



More than 30ty – years experience of the authors in the field of complex investigations of heating processing of metal in methodical pusher furnaces, carried out in conditions of major metallurgical enterprises of CIS, is summarized.

В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, И. А. ТРУСОВА, БНТУ

УДК 669.041:536.24

ТЕПЛОВАЯ РАБОТА НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ ПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА В ПРОМЫШЛЕННЫХ УСЛОВИЯХ. СООБЩЕНИЕ 1. МЕТОДИЧЕСКИЕ ПЕЧИ ТОЛКАТЕЛЬНОГО ТИПА

Введение. Печной агрегат, функционирующий в условиях любого металлургического предприятия, для исследователей является сложнейшим объектом, при изучении которого должны учитываться взаимосвязанные тепломассообменные, газодинамические, физико-химические и другие процессы.

К настоящему времени накоплен достаточно большой опыт в области создания методов расчета и проектирования металлургических печей.

У истоков создания металлургической теплотехники как науки стояли такие выдающиеся ученые, как В. Е. Грум-Гржимайло, которым была создана гидравлическая теория металлургических печей и заложены теоретические основы расчетов металлургических печей различного технологического назначения [1], Г. П. Иванцов [2], В. Н. Соколов [3], Н. М. Ицкович [4]. Параллельно металлургической теплотехникой занимались Н. Н. Доброхотов, Н. Ю. Тайц, Д. В. Будрин, Ю. И. Розенгарт, М. А. Глинков, Б. И. Китаев, Э. М. Гольдфарб и др.

Вместе с тем, полагаем, что наибольший вклад в развитие теоретических основ металлургических печей наряду с московской и уральской школами внесла украинская, днепропетровская школа под руководством Н. Н. Доброхотова, И. Д. Семикина (создателя энергетической теории печей) и Н. Ю. Тайца [5, 6]. Основные методы расчета металлургических печей (плавильных, нагревательных, термических) обобщены в работах [7, 8].

В настоящее время это направление по созданию методов расчета и проектирования металлургических печей не только не потеряло своей значи-

мости, но и приобрело еще большую актуальность. Это, в первую очередь, обусловлено повышением цен на энергоносители, в частности, на природный газ, который является основным технологическим сырьем для печей металлургической и машиностроительной отрасли, постоянно возрастающими требованиями к повышению эффективности тепловой работы печи, ее экологичности и т. д.

Но наиболее важную информацию несут исследования, проведенные в промышленных условиях, поскольку не всегда имеется возможность, даже на базе современных теоретических разработок, предложить конструкцию печи, которая была бы наиболее эффективной. Основным фактором при выборе конструктивных и теплотехнических параметров металлургической печи, как считают авторы данной статьи, является использование технологических и теплоэнергетических приемов, изложенных в работах [5, 9–12].

В настоящем сообщении обобщен более чем 30-летний опыт авторов в области комплексных исследований тепловой обработки металла в методических печах толкательного типа, выполненных в условиях крупнейших металлургических предприятий СНГ: на Днепропетровском металлургическом комбинате им. Дзержинского, Алчевском металлургическом комбинате (Украина) и Новосибирском металлургическом заводе им. Кузмина. Исследования включают в себя системный подход, предусматривающий выполнение экспериментальных исследований, математическое моделирование, совершенствование существующих и разработку новых технологий.

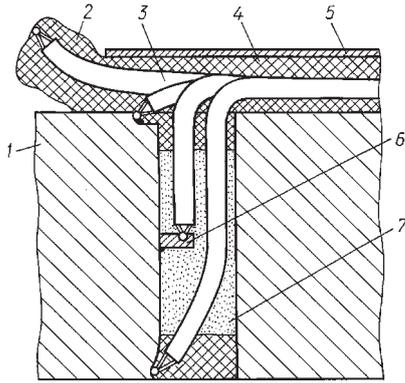


Рис. 1. Методика установки и закрепления термодатчиков в слябе: 1 – сляб; 2 – спай термодатчика; 3 – двухканальная алундовая изоляция; 4 – каолиновая вата; 5 – уголок или тавр; 6 – планка; 7 – безводный оксид алюминия

Экспериментальные исследования. Нагрев металла в методических печах толкательного типа характеризуется несимметричностью нагрева, поэтому измерение температур в блюмах и слябах необходимо осуществлять как минимум в трех характерных точках сечения: верхней и нижней поверхности, центральной части. Измерения температур проводится в течение всего процесса нагрева с одновременной фиксацией основных показателей работы печи: температуры, расходов топлива и воздуха по зонам, давления и состава газов и др. Схема закрепления термопар в блюме показана на рис. 1. Замер температуры печи в непосредственной близости от заготовки осуществлялся термопарой с открытым спаем, установленным на расстоянии 5–7 см от поверхности и закрепленным к поверхности скобой или другим приспособлением.

