



Математическое моделирование нестационарного перемешивания стали в агрегате ковш-печь

Часть 1. Методика моделирования

Канд. техн. наук Ерофеев М.М. – ООО «Делкам-Урал», г. Екатеринбург.
Доц. канд. техн. наук Агапитов Е.Б. - ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

В настоящее время у инженера-исследователя появилась возможность применять универсальные математические пакеты, для широкого круга задач проводя расчеты в различных областях гидродинамики и теплообмена, позволяя значительно снижать затраты и время на проведение физического эксперимента. Конечно, универсальные коды позволяющие проводить упомянутые исследования появились не вчера. Но широкое распространение они получили только после «скачка» в развитии персональных компьютеров. Появление же кластеров и многопроцессорных машин, позволило значительно расширить ряд решаемых задач и получить точность решения, зачастую не требующую проверки на физической модели.

Специалисты отдела инженерного анализа компании «Делкам-Урал» в течение многих лет решают задачи из различных областей современной промышленности. А том числе широко развито металлургическое направление – все виды литейных задач, прокатное производство, оптимизация работы нагревательных и сталеплавильных печей и агрегатов. Технические эксперты компании «Делкам-Урал» имеют навык работы с различными программами инженерного анализа: ANSYS, FlowVision, EFD, [SYSWELD](#), [ProCast](#), [QForm2D/3D](#), [Deform](#) и другими программами.

Данные программы основываются на численных итерационных методах позволяющих получать решение дифференциальных уравнений, при помощи которых описываются практически все физические задачи, с необходимой точностью. Применение методов компьютерного моделирования позволяет значительно сократить затраты на разработку новых конструкций и систем, а также снизить время на решение задач оптимизации существующих. Отличительной чертой компьютерных моделей является получение дискретного решения в изучаемой системе, при этом исследователь сам может выбирать

Делкам-Урал | 620131 | Россия | Екатеринбург | ул. Металлургов, 16 «Б»¹
Тел.: +7 (343) 214-46-70 (многоканальный) | Факс: +7 (343) 214-46-76



необходимую степень дискретизации решения, без труда увеличивая, при необходимости, количество точек в системе для которых определяются свойства. Следует отметить, что при построении физической модели исследователю бывает затруднительно получить большое количество точек, в которых определены свойства системы. При изучении действующего промышленного агрегата эта задача становится практически невозможной, поэтому приходится оценивать процессы внутри системы по макро показателям, что сопряжено увеличением ошибочных рассуждений и неправильной работой объекта.

Сотрудниками компании «Делкам-Урал» совместно с ГОУ ВПО «МГТУ» проведено исследование одного из самых больших в мире агрегата ковш-печь емкостью 370 т. На агрегате происходит нагрев стали и её донное перемешивание аргоном через две пористые пробки, расположенные в днище ковша.

Равномерное перемешивание стали обеспечивает ее однородность по температуре и химическому составу во всем объеме ковша, обеспечивая одинаковость свойств стали. При неравномерном перемешивании стали по высоте ковша возможно возникновение значительных градиентов (до 25°C [1]) температуры, что в свою очередь, повышает вероятность возникновения аварийных ситуаций при разливке. При возникновении неравномерности по химическому составу возможно «понижение» марки стали или полное «выбраковывание».

Как показано в работе [2], существует зависимость коэффициента усвоения активной мощности от интенсивности перемешивания металла. При этом в данной работе показано, что для исследуемого ковша существует определенный диапазон значений скорости циркуляции металла в ковше, при котором наблюдается максимальное усвоение энергии: при уменьшении скорости происходит увеличение градиента температуры, а при повышении скорости циркуляции наблюдается повышенное «размывание» и разрушение футеровки ковша без снижения неоднородности по температуре.

В данной работе описывается опыт использования универсального пакета для исследования перемешивания жидкой стали в агрегате ковш-печь.

В математической модели решается система состоящая из уравнений тепло- и массообмена. Исходными уравнениями являются уравнения передачи энергии и уравнение Навье-Стокса – уравнение движения. Перемешивание стали в ковше струей



газа описывается при помощи уравнения конвективно-диффузионного переноса. Кроме того, для учета турбулизации расплава используется SST модель турбулентности.

На боковых стенках и на днище ковша задавалось граничное условие стенка с заданной шероховатостью, на границах входа газа задано давление и температура перемешивающего газа, на верхней границе расплава задано условие свободного выхода.

