

УДК:669.17.046.517В.002.5

**В.П.Пиптюк, П.Г.Прокопенко, С.В.Греков, Ю.Б.Костюк,
Г.А.Андриевский, А.А.Аносова**

**ПОДГОТОВКА ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ФИЗИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА
В СТАЛЕРАЗЛИВОЧНОМ КОВШЕ**

Институт черной металлургии НАН Украины

Подготовлено и опробовано оборудование для холодного физического моделирования процессов обработки расплава в сталеразливочном ковше. Показана его работоспособность и возможность проведения экспериментов для проверки результатов численного изучения процессов массо- и теплопереноса при обработке расплава в сталеразливочных ковшах разной ёмкости.

Ключевые слова: холодное физическое моделирование, массо- и теплоперенос, сталеразливочный ковш

Состояние вопроса. Протекание гидродинамических, тепловых и физико-химических процессов, в сталеразливочных ковшах сопровождается высокими температурами, воздействием агрессивных сред (шлак, расплав), выделением вредных газов и абразивных пылевидных частиц. Выполнение экспериментальных работ, связанных с изучением процессов массо-, и тепло теплопереноса, в таких условиях практически невозможно по соображениям безопасности персонала, сложности реализации и значительных финансовых затрат. Кроме того, серьёзным препятствием для проведения исследований на действующих промышленных агрегатах является такой фактор, как потеря производственного времени. Поэтому наиболее приемлемым способом решения возникающих проблем в таких случаях следует считать применение, например, физического моделирования.

Экспериментальные исследования могут проводиться как на промышленном оборудовании, так и на физических моделях, то есть на образцах (устройствах, системах), имеющих ту же физическую природу и позволяющих получить результаты, отражающие действительные явления в количественных соотношениях или адекватные реальным.

Цель работы. Подготовка и опробование работоспособности оборудования для холодного физического моделирования с целью проверки результатов численного исследования процессов массо- и теплопереноса при обработке железоуглеродистого расплава в сталеразливочных ковшах разной ёмкости.

Методика физического моделирования. Физическое моделирование, как метод исследования, включает пять основных этапов: постановку задачи; вывод и анализ условий подобия; выбор конструкции и расчёт параметров модели объекта исследования; проведение экспериментов на модели и обработку полученных результатов.

При постановке задачи необходимо исходить из того, что главная цель моделирования заключается в изучении основных закономерностей исследуемого процесса, а результаты, полученные в ходе эксперимента, после обобщений могут быть использованы в реальных промышленных условиях. Достичь намеченной цели можно в том случае, если проведение эксперимента осуществляется с учётом основных положений теории подобия.

Цель исследования в каждом конкретном случае может быть разной: от стремления получить эмпирические данные, полезные для использования в инженерной практике или позволяющие выполнить проверку теоретических положений, до изучения в общих чертах физической картины разработанного процесса. Однако даже когда не требуется получения особо точных результатов (приближенное или качественное моделирование) необходим анализ условий подобия. На этом этапе, на основании совокупности выбранных критериев рассматривается возможность упрощения условий подобия. При этом оцениваются численные значения критериев и определяется их значимость, что позволяет часть из них отнести к разряду несущественных, т. е. не требующих обеспечения равенства для модели и оригинала.

Выбор конструкции модели во многом зависит от характерных особенностей моделируемого процесса, а также от того, в каком виде необходимо получить интересующую информацию. Например, если исследуемый процесс обусловлен интенсивным движением жидкостных потоков и в итоге требуется получение картин их распределения в различных зонах перемешиваемой ванны, модель конструктивно должна обеспечивать возможность визуального контроля, фотографирования или видеосъёмки потоков. Модель изготавливают геометрически подобной реальному объекту по внутренним контурам. Для этого используют всевозможные материалы, но чаще всего применяют органическое стекло.

Подготовка модели к проведению исследований заключается в выборе варианта рационального размещения применяемой аппаратуры, обеспечении возможности быстрой замены моделирующей расплав жидкости, поддержании требуемой освещённости объектов, подлежащих видео- или фотосъёмке и т. д. Проведению исследований на модели предшествует планирование эксперимента, настройка регистрирующей аппаратуры и, при необходимости, тарировка преобразователей измерительных систем.

Собственно физическое моделирование, в зависимости от решаемых задач, может проводиться по уже известным или специально разработанным методикам с применением широкого набора контрольных датчиков и электронных приборов, предназначенных для регистрации параметров процессов, протекающих в моделях.

