

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДВИЖЕНИЯ ШИХТЫ В ПОЛОСТИ 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»)

В связи с назревшей необходимостью утилизации накопившихся металлосодержащих отходов, имеющих в своем составе значительное количество вредных включений, задача создания плавильного агрегата, обеспечивающего переработку некачественной шихты в условиях специализированного мини-предприятия, является весьма актуальной. Ее решение требует комплексного подхода, предполагающего использование, с одной стороны, известных рациональных предложений по реализации технологического процесса, позволяющего с большой эффективностью удалять из выплавляемой стали нежелательные примеси, а с другой — усовершенствований, направленных на устранение ранее выявленных у этого процесса недостатков [1]. Поэтому при проектировании мини-плавильного агрегата, предназначенного для получения стали требуемого качества из побочных продуктов металлургического производства, прототипом послужил калдо-конвертер, корпус которого во время ведения плавки вращается относительно своей продольной оси симметрии, наклоненной под углом 15–20 град. к горизонтальной плоскости.

Данный тип конвертера благодаря интенсивному механическому перемешиванию расплава, обеспечивающему быстрое растворение вводимых в значительном количестве флюсов, как в кусковом, так и в порошкообразном виде, позволял получать качественную сталь из шихты с высоким содержанием серы и фосфора. Однако из-за выявленного в процессе эксплуатации ряда недостатков его промышленное применение было прекращено.

К существенной конструктивной недоработке этого сталеплавильного агрегата следует отнести размещение привода механизма вращения его корпуса непосредственно на поворотной части механической системы, что не только существенно усложняло проведение операций по ее ремонту и обслуживанию, но и требовало повышения мощности привода механизма поворота конвертера.

В связи с этим при разработке модернизированного образца кислородного конвертера была применена принципиально новая схема привода механизма вращения корпуса

агрегата (рис. 1), отличающаяся тем, что входящие в ее состав электродвигатель 2 и редуктор 3 установлены стационарно на рабочей площадке 1 со стороны его свободной цапфы. При этом крутящий момент от привода корпусу конвертера передает промежуточный вал 4, размещенный в подшипниковых опорах, смонтированных в цилиндрическом канале, выполненном в этой цапфе. Промежуточный вал посредством конической зубчатой пары 6 связан с продольным валом 5, на хвостовике которого закреплена прямозубая шестерня 8, входящая в зацепление с зубчатым венцом 7, жестко связанным с корпусом кислородного конвертера. Благодаря такой кинематической схеме привода удалось устранить отмеченные выше недостатки, присущие известным аналогам [2].

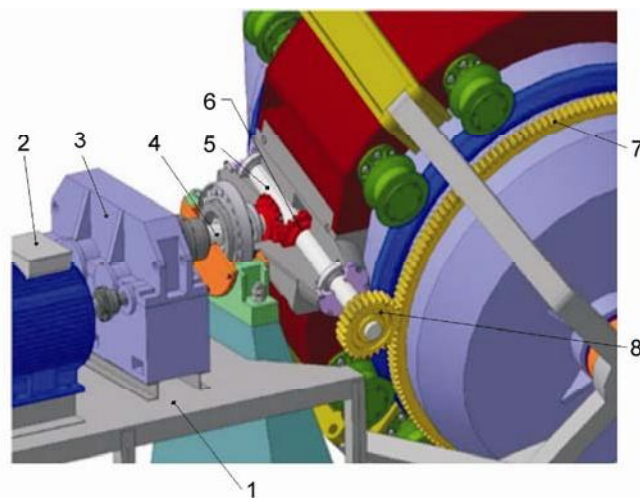


Рис. 1. Конструктивное исполнение механизма вращения корпуса агрегата

Расчет и конструирование новой системы привода механизма вращения корпуса мини-конвертера требуют наличия информации о гидродинамических условиях взаимодействия жидкой и твердой составляющих шихты во время интенсивного механического перемешивания его ванны, так как в результате этого происходит перераспределение соотношения объемов и масс компонентов, находящихся в разных агрегатных состояниях, от чего в значительной мере зависит технологическая нагрузка на приводной двигатель.