После расстановки начальных и граничных условий задавались глобальные параметры расчета – направление вектора свободного падения, физические свойства газа и расплава, шаг расчета, метод расчета (расчет проводился неявным методом), и т.д. Для учета шлака на поверхности жидкого металла в верхней части расчетной области, размером 0,15-0,25 м, задавались физические свойства (плотность, вязкость и т.д.) отличные от свойств остальной расчетной области. Расчетный объем разбили на $4,93 \cdot 10^4$ ячеек, причем сетка была создана неравномерная, таким образом, что в областях с большим градиентом скорости размер ячеек был меньше чем в областях с малым градиентом. Шаг расчета устанавливался через число CFL (число Куранта) которое можно определить как максимальное число ячеек сетки, которые некоторый малый объем жидкости может преодолеть за один шаг по времени. Шаг определяли серией пробных вычислений, наблюдая за характером изменения скоростей и температур в объеме и изменением решения при различных значениях шага расчета. Адекватность модели оценивали по макро показателям – измеренному на основе теплового баланса среднему темпу охлаждения и нагрева стали, и сравнением измеренной температуры в контрольной области модели и реального объекта.

Для анализа перемешивания стали в ковше предложена методика оценки изменения скорости смещения её элементарного объема. За элементарный принят объем стали полученный в результате разбиения исследуемого объема расчетной сеткой.

В работе [3] для оценки перемешивания расплава также предложен метод разделения всего объема ванны на элементарные объемы. При этом для оценки перемешивания использовалась величина средневзвешенного удельного количества движения расплава в ванне:



$$(mw)_{\text{уд}} = \frac{\sum_{i=1}^N (mw)_i}{V_B} \cdot \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с} \cdot \text{м}^3} \right],$$

где m – масса элементарного объема, кг; w – скорость элементарного объема, м/с; V_B – объем ванны, м^3 ; N – количество элементарных объемов, на которые условно разбивается исследуемая ванна

Однако данный метод обладает существенным недостатком: при такой оценке невозможно учесть возникновение в ванне застойных зон. За счет высоких скоростей движения стали в зонах продувки, данный макропоказатель может иметь высокое значение, при этом расчетное значение параметра перемешивания может быть «удовлетворительным», а усреднение расплава окажется «неудовлетворительным» из-за возникновения застойных зон.

Поэтому для оценки качества перемешивания всего объема ковша было предложено исследуемый объем равномерно рассекать на N условных плоскостей (рис. 1) и анализировать движение стали в каждой из них. При этом расстояние от днища ковша до нижней плоскости и расстояние от верхней до зеркала стали составляло не менее 10 линейных размеров расчетных ячеек по вертикали. Такое расположение секущих плоскостей позволило оценить перемешивание стали во всей исследуемой области.