Обработку полученных результатов осуществляют с использованием методов математической статистики и с привлечением средств вычислительной техники. При этом необходимо выделить впервые зафиксирован-

ные данные, попытаться дать им полное объяснение и сопоставить их с уже известными результатами. После соответствующего анализа и обработки данные должны быть представлены в виде таблиц и графиков.

Для получения адекватных результатов на моделях необходимо, чтобы физические модели были подобны реальным объектам, то есть, можно было простым пересчётом по данным моделирования определить величины контролируемых параметров.

Описание лабораторного оборудования. Подготовку оборудования и его опробование осуществляли с участием сотрудников отдела главного метролога ИЧМ НАНУ (ОГМ НАНУ). Экспериментальное оборудование (ковш для холодного физического моделирования, регистрационные приборы и оборудование для воздействия на жидкую среду) было смонтировано в одной из лабораторий ОГМ ИЧМ НАНУ. Функциональная схема оборудования представлена на рис. 1

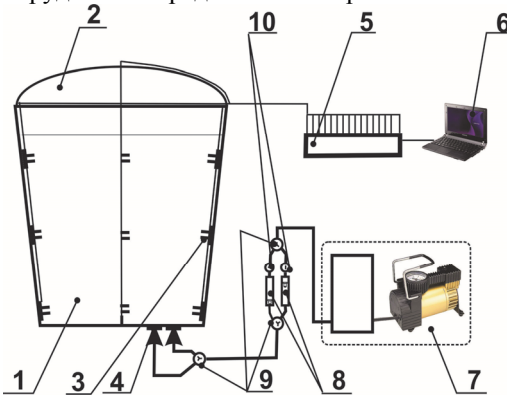


Рис. 1. Функциональная схема оборудования для холодного физического моделирования. Обозначения: 1 – ковш холодного моделирования; 2 – крышка ковша; 3 – регистрационные датчики; 4 – донные фурмы; 5 – АЦП; 6 – компьютер; 7 – компрессор с ресивером 10л; 8 – ротаметр; 9 – тройник; 10 – кран

При комплектации оборудования использовали лабораторный ковш, предоставленный кафедрой «Электрометаллургия» Национальной металлургической академии Украины. Ковш (1) для холодного моделирования изготовлен из прозрачного оргстекла, позволяющего наблюдать и регистрировать фотоаппаратом или видеокамерой происходящие в ванне процессы. Из этого материала изготовлена и крышка (2), которая плотно прилегает к верхней кромке ковша по диаметру, а в ее центре имеется отверстие для постановки по центральной оси ковша датчиков. Датчики (3) в экспериментах располагались по стенкам и по центральной оси ковша. Датчик представлял собой два электрода (очищенная от изоляции проволока диаметром 0,5 мм длиной 20 мм), расположенные параллельно на расстоянии 5 мм друг от друга. Донные фурмы (4) прижимались медными штуцерами (не показаны). 16-канальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) (5) соединён с компьютером (6). Автомобильный компрессор с ресивером (7) обеспечивал подачу и продвижение воздуха через тройник

ки (9) и ротаметр (8) к фурмам. Кран (10) давал возможность выбора того или иного ротаметра, через который подавался поток воздуха.

На рис.2 представлен чертёж ковша. В днище ковша (снизу) расположены: несквозные резьбовые отверстия (М26) в количестве 21 шт., которые имеют опорные поверхности, и совмещённые с ним концентрические сквозные отверстия меньшего диаметра под фурму. Вставленная(ые) фурма(ы) в это отверстие(ия) через уплотнительные резинки поджималась(лись) резьбовым(и) штуцером(ами). Резьбовой штуцер имел сквозное отверстие по оси, а в местах присоединения газоподводящего шланга - зубцы обратного конуса диаметром 10 мм. Незадействованные для фурм штуцеры соединялись между собой резиновыми трубками. Первоначально через одно из отверстий диаметром 6 мм, которые располагались на стенке ковша у днища, намечалось подавать марганцово-солевой раствор, но в последствии от этого отказались, т.к. нашли более приемлемое решение.

Схема расположения датчиков в ковше показана на рис.3. Датчики располагались на большом расстоянии друг от друга (на порядок больше их геометрических размеров), что минимизировало их перекрёстное влияние. Провода с датчиками крепились к стенкам ковша при помощи куска липкой с двух сторон ленты в местах нахождения датчиков. Датчики по вертикальной оси ковша крепились на упругой стальной проволоке, которая подавалась в отверстие в крышке ковша, а самый нижний датчик упирался в геометрический центр днища.

Датчики в исследовании обозначались по каждому каналу и по высотам от днища ковша. На рис.3 также показано расположение фурм.