По ряду причин получение такой информации возможно только в условиях лабораторного эксперимента на действующих моделях плавильного агрегата. Несмотря на то что данные модельных исследований позволяют раскрыть только качественную картину изучаемого процесса, в результате их анализа удается исключить неверные технические решения и грубые ошибки в расчетах при конструировании опытно-промышленного образца модернизированного конвертера. Поэтому при планировании эксперимента ставилась задача получения данных, характеризующих изменение во времени, т. е. по ходу ведения процесса выплавки стали, момента сопротивления вращению корпуса агрегата, обусловленное постепенным переходом части шихты из твердого состояния в жидкое.

Модельные опыты проводили в два этапа. Во время первого осуществляли визуальный контроль процесса взаимодействия имитаторов твердой и жидкой составляющих шихты в поперечном сечении перемешиваемой ванны.

Для изучения закономерности движения твердого материала в жидкой среде в плоскости поперечного сечения плавильного агрегата, нормальной к его центральной оси, относительно которой происходит вращение корпуса, изготовили модель нижней части конвертера, имеющую съемную прозрачную переднюю торцевую стенку. Масштаб модели по отношению к соответствующей части разрабатываемого 10-т кислородного конвертера составил 1:10. Ее приводили в действие с помощью мотор-редуктора постоянного тока, обеспечивающего получение различных частот вращения в диапазоне 5–30 об/мин. При этом корпус модели консольно закрепляли на хвостовике выходного вала мотор-редуктора.

Согласно плану эксперимента моделировали два варианта реализации процесса перемешивания в зависимости от соотношения объемов и плотностей жидкой и твердой частей перерабатываемой шихты, в состав которой входит расплавленный чугун, пакетированный и тяжеловесный стальной лом.

Спрессованный в пакеты легковесный металлический лом и тяжеловесный имитировали кубиками из пенопласта, выполненными в масштабе 1:10 к реальным пакетам и имеющими размеры 20×20×20 мм. Как известно, плотность спрессованного лома составляет 2–4 т/м³, т. е. примерно в 2 раза меньше плотности жидкого металла, а плотность тяжеловесного лома (концевая обрезь непрерывнолитой заготовки) равняется 7,8 т/м³, т. е. превышает плотность жидкого металла в 1,1 раза. Исходя из этого, а также учитывая то, что в качестве модельной жидкости использовали воду ($\rho = 1 \text{ т/м}^3$), кубики пенопласта с помощью свинцовых штифтов

утяжеляли с таким расчетом, чтобы их средняя плотность при имитации легковесного и тяжеловесного лома составляла 0,4–0,5 и 1,1 т/м³ соответственно.

Регистрацию процессов движения внутри модели материалов, имитирующих твердые и жидкие компоненты шихты, выполняли с помощью видеосъемки с возможностью просмотра отснятого материала как в динамике, так и в режиме “стоп-кадр”. Характерные картины, наблюдавшиеся при различных вариантах загрузки имитаторов компонентов шихты и скорости вращения корпуса модели конвертера, приведены на рис. 2. В результате их анализа установлены следующие особенности поведения жидкой ванны модели конвертера и движения в ней имитатора твердой части шихты. Прежде всего следует отметить отклонение свободной поверхности жидкой ванны модели конвертера от горизонтальной плоскости по ходу вращения ее корпуса. Это отклонение увеличивалось с повышением частоты вращения корпуса и составляло от 2 до 5 град.

