

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

ОПРОБОВАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА НА УСТАНОВКЕ КОВШ-ПЕЧЬ

Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины

Опробовано оборудование для физического моделирования условий теплопереноса при нагреве расплава в сталеразливочном ковше на установке ковш-печь и установлена возможность проведения исследований для проверки результатов численного изучения процессов. Результатами физического моделирования теплового состояния водяной ковшовой ванны подтверждены данные численных исследований и установлена достаточная их схожимость (до 14%).

Ключевые слова: ковш-печь, сталеразливочный ковш, физическое моделирование, исследование

Состояние вопроса. Ранее сообщалось об опробовании оборудования для физического моделирования, главным образом, гидродинамических процессов в расплаве при обработке в сталеразливочном ковше и установлении его работоспособности [1]. В настоящих исследованиях продолжена работа в направлении аппаратурного оформления и определения возможности изучения условий теплопереноса при нагреве расплава на установке ковш-печь (УКП) в сталеразливочном ковше вышеуказанным методом.

Цель работы. Комплектация лабораторного оборудования и опробование его работоспособности для физического моделирования процессов теплопереноса в расплаве при нагреве на УКП в сталеразливочном ковше.

Описание лабораторного оборудования. В качестве модели промышленного сталеразливочного ковша КС-90 ЭСПЦ-3 ПАО «Днепро-спецсталь» (ПАО «ДСС») применяли лабораторный ковш, представленный кафедрой «Электрометаллургия» Национальной металлургической академии Украины. Особенностью геометрии модели ковша в настоящих исследованиях являлось наличие масштабированного усиления футеровки в бойной части (БЧ) по аналогии с реальным ковшом КС-90 емкостью 60т (по металлу). Координаты расположения донной продувочной щелевой фурмы в модели ковша (угол 40° относительно БЧ и радиус 102мм) приближены к используемому промышленному варианту на ПАО «ДСС» (угол 40° относительно БЧ и радиус 570мм). В качестве датчиков температуры использовали терморезисторы марки NTC мощностью 0,5Вт и сопротивлением 47 кОм (при 25°С). Датчики располагали в поверхностном слое и на незначительной глубине ванны (см. рис.1 и табл.1). Датчики №№1 и 2 находились у боковой стенки, а №3 располагался в масштабированных координатах соответствующего места в промышленном ковше КС-90, где осуществляется замер температуры жидкого металла.

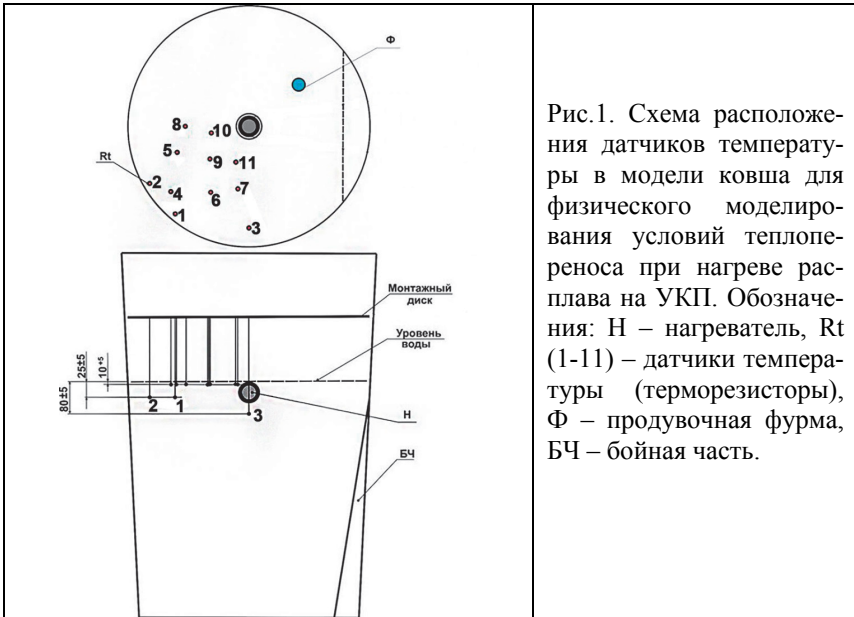


Рис.1. Схема расположения датчиков температуры в модели ковша для физического моделирования условий теплопереноса при нагреве расплава на УКП. Обозначения: Н – нагреватель, Rt (1-11) – датчики температуры (терморезисторы), Ф – продувочная фурма, БЧ – бойная часть.