Фурмы изготавливались из полистирола. В них просверливались отверстия для установки игл медицинского шприца. Внутренний диаметр иглы равнялся 0,4 мм. Игла обрезалась по высоте фурмы, затачивался срез для снятия заусенцев. Торцы иглы развальцовывались с двух сторон для предотвращения её выпадения в период проведения эксперимента и при хранении.

Ротаметры были откалиброваны на расход воздуха до 1л/мин и до 4,2 л/мин (максимум) соответственно.

Многоканальный АЦП имел чувствительность достаточную для регистрации от датчиков изменения электрической проводимости жидкой среды. АЦП подсоединялся к компьютеру через USB-разъём. Компьютер вёл запись и сохранение измеряемого параметра в среде Excel.

Для модельных ковшей (ПАО «Енакиевский металлургический завод (ЕМЗ), ПАО «Днепроспецсталь» (ДСС)) приповерхностные датчики расположены на высоте 300мм, а для ковшей ПАО «Днепровский меткомбинат» (ДМКД) и ПАО «Меткомбинат Азовсталь» (МК Азовсталь) в соответствии с рис.3.

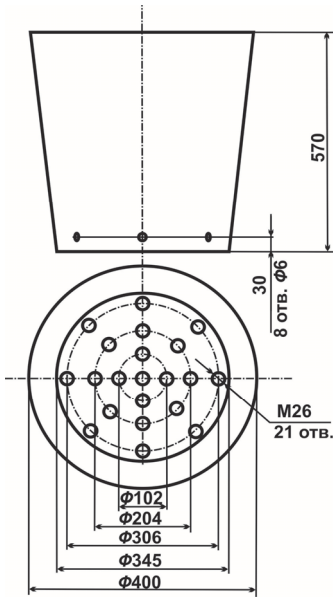


Рис.2. Ковш для холодного моделирования

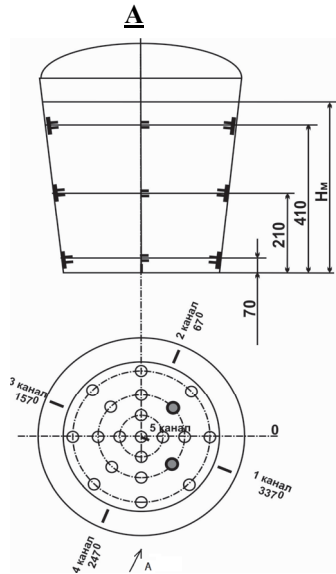


Рис.3. Схема расположения датчиков по каналам сбора информации (с указанием их азимутальных координат) и фурм (серый кружок). Обозначения: $H_{ж}$ – высота жидкости в ковше, мм

Внешний вид фурмы, ротаметров и АЦП представлен на рис.4-6 соответственно.

Результаты опробования лабораторного оборудования. Прежде чем начать опробование оборудования провели ряд предварительных расчётов. Сначала выбрали реальные объекты исследования. Ранее в качестве объектов исследования использовали ковши следующих предприятий МК Азовсталь, ДМКД, ЕМЗ, ДСС. Поэтому в настоящей работе использовались именно эти объекты с данными опубликованными в статьях [1-3]. Информация о геометрических размерах ковшовых ванн и щелевых отверстий продувочных фурм, а также режимах продувки аргоном расплава на различных предприятиях представлены в табл.1.

При опробовании работоспособности оборудования проводили несколько экспериментов: с вводом окрашенной жидкости на дно ковша и последующей продувкой для визуализации момента усреднения ковшовой ванны и без ввода таковой.



Рис.4. Внешний вид фурмы с уплотнительной резиной

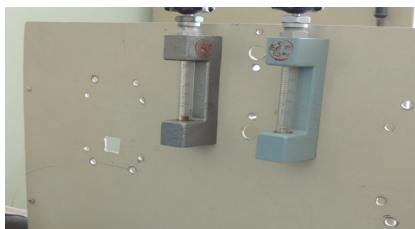


Рис.5. Внешний вид ротаметров



Рис.6. Внешний вид многоканального АЦП.