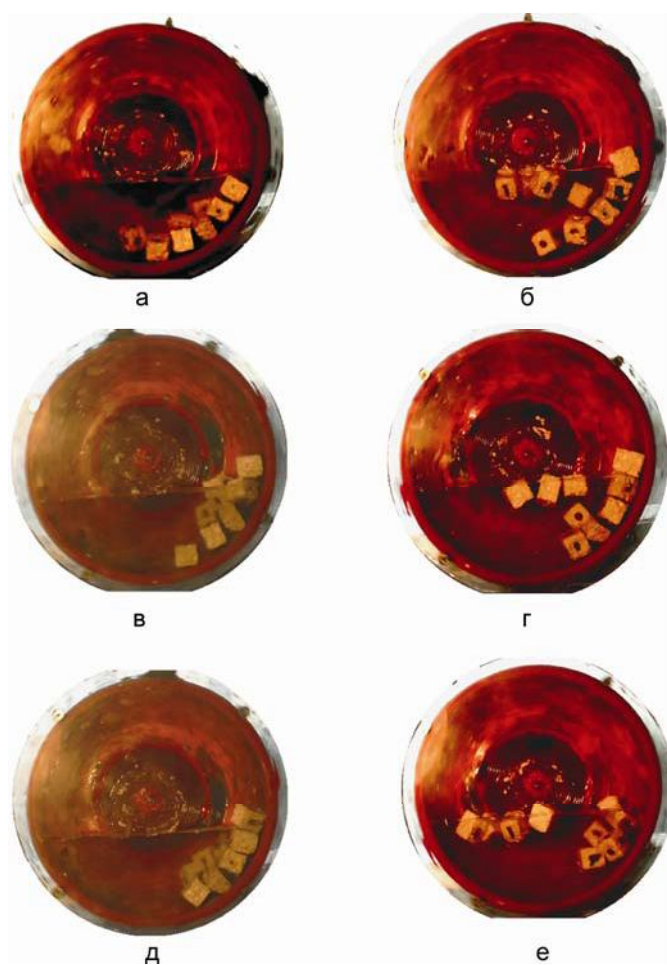


Рис. 2. Положение имитатора твердой части шихты в жидкой ванне модели конвертера при различной частоте вращения ее корпуса: 10 (а, б), 20 (в, г), 40 об/мин (д, е)

При наличии в ванне только имитатора тяжеловесного лома во время вращения корпуса модели в заданных пределах изменения угловой скорости наблюдается челночный режим движения всей массы загруженных кубиков (см. рис. 2, а и в). С повышением угловой скорости корпуса модели дуга контакта кубиков с ее внутренней поверхностью заметно смещалась по направлению вращения, а их слой становился более компактным (см. рис. 2, д).

Если в жидкой ванне находились одновременно имитаторы тяжеловесного и пакетированного лома, то при различной угловой скорости модели они вели себя по-разному. Для малой частоты вращения корпуса модели характерно рассредоточенное положение кусочков имитатора тяжеловесного лома по дуге контакта со стенкой агрегата (см. рис. 2, б). Увеличение частоты вращения корпуса модели сопровождалось повышением компактности размещения этих кусочков с одновременным уменьшением дуги их контакта с внутренней поверхностью модели конвертера в 1,5–2 раза (см. рис. 2, г и е). Кусочки имитатора легковесного лома, находившиеся на поверхности жидкой ванны, по мере увеличения частоты вращения корпуса модели агрегата смещались в противоположную сторону от имитатора тяжеловесного лома под воздействием возбуждавшихся циркуляционных потоков модельной жидкости.

Установленные особенности взаимодействия имитатора тяжеловесного лома с внутренней поверхностью корпуса модели конвертера свидетельствуют о том, что в случае ускоренного вращательного движения агрегата приращение значения мощности, требуемой для его вращения, будет обусловлено (рис. 3) увеличением угловой скорости ω и момента сопротивления вращению, вызванного равнодействующей сил тяжести тяжеловесного лома $G_{тл}$ и Архимеда, что можно учесть с помощью коэффициента K , равного отношению плотностей металла в жидком и твердом состояниях (0,09). При этом из-за изменения значений угла отклонения от вертикали β биссектрисы центрального угла α , соответствующего дуге контакта $L_{дк}$ имитатора тяжеловесного лома, смещается его центр масс и увеличивается плечо h результирующей силы относительно оси вращения корпуса (см. таблицу). Поэтому суммарный статический момент сопротивления, преодолеваемый приводом при вращении корпуса конвертера во время ведения технологического процесса выплавки стали, включает три составляющие:

$$M_0 = M_{тр} + M_{ст} + M_{сж},$$

где $M_{тр}$ — момент сил трения в опорах; $M_{ст}$ — момент, вызванный смещением центра тя-

жести тяжеловесного лома; $M_{сж}$ — момент, вызванный смещением центра тяжести объема расплава.

