

Крупнов Л.В.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОМЫШЛЕННОГО АГРЕГАТА ДЛЯ РАСЧЕТОВ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА НА ПРИМЕРЕ ПЕЧИ ВЗВЕШЕННОЙ ПЛАВКИ

Аннотация. В работе представлены результаты исследований фактических статей расхода тепла при эксплуатации промышленного агрегата – печи взвешенной плавки, включая такие статьи, как потери тепла через неохлаждаемые элементы печи и отвод тепла системой охлаждения. Цель исследований – экспериментальное определение распределения тепловых полей печей ПВП-1. Полученные экспериментальные данные позволили определить отвод тепла системой охлаждения как значимый и регулируемый канал расхода тепла, что открывает возможность управлять тепловой работой агрегата в условиях дефицита теплового баланса. Полученные результаты отличаются достаточной точностью и могут в дальнейшем использоваться как справочные материалы для инженерных расчетов для подобного рода агрегатов.

Ключевые слова: печь взвешенной плавки (ПВП), опытно-промышленные испытания (ОПИ), автогенный процесс, тепловой баланс, отстойник, аптейк, газопылевой поток, Надеждинский металлургический завод (НМЗ)

Введение

Тепловые балансы печей являются важнейшей информацией для понимания пирометаллургического процесса в целом. Если посмотреть на традиционную структуру теплового баланса какого-нибудь пирометаллургического процесса [1–4], то можно заметить, что значительное число статей баланса могут быть рассчитаны методами термодинамического моделирования с высокой степенью точности. Например, потери тепла с расплавленными продуктами плавки (шлаком и штейном) достаточно точно могут быть рассчитаны, исходя из знания массы продуктов плавки, их температуры и теплоемкости, определенной с высокой степенью точности с использованием баз данных современных термодинамических программных комплексов [5–7].

Несколько сложнее обстоит дело с определением потерь тепла с отходящими газами. Здесь появляются элементы неопределенности, которые не могут быть получены расчетным путем с высокой степенью точности. Это объем подсосов воздуха в печь, содержание пыли в газах и их состав. Чтобы повысить точность составления теплового баланса, желательно выполнить инструментальные замеры.

Однако самая большая неопределенность в составлении теплового баланса заключается в оценке потерь тепла печью с охлаждающими элементами и с поверхностей печи (свод, подина, боковые стенки и т.д.). Чтобы существенно увеличить точность определения этих статей баланса, проведение инструментальных замеров просто необходимо. Это становится особенно важным в настоящее время, когда из-за изменения состава сырья и снижением его автогенности тепловой баланс агрегатов становится дефицитным [8, 9]. В настоящее время дефицит такого рода может достигать 10% [10].

Следует заметить, что в открытых источниках по технологии взвешенной плавки отсутствуют сведения о фактических тепловых балансах ПВП, определен-

ных в результате фактических замеров. Нет этой информации и в фундаментальной работе У. Давенпорта с соавторами, посвященной теории и практике технологии взвешенной плавки [11, 12].

Таким образом, представляет большой научный и практический интерес снятие фактических тепловых балансов печей взвешенной плавки с точки зрения возможного управления тепловой работой агрегата через регулирование расходными статьями теплового баланса.

С этой целью еще в 2017 г. были выполнены опытно-промышленные испытания для получения фактических (экспериментальных) исходных данных для составления тепловых и материальных балансов действующей промышленной печи – ПВП-1 НМЗ.

Ранее результаты этой работы не публиковались, но были использованы в рамках других исследований [9, 13].

Методы исследования

В ходе проведения испытаний выполнялся сбор для определения количества тепла, отводимого в ПВП:

- характеристики системы водяного охлаждения печей (расход воды на охлаждение, увеличение температуры охлаждающей воды в результате теплосъёма с печей);
- оценка температур внешних поверхностей РШ, отстойника и аптейка печей;
- исследование объёма, температуры, запылённости и состава отходящих газов печей;
- оценка количества и температуры шлака и штейна на выходе из ПВП.

Кроме того, для решения задач работы при использовании штатных систем АСУТП был осуществлен сбор данных, отражающих состав и расход твердых и газообразных веществ, выводимых в ПВП. Были зафиксированы расходы и составы шихты, шлака, штейна, пыли, отходящих газов, расходы природного газа, технического кислорода, азота и т.п. [14].