Таблица 1. Данные о металлической ванне промышленных ковшей, донных щелевых фурмах и интенсивности продувки

Предприятие	Верхний диаметр ванны, мм	Нижний диаметр ванны, мм	Высота налива металла, мм	Длина щелей фурмы, мм	Ширина щелей фурмы, мм	Количество щелей фурмы, шт.	Количество фурм, шт.	Расход аргона на ковш, л/мин**)
МК Азов-сталь	4260	3530	4400	20	0,18	54	2	До 5М
ДМКД	3610	3070	4135	12	0,20	30	2	До 3,7М
ЕМЗ	3216	2950	2760	17	0,20	30	2	До 2М
ДСС*)	2360	2120	2210	25	0,20	24	1	До 1М

*) В настоящее время на ДСС вместо пористой фурмы используется щелевая фурма с аналогичным расположением в днище ковша [1]

***) М- максимальный расход аргона, выбранный для исследования

Жидкостью, моделирующей железоуглеродистый расплав, служила дистиллированная вода. При этом оценивали проводимость электрического тока. Электрическая проводимость воды обусловлена, прежде всего, ионной проводимостью растворённых в ней солей. Сопротивление использованной воды измерялось непосредственно перед его началом, и составляло от 60 до 120 кОм в разных экспериментах. Физические (плотность $0,9982 \text{ г/см}^3$) и теплофизические свойства (динамическая вязкость $0,00101 \text{ Па}\cdot\text{с}$) воды взяты из Википедии [4].

В качестве окрашенной жидкости применялся насыщенный раствор поваренной соли (NaCl) с добавлением в него марганцовки (K_2MnO_4). Со-

ли способствовали увеличению ионной проводимости, а перманганат калия придал раствору фиолетовую окраску. Сопротивление такого раствора составило приблизительно 1 кОм. В одном из начальных экспериментов с помощью шприца с иглой вводили окрашенную марганцево-солевою жидкость на днище наполненного водой ковша. При этом наблюдалось выпадение кристалликов поваренной соли в проходном отверстии иглы, что не позволило осуществить ввод очередной порции (20 г) в ковш. Поэтому в последующих экспериментах был произведён ввод такой жидкости через катетер (резиновую трубку с внутренним диаметром 3 мм), прикреплённый скотчем сверху вниз по стенке, а затем по днищу в центральную донную зону ванны ковша.

Продувку модели осуществляли воздухом, т.к. влияние состава газа на параметры массо-, и теплопереноса в настоящих исследованиях не изучались. Продувку в экспериментах проводили с фиксированным значением расхода воздуха, который поддерживался в ручном режиме на одном из ротаметров. Физические (плотность воздуха 1,2041 кг/м³, плотность аргона 1,784*10⁻³ г/см³) и теплофизические свойства газов (динамическая вязкость воздуха 17,2*10⁻⁵ Па*с, динамическая вязкость аргона 22,72*10⁻⁶ Па*с) взяты из Википедии [5, 6].

Расходы аргона в численных расчётах варьировались в пределах, указанных в табл.1, а модельные (соответствующие реальным) расходы воздуха рассчитывались по теории подобия. Расчёты проводились в среде Excel а их результаты представлены ниже. Сначала определяли соотношение линейных размеров (диаметр и высота) и площадей (днище и отверстие сопел фурм) идеализированного и модельного ковшей табл.2.

Таблица 2.Соотношение геометрических параметров идеализированного и модельного ковшей

Предприятие	Идеализированный ковш			Модельный ковш			m
	Диаметр днища, м	Верхний диаметр, м	Высота ванны, м	Диаметр днища, м	Верхний диаметр, м	Высота ванны, м	
ДСС	2,12	2,33	2,21	0,35	0,380	0,360	6,145
ЕМЗ	2,95	3,22	2,76	0,35	0,376	0,323	8,550
ДМКД	3,07	3,47	4,14	0,35	0,389	0,465	8,899
МК Азов-сталь	3,53	3,96	4,40	0,35	0,387	0,430	10,232
	Площадь днища, м ²	Общая площадь сопел, ×10 ⁴ м ²	Объём, м ³	Площадь днища, м ²	Общая площадь сопел, ×10 ⁶ м ²	Объём, м ³	м ²
ДСС	3,53	1,2	8,61	0,094	3,18	0,037	37,76
ЕМЗ	6,83	2,04	20,62	0,094	2,79	0,330	73,11
ДМКД	7,40	1,44	34,76	0,094	1,82	0,049	79,18
МК Азов-сталь	9,79	3,89	48,45	0,094	3,71	0,045	104,69

m – коэффициент линейного масштаба.

m² – квадрат коэффициента линейного масштаба

Идеализированный ковш – материальный объект, наделённый физическими и теплофизическими свойствами (в идеализированном виде) промышленного (реального) ковша с габаритами кратными коэффициенту подобия модельного ковша. По соотношению площадей идеализированного и модельного ковшей применительно к отверстиям в фурмах промышленного и модельного образца определяли количество отверстий в моделируемой фурме, необходимых для подачи воздуха при продувке. Затем провели предварительные расчёты соотношений расходов аргона промышленного ковша и расходов воздуха для модельного ковша (табл.3). Из табл.3 видно, что минимальные расходы воздуха для фурм модельного образца в экспериментах выбирались дискретно, т.е. ограничивались возможностью минимальной пропускной способности ротаметра (0,2л/мин), а максимальный расход воздуха – максимальной пропускной возможностью используемого оборудования. С использованием данных табл.3 на серии экспериментальных пусков оборудования осуществили проверку его работоспособности.

