

EDN: MDTBVL

УДК 669.332

## **Estimation of Thermal Performance of Bath Smelting and Flash Smelting Furnaces with Regard to Their Design Features**

**Leonid V. Krupnov<sup>a\*</sup>, Denis V. Rumyantsev<sup>b</sup>,  
Vladimir A. Popov<sup>b</sup> and Anton V. Kaverzin<sup>c</sup>**

*<sup>a</sup>PJSC «MMC «Norilsk Nickel» Polar Branch  
Norilsk, Russian Federation*

*<sup>b</sup>Gipronickel Institute LLC*

*Saint Petersburg, Russian Federation*

*<sup>c</sup>N.M. Fedorovsky Polar State University  
Norilsk, Russian Federation*

Received 08.01.2025, received in revised form 15.01.2025, accepted 26.01.2025

**Abstract.** To satisfy a necessity of smelters operating autogenous head smelting units to expand their resource base, the metal-containing technogenous materials are being increasingly involved in recycling. Such materials include products of slag flotation, and smelting units reverts. The aforementioned provokes major process failures and process destabilization at the head autogenous smelting units, such as flash smelting furnaces (FSF) and bath smelting furnaces.

Low autogenous feed processing results in significant alterations of furnaces thermal conditions. Recovery of standard thermal conditions requires obtaining higher grade converter matte, combustion of higher amount of fuel, and higher level of blast air oxygen enrichment, which in turn complicates process control especially for flash smelting furnaces (in comparison to Vanyukov furnaces (VF)). Obviously, such difference is caused by thermal performance of the furnaces. In order to determine operational features of the furnaces while processing autogenous feed one should calculate heat balance for both processes using low autogenous feed of the same composition with regard to all heat losses measured at commercial furnaces.

**Keywords:** recycling, Vanyukov Furnace, low-heat feed, Flash Smelting Furnace, heat balance.

Citation: Krupnov L. V., Rumyantsev D. V., Popov V. A., Kaverzin A. V. Estimation of Thermal Performance of Bath Smelting and Flash Smelting Furnaces with Regard to Their Design Features. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2025, 18(2), 200–207. EDN: MDTBVL



## **Оценка тепловой работы печей плавки в жидкой ванне и печей взвешенной плавки с точки зрения их конструктивных особенностей**

**Л. В. Крупнов<sup>а</sup>, Д. В. Румянцев<sup>б</sup>,  
В. А. Попов<sup>б</sup>, А. В. Каверзин<sup>в</sup>**

*<sup>а</sup>ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель»*

*Российская Федерация, Норильск*

*<sup>б</sup>ООО «Институт Гипроникель»*

*Российская Федерация, Санкт-Петербург*

*<sup>в</sup>Заполярный государственный университет*

*им. Н. М. Федоровского*

*Российская Федерация, Норильск*

**Аннотация.** Необходимость увеличения ресурсной базы металлургических компаний, эксплуатирующих головные агрегаты автогенного типа, привела к широкому использованию в рамках рециклинга металлосодержащих материалов, имеющих техногенную природу. К ним можно отнести продукты флотационного обогащения металлургических шлаков, оборотные материалы плавильных агрегатов. Такая ситуация обусловила серьёзные технологические сбои в устойчивом ведении процесса в автогенных плавильных агрегатах – печах взвешенной плавки и печах плавки в жидкой ванне.

Переработка низкоавтогенного сырья приводит к существенному изменению теплового режима работы печей, для нормализации которого требуется получение более богатых штейнов, сжигание повышенного количества топлива и работа на более высоком обогащении дутья, что создаёт трудности в управлении технологическим процессом, более выраженные при плавке во взвешенном состоянии, нежели в печах Ванюкова. Очевидно, что эти различия определяются тепловой работой обоих агрегатов, а именно дефицитом тепла, возникающим в процессе плавки. Это, в свою очередь, с большой долей вероятности определяется конструктивными различиями обоих агрегатов. С целью определения особенностей эксплуатации обоих агрегатов при переработке в них автогенного сырья необходимо провести расчёты тепловых балансов обоих процессов на одинаковых составах низкоавтогенного сырья, с учётом всех статей расхода тепла в процессе, полученных при реальных измерениях на промышленных агрегатах.