Помимо указанных параметров, фиксируемых датчиками температуры, расхода, разрежения и т.п., ис-

пользованы данные о химическом составе компонентов шихты и продуктов плавки, результаты исследований параметров отходящего газа (температура, состав, расход, запыленность), а также результаты тепловизионного обследования поверхностей, результаты обследования системы водяного охлаждения печей.

Потери тепла печью складываются из следующих статей теплового баланса:

- 1) потери тепла с продуктами плавки (штейн, шлак, пыль, отходящие газы);
- 2) потери тепла с поверхности печей (борта печи, своды РШ, отстойника и аптейка, подина печи);
- 3) тепло, отводимое системой водяного охлаждения;
- 4) потери тепла на эндотермические реакции, имеющие место в процессе плавки.

В настоящем подразделе приведены обобщения исходных данных, необходимых для оценки расходных статей теплового баланса ПВП. Составлен материальный баланс печей в период ОПИ. Выполненные расчеты привязаны к усредненной часовой производительности печи.

Состав, количество и тепловые характеристики шлака и штейна ПВП

Замеры температуры продуктов плавки проводили высокотемпературным инфракрасным пирометром Raynger 3i1M¹ и инфракрасной камерой (тепловизором) Land Guide IR 928+. Кроме того, осуществлены замеры температуры шлака ПВП на выпуске из печи с помощью погружной термопары. Результаты измерений показали высокую сходимость данных, полученных при использовании оптических бесконтактных методов и при использовании термопары.

Массу продуктов плавки определяли из данных оперативного учета (штейн), а также на основе расчетов материального баланса (шлак) печей в период испытаний. Составы продуктов брали из данных оперативного учета.

Состав, количество и тепловые характеристики шлака и штейна ПВП

Замеры температуры продуктов плавки осуществляются высокотемпературным инфракрасным пирометром Raynger 3i 1M и инфракрасной камерой (тепловизором) Land Guide IR 928+. Кроме того, осуществлены замеры температуры шлака ПВП на выпуске из печи с помощью погружной термопары. Результаты измерений показали высокую сходимость данных, полученных при использовании оптических бесконтактных методов и при использовании термопары.

Массы и составы продуктов плавки оцениваются из фактических данных оперативного учета.

Состав и количество шлака и штейна ПВП

В табл. 1 представлены результаты оценок средних составов и количеств расплавов, выдаваемых из ПВП-1 в период ОПИ.

Тепловые характеристики шлака и штейна ПВП

В табл. 2 представлены результаты оценок средних температур расплавов, а также рекомендованные величины теплоемкости и часового количества тепла, выводимого из ПВП с расплавами шлака и штейна.

Как видно из представленных данных, колебания температуры продуктов плавки, вносимой в журнал оперативного учета за период ОПИ, составили 5-10°C. В это же время колебания температуры расплавов, диагностируемой средствами инструментального контроля, достигали 100 градусов: температура штейна изменялась в диапазоне 1120-1220°C, температура шлака изменялась в диапазоне 1205-1305°C. Симбатное изменение температур шлака и штейна, а также высокая согласованность результатов измерения температуры пирометром и термопарой свидетельствуют об адекватности выполненных замеров.

Таблица 1

Средние составы и часовые количества расплавов в период ОПИ

Номер печи	Продукт	Q, т/ч	Содержание, %										
			Ni	Cu	Co	S	Fe	Ni+Cu	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₃ O ₄
1	Штейн	25,79	36,62	12,26	0,795	26,71	22,02	48,88	0,324	-	-	-	4,273
	Шлак	152,11	1,03	0,330	0,208	0,65	37,91	1,36	33,65	3,32	4,56	3,84	7,31

Таблица 2

Результаты оценок основных теплофизических характеристик шлака и штейна ПВП, необходимых для составления тепловых балансов печей

Номер печи	Продукт	Ср, МДж/т.°	Q, т/ч	T, °C	Тепло, МДж/ч
1	Штейн	0,781	25,79	1155	23263
	Шлак	1,078	152,11	1249	204876

¹ Высокотемпературная модель 3i1M для контроля температур в литейном и металлургическом производстве. Оптическое разрешение 180:01:00, диапазон измерений от +600 до +3000°C, спектральный отклик 1,0 мкм (1M), точность ±0,5%, регулируемый коэффициент излучения от 0,10 до 1,00 с шагом 0,01.

