

при учете вязких потерь и в местных сопротивлениях, сил тяжести и Архимеда, действующих на поток, и других явлений, возникающих в вихревом потоке при подаче греющего пара, позволит уточнить математическую модель ДЦВ и более полно изучить процессы, происходящие в ДЦВ.

**Список использованных источников:**

1. Шарапов В.И., Цюра Д.В. Термические деаэраторы / Ульянов. гос. техн. ун-т. – Ульяновск, 2003.
2. Пат. 2131555 Россия: F 22 D 1/50, C 02 F 1/20, B 01 D 19/00. Деаэратор (теплообменник) / Б.А. Зимин ; заяв. и патентооблад. Б.А. Зимин . – № 97121266/06; заявл. 09.12.1997; опубл. 10.06.1999, Бюл. № 22 (I ч.). – 4 с.
3. Деаэрационная установка двойного назначения на основе центробежно-вихревых деаэраторов / А.В. Мошкарин, Г.В. Ледуховский, В.Н. Виноградов, Б.А. Зимин, Е.Н. Топоров, И.А. Борисов // Вестник ИГЭУ. – 2009. - Вып. 4. – С.1-5.
4. Пат. 2151341 Россия, МПК F 22 D 1/50, C 02 F 1/20. Деаэратор.
5. Пат. 2086289 Россия, МПК B 01 D 19/00. Устройство для деаэрации смазочного масла.
6. Дитякин Ю. Ф. Распыливание жидкости/ Ю.Ф. Дитякин, Л.А. Клячко, Б.В. Новиков, В.И. Ягодкин – М.: Машиностроение, 1977. - 208 с.

**Bibliography:**

1. Sharapov V.I., Tsyura D.V. Thermal deaerators / Ulyan. gos. tekhn. univ. - Ulyanovsk, 2003. (Rus.)
2. Pat. 2131555 Russia, F 22 D 1/50, C 02 F 1/20, B 01 D 19/00. Deaerator / B.A. Zimin ; zaav. i patentoobl. B.A. Zimin. - № 97121266/06; zaavvl. 09.12.1997; opubl. 10.06.1999, Byul. № 22 (I ch.). - 4 s. (Rus.)
3. Deaerating plant of double-duty on the basis of centrifugal-vortical deaerators / A.V. Moshkarin, G.V. Ledukhovskii, V.N. Vinogradov, B.A. Zimin, Ye.N. Toporov, I.A. Borisov // Vestnik IGEU. - 2009. - Vip. 4. - S.1-5. (Rus.)
4. Pat. 2151341 Russia, MPK F 22 D1/50, C 02 F 1/20. A deaerator. (Rus.)
5. Pat. 2086289 Russia, MPK B 01 D 19/00. Device for the deaeration of luboil. (Rus.)
6. Dityakin Yu.F. Распыливание of liquid/ Yu.F. Dityakin, L.A. Klyachko, B.V. Novikov, V.I. Yagodkin - M. : Mashinostroyeniye, 1977. - 208 s. (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов  
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 7.03.2012

УДК 536.24

©Шаламов Ю.Н.<sup>1</sup>, Берестовой И.О.<sup>2</sup>, Айнагоз Г.В.<sup>3</sup>

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ВНУТРЕННЕГО ТЕПЛООБМЕНА В ПЕЧАХ ПРИ НАГРЕВЕ МЕТАЛЛА**

*В статье предложен метод расчета внутреннего теплообмена в печах при нагреве металла на основе построения номограмм для термически «тонкого» тела при лучистом внешнем теплообмене.*

**Ключевые слова:** термически «тонкое» тело, нестационарный процесс, тепловой поток, теплообмен, нагрев, лучистый теплообмен.