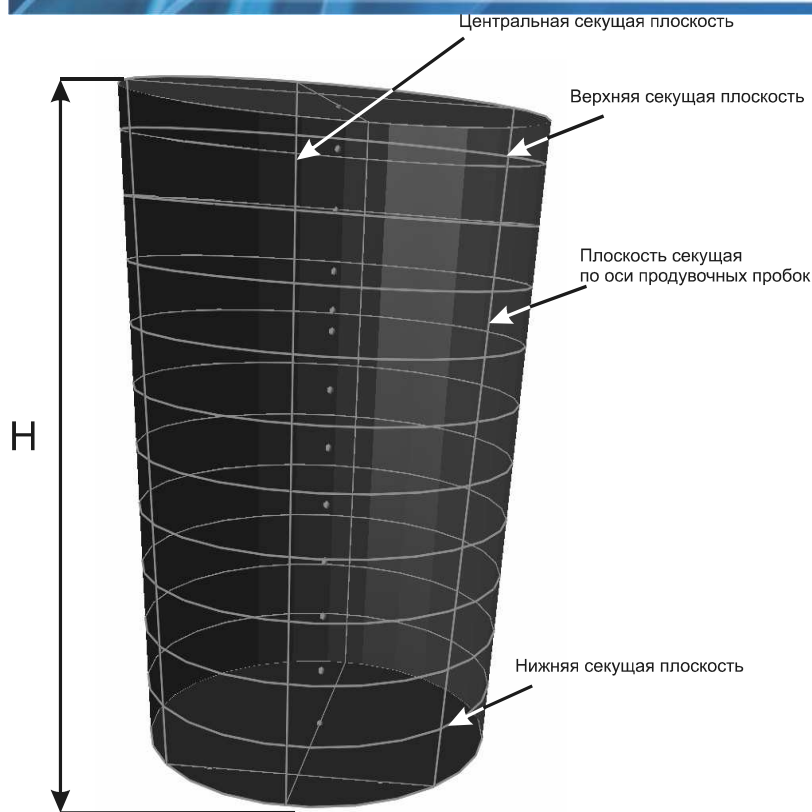


Рис. 1. Расположение секущих плоскостей в исследуемом объеме

Для всего объема ковша рассчитывались значения векторов скорости движения металла для каждого элементарного объема. Затем определялись скорости движения элементарных объемов стали в каждой условной плоскости. Кроме того, определялись скорости движения элементарных объемов в двух вертикальных плоскостях: плоскости, проходящей через центральную ось ковша и через обе пробки ковша. Таким образом, возникновение нераспознанных застойных зон полностью исключалось.

В ходе расчета получены поля скоростей и температур во всей расчетной области. Анализ результатов расчета перемешивания расплава в ковше показал несимметричность температурного поля металла даже при одинаковом расходе аргона, подаваемого на пористые пробки (рис. 2).

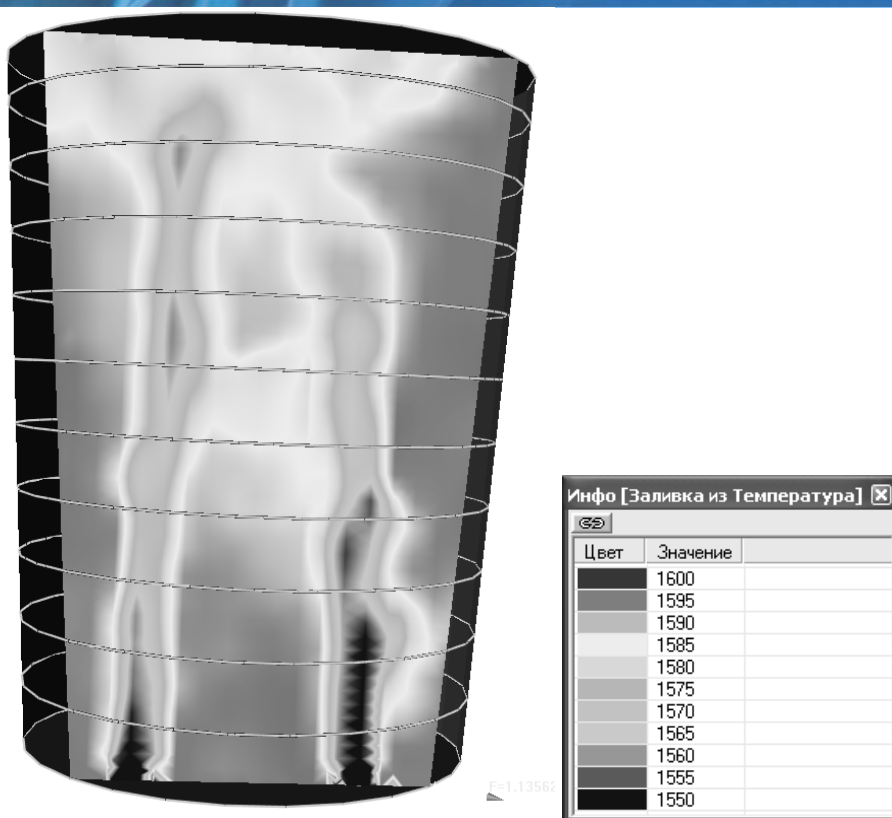


Рис. 2. Температурное поле расплава в модели ковша емкостью 370 т (градуировочная шкала в $^{\circ}\text{C}$); расход аргона на обе пробки по 1000 л/мин

На основании проведенного моделирования была проанализирована существующая технология перемешивания стали. Во второй части работы будут показаны её недостатки и описаны предлагаемые изменения.

Используемая литература.

- 1 Поволоцкий Д.Я., Кудрин В.А., Вишкарёв А.Ф. Внепечная обработка стали: - М.: «МИСИС», 1995 – 256 с.
- 2 Самарский А.А., Попов Ю.П. Разностные методы решения задач газовой динамики. Учеб. пособие для вузов. М.: Наука. 1992 – 424 с.
- 3 Гнездов Е.Н. Энергосберегающая технология перемешивания сталеплавильной ванны на основе физического моделирования // Известия ВУЗов Черная металлургия. 2004. - №5. С. 64-66.