При выполнении экспериментальных исследований по определению температурного поля блюмов и слябов использованы термопары ХА, которые при измерениях до 8 ч дают достоверные показания в пределах 0–1300 °С, с электродами диаметром 1,2 мм, в качестве вторичного прибора – переносной потенциометр ПП-63.

При использовании разработанной методики выполнены экспериментальные исследования на-

грева блюмов в нагревательных устройствах трубозаготовочного стана Днепровского металлургического комбината им. Дзержинского, в состав которого входят три методические печи со сводово-торцевым отоплением и одна печь со сводовым отоплением, оборудованные керамическим воздушным и металлическим газовым рекуператорами с верхним и нижним подогревом металла, с однорядным расположением. Печь со сводово-торцевым отоплением отапливается девятью дискофакельными горелками (в три ряда в своде) в методической зоне, 20 инъекционными горелками в верхней и нижней сварочных и томильной зонах, топливо – доменный газ с дополнительной подачей природного. Печь со сводовым отоплением оборудована плоскопламенными горелками типа ГР, в сварочной зоне нижнего обогрева – двухпроводными горелками типа «труба в трубе».

Результаты термометрирования блюма размером 0,27×0,35×5,8 мм из среднеуглеродистой стали (сталь 45) приведены на рис. 2. Анализ приведенных термограмм и продолжительности нагрева показывает, что производительность печи со сводово-торцевым отоплением на 10–15% ниже, чем для печи со сводовым отоплением, что приводит к нарушению синхронной поплавочной загрузки печей металлом.

При проведении экспериментальных исследований в условиях нагревательных печей стана 810 Новосибирского металлургического завода методика проведения эксперимента была усовершенствована. Печь предназначена для нагрева слябов, отапливается природным газом. Учитывая, что на этом предприятии производятся прецизионные марки стали и сплавов, к качеству которых предъявляются повышенные требования, измерение температур осуществляли не только по сечению сляба, но и по длине заготовок в сечениях слябов, расположенных как посередине глиссажной трубы, так и над глиссажной трубой. При проведении промышленных экспериментов были отобраны

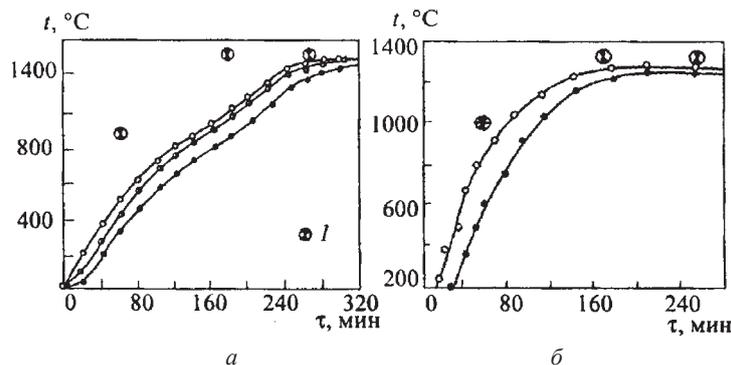


Рис. 2. Результаты измерения температур в характерных точках сечения блюмов при нагреве в печах со сводово-торцевым (а) и сводовым (б) отоплением: 1 – значения штатных термопар