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

<sup>2</sup> ассистент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

<sup>3</sup> ассистент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

*Шаламов Ю.М., Берестовой І.О., Айнагоз Г.В. Удосконалення методики розрахунку внутрішнього теплообміну в печах при нагріві металу. У статті запропонований метод розрахунку внутрішнього теплообміну у печах при нагріві металу на основі побудови номограм для термічно «тонкого» тіла при променистому зовнішньому теплообміні.*

*Ключові слова: термічно «тонке» тіло, нестационарний процес, тепловий потік, теплообмін, нагрівання, променистий теплообмін.*

*Yu.M. Shalamov, I.O. Berestovoi, G.V. Aynagoz. Improving methods of calculating the internal heat transfer in furnaces for heating the metal. In this paper the method of calculating the internal heat transfer in furnaces for heat metal on the basis of a graph for thermally «thin» body with radiant heat transfer outside.*

*Keywords: thermally «thin» body, non-stationary process, heat flow, heat transfer, heating, radiant heat transfer.*

**Постановка проблеми.** Современные тенденции диктуют новые требования к методам инженерных расчетов внутреннего теплообмена в печах при нагреве металла перед обработкой давлением. Качество методики расчета должно удовлетворять общепринятым нормам и быть, как минимум, не ниже среднего.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В практике на стадии проектирования оборудования, а также в процессе его эксплуатации применяют оценочные расчетные методики, обеспечивающие адекватность к моделируемым процессам. Эти методы используются и при решении задач оптимизации конструктивных и технологических параметров.

Наиболее распространенным методом исследования высокотемпературного нагрева является математическое моделирование. При построении математических моделей разделяют решение внутренней задачи теплопроводности в нагреваемом материале и ограждающих поверхностях и задачи внешнего теплообмена, связанной с движением греющих газов и теплообмена излучением между нагреваемыми поверхностями.

Задачи тепломассопереноса решают различными методами сеток, конечных или граничных элементов. Значительный вклад в развитие численных методов решения этих задач внесли российские исследователи школы А.А. Самарского [1], а также западные ученые, во главе с Д.Б. Сполдингом, С. Патанкармом, О. Зенкевичем и К. Бреббия. При использовании дискретных моделей среды и процесса, решение получают в дискретном виде, т.е. в виде таблицы значений параметров в узловых точках и т.п. Однако, при численных методах недостаточно выявляется влияние отдельных параметров на результат. Численные методы в большинстве случаев позволяют получить решение сложных задач. К данным методам относятся: метод сеток (конечных разностей), метод элементарных балансов и т.п.

В развитии методов расчета лучистого теплообмена важной ступенью стало появление зональных методов, которые позволяют свести решение интегро-дифференциальных к системе алгебраических уравнений. Ю.А. Суринов [2], А.С. Невский [3], А.Г. Блох, М.Н. Оцисик [4] и ряд других исследователей внесли существенный вклад в становление методов расчета лучистого теплообмена в теплообменных аппаратах. Несмотря на обилие исследований, вопрос не является полностью решенным, особенно при расчетах конкретных аппаратов.

В последнее время на рынке прикладных программ появились крупные пакеты, позволяющие производить расчеты тепломассопереноса с учетом многих теплофизических особенностей. Однако это не снизило интереса к развитию методов расчетов металлургических печей.

**Цель статьи** – сокращение количества расчетов и используемых в методе подручных средств для решения задачи расчета внутреннего теплообмена в печах при нагреве металла на основе построения номограмм для термически «тонкого» тела при лучистом внешнем теплообмене.

**Изложение основного материала.** В настоящей работе предлагается методика расчета температуры металла в печах перед обработкой давлением. Металл нагревают с целью придания ему необходимой пластичности. Такой нагрев обычно осуществляется в высокотемпературных печах (печи с шагающими балками и подом, печи толкательного типа и т.д.).