Математическое моделирование нестационарного перемешивания стали в агрегате ковш-печь

Часть 2. Результаты моделирования

канд. техн. наук Ерофеев М.М. – ООО «Делкам-Урал», г. Екатеринбург.
доц. канд. техн. наук Агапитов Е.Б. – ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»

Специалистами компании «Делкам-Урал» совместно с ГОУ ВПО МГТУ проводится исследование агрегата ковш-печь большой емкости (370 т) на основе математического моделирования. В первой части данной работы [1] была описана методика проведения математического моделирования. На основе математического моделирования были получены значения скорости движения стали и её температуры во всем объеме ковша. Была показана несимметричность перемешивания стали в исследуемом агрегате. Расчет проводился для нестационарной задачи.

В результате расчета по предложенной математической модели, для каждого момента времени был получен массив данных из значений скорости и температуры стали в каждой ячейки сетки. То есть, определена скорость движения каждого элементарного объема и температура металла в нем. На основе этих массивов для каждой из 12 плоскостей построено трехмерное поле изменения значения модуля скорости в исследуемой плоскости. Так, например, при перемешивании стали с расходом аргона 300 л/мин на каждую пробку образуются застойные зоны и зоны активного движения металла.

Анализ полученных данных показал неравномерность перемешивания металла, как по высоте, так и по ширине ковша (рис. 1).

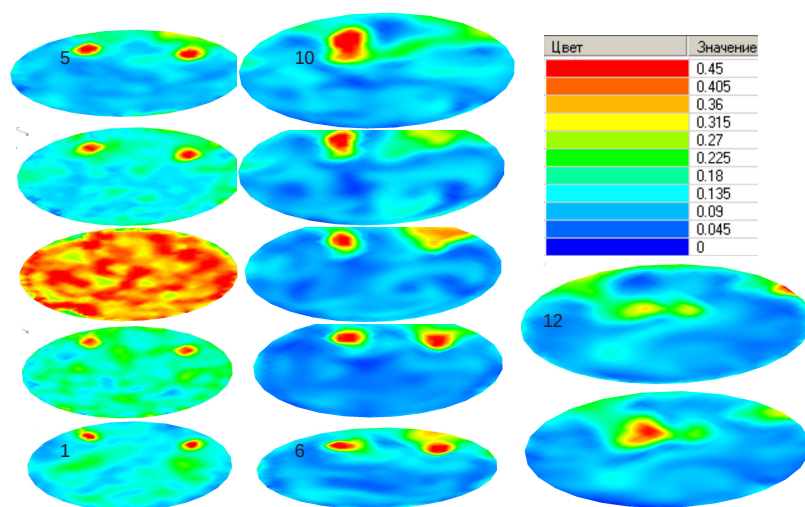


Рис. 1. Изменение скорости расплава в секущих плоскостях (градуировочная шкала в м/с)

Анализ работы действующего агрегата ковш-печь показал, что режим перемешивания, выбираемый оператором, не является оптимальным. Зачастую, после окончания обработки на агрегате, наблюдаются температурные градиенты по высоте ковша.

Рассчитан предельный случай «пробоя» ванны при продувке с высокими значениями расхода аргона – более 1000 л/мин на каждую пористую пробку. При этом показано возникновение канального течения газа в металле и возникновение застойных зон в объеме ковша (рис. 2). Данный режим является крайне неблагоприятным, так как при этом происходит вторичное окисление металла у поверхности ковша, повышенное размывание футеровки. Кроме того, при таком режиме увеличиваются тепловые потери с поверхности металла.