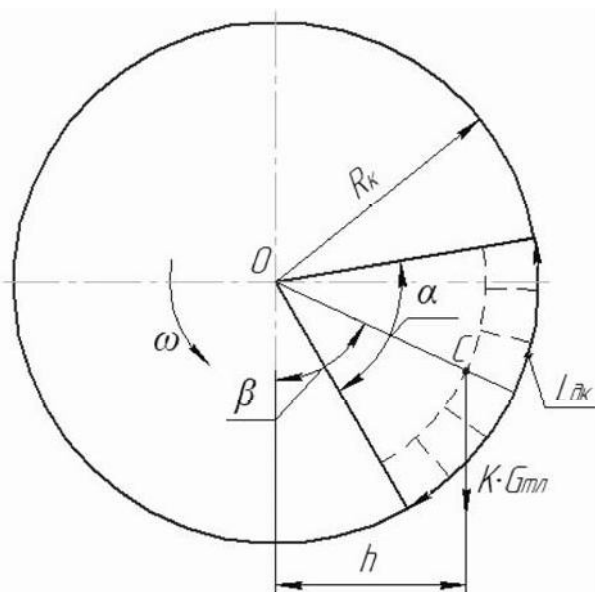


Рис. 3. Параметры, характеризующие распределение имитатора тяжеловесного металлолома в ванне модели конвертера при вращении ее корпуса

ЗАФИКСИРОВАННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИМИТАТОРА ТЯЖЕЛОВЕСНОГО ЛОМА В ВАННЕ МОДЕЛИ КОНВЕРТЕРА ПРИ РАЗЛИЧНОЙ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ЕЕ КОРПУСА

Частота вращения корпуса, об/мин	R_k , мм	β , град.	α , град.	$L_{дк}$, мм	ОС, мм	h , мм
10	130	45	90	200	90	63
20		60	70	160	85	68
40		75	60	130	80	72

Первую составляющую момента сопротивления, препятствующего вращению корпуса конвертера, можно считать неизменной, так как она зависит от суммарной силы тяжести корпуса плавильного агрегата и находящейся в нем шихты, а также от значения коэффициентов трения в подшипниковых опорах.

Значения второй и третьей составляющих будут переменными, поскольку они определяются силами тяжести твердой и жидкой частей шихты и смещением их центров тяжести относительно оси вращения корпуса плавильного агрегата. В свою очередь, положение центров тяжести тяжеловесного лома и объема расплава, как отмечалось выше, зависит от частоты вращения корпуса конвертера.

Для выполнения проектных расчетов привода механизма вращения корпуса сталеплавильного агрегата необходима исходная информация о

соотношении слагаемых действующего на него общего момента сопротивления. Поэтому второй этап лабораторных исследований включал проведение опытов на изготовленной в масштабе 1:7 объемной модели плавильного агрегата, имевшей механизм вращения корпуса с электрическим приводом, в точности воспроизводящий конструктивные особенности усовершенствованной приводной системы разрабатываемого опытно-промышленного образца 10-т мини-конвертера [3]. Корпус модели выполнили из органического стекла, что облегчало осуществление визуального контроля и видеосъемку гидродинамических процессов, протекающих в перемешиваемой жидкой ванне. Для фиксации энергосиловых параметров функционирования механизма вращения корпуса модели конвертера в ходе проведенных экспериментов использовали контрольно-измерительный комплекс, включавший тензорезисторный преобразователь, усилитель переменного тока, АЦП и ЭВМ с печатающим устройством. Тензорезисторный преобразователь представлял собой металлическую гильзу, выполнявшую функцию муфты, передающей крутящий момент. На ее наружной цилиндрической поверхности с помощью специального клея под углом 45 град. закреплены четыре фольговых тензодатчика, включенные в мостовую схему. Сама гильза размещена в защитном корпусе с прозрачной крышкой (рис. 4) и снабжена кольцами и подпружиненными шинами, обеспечивающими электрическую связь моста преобразователя с усилителем во время передачи ею крутящего момента [4].