Состав, количество и тепловые характеристики пыли и отходящих газов ПВП

Важной составляющей теплового баланса печей взвешенной плавки является тепло отходящих газов процесса. Для корректного его расчёта был выполнен анализ отходящих газов в печах (в отстойнике) и в нескольких точках по тракту газоочистки. Кроме того, были использованы данные о составе, объёме и запылённости отходящих газов ПВП на входе и выходе из электрофильтров, полученные центральной лабораторией пылевентиляторных систем Центра диагностики ПАО «ГМК «Норильский никель».

Замер температур газов осуществляется при использовании термопар (тип ХА, в металлическом чехле), замер состава газовой фазы осуществляется при использовании пробоотборника, газоизмерительных индикаторных трубок и переносного газоанализатора ЭМГ-30-1².

Отбор газов из газоходов тракта очистки, имеющих меньшую температуру, осуществлялся с помощью стального пробоотборника со встроенным фильтром непосредственно в шприц, без использования аспиратора.

Объём и состав отходящих газов ПВП представлены в табл. 3.

Отвод тепла системой водяного охлаждения ПВП

В конструкции печей взвешенной плавки широко используются медные водоохлаждаемые кессоны; тепло, отводимое водой этих элементов, составляет существенную статью расходной части теплового баланса. Площадь кессонированных элементов ПВП-1 весьма значительна, с детальным контролем параметров системы КИП АСУ ТП [14].

Кессоны объединены в группы, каждая группа имеет общие коллекторы подачи холодной и сбора отработанной воды. Средствами КИП контролируются расход воды на каждую группу (или несколько групп) кессонов, температура подаваемой и отводимой воды. На основании данных о расходе воды и увеличении ее температуры при прохождении системы охлаждения рассчитывается теплосъём.

Часть кессонов на момент проведения ОПИ охлаждались не водой, а воздухом (несколько кессонов свода РШ ПВП-1). Объём доступных данных о работе таких кессонов весьма ограничен. По оценкам, теплосъём таких кессонов значительно ниже, чем теплосъём кессонов, работающих на воде.

Основные группы кессонов ПВП:

- 8 групп кессонов боковой поверхности отстойника (коллекторы SH1-SH8);

- 6 групп кессонов свода отстойника (коллекторы SH9-SH14);

- 3 группы кессонов аптейка (коллекторы US1-US3);

- 8 групп кессонов реакционной шахты (коллекторы RS1-RS8).

Расположение кессонов ПВП представлено на рис. 1. В период ОПИ на 5 кессонов свода реакционной шахты (коллектор RS6) вода не подавалась (охлаждение осуществлялось воздухом).

Для каждого коллектора измерялись:

- температура, давление, общий расход подаваемой воды;

- температура воды на сливе каждого контура циркуляции;

- общая температура воды на сливе коллектора.

Система охлаждения контролируется с использованием программы Outotec Sentinel [14]. По полученным данным рассчитывается общий теплосъём с охлаждающей водой коллектора, а также удельный теплосъём на единицу площади охлаждаемой поверхности.

Для проверки корректности измерения температуры и расхода воды штатными КИП в рамках настоящей работы были измерены температура на входе и выходе коллекторов с помощью оптического пирометра, а также расход воды, подаваемой на несколько произвольно выбранных коллекторов.

Для замера расхода воды использован ультразвуковой расходомер-счетчик «Днепр-7»³. Для замера температуры воды использован инфракрасный термометр testo 835-T1⁴.

В табл. 4 представлены обобщённые данные по общему теплосъёму кессонов ПВП 1 за рассматриваемый период.

Видно, что теплосъём кессонов может существенно колебаться в зависимости от условий работы печи; сумма максимальных значений теплосъёма составляет 159,1% от суммы средних, сумма минимальных – 55,2%. Для ряда коллекторов (торец отстойника

³Высокотемпературная модель 3i1M для контроля температур в литейном и металлургическом производстве. Оптическое разрешение 180:01:00, диапазон измерений от +600 до +3000 °С, спектральный отклик 1,0мкм (1М), точность ±0,5%, регулируемый коэффициент излучения от 0,10 до 1,00 с шагом 0,01. От 80 до 0,1 % объемных.