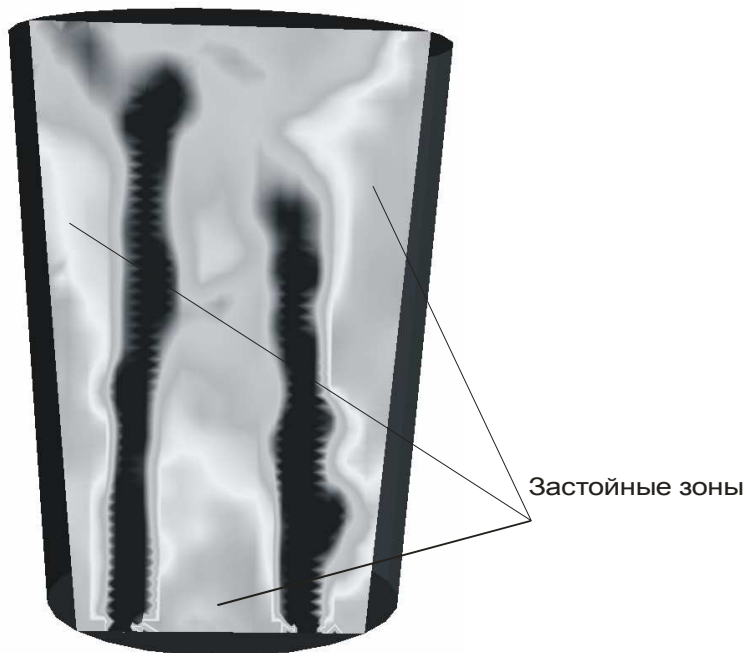


Рис. 2. Вид аргоновой струи при продувке ковша с высоким расходом аргона (1000 л/мин на каждую пробку)

Отмечено, что зона наиболее интенсивного движения стали смещается по высоте ковша в зависимости от расхода продувочного газа. Это хорошо иллюстрируется на рис. 3 – 4. При этом, так как продувочные пробки, расположенные в днище ковша, смещены от центра к его стенкам, происходит локальное повышение скорости по центрально оси. Данное явление объясняется возникновением циркуляционных зон при продувке, высота которых изменяется в зависимости от интенсивности продувки.

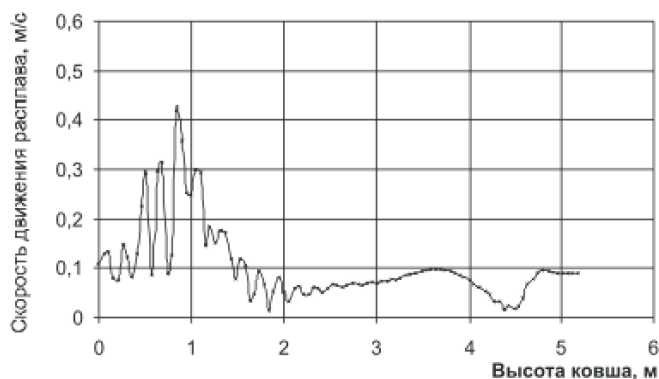




Рис. 3. Изменение скорости стали по вертикальной центральной оси ковша; время расчета (продувки) 3 мин. с расходом аргона 300 л/мин на каждую пробку

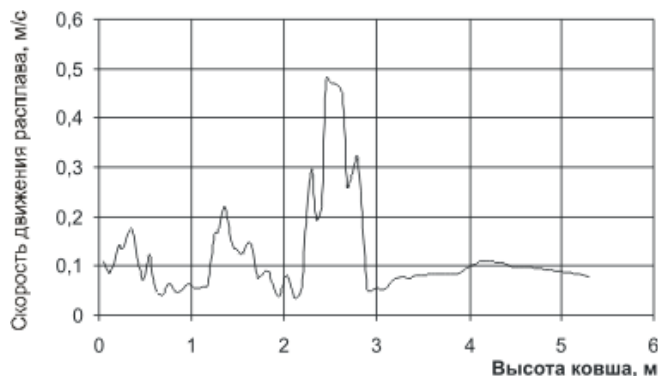


Рис. 4. Изменение скорости стали по вертикальной центральной оси ковша; время расчета (продувки) 3 мин. с расходом аргона 600 л/мин на каждую пробку

Таким образом, показано, что изменяя расход аргона подаваемого на перемешивание металла через пористые пробки можно смещать зоны воздействия газовых струй на металл в ковше.

На основании этого вывода для различных операций, проводимых на агрегате, на основании математической модели разработаны различные режимы перемешивания стали.

За основу разработки рекомендаций по управлению перемешиванием стали была принята действующая технологическая инструкция. Согласно данной инструкции перемешивание металла необходимо проводить не менее 3 минут в режиме с не зашлакованными – «чистыми» продувочными пробками. Опыт наблюдения за работой агрегата показал, что расход на пористые пробки изменяется в диапазоне от 150 до 1200 л/мин на каждую пробку. На математической модели проведено исследование перемешивания стали в данном диапазоне расходов аргона. При этом, так как при расходе аргона более 1000 л/мин образуется канальное движение, то при работе с «чистыми» пробками не рекомендуется устанавливать значение расхода более 1000 л/мин.

Было предложено перемещать зону наибольших скоростей по высоте ковша, изменяя расход аргона на пористые пробки в указанном диапазоне. Проведенные расчеты по предложенной выше модели показали, что ступенчатый график изменения расходов аргона на пробки (1000,



600, 300 л/мин) позволяет провести перемешивание более эффективно за заданные 3 минуты, по сравнению с постоянным режимом продувки.