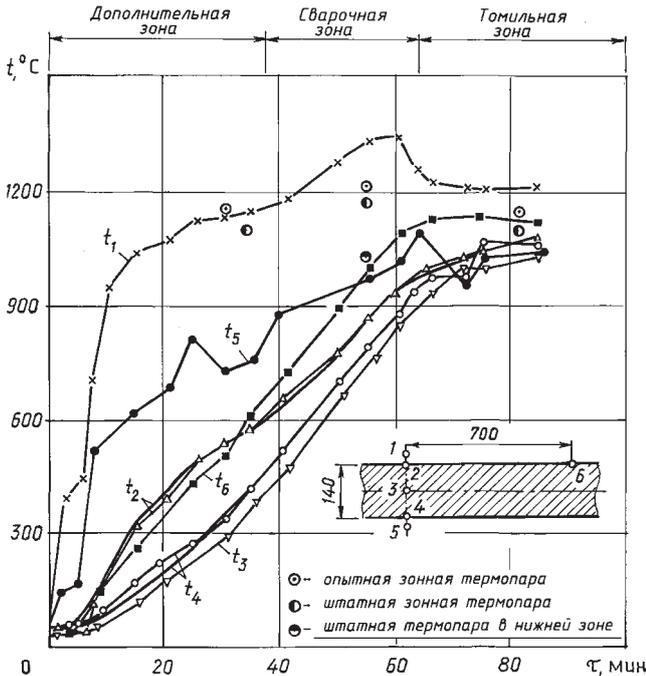


Рис. 3. Термограмма нагрева слябов из стали 29HK в методической печи: — — — расчет; Δ, ●, ▽ — эксперимент

слябы следующих марок: 10СП, 79НМ, 29НК, 12Х18Н10Т (два сляба). Некоторые результаты исследований приведены на рис. 3–5. Анализ результатов промышленных экспериментов показал, что для всех исследованных сталей и сплавов отмечается несимметричность нагрева, при этом температура нижней поверхности значительно ниже верхней и по величине близка к температуре центра; при форсированных режимах к концу нагрева по сечению сляба имеют место значительные температурные перепады, превышающие требуемые по техно-

логии нагрева; температуры в верхних зонах нагрева, фиксируемые штатными зонными термопарами, ниже, а в нижней – выше действительных, замеренных экспериментально, что обусловлено неправильным размещением штатных термопар.

Математическое моделирование процессов теплообмена в методических печах. Учитывая, что блюмы или слябы располагаются в методических печах вплотную друг к другу, процесс внутреннего теплообмена описывается формулой

$$c(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right], \quad (1)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0(L)} = \sigma^{B(H)} \left[\left(\frac{T_c^{B(H)}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_M^{B(H)}}{100} \right)^4 \right] + \alpha^{B(H)} (T_c^{B(H)} - T_M^{B(H)}), \quad (2)$$

$$T(x,0) = T_0. \quad (3)$$

Математическая модель внутреннего теплообмена (1)–(3) дополнена соотношениями для расчета зонального расхода топлива для каждой технологической зоны:

$$(1 - K_j)(Q_{xt}^j + Q_{фт}^j + Q_{фв}^j + Q_{вн}^j + Q_{yx}^j) = Q_M^j - Q_{экз}^j. \quad (4)$$

Наибольшую трудность при решении приведенной задачи представляет определение коэффициентов внешнего теплообмена (теплообмена излучением σ и конвекцией α), которые подбираются путем идентификации математической модели