от 1 до 150°С;
- насыщенного пара - от 100 до 200°С при условии, что температура первичных преобразователей не превышает 150°С.

Пределы допускаемой относительной погрешности измерения объемного расхода и количества жидкости (пара) составляют 2,0 % в диапазоне расхода от 3 до 100 % максимального расхода. Расходомер-счетчик устанавливается на трубопроводах с номинальными диаметрами от DN20 до DN1600 для жидкости и от DN20 до DN700 для пара, при толщине стенки от 2 до 20 мм для металлических и пластмассовых трубопроводов.

⁴ Инфракрасный термометр, с 4-точечным лазерным целеуказателем, оптикой 50:1, функцией управления данными измерений. Диапазон измерений -30 / +600°С, погрешность +/-1% разрешение 0,1°С.

² Высокотемпературная модель 3i1M для контроля температур в литейном и металлургическом производстве. Оптическое разрешение 180:01:00, диапазон измерений от +600 до +3000°С, спектральный отклик 1,0 мкм (1М), точность ±0,5%, регулируемый коэффициент излучения от 0,10 до 1,00 с шагом 0,01. От 80 до 0,1% объемных.

со стороны РШ, боковые поверхности отстойника со стороны РШ, нижний ряд кессонов РШ) наблюдается скачкообразное изменение теплосъёма 2.06.2017 г., для других разница между режимами 24.05-02.06.2017 и 3.06-9.06.2017 г. практически отсутствует (свод отстойника со стороны аптейка, нижний ряд кессонов

аптейка, в меньшей степени верхний ряд кессонов РШ).

Наибольший разброс значений выявлен для кессонов боковых сторон отстойника со стороны РШ (коллекторы SH2 и SH8), наименьший – для кессонов аптейка.