Таблица 3. Интенсивность продувки промышленного и модельного ковшей и критерий Архимеда

Предприятие	Расход аргона промышленного ковша, л/мин	Расход воздуха модельного ковша $M \times 10^{-4}$, л/мин	Критерий Архимеда
ДСС	0,04 М	1,98	9,16
	0,50 М	23,85	1321,23
	1,00 М	47,70	5284,92
ЕМЗ	0,08 М	1,75	9,74
	0,50 М	10,43	350,68
	2,00 М	41,77	5610,89
ДМКД	0,08 М	1,58	23,29
	1,33 М	25,21	5962,95
	3,66 М	69,34	45094,82
МК Азов-сталь	0,16 М	2,22	7,77
	2,00 М	17,45	497,28
	5,00 М	57,66	5252,61

Выводы. Подготовлено и опробовано оборудование для холодного физического моделирования процессов обработки железоуглеродистого расплава в сталеразливочных ковшах разной емкости. Показана его работоспособность и возможность проведения экспериментов для проверки результатов численного исследования процессов массо- и теплопереноса.

Выявлены ограничения дутьевого режима опробованного оборудования и дискретность расходов воздуха при его использовании.

В ходе опробования оборудования определено соответствие качественного характера численно изученным процессам, а полученные предварительные количественные характеристики (продолжительность усреднения по химическому составу, время начала изменения проводимости на

каждом датчике) дали представление о массо-, и теплопереносе в ковшовой ванне.

1. *Основные данные для численных исследования гидродинамики ванны на установках ковш-печь переменного тока разной мощности /В.П.Пиптюк, В.Ф.Поляков, И.Н.Логозинский и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии. Сб. научных трудов ИЧМ. – 2006. – Вып.№14. – С.145-153.*
2. *Данные для моделирования гидродинамики ковшевой ванны большой емкости при обработке расплава на УКП / В.П.Пиптюк, В.Ф.Поляков, А.Б.Ковура и др.// Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии. Сб. научных трудов ИЧМ. – 2008. – Вып.№18. – С.115-121.*
3. *Конструктивно-компоновочные и технологические параметры для численного исследования гидродинамики расплава при обработке на установке ковш-печь мощностью 35МВ'А / В.П.Пиптюк, И.Д.Буга, С.Е.Самохвалов и др.// Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии. Сб. научных трудов ИЧМ. – 2010. – Вып.№21. – С.133-137.*
4. <http://ru.wikipedia.org/wiki/%C2%EE%E4%E0>
5. <http://ru.wikipedia.org/wiki/%C2%EE%E7%E4%F3%F5>
6. <http://ru.wikipedia.org/wiki/%C0%F0%E3%EE%ED>

*Статья рекомендована к печати
докт. техн. наук., проф. В.Ф.Поляковым*

В.П.Піптюк, П.Г.Прокопенко, С.В.Греков, Ю.Б.Костюк, Г.О.Андрієвський, А.О.Аносова

Підготовка обладнання для фізичного моделювання процесів обробки розплаву в сталерозливному ковші

Підготовлено і випробувано обладнання для холодного фізичного моделювання процесів обробки розплаву в сталерозливному ковші. Показано його працездатність і можливість проведення експериментів для перевірки результатів чисельного вивчення процесів масо-і теплопереносу при обробці розплаву в сталерозливних ковшах різної ємності.

Ключові слова: холодне фізичне моделювання, масо-і теплоперенос, сталерозливний ківш

V.P.Pipyuk, P.G.Prokopenko, S.V.Grekov, Y.B.Kostyuk, G.A.Andrievsky, A.A.Anosova

Preparing the equipment for physical modeling of processes in the melt treatment ladle

Prepared and tested equipment for cold processing of physical modeling processes melt in ladle. Shows its efficiency and the ability to conduct experiments to validate the results of the numerical study of the processes of mass and heat transfer during melt processing in steel ladles of different capacities.

Keywords: cold physical modeling, mass and heat transfer, steel ladle