Таблица 1. Координаты расположения датчиков температуры в модели ковша

№ датчика	Угол, °	Радиус, мм	Глубина, мм
1	230	180	25
2	210	180	25
3	270	140	80
4	220	160	10
5	200	120	10
6	240	120	10
8	180	100	10
7	260	100	10
9	220	80	10
10	190	60	10
11	250	60	10

При калибровке каждого измерительного канала (датчик температуры – аналого-цифровой преобразователь) использовали следующее уравнение преобразования изменения термосопротивления R_t от температуры:

$$T(^{\circ}\text{C}) = 21,969 * \ln (X_n / K_n) + 74,637$$

где T – температура среды, X_n – термосопротивление n -го измерительного канала, K_n – поправочный коэффициент n -го измерительного канала.

Источником тепла (нагревателем) в экспериментах по опробованию работоспособности оборудования служил электрический кипятильник (ГОСТ 14705-83) с номинальной и неизменной мощностью 1100 Вт. Нагреватель включали после 3 мин продувки для установления квазистационарных условий перемешивания ванны и нагревали воду с такой же интенсивностью продувки в течение 300 с. Выключив нагреватель продолжали продувку ванны еще 3 мин для усреднения ее по температуре. Фиксировали момент времени, когда показания величин сопротивления всех терморезисторов становились примерно одинаковыми. Это соответствовало окончанию гомогенизации ванны.

В настоящей работе (в отличие от ранее проведенного опробования лабораторного оборудования [1]) изменили схему подачи и вид продувочного газа (рис.2): компрессор с ресивером заменили на баллон с редуктором, дополнительно установили цифровой датчик расхода газа перед фурмой, воздух заменили на азот. При этом объем дистиллированной воды в ковше остался прежним – 37 л.

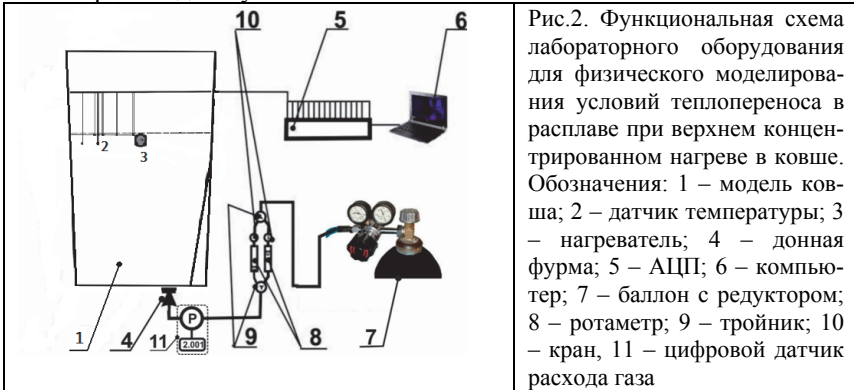
В связи с заменой вида газа в настоящем опробовании пересчитали его расход применительно к азоту (табл.2).

Таблица 2. Интенсивность продувки промышленного и модельного ковшей различными газами и значения критерия Архимеда

Промышленный (реальный) ковш КС-90	Модельный ковш		Значения критерия Архимеда для воздуха
	Расход азота, л/мин	Расход воздуха, л/мин	
0,167М	0,00081 М	0,00080 М	36,70
0,333М	0,00161 М	0,00159 М	146,76
0,5М	0,00242 М	0,00238 М	330,35
0,667М	0,00323 М	0,00318 М	587,29
0,833М	0,00403 М	0,00398 М	917,64
М	0,00484 М	0,00477 М	1321,40

Материал и методика опробования оборудования. В качестве имитатора железоуглеродистого расплава в модели ковша, как и в предыдущей работе [1], использовали дистиллированную воду. При опробовании оборудования применяли следующие режимы продувки азотом (л/мин): 0,00089 М; 0,00156 М; 0,00244 М; 0,00311 М; 0,004 М и 0,00489 М (где М – максимальный расход азота, выбранный для опробования), соответствующие 4, 7, 11, 14, 18 и 22 малым делениям

(всего их 25) на ротаметре. После открытия крана на баллоне при помощи ротаметра устанавливали необходимый расход азота и не изменяли его в течение каждого экспериментального опробования. Окончание продувки определяли стабилизацией изменения величины электропроводности водно-газовой среды в течение 1 мин (визуально на мониторе кривые переходили в асимптотно-стабилизирующие прямые), после чего подача азота прекращалась. После отключения азота в каждом экспериментальном опробовании в течение приблизительно 3 мин происходило успокоение ванны.



