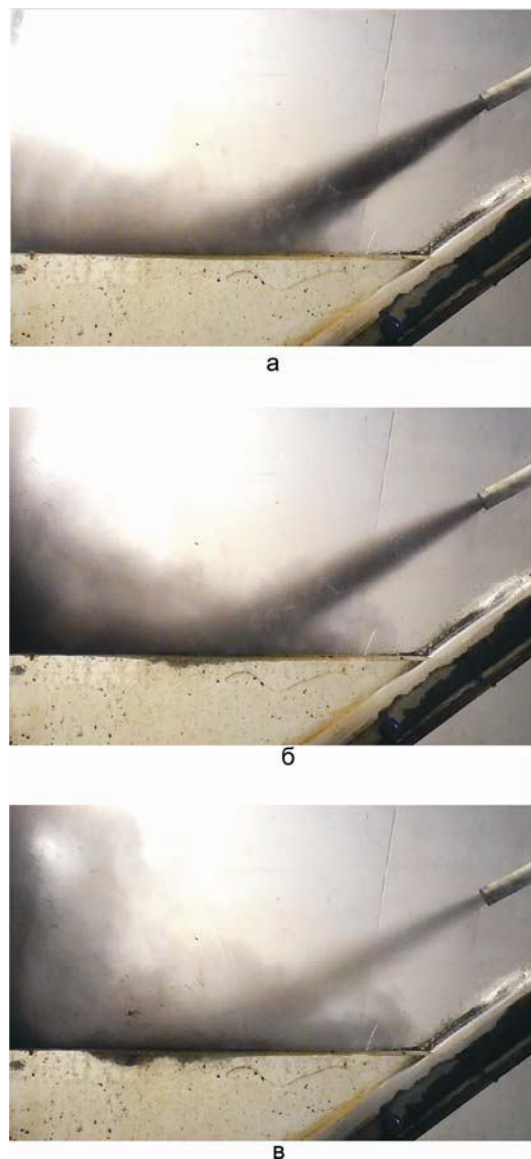


Рис. 4. Характер взаимодействия с поверхностью жидкой ванны газопорошковой струи при различной плотности частиц вдуваемого материала

Картина взаимодействия газопорошковой струи с поверхностью жидкой ванны кардинально менялась с ростом удаления от нее сопла фурмы. Когда удаление сопла становилось соизмеримым с дальностью газовой струи, легкие частицы вдуваемой смеси рассредоточивались в полости модели конвертера и равномерным слоем оседали на зеркале имитатора шлакового расплава, а потерявшие скорость частицы полиэтилена пронизывали его слой и плавно погружались в воду. В этом случае фактором, дополнительно стимулирующим очищение расплава от вредных примесей, послужит также его продувка инертным газом через пористые или многоканальные блоки, установленные в футеровке конвертера по периметру ее участка, примыкающего к донной части корпуса агрегата, о чем сообщалось в предыдущей публикации [6].

Полученная информация свидетельствует в пользу того, что в кислородном конвертере с

вращающимся корпусом при ведении плавки можно существенно интенсифицировать процессы десульфурации и дефосфорации металла за счет увеличения поверхности контакта твердой, жидкой и газовой фаз и обеспечения при их взаимодействии полного протекания химических реакций. Наряду с этим следует отметить, что приведенные данные экспериментальных исследований позволили установить лишь качественную картину процесса функционирования усовершенствованной системы верхней продувки ванны кислородного конвертера с вращающимся корпусом. Поэтому дальнейшие исследования в этой области должны быть продолжены с целью получения теоретических зависимостей, позволяющих обосновать рациональные значения конструктивных и технологических параметров структурных элементов, входящих в состав данной системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бойченко, Б. М. Конвертерное производство стали: теория, технология, качество стали, конструкции агрегатов, рециркуляция материалов и экология [Текст] / Б. М. Бойченко, В. Б. Охотский, П. С. Харлашин. — Днепропетровск: РВА «Днепро-ВАЛ», 2006. — 454 с.
2. 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.
3. 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.
4. Щербаков, В. А. Анализ взаимодействия газопорошковой струи с жидкой сталью [Текст] / В. А. Щербаков // *Тематический сборник научных трудов «Теория и практика повышения качества стали»*. — М.: Металлургия, 1985. — С. 61–69.
5. *Инженерная металлургия '86. Труды конференции / Пер. с англ.; под ред. В. А. Кудрина* — М.: Металлургия, 1990. — 400 с.
6. Еронько, С. П. Повышение интенсивности перемешивания расплава в ванне конвертера с вращающимся корпусом [Текст] / С. П. Еронько, Е. В. Ошовская, Б. И. Стародубцев // *Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация»*. — 2017. — № 4. — С. 49–54.