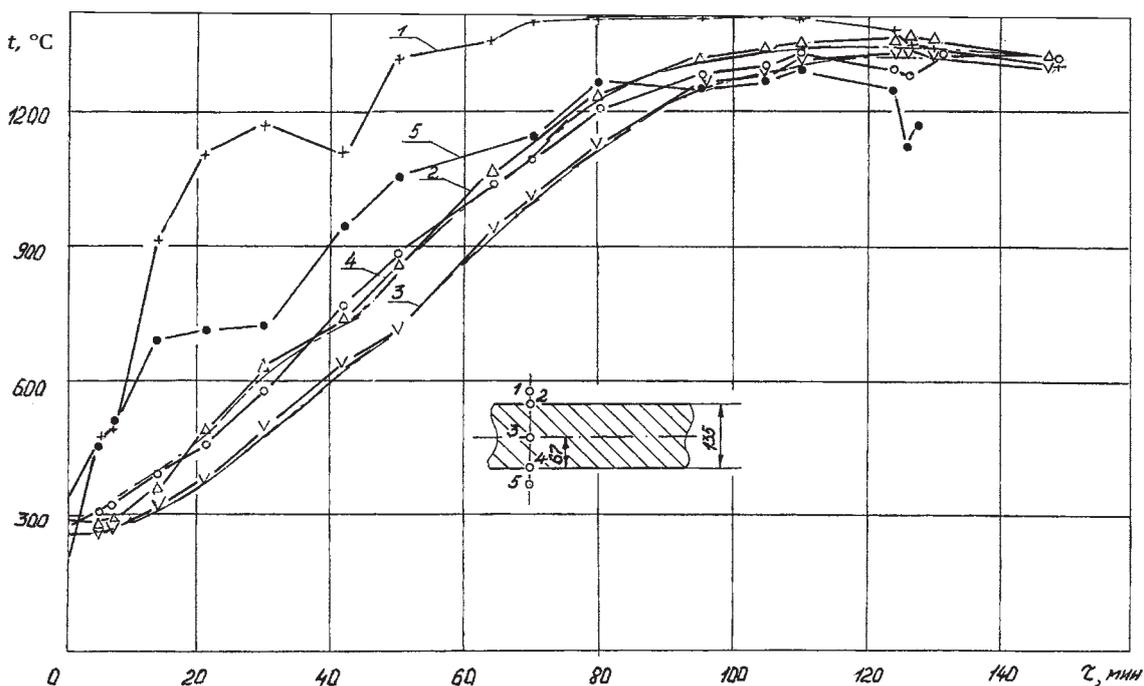


Рис. 4. Термограмма нагрева слябов из стали 65X13 в методической печи. Обозначения те же, что на рис. 3

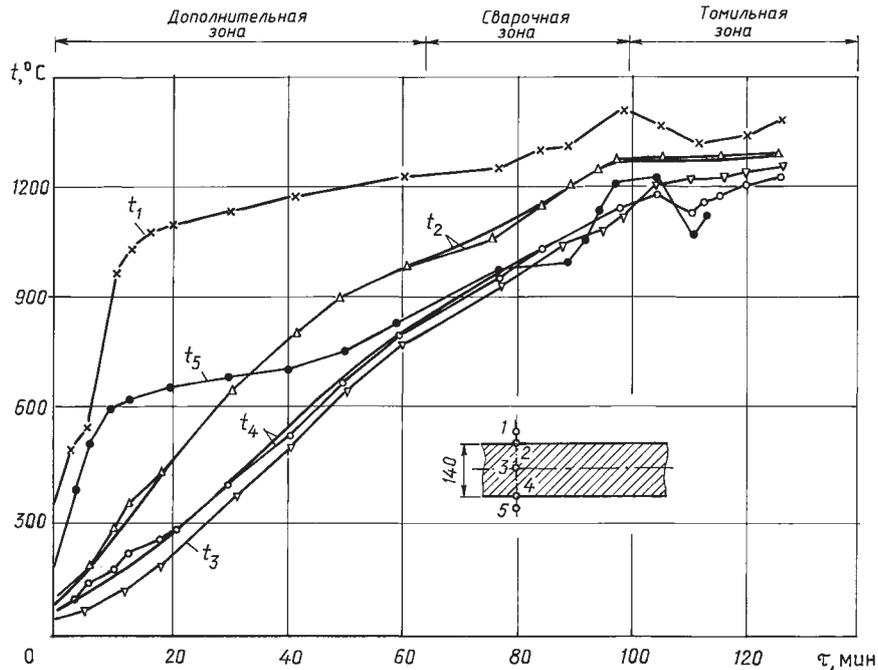


Рис. 5. Термограмма нагрева слэбов из стали 12X18H10T в методической печи. Обозначения те же, что на рис. 3

на основе полученных экспериментальных данных (путем сравнения экспериментальных и расчетных значений температур в характерных точках сечения заготовок). Сравнение термограмм показало в конкретном случае (для условий Днепровского металлургического комбината и Новосибирского металлургического завода), что расхождение данных расчетов и экспериментов составило не более 3%.

Представляется возможным и несколько иной подход к определению коэффициентов внешнего теплообмена – разработка математической модели сопряженного (внешнего и внутреннего) теплообмена. Решение такой задачи позволяет определить температурные поля по сечению заготовки и в рабочем пространстве печи; тепловой поток и коэффициенты теплообмена по длине печи; время нагрева; суммарный и удельный расход топлива.