Температуру нагрева перед обработкой давлением выбирают в зависимости от свойств и

назначения металла, а также от характеристики оборудования для обработки, т.е. при нагреве стали нужно точно знать, в какой момент времени температура металла будет такой, которая необходима для последующей обработки металла. При нагреве стали выше температуры начала горячей обработки давлением наступает перегрев, который проявляется в резком росте аустенитных зерен и понижении пластичности. Последняя в процессе обработки может нарушить целостность заготовки. При нагреве стали до температур, близких к температурам начала плавления, наступает пережог, характеризующийся появлением хрупкой пленки между зернами вследствие окисления их границ. Пережженный металл теряет пластичность, становится хрупким и представляет собой неисправимый брак. Следует отметить, что на перегрев и на пережог влияют и температура, и время нахождения металла в зоне высоких температур.

Для определения температуры металла термически «массивного» тела в данный момент времени существует методика расчета, опирающаяся на использование номограмм «безразмерная температура-безразмерное время» при условии, что внешний теплообмен происходит по закону Ньютона-Рихмана. Эта методика является в определенной мере несовершенной, т.к. предусматривает следующие допущения: замена лучистого теплообмена конвективным (это приводит к увеличению объемов расчета); использование числа подобия  $Bi = \alpha \cdot S/\lambda$ , при котором коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  принимается средним, а он меняется в процессе изменения температуры. Нагрев – это термически нестационарный процесс. В тоже время доля лучистого теплового потока в печах составляет 80-95% (оставшуюся часть конвективного теплового потока в расчетах вообще не учитывают, считая, что они являются потерями в окружающую среду) [5].

Предлагаемая методика предполагает разработку и использование номограмм «безразмерная температура – безразмерное время» при лучистом внешнем теплообмене для термически «тонкого» тела. При этом определяющим критерием есть число подобия

$$Sk = \varepsilon_{np} \sigma_0 T^3 \cdot S/\lambda, \quad (1)$$

- где  $S$  – характерный линейный размер, м;  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности тела, Вт/м·К;  
 $\alpha$  – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>·К;  
 $\sigma_0$  – излучательная способность абсолютно черного тела, Вт/м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>;  
 $T$  – абсолютная температура поверхности тепловоспринимающего тела, К;  
 $\varepsilon_{np}$  – степень черноты поверхности тела.

Таким образом, в данной методике исключается замена на условный конвективный теплообмен (исключается коэффициент теплоотдачи).

Данная методика имеет свои достоинства, т.к. позволяет упростить расчет времени нагрева, уменьшить погрешность вычисления внутреннего теплообмена в печи.

Следовательно, требуется внести поправки в этот метод к решениям для «тонких» тел, это следует из того, что в основу дифференциального уравнения для «тонких» тел (2) помимо температуры используется значение плотности теплового потока на поверхности.

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{q}{\rho \cdot c \cdot S \cdot k_1}, \quad (2)$$

- где  $\rho$  – плотность тела, кг/м<sup>3</sup>;  
 $c$  – теплоемкость тела, Дж/кг·К;  
 $q$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $S$  – характерный линейный размер тела (для пластины – половина толщины, для цилиндра и шара – радиус), м;  
 $k_1$  – коэффициент, учитывающий форму тела;  
 $\tau$  – время нагрева, с;  
 $T$  – температура нагрева тела, К.

Для лучистого теплообмена тепловой поток рассчитывается по закону Стефана-Больцмана

$$q = \sigma_{np} (T_{эфф}^4 - T^4), \quad (3)$$

- где  $\sigma_{np}$  – приведенный коэффициент лучеиспускания, Вт/м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>.

В результате дифференциальное уравнение нагрева «тонкого» тела при лучистом теплообмене приобретает вид

$$\frac{d\bar{T}}{d\tau} = \frac{\sigma_{np}(T_{эфф}^4 - T^4)}{\rho \cdot c \cdot S \cdot k_1} \quad (4)$$