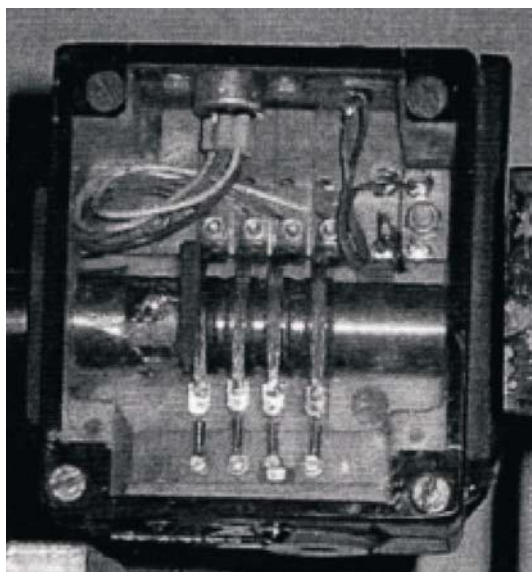


Рис. 4. Тензорезисторный преобразователь для контроля крутящего момента

В данной серии опытов в качестве имитатора тяжеловесного лома использовали кубики из переплавленного сахара, позволяющие при постепенном растворении в воде симулировать процесс плавления лома, т. е. его переход из твердого состояния в жидкое, а значит обеспечить во время моделирования изменение отношения долей составляющих шихты, находящихся в разных агрегатных состояниях. Для обеспечения требуемой плотности кубиков перед затвердеванием расплава сахара в него добавили необходимое количество мелких частиц пенопласта.

С целью получения достоверных данных о значениях крутящего момента, препятствующего вращению корпуса модели конвертера, предварительно протарированный тензорезисторный преобразователь устанавливали между задней цапфой модели и приводом, т. е. при исключенных зубчатых передачах (рис. 5). Такой вариант размещения преобразователя в кинематической цепи механизма вращения позволял устранить при измерении возмущения, вносимые силами трения в зубчатых зацеплениях.



Рис. 5. Место размещения тензорезисторного преобразователя при контроле крутящего момента, необходимого для вращения корпуса модели конвертера

Учитывая то, что в реальных условиях реализации технологического процесса во время ведения плавки происходит постоянное перераспределение долей жидкой и твердой составляющих шихты в ванне агрегата, при моделировании его работы важно было отследить влияние данного фактора на изменение составляющей момента сопротивления вращению корпуса конвертера, обусловленной действием силы тяжести металлического лома относительно его оси вращения. В связи с чем провели серию замеров крутящего момента,

требуемого для вращения с различной частотой корпуса модели кислородного конвертера при изменяющемся соотношении масс жидкой и твердой частей имитаторов шихты, находящейся в ее ванне. При этом в каждом из проводившихся опытов суммарная масса воды, моделирующей металлический расплав, и кубиков, имитирующих тяжеловесный металлический лом, была неизменной, а общий объем жидкой и твердой фаз соответствовал с учетом линейного масштаба модели в третьей степени объему расплава в 10-т кислородном конвертере. Как известно, максимально возможное содержание металлического лома в шихте, перерабатываемой в сталеплавильном агрегате с вращающимся корпусом (процесс Калдо), составляет 50 % [1]. Поэтому в ходе модельных исследований долю имитатора металлического лома дискретно изменяли в пределах 10–50 % и для каждого варианта соотношений твердой и жидкой фаз измеряли крутящий момент, требуемый для вращения корпуса модели конвертера с частотой 10, 20 и 40 об/мин. Характерный вид регистрировавшихся сигналов показан на рис. 6. Они свидетельствуют о наличии пиковых нагрузок на привод в момент его пуска, а также о пульсациях преодолеваемого им момента сопротивления вращению корпуса модели, обусловленных перемещениями в ее жидкой ванне кусочков материала, имитирующих твердую шихту. Частота и амплитуда пульсаций крутящих моментов находятся в прямой зависимости от угловой скорости вращения корпуса модели и количества загруженного в нее имитатора твердой части шихты, совершающего челночное движение относительно ее внутренней поверхности.