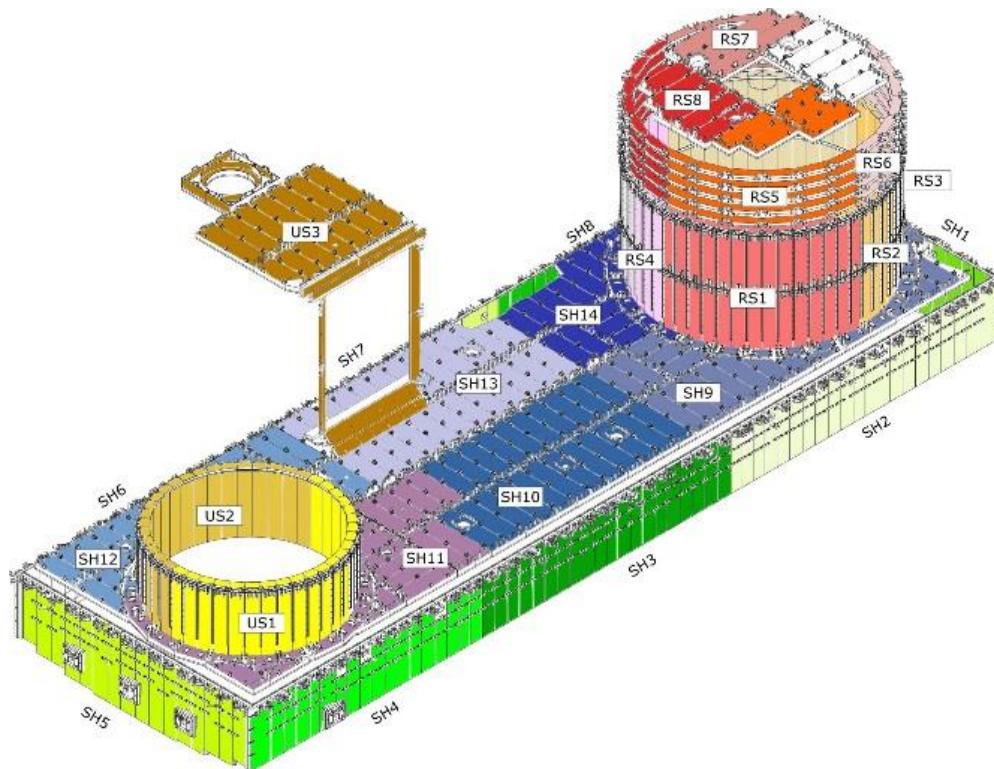


Рис. 1. Расположение кессонов ПВП-1

Таблица 3

Состав и объём газовой фазы ПВП

Компонент	Дутьё РШ		Окисление шихты нм ³ /ч	Газ РШ, всего		Дутьё отстойника		Подсосы		Тепло МДж/ч
	нм ³ /ч	об.%		нм ³ /ч	об.%	нм ³ /ч	об.%	нм ³ /ч	об.%	
O ₂	34380,3	75,04	-34059,8	320,5	0,91	421,5	3,64	4190	21	10758,8
N ₂	9804,4	21,40		9804,4	27,91	6781,1	58,50	15618	78,1	67088,6
Ar	1574,8	3,44		1574,8	4,48	153,3	1,32	186,5	0,93	2348,7
CO ₂	18,4	0,04		18,4	0,05	1412,1	12,18			5000,7
H ₂ O	36,9	0,08		550,5	1,57	2824,2	24,36			9700,9
SO ₂			22863,1	22863,1	65,08					77612,3
Всего	45814,8		-11196,7	35131,7		11592,2		20000		172509,9

Таблица 4

Теплосъём кессонов ПВП-1 в период ОПИ

	Ед. изм.	Коллектор ПВП 1								
		SH1	SH2	SH3	SH4	SH5	SH6	SH7	SH8	SH9
Среднее	МДж/ч	617	148	534	1068	978	899	458	385	2605
Максимум	МДж/ч	1237	363	863	1517	1742	1466	879	1193	4536
	% от ср.	200,4	244,6	161,7	142,1	178,1	163	191,8	310,1	174,1
Минимум	МДж/ч	76	-74	304	581	473	505	174	-84	1612
	% от ср.	12,3	-49,6	56,9	54,4	48,4	56,2	37,9	-21,7	61,9

	Ед. изм.	Коллектор ПВП-1								
		SH10	SH11	SH12	SH13	SH14	RS1	RS2	RS3	RS4
Среднее	МДж/ч	4489	3976	7750	6545	2851	1759	1991	1696	968
Максимум	МДж/ч	6784	5059	11633	9722	4444	3117	4041	2777	1412
	% от ср.	151,1	127,2	150,1	148,5	155,9	177,2	203	163,7	145,9
Минимум	МДж/ч	3297	2265	4270	2778	1513	829	737	882	700
	% от ср.	73,4	57	55,1	42,4	53,1	47,1	37	52	72,4

Окончание табл. 4

	Ед. изм.	Коллектор ПВП-1								Всего
		RS5	RS6	RS7	RS8	US1	US2	US3		
Среднее	МДж/ч	778	196	1367	1485	2518	1381	6944	54385	
Максимум	МДж/ч	1182	507	2419	3158	3470	1763	11236	86518	
	% от ср.	151,9	259,1	176,9	212,7	137,8	127,7	161,8	159,1	
Минимум	МДж/ч	417	102	529	606	1863	1157	4501	30015	
	% от ср.	53,6	52,1	38,7	40,8	74	83,8	64,8	55,2	

Потери тепла с поверхности печей (борта печи, своды РШ, отстойника и аптейка, подина печи)

Для оценки теплопотерь печью во внешнюю среду принято допущение, что внешний кожух печи – гладкий, стальной.

Поверхность печей ПВП-1 условно разделена на зоны, приблизительно отвечающие контурам охлаждения, а также дополнительные зоны, не оборудованные водяным охлаждением.

ПВП-1 – выделены 29 зон, а также подина печи.

Замеры температуры внешних поверхностей печей осуществляли с использованием инфракрасной камеры (тепловизора) Land Guide IR 928⁵. Цель выполненных измерений – определение средней температуры поверхности каждой из выделенных зон печи.

Тепловизионной съемке не подвергнуты следующие поверхности печей:

- подины ПВП-1, оборудованная системой воздушного охлаждения;
- примыкание аптейк – отстойник;
- примыкание РШ – отстойник, из-за наличия массивных металлоконструкций в этих зонах.

В процессе работы снято более 520 термографий элементов поверхностей ПВП-1.

Теплопотери с бортов и сводов ПВП-1

На рис. 2 приведены примеры термографий различных участков поверхности ПВП-1 и ПВП-2.