**Ключевые слова:** рециклинг, печь Ванюкова, низкоэнергетическое сырьё, печь взвешенной плавки, тепловой баланс.

Цитирование: 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 // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2025, 18(2). С. 200–207. EDN: MDTBVL

### **Введение**

В различных работах, посвящённых переработке техногенного сырья [1–4], было показано, что переработка низкоавтогенного сырья приводит к существенному изменению теплового режима работы печей. Для нормализации теплового баланса требуется получение более богатых штейнов, сжигание повышенного количества топлива и работа на более высоком обогащении дутья, что создаёт трудности в управлении технологическим процессом, более выраженные при плавке во взвешенном состоянии, нежели в печах Ванюкова [5]. Очевидно, что эти различия

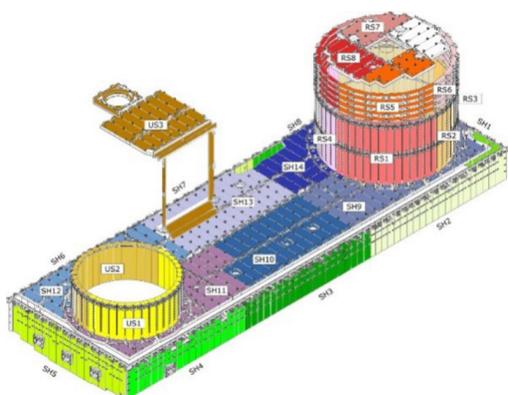


Рис. 1. Схема кессонов ПВП

Fig. 1. FSF cooling elements layout

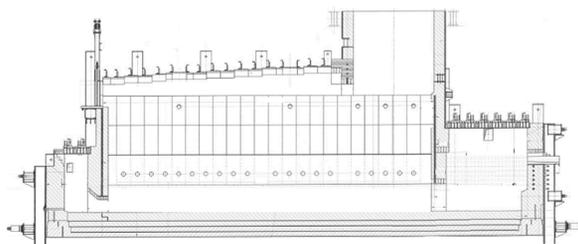


Рис. 2. Эскиз ПВ

Fig. 2. VF schematic drawing

определяются тепловой работой обоих агрегатов, а именно дефицитом тепла, возникающим в процессе плавки. Это, в свою очередь, с большой долей вероятности определяется конструктивными различиями обоих агрегатов [6–9]. На рис. 1 и 2 представлены схемы обоих агрегатов.

Современные автогенные агрегаты отличаются широким применением кессонированных поверхностей [10–14]. Так, печи ПВП имеют кессонированные стены и свод отстойника, реакционной шахты, свод аптейка и его примыкание к котлу-утилизатору. Печи ПВП также имеют принудительное воздушное охлаждение подины печи и существенные потери тепла в виде лучистой энергии через отверстие примыкания аптейка к радиационной зоне котла-утилизатора. Печи Ванюкова имеют кессонированные, трехъярусные стены шахты агрегата. Свод ПВ распорно-подвесной, подина принудительного охлаждения не имеет.

С целью определения особенностей эксплуатации обоих агрегатов при переработке автогенного сырья представляется необходимым провести расчёты тепловых балансов процессов на одинаковых составах низкоавтогенного сырья, с учётом всех статей расхода тепла в процессе, полученных при реальных измерениях на промышленных агрегатах. Таким сравнительным расчетам посвящена данная работа.

В рамках определения причин настыеобразования в печах взвешенной плавки в 2017 году на НМЗ были проведены работы по прямому измерению теплотерь модернизированных печей взвешенной плавки [15]. Были собраны исходные данные, необходимые для составления теплового баланса ПВП.