Решим данное дифференциальное уравнение (4)

$$d\tau = \frac{\rho \cdot c \cdot S \cdot 1}{\sigma_{np}} \cdot \frac{dT}{(T_{эфф}^4 - T^4)}, \quad (5)$$

$$\tau = \frac{\rho \cdot c \cdot S \cdot k_1}{\sigma_{np} \cdot 2 \cdot T_{эфф}^3} \cdot \left[ \left( \operatorname{arctg} \frac{T}{T_{эфф}} - \operatorname{arctg} \frac{T_{нач}}{T_{эфф}} \right) + \frac{1}{2} \cdot \left( \ln \frac{1 + \frac{T}{T_{эфф}}}{1 - \frac{T}{T_{эфф}}} - \ln \frac{1 + \frac{T_{нач}}{T_{эфф}}}{1 - \frac{T_{нач}}{T_{эфф}}} \right) \right] \quad (6)$$

Преобразовав (6), получим:

$$\tau = \frac{\lambda \cdot \rho \cdot c \cdot S^2 \cdot 1}{2 \cdot \lambda \cdot \sigma_{np} \cdot S \cdot T_{эфф}^3} \cdot \left[ \left( \operatorname{arctg} \frac{T_{нов}}{T_{эфф}} - \operatorname{arctg} \frac{T_{нач}}{T_{эфф}} \right) + \frac{1}{2} \cdot \left( \ln \frac{1 + \frac{T_{нов}}{T_{эфф}}}{1 - \frac{T_{нов}}{T_{эфф}}} - \ln \frac{1 + \frac{T_{нач}}{T_{эфф}}}{1 - \frac{T_{нач}}{T_{эфф}}} \right) \right], \quad (7)$$

$$\frac{\tau \cdot \lambda}{\rho \cdot c \cdot S^2} \cdot \frac{\sigma_{np} \cdot S \cdot T_{эфф}^3}{\lambda} = \frac{1}{2} \cdot \left[ \left( \operatorname{arctg} \frac{T}{T_{эфф}} - \operatorname{arctg} \frac{T_{нач}}{T_{эфф}} \right) + \frac{1}{2} \cdot \left( \ln \frac{1 + \frac{T}{T_{эфф}}}{1 - \frac{T}{T_{эфф}}} - \ln \frac{1 + \frac{T_{нач}}{T_{эфф}}}{1 - \frac{T_{нач}}{T_{эфф}}} \right) \right], \quad (8)$$

$$Fo \cdot Sk = \frac{1}{2} \cdot \left[ \left( \operatorname{arctg} \frac{T}{T_{эфф}} - \operatorname{arctg} \frac{T_{нач}}{T_{эфф}} \right) + \frac{1}{2} \cdot \left( \ln \frac{1 + \frac{T}{T_{эфф}}}{1 - \frac{T}{T_{эфф}}} - \ln \frac{1 + \frac{T_{нач}}{T_{эфф}}}{1 - \frac{T_{нач}}{T_{эфф}}} \right) \right] \quad (9)$$

Заменяя произведение  $Fo \cdot Sk$  на  $z$ , получим

$$z = \frac{1}{2} \cdot \left[ \left( \operatorname{arctg} \frac{T}{T_{эфф}} - \operatorname{arctg} \frac{T_{нач}}{T_{эфф}} \right) + \frac{1}{2} \cdot \left( \ln \frac{1 + \frac{T}{T_{эфф}}}{1 - \frac{T}{T_{эфф}}} - \ln \frac{1 + \frac{T_{нач}}{T_{эфф}}}{1 - \frac{T_{нач}}{T_{эфф}}} \right) \right] \quad (10)$$

Уравнение (10) – дифференциальное уравнение нагрева "тонких" тел при лучистом теплообмене для симметричного нагрева пластины. Для нагрева цилиндра и шара они будут несколько другими.