Система уравнений для расчетных зон II рода, где заданы тепловые потоки:

$$\sum_{k=1}^{N^{B(H)}} \left(a_{ki}^{B(H)} T_k^{B(H)} + g_{ki}^{B(H)} T_k^{B(H)} \right) + g_i^{0^{B(H)}} + Q_i^{B(H)} = 0, \quad i \in N_2^{B(H)}. \quad (5)$$

Здесь N – общее число зон; N_2 – множество номеров зон II рода.

Формула для вычисления тепловых потоков на поверхности металла (зоны I рода) имеет вид

$$Q_i^{B(H)} = \sum_{k=1}^{N^{B(H)}} \left(a_{ki}^{B(H)} T_k^{B(H)} + g_{ki}^{B(H)} T_k^{B(H)} \right) + g_i^{0^{B(H)}}, \quad i \in N_1, \quad (6)$$

где N_1 – множество номеров зон I рода (зоны на верхней и нижней поверхностях металла, где задается температура); a_{ki} , g_{ki} , g_i^0 , Q_i^y – коэффициенты радиационного (эффективные с учетом селективности излучения) и конвективного теплообмена, а также величины объемных тепловыделений; «в» и «н» – верхнее и нижнее строения печи. Приведенная модель (5)–(6), дополненная дифференциальным уравнением теплопроводности, была использована для исследования тепловой работы методических печей станов 600 и 2250 Алчевского металлургического комбината.

Разработка рациональных режимов тепловой обработки печей. С использованием приведенных математических моделей выполнены серии численных расчетов с широким диапазоном изменения технологических, конструктивных и теплотехнических параметров нагрева металла.

Для условий методических печей трубозаготовочного стана ДМК им. Дзержинского при выборе рациональных режимов нагрева блюмов использовали методы нечеткой многокритериальной оптимизации. Задача сводилась к отысканию таких знаний начальной температуры печи, времени достижения максимальной температуры и ее величины, которые позволили бы максимально удовлетворить совокупности частных критериев качества, зависящих от величины образовавшейся окалины, времени нахождения блюма в печи, температуры его поверхности в конце нагрева и термических напряжений, возникающих в металле. Разработанный температурно-тепловой режим апробирован на печи при производительности 60 т/ч, по резуль-

татам испытаний составлен тепловой баланс для рационального и существующего режимов соответственно (табл. 1).

Таблица 1. Результаты расчета теплового баланса печей ТЭС ДМК (числитель – рациональный режим, знаменатель – существующий режим)

Статья	Значение, ГДж/ч (%)
<i>Приход теплоты</i>	
От сжигания топлива	$\frac{203(75,84)}{216,6(77,25)}$
Теплота, вносимая подогретым топливом	$\frac{16,85(6,27)}{16,85(5,99)}$
Теплота, вносимая подогретым воздухом	$\frac{36,50(13,57)}{36,50(12,98)}$
Теплота от окисления железа	$\frac{8,84(1,04)}{8,84(0,99)}$
Физическая теплота металла	$\frac{2,80(3,28)}{2,80(2,79)}$
Итого	$\frac{268,79(100)}{289,59(100)}$
<i>Расход теплоты</i>	
Теплота на нагрев металла	$\frac{49,20(18,46)}{50,50(18,05)}$
Потери теплоты с дымовыми газами	$\frac{162,80(61,12)}{174,60(62,42)}$
Потери теплоты через кладку	$\frac{3,05(1,14)}{3,44(1,235)}$
Потери теплоты с охлаждающей водой	$\frac{15,60(5,85)}{15,60(5,57)}$
Потери теплоты с паром	$\frac{19,71(7,40)}{19,60(7,00)}$
Потери теплоты с окалиной	$\frac{2,48(0,93)}{3,00(1,07)}$
Потери теплоты с недожогом	$\frac{13,60(5,1)}{12,98(4,65)}$
Итого	$\frac{266,44(100)}{279,7188(100)}$

Анализ производственных данных после внедрения разработанного режима на печах со сводово-торцевым отоплением показал, что удельный расход условного топлива снизился на 7 кг у.т./т (5,7%), к. п. д. увеличился на 2,26%. Аналогичные исследования были выполнены для печи со сводовым отоплением, при этом достигнуто уменьшение удельного расхода условного топлива

на 12 кг у. т./т (9,6%), снижение окалинообразования в среднем с 2,5 до 2,2%.