Результаты опробования лабораторного оборудования. Перед опробованием оборудования провели численную оценку изменения температуры воды по ходу ее нагрева в контролируемых точках ванны для использованных режимов продувки. При этом применили опубликованные исходные данные [1, 2]. Опробование осуществляли на 6-ти экспериментах с разным (табл.2) расходом азота. Выборочные данные, полученные при опробовании лабораторного оборудования, соответствующие минимальной, одной из средних и максимальной интенсивностям продувки для разных моментов по ходу нагрева ванны представлены в табл.3. На рис.3 представлен вид температурных кривых, полученных по ходу экспериментального опробования. Графические отображения соотношения экспериментальных и расчетных значений температуры воды представлены на рис.4.

Из представленных в табл.3 и на рис.4 данных следует, что экспериментальные и расчётные результаты адекватны и имеют достаточную (до 14%) сходимость. Кроме этого, результаты экспериментального опробования подтверждают ранее численно установленную для промышленной металлической ванны ковша КС-90 закономерность уменьшения градиента температуры в контролируемых точках с увеличением интенсивности продувки.

Таблица 3. Соотношение экспериментальных и расчетных значений температуры воды, абсолютная и относительная ошибки контролируемого параметра и условия лабораторного опробования *)

№ датчик		Продолжительность (с) от начала эксперимента											
		60				180				300			
		Т, °С		Ошибка		Т, °С		Ошибка		Т, °С		Ошибка	
Расч.	Эксп.	Абс.	Отн., %	Расч.	Эксп.	Абс.	Отн., %	Расч.	Эксп.	Абс.	Отн., %		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
Расход азота 0,00089М л/мин, Тн = 27,83 ⁰ С, Тк = 29,78 ⁰ С на 390с													
1	28,76	29,09	0,33	1,13	29,87	30,05	0,19	0,62	30,47	31,00	0,53	1,70	
2	29,29	29,04	-0,25	-0,85	29,85	29,68	-0,16	-0,55	30,46	30,77	0,31	1,02	
3	28,18	28,72	0,54	1,89	28,75	29,92	1,17	3,90	29,36	31,50	2,14	6,78	
4	30,28	29,49	-0,78	-2,65	30,84	30,39	-0,45	-1,47	31,45	31,42	-0,03	-0,10	
5	28,75	30,27	1,52	5,02	29,32	30,12	0,80	2,67	29,93	31,19	1,26	4,05	
6	29,15	29,64	0,49	1,67	29,73	31,02	1,29	4,17	30,34	32,26	1,92	5,95	
7	29,11	29,41	0,30	1,02	29,69	31,30	1,61	5,14	30,31	31,99	1,68	5,26	
8	28,29	32,25	3,97	12,30	28,87	32,12	3,26	10,14	29,46	32,64	3,18	9,73	
9	31,35	30,23	-1,12	-3,72	31,93	31,89	-0,04	-0,11	32,54	32,54	0,01	0,02	
10	27,95	32,62	4,66	14,29	29,71	32,59	2,88	8,82	30,32	32,68	2,36	7,21	
11	29,32	30,66	1,34	4,37	29,91	31,70	1,79	5,66	30,52	32,65	2,13	6,53	
Расход азота 0,00311М л/мин, Тн = 33,10 ⁰ С, Тк = 34,94 ⁰ С на 390с													
1	34,04	34,16	0,11	0,33	34,65	34,68	0,03	0,08	35,26	35,44	0,18	0,50	
2	33,95	33,62	-0,34	-1,00	34,56	34,27	-0,29	-0,85	35,17	34,83	-0,34	-0,99	
3	33,40	34,28	0,88	2,57	34,02	35,08	1,06	3,03	34,62	35,98	1,36	3,78	
4	34,58	33,85	-0,73	-2,15	35,19	34,39	-0,80	-2,32	35,80	35,31	-0,49	-1,38	