Для цилиндра:  $k_l = 1/2$

$$z = \frac{1}{4} \cdot \left[ \left( \operatorname{arctg} \frac{T}{T_{эфф}} - \operatorname{arctg} \frac{T_{нач}}{T_{эфф}} \right) + \frac{1}{2} \cdot \left( \ln \frac{1 + \frac{T}{T_{эфф}}}{1 - \frac{T}{T_{эфф}}} - \ln \frac{1 + \frac{T_{нач}}{T_{эфф}}}{1 - \frac{T_{нач}}{T_{эфф}}} \right) \right] \quad (11)$$

Для шара:  $k_l = 1/3$

$$z = \frac{1}{6} \cdot \left[ \left( \operatorname{arctg} \frac{T}{T_{эфф}} - \operatorname{arctg} \frac{T_{нач}}{T_{эфф}} \right) + \frac{1}{2} \cdot \left( \ln \frac{1 + \frac{T}{T_{эфф}}}{1 - \frac{T}{T_{эфф}}} - \ln \frac{1 + \frac{T_{нач}}{T_{эфф}}}{1 - \frac{T_{нач}}{T_{эфф}}} \right) \right] \quad (12)$$

По полученной зависимости (10) составим номограмму зависимости  $Z = f\left(\frac{T}{T_{эфф}}, \frac{T_{нач}}{T_{эфф}}\right)$  для пластины. Аналогичные номограммы (рисунок) получены для других форм тела (цилиндр, шар).

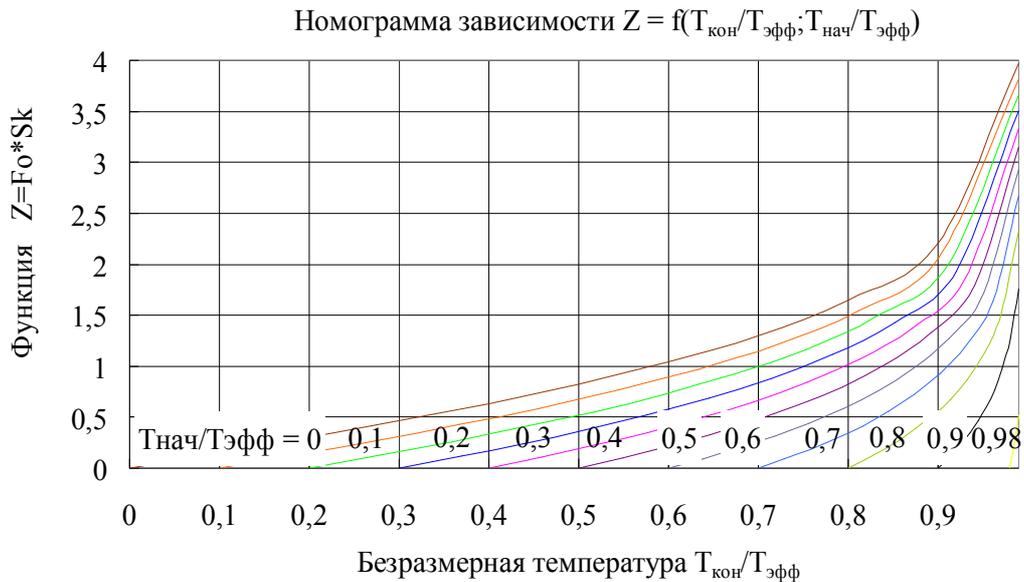


Рисунок – Номограмма зависимости  $z = Fo \cdot Sk = f(T/T_{эфф}; T_{нач}/T_{эфф})$

В таблице приведены результаты расчета термически тонкого тела (пластина) при постоянной температуре окружающей среды  $t_{эфф}$ . Теплообмен между средой и поверхностью тела лучистый:

$$l = 120 \text{ мм}, \lambda = 45 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}, a = 1,1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}, \quad t_{эфф} = 1300^\circ\text{C},$$

$$\sigma_{эфф} = 2,8 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4 \quad t_{нач} = 20^\circ\text{C}, t_{кон} = 1050^\circ\text{C}.$$

Таблица

Результаты расчета при граничных условиях третьего рода различными методами

Метод	Классический*	Метод сеток**	Предлагаемый
$t_{нач}, ^\circ\text{C}$	20	20	20
$t_{кон}, ^\circ\text{C}$	1050	1050	1050
$\tau$ , сек	3501	3480,1	3491

\* Алгоритм расчета по классическому методу приведен в [6].