Для условий нагревательных печей стана 810 Новосибирского металлургического завода с использованием математической модели (1)–(4) выполнены серии численных расчетов для всего существующего сортамента (свыше 40 специальных сталей и сплавов), после обработки результатов предложена новая режимная карта нагрева слябов. Внедрение рациональных режимов нагрева позволило снизить удельный расход условного топлива на 3,2 кг у. т./т, увеличить выход годного на 60%.

При разработке рациональных режимов в методических печах станов 600 и 2250 Алчевского металлургического комбината использована математическая модель (5)–(6) с соответствующими уравнениями внутреннего теплообмена. Расчеты предусматривали три этапа: на первом этапе при постоянном расходе топлива производили его пе-

Таблица 2. Результаты расчета теплового баланса печи стана 600 (числитель – рациональный режим, знаменатель – существующий режим)

Статья	Значение, ГДж/ч (%)
<i>Приход теплоты</i>	
От сжигания топлива	$\frac{337,96(85,55)}{357,24(85,65)}$
Теплота, вносимая подогретым воздухом	$\frac{45,14(11,42)}{47,73(11,45)}$
Теплота от окисления железа	$\frac{11,89(3,01)}{12,1(2,9)}$
Итого	$\frac{394,99(100)}{417,1(100)}$
<i>Расход теплоты</i>	
Теплота на нагрев металла	$\frac{100,4(26,6)}{101,7(26,2)}$
Потери теплоты с дымовыми газами	$\frac{153,44(40,66)}{162,27(41,8)}$
Потери теплоты через кладку	$\frac{6,345(1,68)}{6,35(1,63)}$
Потери теплоты с охлаждающей водой	$\frac{98,79(26,18)}{98,79(25,45)}$
Потери теплоты излучением	$\frac{5,26(1,39)}{5,45(1,4)}$
Неучтенные потери	$\frac{13,19(3,49)}{13,64(3,51)}$
Итого	$\frac{377,4(100)}{388,2(100)}$

перераспределение по зонам печи, на втором – уменьшали расход топлива до требуемых температур нагрева металла, на третьем – осуществляли детальный анализ процессов внутреннего теплообмена в блюмах с учетом несимметричности. По результатам выполненных расчетов разработаны рациональные режимы нагрева металла, выполнены опытно-промышленные испытания, которые

показали эффективность предлагаемых технологий (табл. 2).

Анализ технико-экономических показателей тепловой работы методической печи стана 600 показал, что при работе по предлагаемому режиму удельный расход условного топлива снизился на 4,51 кг у. т./т, к. п. д. повышен на 4,05%, окалинообразование снижено с 1,8 до 1,78%.

Литература

1. Грум - Гржимайло В. Е. Пламенные печи. Ч. I–IV. М.; Л.: Госмашметиздат, 1932.
2. Иванцов Г. П. Нагрев металла. Свердловск; М.: Metallurgizdat, 1948.
3. Соколов В. Н. Расчеты нагрева металла. М.: Машгиз, 1955.
4. Ицкович Н. М. Методы приближенных расчетов нагревательных печей. М.: Metallurgizdat, 1957.
5. Тайц Н. Ю. Технология нагрева стали. М.: Машгиз, 1962.
6. Расчеты нагревательных печей / С. И. Аверин, Э. М. Гольдфарб, Кравцов А. Ф. и др. / Под ред. Н. Ю. Тайца. Киев: Техніка, 1969.
7. Metallургические печи. Теория и расчеты: Учеб. В 2-х т. Т. 1 / В. И. Губинский и др.: Под общ. ред. В. И. Тимошпольского, В. И. Губинского. Мн.: Белорусская наука, 2007.
8. Metallургические печи. Теория и расчеты: Учеб. В 2-х т. Т. 2 / В. И. Губинский и др.: Под общ. ред. В. И. Тимошпольского, В. И. Губинского. Мн.: Белорусская наука, 2007.
9. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах / Ю. И. Розенгарт и др. Донецк: Вища шк., 1986.
1. Гольдфарб Э. М. Теплотехника metallургических процессов. М.: Metallургия, 1967.
11. Тайц Н. Ю., Розенгарт Ю. И. Методические нагревательные печи. М.: Metallurgizdat, 1964.
12. Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Стеблов А. Б., Павлюченков И. А. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах. Мн.: Выш. шк., 1992.