С использованием результатов обработки экспериментальных данных построили графики зависимостей моментов сопротивления вращению корпуса модели конвертера для различных условий ее работы (рис. 7).

Анализ полученной информации позволяет сделать несколько выводов, имеющих практическое значение. При пуске привода механизма вращения корпуса кислородного конвертера в системе будут возникать кратковременные пиковые нагрузки, превышающие в 1,5–2 раза значения крутящего момента в установившемся режиме работы. Во время ведения технологического процесса колебания значений крутящего момента, требуемого для вращения корпуса сталеплавильного агрегата,

обусловлены челночным движением по его внутренней поверхности кусков тяжеловесного лома. Причем значение момента растет по мере поднятия кусков в верхнюю точку по поверхности и затем резко снижается после их соскальзывания вниз.

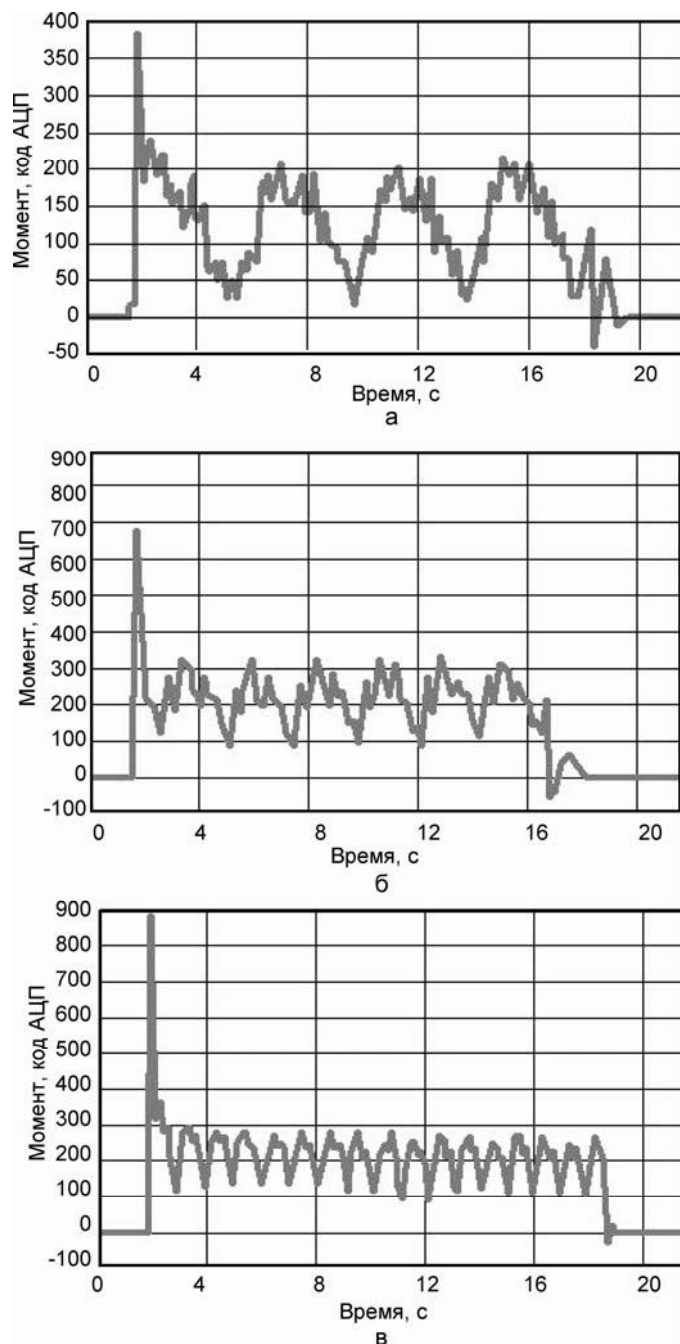


Рис. 6. Вид сигналов, зарегистрированных при контроле крутящих моментов для разных частот вращения корпуса модели конвертера: 10 (а), 20 (б) и 40 об/мин (в)