Каждая зона характеризуется своей площадью и средней температурой поверхности, которая определялась при обработке серии тепловизионных изображений.

Теплопотери рассчитывались следующим образом. На наружной поверхности кожуха происходит непрерывный теплообмен с окружающей средой, который может быть описан по закону Ньютона:

$$q_2 = \alpha \cdot (T_K - T_0),$$

где q_2 – удельный тепловой поток (Вт/м²); α – коэффициент теплоотдачи (Вт/(м²·°C)); T_K , T_0 – температуры соответственно кожуха конвертора и наружной среды.

Величина α рассчитывалась по формулам турбулентной естественной конвекции в воздухе:

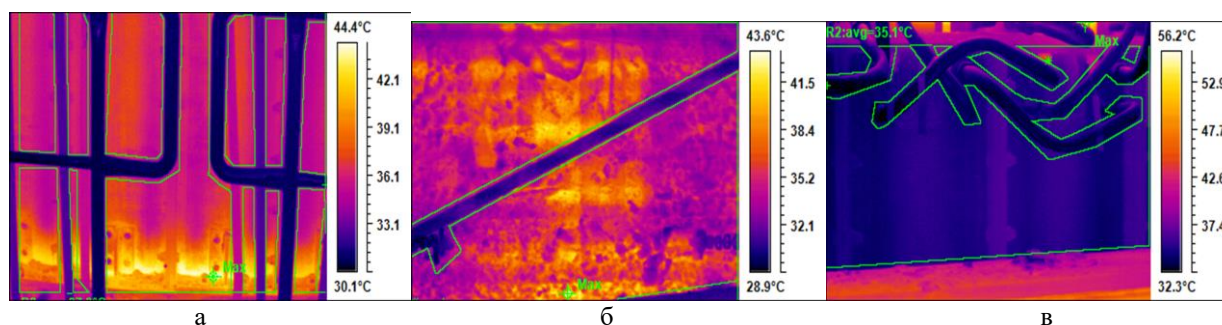


Рис. 2. Термограммы различных элементов печи:
а – свод отстойника; б – реакционная шахта; в – аптейк (охлаждаемая часть)

⁵ Тепловизор с неохлаждаемой матрицей 320×240 элементов, диапазон измерения температур от -20°C до +500°C (с фильтром – до +1500°C).

$$\alpha = 0,13 \cdot \lambda_B \cdot Pr^{1/3} \left[\frac{g_0 \beta_B (T_K - T_0)}{v_B^2} \right]^{1/3} \approx 1,78 (T_K - T_0)^{1/3}.$$

Таким образом, зная температуру поверхности кожуха и время, можно рассчитать тепловые потери с поверхности печи [15].

Суммарная теплоотдача с поверхности (без теплотерь с подины ПВП) в период испытаний для ПВП-1 составила 0,493 МВт или 1777,0 МДж/ч.

Как видно из представленных результатов в табл. 5, основными источниками теплотерь печей с поверхностью являются водоохлаждаемые элементы.

Теплотери с подины ПВП-1

Подина ПВП представляет собой многослойную конструкцию из различных материалов.

Основание печи выполнено из двутавровых балок, прикреплённых к закладным плитам. На балки уложены поперечные стальные секции подины шириной 1540-2465 мм.

Таблица 5

Статьи расхода тепла

Расход тепла	Количество тепла, МДж/ч	Количество тепла, отн. %
Теплосодержание шлака	204 876	43,68
Теплосодержание штейна	23 263	4,96
Теплосодержание пыли	6 682	1,42
Теплосодержание газов ПВП	173 447	36,98
Количество тепла, снимаемого системой охлаждения печи	54 385	11,59
Количество тепла, передаваемого атмосфере цеха (с поверхности печи)	6 399	1,36
Итого	469 052	100

Рабочая футеровка днища имеет толщину 450 мм, выполнена из фасонного кирпича, уложенного в продольную перевязку. Первый слой кирпичей под рабочим подом (арматурный слой) имеет толщину 300 мм. Для выравнивания поверхности для установки кирпичей рабочей футеровки между рабочим и арматурным слоями засыпается слой (10 мм) хромомagneзитового порошка, на который укладывается стальной лист толщиной 0,75 мм. Дополнительный слой хромомagneзитового порошка толщиной 5 мм вводится между арматурным слоем и стальной плитой днища для компенсации возможной неровности плиты днища. Общая толщина подины – от 760 до 770 мм.