В ходе проведения испытаний были собраны следующие исходные данные для ПВП НМЗ:

1. Расход и состав шихты, расход природного газа, технического кислорода, азота; объём и состав перерабатываемой пыли и проч.
2. Характеристики системы водяного охлаждения печей (расход воды на охлаждение, увеличение температуры охлаждающей воды в результате теплосъёма с печей).
3. Температура внешних поверхностей реакционной шахты, отстойника и аптейка.
4. Объём, температура, запылённость и состав отходящих газов печей.
5. Количество и температура шлака и штейна на выходе из ПВП.

Полученные в ходе проведения испытаний исходные данные позволили оценить тепловой баланс ПВП НМЗ, перерабатывающих текущий поток сырья.

Для проведения тепловых расчётов в ходе обследования ПВ: оценки количества тепла, выделяющегося при сжигании углеводородного топлива, окислении шихты, а также для оценки теплосодержания исходных веществ и продуктов плавки, использован термодинамический программный комплекс FactSage версии 7.3 [16]. Тот же комплекс использован и в настоящей работе для сравнения теплового баланса печи Ванюкова и печи взвешенной плавки.

Для моделирования пирометаллургических агрегатов преимущественно используется модуль FactSage Equilib, осуществляющий расчёт сложных химических равновесий методом минимизации энергии Гиббса:

$$\begin{aligned}
 G = & \sum_{\text{ид.газ}} n_i(g_i^0 + RT \ln P_i) + \sum_{\substack{\text{чистые} \\ \text{конд.} \\ \text{фазы}}} n_i g_i^0 + \\
 & + \sum_{\text{раств.1}} n_i(g_i^0 + RT \ln X_i + RT \ln \gamma_i) + \\
 & + \sum_{\text{раств.2}} n_i(g_i^0 + RT \ln X_i + RT \ln \gamma_i) + \dots
 \end{aligned} \quad (1)$$

где  $n_i$  – число молей;  $P_i$  – парциальное давление газа;  $X_i$  – мольная доля;  $\gamma_i$  – коэффициент активности;  $g_i^0$  – стандартная молярная энергия Гиббса.

Программа находит такое сочетание параметров  $n_i$ ,  $P_i$ ,  $X_i$  системы, при котором общая энергия Гиббса  $G$  (1) минимальна. В ходе расчёта пользователем поэтапно задаются количество и тип исходных реагентов, назначаются возможные чистые вещества и растворы в системе и выбираются значения констант – температуры, давления. Расчёты могут быть выполнены с большой гибкостью – так, можно вводить исходные данные в различных единицах измерения, оценивать метастабильные фазы при расчёте равновесия, изменять стандартные состояния компонентов и т.п.

Исходные данные для оценки количества тепла, выводимого из ПВП и ПВ с продуктами плавки.

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, отстойника и аптейка, подина печи);
3. Тепло, отводимое системой водяного охлаждения;
4. Потери тепла на эндотермические реакции, протекающие в процессе плавки. Эти потери тепла учтены при оценке количества тепла, вводимого при ведении автогенного процесса.

Тепловые потери для обоих типов печей рассчитываются вне алгоритмов химической термодинамики, исходя из данных о конструкции. Для печи Ванюкова используются следующие исходные данные:

- удельный тепловой поток на одну работающую фурму 200 Мкал/м<sup>2</sup>·ч, огневая поверхность фурмы 0,34 м<sup>2</sup>;
- удельный тепловой поток на основные кессоны шахты, омываемые расплавом (кессоны первого и второго ряда) 80 Мкал/м<sup>2</sup>·ч;

- удельный тепловой поток на кессоны третьего ряда 30 Мкал/м<sup>2</sup>·ч;
- удельный тепловой поток на кессоны торцевых стен 80 Мкал/м<sup>2</sup>·ч;
- удельный тепловой поток через кладку горна печи 0,4 Мкал/м<sup>2</sup>·ч;
- удельный тепловой поток через кладку шахты печи 0,6 Мкал/м<sup>2</sup>·ч;
- удельный тепловой поток через свод 0,6 Мкал/м<sup>2</sup>·ч;
- удельный тепловой поток через подину 0,1 Мкал/м<sup>2</sup>·ч.

Для печи взвешенной плавки использованы результаты расчёта фактического теплового баланса печей ПВП НМЗ, выполненного в 2017 году [6]. Потери тепла приняты равными 75000 МДж/ч.