Окончание табл.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
5	33,71	33,90	0,19	0,56	34,32	34,63	0,31	0,89	34,93	35,17	0,24	0,69
6	33,92	34,73	0,80	2,31	34,53	35,13	0,59	1,69	35,14	36,15	1,01	2,79
7	33,93	33,78	-0,15	-0,45	34,54	34,16	-0,38	-1,12	35,15	35,30	0,16	0,44
8	33,45	35,40	1,95	5,50	34,06	36,15	2,09	5,78	34,67	36,26	1,59	4,39
9	35,14	34,66	-0,48	-1,38	35,75	35,21	-0,54	-1,53	36,36	36,03	-0,33	-0,92
10	33,91	34,77	0,85	2,46	34,52	35,11	0,59	1,68	35,13	35,83	0,70	1,97
11	34,03	34,16	0,13	0,37	34,62	34,33	-0,29	-0,83	35,23	35,42	0,19	0,54
Расход азота 0,00489 М л/мин, Тн = 36,25 ⁰ С, Тк = 37,99 ⁰ С на 370с												
1	37,04	36,94	-0,10	-0,28	37,65	37,60	-0,05	-0,12	38,26	38,12	-0,14	-0,37
2	37,02	36,38	-0,64	-1,76	37,63	36,99	-0,63	-1,72	38,24	37,47	-0,77	-2,05
3	36,55	37,37	0,82	2,19	37,16	37,81	0,65	1,71	37,77	38,85	1,08	2,78
4	37,50	36,68	-0,83	-2,25	38,11	37,38	-0,73	-1,95	38,72	37,96	-0,76	-1,99
5	36,79	36,69	-0,10	-0,29	37,40	37,14	-0,26	-0,71	38,01	37,84	-0,16	-0,43
6	37,03	37,54	0,52	1,38	37,64	38,15	0,51	1,34	38,25	39,01	0,76	1,96
7	36,55	36,64	0,10	0,27	37,19	37,28	0,09	0,25	37,80	38,06	0,26	0,70
8	37,00	37,87	0,87	2,30	37,61	38,51	0,90	2,34	38,22	39,26	1,05	2,66
9	37,95	37,91	-0,05	-0,13	38,56	38,43	-0,13	-0,33	39,17	39,02	-0,15	-0,38
10	36,96	37,89	0,92	2,44	37,57	38,29	0,72	1,89	38,18	38,77	0,59	1,53
11	37,06	36,77	-0,29	-0,79	37,66	37,39	-0,27	-0,72	38,27	38,24	-0,03	-0,09

*) Тн – температура воды перед подогревом ванны; Тк – температура воды после гомогенизации ванны.

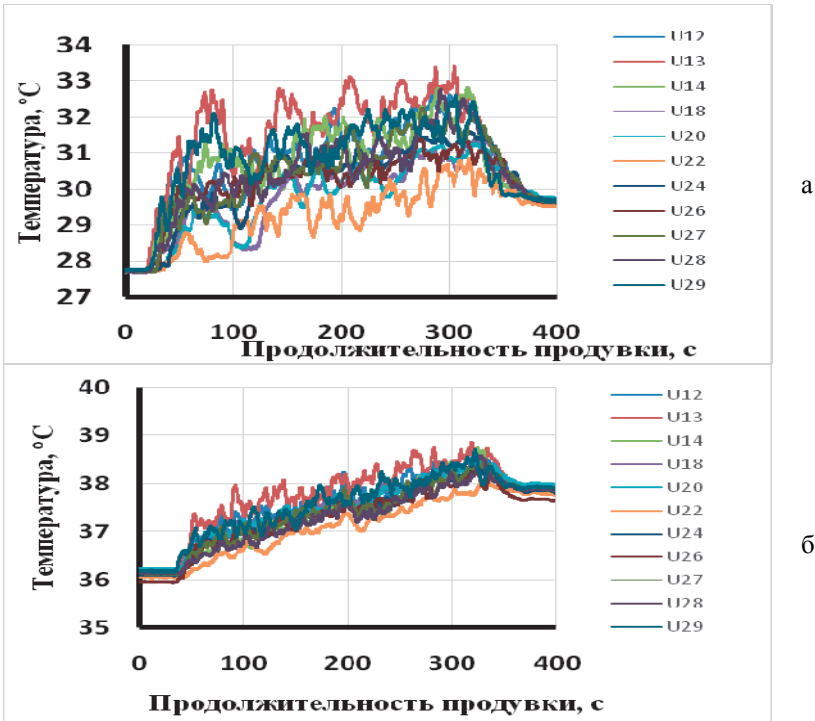


Рис.3. Изменение температуры воды при нагреве по ходу экспериментального опробования оборудования с интенсивностью продувки ванны азотом 0,00089 М (а) и 0,00489 М (б). Обозначение: цифры после U – номер канала регистрации в АЦП.

Выводы. Проведено опробование и установлена работоспособность лабораторного оборудования для физического моделирования теплового состояния водяной ковшовой ванны с усилением футеровки в БЧ емкостью 37л в процессе верхнего концентрированного нагрева с постоянной мощностью 1,1 кВт и одновременной продувкой азотом с разной интенсивностью через ассиметричную донную щелевую фурму. Результатами физического моделирования теплового состояния водяной ковшовой ванны, в целом, подтверждены соответствующие данные численных исследований и установлена достаточная их сходимость (до 14%). Показано уменьшение градиента температуры воды (с 3,11 до 1,64 °C) в изучаемых точках ванны с повышением интенсивности продувки от 0,00089 М до 0,00489 М, что коррелируется с численными результатами оценки теплового состояния железоуглеродистого расплава при нагреве на УКП в промышленных ковшах КС-90 ЭСПЦ-3 ПАО «ДСС». Определено, что гомогенизация по температуре водяной ковшовой ванны наступает при-

близительно через 1-1,5 мин после окончания ее нагрева независимо от используемой интенсивности продувки азотом.