Согласно проекту ПВП, температура днища подины печи при работе в нормальном режиме составляет от 145 до 165°C для ПВП-1, что достигается за счёт принудительного охлаждения подины.

Система охлаждения подины печи предназначена для отвода тепла вместе с воздухом, омывающим

стальное днище, с целью обеспечения нормального температурного режима работы подины и увеличения срока службы ее футеровки.

На ПВП-1 нагретый воздух удаляется от поверхности днища по отводящим воздуховодам и сборному воздушному коллектору за счёт разрежения, создаваемого центробежными вентиляторами. Из вентиляторов горячий воздух выбрасывается в атмосферу цеха вертикально вверх. Поступление охлаждающего воздуха к поверхности стального днища подины печи из атмосферы цеха происходит за счет принудительной тяги в системе воздуховодов через щелевые зазоры, образованные ложным стальным днищем подины печи.

Таким образом, упрощённо можно принять, что теплосъём через подину печи равен разнице между теплом поступающего к подине холодного воздуха и теплом горячего воздуха, удаляемого в атмосферу цеха. Для расчёта этих величин должны быть известны производительность вентиляторов и температуры горячего и холодного воздуха. В ходе обследования печей осуществлялось измерение температур с помощью инфракрасного термометра Testo 835-T1, кроме того, были получены данные о числе работающих вентиляторов на ПВП-1, паспортной производительности и режиме работы.

Средняя теплоотдача с подины ПВП-1 в период испытаний составляет 4622,0 МДж/ч.

Общие статьи расхода тепла ПВП-1 представлены в табл. 5.

Следует отметить, что величина погрешности определения величин отводимого из системы тепла не превышает 5%, что является хорошим результатом для такого рода измерений на промышленном агрегате.

Выводы

На основании проведенных фактических измерений потоков тепла и выполненных на их основе расчетов получены следующие данные:

- количество тепла, отводимого со шлаком, составило 204875,6 МДж/ч, или 43,7%;
- количество тепла, отводимого со штейном, составило 23262,6 МДж/ч, или почти 5%;
- количество тепла газов ПВП составило 173447,3 МДж/ч, или 37%;
- количество тепла, снимаемого системой охлаждения, составило 54385,0 МДж/ч, или 11,5%;
- количество тепла, передаваемого с поверхности печи, составило 6399,0 МДж/ч, или 1,4%.

Таким образом, при переработке низкоэнергетического сырья имеется только один контролируемый поток отводимого тепла, который позволяет регулировать баланс для его бездефицитности – тепло, снимаемое системой охлаждения печи.