При расчёте ПВП принято, что в горелки отстойника подаётся 2800 нм<sup>3</sup>/ч природного газа, сжигаемого КВС с 28 % кислорода. В настоящей работе по результатам пробных расчётов задано, что тепло сгорания этой части газа усваивается расплавом не более чем на 55 % абс, остальное теряется с отходящим газом. Остальной газ – горелки распылителя и свода реакционной шахты – условно сжигается более эффективно и более богатым КВС (80 % кислорода в КВС, а также кислород «копья» распылителя).

При расчёте ПВП принято, что в горелки отстойника подаётся 2800 нм<sup>3</sup>/ч природного газа, сжигаемого КВС с 28 % кислорода. Степень усвоения этого тепла расплавом может быть принята, в частности, по аналогии с печами Ромелт, где тепло верхнего ряда фурм усваивается не более чем на ~75 % [17]. В настоящей работе по результатам пробных расчётов задана степень усвоения тепла горелок отстойника 55 %, остальное теряется с отходящим га-

Таблица 1. Тепловой баланс печи взвешенной плавки (низкоэнергетическая шихта, номинальная загрузка по шихте ПВП – 120 т/ч)

Table 1. Flash smelting furnace heat balance (low-heat blend, nominal FSF blend feed rate 120 t/h)

Приход тепла	Мкал/ч	%	Расход тепла	Мкал/ч	%
Руда Маяк	18.49	0.020	Штейн	10304.33	11.08
Медный концентрат ТОФ	213.81	0.230	Шлак	29581.47	31.82
Медный концентрат НОФ	84.17	0.091	Газ	35179.60	37.84
Обороты бедные ПЦ	28.75	0.031	Теплопотери	17913.44	19.27
Медный концентрат ФНШ НМЗ	9.04	0.010			
Штейн ПВ медный	19.16	0.021			
Концентрат отстойников МЗ	31.64	0.034			
Си цементная	2.89	0.003			
Си кек NNN	9.04	0.010			
Песок	86.35	0.093			
Вода общая	3.48	0.004			
Физ. тепло природного газа	52.32	0.056			
КВС	337.11	0.363			
Тепло горелок отстойника	22848	24.573			
Прочее тепло сж. пр. газа	16512.0	17.759			
Тепловой эффект процессов	52722.6	56.704			
Всего	92978.8		Всего	92978.8	

Таблица. 2. Тепловой баланс печи Ванюкова (низкоэнергетическая шихта, номинальная загрузка по шихте ПВ – 120 т/ч)

Table 2. Vanyukov furnace heat balance (low-heat blend, nominal VF blend feed rate 120 t/h)

Приход тепла	Мкал/ч	%	Расход тепла	Мкал/ч	%
Медный концентрат ФНШ НМЗ	9.0	0.01	Газ. фаза	19055.33	26.08
Медный концентрат ТОФ	213.8	0.29	Штейн	10838.62	14.83
Руда Маяк	18.5	0.03	Шлак	28937.72	39.60
Медный концентрат НОФ	84.2	0.12	Прочие (невязка составов)	1998.64	2.74
Обороты бедные ПЦ	28.7	0.04	Теплопотери	12239.56	16.75
Штейн КГМК	19.2	0.03			
Концентрат отстойников МЗ	31.6	0.04			
Си цементная КГМК	2.9	0.00			
Си кек NNN	9.0	0.01			
Песок	86.4	0.12			
Физ. тепло природного газа	28.9	0.04			
КВС	184.7	0.25			
Вода общая	3.5	0.00			
Тепло сжигания пр. газа	21725.4	29.73			
Тепловой эффект процессов	50624.0	69.28			
Всего	73069.9			73069.86	

зом. Остальной газ – горелки распылителя и свода реакционной шахты – условно сжигается более эффективно и более богатым КВС (80 % кислорода в КВС, а также кислород «копья» распылителя).