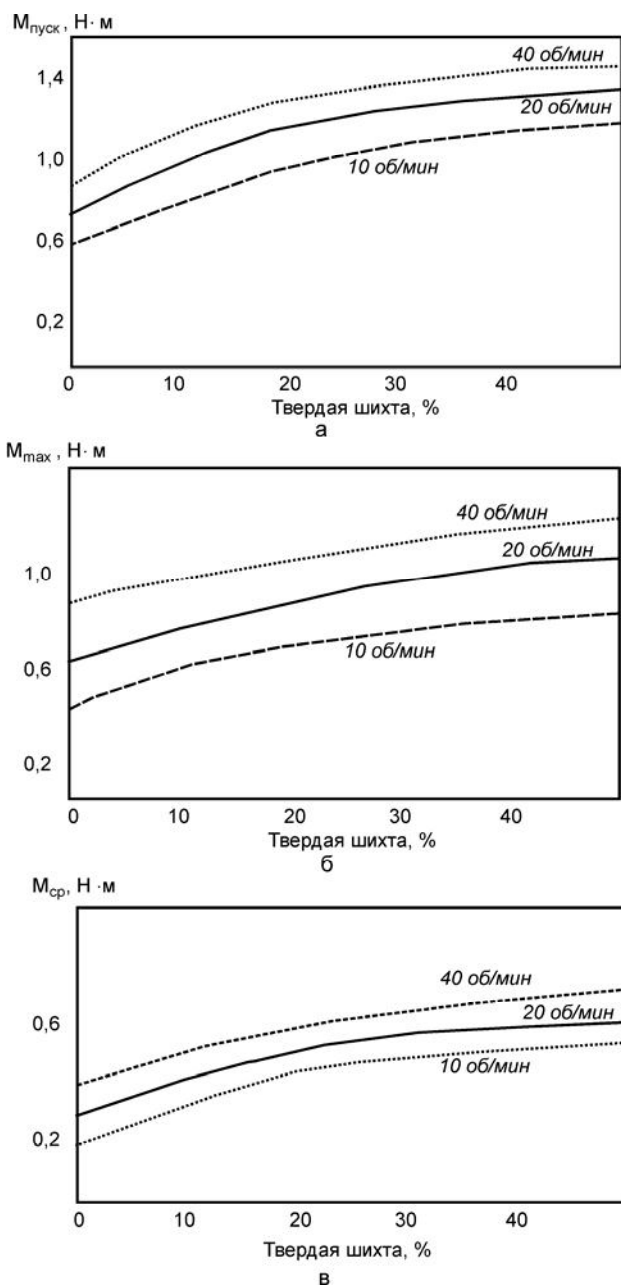


Рис. 7. Зависимости пускового (а), максимального (б) и среднего (в) крутящих моментов от процентного содержания имитатора тяжеловесного лома в ванне модели конвертера при различной скорости вращения ее корпуса

Увеличение доли тяжеловесного лома в твердой части шихты заметно повышает технологическую нагрузку на привод механизма вращения корпуса кислородного конвертера, имеющую максимальное значение в начальной стадии реализуемого сталеплавильного процесса. По ходу его ведения, в результате плавления лома, нагрузка на привод должна постепенно снижаться из-за уменьшения действующего на корпус агрегата крутящего момента, вызванного смещением центра тяжести ванны относительно оси вращения из-за разности плотностей твердой и жидкой составляющих шихты.

Влияние отмеченных факторов на работу механизма вращения корпуса конвертера будет учтено при разработке метода расчета энергосиловых параметров его привода.

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 «ДнепроВАЛ», 2006. — 454 с.
2. А. с. 154293 СССР, МПК С 21 С 5/42. Конвертер с двумя осями вращения [Текст] / Н. В. Молочников, А. И. Майоров, А. Н. Победоносцев. Заявл. 31.07.1962. Оpubл. 1963. Бюл. № 9.
3. 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.
4. Еронько, С. П. Физическое моделирование процессов внепечной обработки и разлива стали [Текст] / С. П. Еронько, С. В. Быковских. — Киев: Техніка, 1998. — 136 с.