Список источников

1. Диомидовский Д.А. Металлургические печи цветной металлургии. М.: Металлургиздат, 1961. 728 с.
2. Кобахидзе В.В. Тепловая работа и конструкции печей цветной металлургии. М.: МИСиС, 1994. 355 с.
3. Методика расчета и исследование тепловой работы печей взвешенной плавки / А.П. Скуратов, В.М. Парецкий, С.Д. Скуратова, В.Г. Лисиенко // Эффективность внедрения автогенных процессов в производстве тяжелых цветных металлов: тез. докл. I Всесоюзн. науч.-техн. конф. М.: ЦНИИцветмет экономики и информации, 1988. С. 79.
4. Особенности тепловой работы печей взвешенной плавки / В.В. Кобахидзе, Ю.Я. Сухобаевский, А.А. Каждан и др. // Цветные металлы. 1993. № 10. С. 13-17.
5. FactSage Thermochemical Software and Databases - 2010-2016 / С. W. Bale, E. Bélisle, P. Chartrand, S. A. Decterov, G. Eriksson, A.E. Gheribi, K. Hack, I. H. Jung, Y. B. Kang, J. Melançon, A. D. Pelton, S. Petersen, C. Robelin, J. Sangster, P. Spencer and M-A. Van Ende. // Calphad. 2016. Vol. 54. Pp. 35-53. <www.factsage.com>
6. Шаблий Л.С., Кривцов А.В., Колмакова Д.А. Компьютерное моделирование типовых гидравлических и газодинамических процессов двигателей и энергетических установок в ANSYS Fluent: учеб. пособие. Самара: Изд-во Самар. ун-та, 2017. 108 с.: ил.
7. Анализ изменения состава сульфидного рудного сырья, перерабатываемого в процессе взвешенной плавки, и технологические особенности работы в условиях снижения его теплотворности/ С.Ю. Ерошевич [и др.]; ЗФ ОАО «ГМК "Норильский никель"» // Цветные металлы. 2012. № 9. С. 13-20.
8. Практика работы автогенных агрегатов в ЗФ ПАО «ГМК "Норильский никель"» в условиях переработки сырья с пониженным энергетическим потенциалом / Крупнов Л.В., Малахов П.В., Озеров С.С., Цымбулов Л.Б. // Цветные металлы. 2022. № 2. С. 39-47.
9. Отчёт о НИР по теме «Корректировка технологического регламента ПМП НМЗ при переработке перспективного никелевого сырья ЗФ и никелевого сырья ЗФ переходного периода», Этап 2 – Док. № 021-372н с ЗФ ПАО «ГМК "Норильский никель"». СПб.: ООО «Институт Гипроникель», 2017.
10. Крупнов Л.В. Оценка тепловой работы печей плавки в жидкой ванне и печей взвешенной плавки с точки зрения их конструктивных особенностей / Л.В. Крупнов, Д.В. Румянцев, В.А. Попов, А.В. Каверзин // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2025. 18(2). С. 200–207. EDN: MDTBVL.
11. Взвешенная плавка: контроль, анализ и оптимизация / Давенпорт У.Г. и др. М.: МИСиС, 2006. 400 с.
12. Davenport W.G. Flash smelting: a look back and a look ahead / Met. Rev. ММН. 1987. Vol. 4. №2. Pp. 15-33.
13. Отчет о НИР по Договору № 021-372н от 10.02.2017 г. «Корректировка технологического регламента ПМП НМЗ при переработке перспективного никелевого сырья ЗФ и никелевого сырья ЗФ переходного периода». Этап 1.
14. Крупнов Л.В. Механизм образования тугоплавкой настывки в печах взвешенной плавки и способы ее устранения : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.02 / Крупнов Леонид Владимирович; [Место защиты: Нац. минерально-сырьевой ун-т «Горный»]. Санкт-Петербург, 2015. 19 с.
15. Загускин В.Л. Основы численных методов для газодинамики с теплопроводностью. М., 2022. 167 с.

Сведения об авторах

Крупнов Леонид Владимирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой металлургии, машин и оборудования Заполярного государственного университета им. Н.М. Федоровского; главный металлург – начальник Металлургического управления Заполярного филиала ПАО «ГМК "Норильский никель"», г. Норильск, Россия. E-mail: KrupnovLV@norvuz.ru. ORCID 0009-0008-7451-9610. Scopus ID 55830885000.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DETERMINATION OF THE ACTUAL PARAMETERS OF AN INDUSTRIAL UNIT FOR HEAT BALANCE CALCULATIONS USING A FLASH SMELTING FURNACE AS AN EXAMPLE

Krupnov Leonid V. – Associate Professor, Chief Metallurgist – Head of the Metallurgical Department of the Polar Branch of PJSC MMC Norilsk Nickel, Head of the Metallurgy, Machinery and Equipment Department, N.M. Fedorovsky Polar State University. E-mail: KrupnovLV@norvuz.ru

Abstracts. The results of a study of actual heat consumption during the operation of an industrial unit - a flash smelting furnace - including heat loss through uncooled furnace elements and heat removal by the cooling system are presented in this paper. The objective of the study was to experimentally determine the thermal field distribution of flash smelting furnaces (FSFs).

Key words: flash smelting furnace (FSF), pilot tests (PIT), autogenous process, heat balance, settling tank, uptake, gas-dust flow, Nadezhdinskiy Metallurgical Plant (NMZ)

Ссылка на статью:

Крупнов Л.В. Определение фактических параметров промышленного агрегата для расчетов теплового баланса на примере печи взвешенной плавки // Теория и технология металлургического производства. 2026. №1(56). С. 22-29. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1\(56\)-22-29](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1(56)-22-29)
Krupnov L.V. Determination of the actual parameters of an industrial unit for heat balance calculations using a flash smelting furnace as an example. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2026, vol. 56, no. 1, pp. 22-29. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1\(56\)-22-29](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1(56)-22-29)