Расчёт для обеих печей медного сырья выполнен для сухой (0,1 % влаги) шихты, на медный штейн с содержанием 12 % Fe. Результаты расчётов показаны в табл. 1 и 2. Некоторая незначительная разница в составе и выходе шлака и штейна обусловлена несколькими отличающимися термодинамическими моделями ПВ и ПВП (изначально оптимизированы для штейнов разного состава).

Как видно из результатов расчётов (табл. 1 и 2), при переработке 120 тонн низкоэнергетичной шихты в час удельный расход газа на тонну шихты для ПВ составляет 22,2 нм<sup>3</sup>, для ПВП – 40,2 нм<sup>3</sup>.

Таким образом, из проведенных расчётов видно, что при относительно низкой производительности двух сравниваемых агрегатов дефицит тепла (в расчете это то тепло, которое компенсируется сжиганием природного газа) при плавке во взвешенном состоянии низкоэнергетической медной шихты составляет более 42 %. Этот же дефицит тепла при плавке в печах жидкой ванны (в данном случае ПВ) по сравнению с печами взвешенной плавки меньше на ≈12,5 %, абсолютное значение количества тепла, требующего компенсации, составляет 29,7 %.

### Выводы

Таким образом, на основании проведенных расчетов с использованием исходных данных, полученных на реальных промышленных агрегатах, а также на укрупненных полупромыш-

ленных установках, можно однозначно сделать вывод о преимуществе печи Ванюкова как теплогенерирующего агрегата по сравнению с печами взвешенной плавки.

Это объясняется конструктивными различиями печей в плане подачи дополнительного количества топлива для компенсации дефицита тепла при переработке низкоавтогенного сырья и существенно большим количеством отводимого тепла в единицу времени.

Подача и горение топлива непосредственно в расплав, как это реализовано в печах ПВ, существенно эффективнее в части передачи тепла, нежели при горении топлива в газовой фазе с передачей тепла расплаву лучистой энергией от «прозрачного» газового факела, как это реализовано в печах взвешенной плавки.

Преимущества выражаются в количестве дополнительного тепла связанного с подачей топлива, разница составляет до 16 % абс, или до 30000 Мкал/ч при плавке медного сырья.

### Список литературы / References

[1] Оганесян Л.В., Мирлин Е. Г. Проблема истощения минерально-сырьевых ресурсов земной коры. *Горная промышленность*, 2019, 6, 100–105 [Oganesyanyan L. V., Mirlyin E. G. The problem of depletion of mineral resources of the earth's crust. *Mining industry*, 2019, 6, 100–105 (In Rus.)]

[2] Mudd G. M., Jowitt S.M. A Detailed Assessment of Global Nickel Resource Trends and Endowments. Society of Economic Geologists – february 2014. *Inc. Economic Geology*, 109, 1813–1841. 0361–0128/14/4250/1813–29.

[3] Власов И. А. Минералогические особенности техногенного сырья. *Современные технологии переработки техногенного сырья*. Под ред. К. В. Булатова, Г. И. Газалеевой. Екатеринбург: Уральский Рабочий, 2019. С. 17–23 [Vlasov I. A. Mineralogical features of technogenic raw materials. *Modern technologies of processing of technogenic raw materials*. Ed. by K. V. Bulatov, G. I. Gazaleeva. Ekaterinburg, 2019. Pp. 17–23 (In Rus.)]

[4] Крупнов Л.В., Мидюков Д. О., Дациев М. С., Ильин В.Б. Изменение ресурсной базы производства тяжелых цветных металлов на примере меди и никеля. *Горный журнал*, 2024, 3, 10–15 [Krupnov L. V., Midyukov D. O., Datsiev M. S., Ilyin V. B. Changes in the resource base for the production of heavy non-ferrous metals: the case of copper and nickel. *Gornyi Zhurnal*, 2024, 3, 10–15 (In Rus.)]

[5] Малахов П.В., Озеров С. С., Цымбулов Л. Б. Практика работы автогенных агрегатов в ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» в условиях переработки сырья с пониженным энергетическим потенциалом. *Цветные металлы*, 2022, 2, 39–47 [Malakhov P.V., Ozerov S.S., Tsybulov L. B. Operation of autogenous smelters at Nor Nickel's polar division when processing raw materials with low energy potential. *Tsvetnye Metally*, 2022, 2, 39–47 (In Rus.)]