\*\* Расчет выполнен по неявной разностной схеме (НРС) при разбиении по толщине на  $dx=20$  частей, с шагом во времени  $dt=0,1$  сек (на каждом участке приведенный коэффициент излучения заменялся на условный коэффициент теплоотдачи).

Из приведенных выше расчетов видно, что результаты, полученные предлагаемым методом, находятся между классическим методом и методом сеток (НРС), отклонения времени незначительны (менее 1%).

В результате сравнения можно утверждать, что предлагаемый метод с достаточной степенью точности пригоден для расчета задач теплопроводности для термически «тонкого» тела.

Помимо этого, в отличие от классического метода и метода сеток, для реализации которых необходимы таблицы функции  $\psi = f\left(\frac{T}{T_{эфф}}\right)$  и использование ПВЭМ, реализация нового метода упрощает расчет термически тонкого тела при лучистом теплообмене, что приводит к ускорению реализации энерго- и ресурсосберегающих мероприятий.

### Выводы

1. Предложенный метод для решения задачи расчета внутреннего теплообмена в печах при нагреве металла на основе построения номограмм для термически «тонкого» тела при лучистом внешнем теплообмене позволяет с достаточной степенью точности определить за-

траты энергии и времени на нагрев термически «тонкого» тела.

2. Реализация нового метода упрощает расчет нагрева-охлаждения тела, что приводит к ускорению реализации энерго- и ресурсосберегающих мероприятий, а также к обеспечению оптимальных условий протекания технологических процессов.

**Список использованных источников:**

1. Самарский А.А. Математическое моделирование. Идеи, методы, примеры / А.А. Самарский, А.П. Михайлов. – М. : Наука, 2001. – 320 с.
2. Суринов Ю.А. Об итерационно-зональном методе исследования и расчета лучистого теплообмена в поглощающей и рассеивающей среде/ Ю.А. Суринов // Изв. Сибирского отделения АН СССР. Серия технических наук. – 1978. – № 8. – С. 106-125.
3. Невский А.С. Зональный метод расчета лучистого теплообмена и сравнение его с другими методами / А.С. Невский, А.К. Колосова, Л.А. Чуканова. // Сб. трудов ВНИИМТ. – М., – 1969.– № 19. – С. 170.
4. Оцисик М.Н. Сложный теплообмен / М.Н. Оцисик. – М., 1976. – 616 с.
5. Качан Ю.Г. Расчет внешнего теплообмена в рабочем пространстве методической печи / Ю.Г. Качан, А.В. Николенко // Теория и практика металлургии. – 2007. – №4-5. – С. 77-78.
6. Хиш Л.И. Теплообмен / Л.И. Хиш. – Мариуполь: ПГТУ, 2002. – 257 с.

**Bibliography:**

1. Samarskii A.A. Mathematical modeling. Ideas, methods, examples / A.A. Samarsky, A.P. Mikhailov. – Moscow: Science, 2001. – 320 p. (Rus.)
2. Surinov Yu.A. An iterative-zonal method of investigation and calculation of radiative heat transfer in absorbing and scattering medium // Math. Siberian Branch of the USSR. Series of technical sciences. – 1978. – № 8. – P. 106-125. (Rus.)
3. Nevsky A.C. The zonal method for calculating the radiative heat transfer and its comparison with other methods / A.C. Nevsky, A.K. Kolosov, L.A. Chukanova // Sat VNIIMT works. – Moscow, 1969. – № 19. – p. 170. (Rus.)
4. Otsisik M.N. The complex heat transfer / M.N. Otsisik. – Moscow, 1976. – 616 p. (Rus.)
5. Kachan J.G. Calculation of the external heat transfer in the furnace working space methodology / J.G. Cachan, A.V. Nikolenko // Theory and practice of metallurgy. – 2007. – № 4-5. – P. 77-78. (Rus.)
6. Hiish L.I. Heat and mass transfer / L.I. Hiish. – Mariupol: PSTU, 2002. – 257 p. (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов  
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 05.12.2011