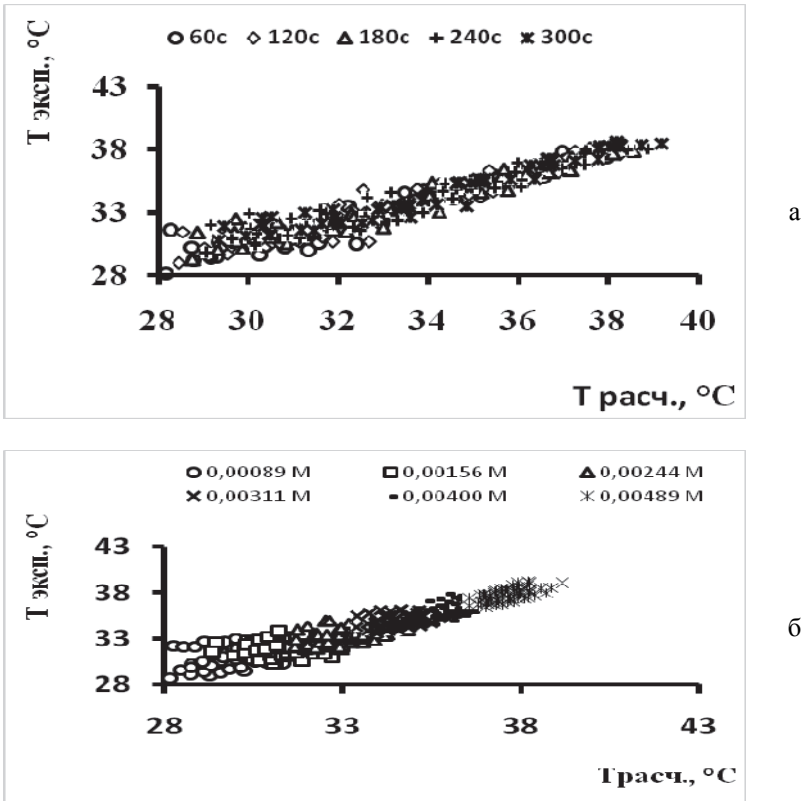


Рис.4. Соотношение экспериментальных и расчетных значений температуры воды при нагреве по ходу экспериментального опробования оборудования в разные моменты времени (а) и для различной интенсивности продувки ванны азотом (б). $R^2=0,88$

1. Подготовка оборудования для физического моделирования процессов обработки расплава в сталеразливочном ковше / В.П.Пиптюк, П.Г.Прокopenко, С.В.Греков и др.// Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб.научн.тр. – Днепропетровск: ИЧМ НАНУ. – 2014. – Вып. 28. – С.161-169.

2. *Основные данные для численных исследований 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 черной металлургии. Сб.научн.тр. – Днепропетровск: ИЧМ НАНУ. – 2006. – Вып.14. – С.145-153.*

*Статья рекомендована к печати
проф., докт.техн.наук, Чернятевичем*

В.П.Піптюк, П.Г.Прокопенко, С.В.Греков, Ю.Б.Костюк, Г.О.Андрієвський
Випробування обладнання для моделювання теплових процесів обробки розплаву на установці ківш-піч

Випробувано обладнання для фізичного моделювання умов теплопереносу при нагріванні розплаву в сталерозливному ковші на установці ківш-піч та встановлено можливість проведення досліджень для перевірки результатів чисельного вивчення процесів. Результатами фізичного моделювання теплового стану водяної ковшової ванни підтверджено дані чисельних досліджень та встановлено достатню їх збіжність (до 14%).

Ключові слова: ківш-піч, сталерозливний ківш, фізичне моделювання, дослідження

V.P.Piptiuk, P.G.Prokopenko, S.V.Grekov, Yu.B.Kostiuk, G.A.Andrievskii
Testing equipment to simulate the thermal processing of the melt in the ladle furnace

Tested equipment for physical modeling of heat transfer conditions at heating the melt in the ladle at the ladle furnace and established the possibility of conducting research to verify the results of the numerical study of the processes. The results of physical modeling of the thermal state of the water bucket baths confirmed data of numerical studies and set their sufficient convergence (14%).

Keywords: ladle furnace, steel ladle, physical modeling, the study