[6] Jylhä J.-P., Jokilaakso A. CFD-DEM models for matte droplet settling in a flash smelting settler. *Heliyon*, 2023, September.

[7] Wan X.L. Shen A., Jokilaakso et al. Experimental Approach to Matte–Slag Reactions in the Flash Smelting Process. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2021, 42 (4), 231–241.

[8] Wang G. Yang Yi., Zhou Sh. et al. Data Analysis and Prediction Model for Copper Matte Smelting Process. *Metallurgical and Materials Transactions B.*, 2024. DOI:10.1007/s11663–024–03115–0.

[9] Taskinen P. Jokilaakso A., Lindberg D. et al. Modelling copper smelting – the flash smelting plant, process and equipment. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 2019, 129, 1–14. DOI:10.1080/25726641.2019.1688904.

[10] Крупнов Л. В. *Механизм образования тугоплавкой настывли в печах взвешенной плавки и способы ее устранения*: дис. канд. техн. наук. СПб., 2015. 234 с. [Krupnov L. V. *Principles of accretion formation in flash smelting furnaces and preventive measures*. Thesis for the degree of Cand. Sci. (Eng.). Saint-Peterburg, 2015. 234 p. (In Rus.)]

[11] Мечев В. В., Шварцбург Г. М., Захарчук А. З., Мейерович Б. В. Об усовершенствовании тепловой работы печей плавки в жидкой ванне. *Комплексное использование минерального сырья*: сб. науч. тр., 1988, 5, 58–63 [Mechev V. V., Schwarzburg G. M., Zakharchuk A. A., Meyerovich B. V. Improvement of bath smelting furnaces thermal performance. *Complex Use of Mineral Resources*. Collection of research papers, 1988, 5, 58–63 (In Rus.)]

[12] Мечев В. В. и др. *Автогенные процессы в цветной металлургии*. М.: Металлургия, 1991. 413 с. [Mechev V. V. et al. *Autogenous processes in non-ferrous metallurgy*. Moscow, 1991. 413 p. (In Rus.)]

[13] Синев Л. А., Борбат Ф. В., Козюра А. И. *Плавка сульфидных концентратов во взвешенном состоянии*. М.: Металлургия, 1979. 150 с. [Sinev L. A., Borbat F. V., Kozyura A. I. *Flash smelting of sulfide concentrates*. Moscow, 1979. 150 p. (In Russ.)]

[14] Кобахидзе В. В. *Тепловая работа и конструкции печей цветной металлургии*. М.: МИСИС, 1994. 355 с. [Kobakhidze V. V. *Non-ferrous metallurgical furnaces thermal performance and design*. Moscow, 1994. 335 p. (In Rus.)]

[15] Отчёт о НИР по теме «Корректировка технологического регламента ПМП НМЗ при переработке перспективного никелевого сырья ЗФ и никелевого сырья ЗФ переходного периода», Этап 1 – Дог. № 021–372н с ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель». СПб.: ООО «Институт Гипроникель», 2017 [Research report: *Adjustment of process regulations at pyrometallurgical chain of the Nadezhda Metallurgical Plant while processing potential nickel-containing raw materials and transition stage nickel-containing raw materials of Nor Nickel Polar Branch, Phase 1 – Contract No 021–372n with PJSC “MMC “NORILSK NICKEL” Polar Branch*. Saint Petersburg, 2017 (In Rus.)]

[16] *Ansys Fluent Theory Guide*. ANSYS, Inc., 2022.

[17] Роменец В. А., Валавин В. С., Усачев А. Б. и др. *ПРОЦЕСС РОМЕЛТ*: монография. Под ред. В. А. Роменца. М.: МИСИС; Руда и Металлы, 2005. 399 с. [Romenets V. A., Valavin V. S., Usachev A. B. et al. *Romelt Process*. Monograph. Ed. by V. A. Romenets. Moscow, 2005, 399 p. (In Rus.)]