Разработаны режимы перемешивания стали в ковше для следующих этапов обработки стали: ввод извести для наведения шлака, нагрев стали и её усреднение после нагрева, ввод легирующих материалов с помощью трайбаппарата, проведение операции десульфурации.

Для каждой технологической операции, проводимой на АКП, предложены режимы перемешивания с указанием расхода продувочного газа (от 150 до 1000 л/мин на каждую пробку) и продолжительности перемешивания. Эти режимы перемешивания стали позволят усреднить её в ковше за 3 – 5 мин.

Адекватность модели проверялась по оценке температуры металла двумя методами [2]:

- проведен расчет теплового баланса на основе классических уравнений теплотехники и вычислены скорости падения и увеличения средней температуры металла. Сравнение этих значений со значениями, полученными в результате моделирования, показало расхождение результатов в 3-7 °С (рис. 5);
- проведено сравнение температуры металла в контрольной области реального ковша (измерено технологом с помощью термопар) и в той же области расчетной модели. Расхождение результатов получено в 8-15 °С.

Объяснить большее расхождение результатов при сравнении температуры в контрольной области можно тем, что сталевару затруднительно проводить измерение точно в заданной точке.

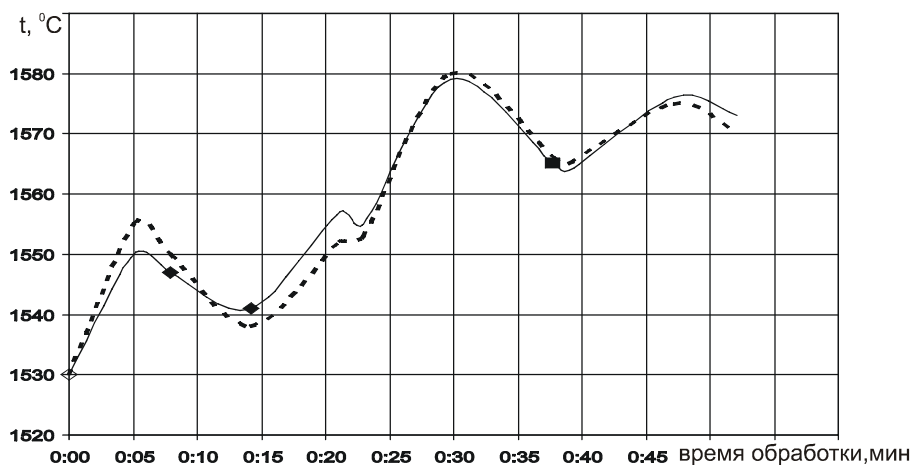


Рис. 5. Изменение температуры во времени, рассчитанное по математической модели (пунктирная линия), и на основе теплового баланса; точками показаны реальные замеры температуры

Адекватное математическое моделирование позволяет разработать режим перемешивания металла исходя из требуемых критериев оптимизации обработки стали в агрегате – повышение производительности агрегата, повышение качества обработки стали, задачи энергосбережения.

В данной работе на основании математического моделирования предложены новые режимы перемешивания стали в исследуемом агрегате. Это позволит снизить продолжительность перемешивания металла, сократить размывание футеровки и повысить ее стойкость. Кроме того, возможна организация режима перемешивания стали позволяющего снизить тепловые потери, интенсифицировать процессы массообмена между шлаком и металлом для обеспечения глубокой десульфурации стали, снизить вторичное окисление металла.

Таким образом, в данной статье показана возможность разработки адекватной математической модели для оценки перемешивания и усреднения стали в ковшах на базе универсального CFD пакета.

Специалисты компании Делкам-Урал постоянно проводят расчеты металлургических агрегатов всех типов. Данные расчеты позволяют адекватно оценить процессы тепло - и массообмена, гидро - и газодинамики в сложных металлургических агрегатах.



Технические эксперты компании готовы оказать помощь в расчетах при оптимизации и разработке различных агрегатов. Кроме того, возможно проведение обучения специалистов предприятий для самостоятельного проведения расчетов на основе математического моделирования.

Используемая литература.

- 1 Ссылка на номер, в котором опубликована первая часть статьи
- 2 Ерофеев М.М., Агапитов Е.Б., Николаев А.А. Исследование перемешивания расплава в ковше на основе пространственной математической модели. Энергетика и энергоэффективные технологии. Сб. докладов международной научно-технической конференции Ч.2. Липецк 18-20 октября 2006 г. С. 76-81.