

# Идентификация температуры в рабочем пространстве печи по результатам измерений температуры на внешней стенке печи при газовой цементации

Е. А. Медведева

*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II*

milon\_2003@mail.ru

В. В. Цаплева

*Северо-Кавказский федеральный университет*

vtcapleva@ncfu.ru

П. М. Михеева

*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II*

appolinariya.miheeva@gmail.com

В. А. Клешня

*СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*

lera.kleshnia2003@gmail.com

**Аннотация.** В данной работе рассматривается способ определения температуры поверхности деталей в рабочем пространстве печи при газовой цементации стали. Предлагается на основе математической модели распределения тепла в печи и ее стенках выявить функциональную зависимость температуры поверхности подвергаемых цементации деталей от температуры на внешней стенке печи. Актуальность обусловлена необходимостью измерения текущей температуры поверхности деталей для реализации замкнутой системы управления температурным полем и невозможностью установить датчики температуры в пространстве печи.

**Ключевые слова:** температурное поле; цементация стали; датчики температуры; математическая модель

## I. ВВЕДЕНИЕ

Технология цементации стали применяется для тяжело нагруженных деталей машин с целью повышения поверхностной твердости, износостойкости и усталостной прочности при сохранении высокой вязкости сердцевины. Газовая цементация – один из наиболее распространенных процессов химико-термической обработки деталей, применяется для массовой обработки деталей в шахтных и камерных печах. В ее основе лежит диффузия углерода к поверхности деталей при температуре 850–950°C. [1]

Обработка должна осуществляться при заданной температуре, определенной составом стали и толщиной упрочненного слоя, поэтому необходимо поддерживать заданную температуру на поверхности деталей.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ

Одна из основных проблем технологического процесса газовой цементации стали заключается в неоднородности температурного поля печи, что вызвано различной толщиной футеровки и нарушением герметичности шахтной печи в процессе эксплуатации [2,3]. Внешние возмущения негативно влияют на качество процесса [4], приводят к несоответствию температурных условий процесса предъявляемым

технологическим требованиям и, как следствие, к браку готовой продукции и энергетическим потерям [5].

Цель исследований – поддержание заданной температуры в пространственно-распределенных объектах, что достигается за счет разработки замкнутой системы управления с распределенным высокоточным регулятором. Для реализации такой системы необходимо получать данные о температуре поверхности деталей с датчиков в реальном времени.

Возникает проблема определения текущей температуры, так как внутри печи она может достигать 1200–1300°C, поэтому невозможно поместить холодный спай и провода термопары непосредственно в рабочее пространство: при их нагреве происходит искажение данных. Монтаж высокотемпературных датчиков с выводом наружу через стенку более дорогостоящ, требуются дополнительные работы по внесению изменений в конструкцию, нарушается изоляция печи.

Современные реализации АСУ газовой цементацией основаны на применении двух- и трехступенчатого регулирования температуры, ПИД-законов регулирования для сосредоточенных систем управления [6]. Выделен недостаток: для контроля углеродного потенциала и температуры используется кислородный зонд с термопарой типа К, что не позволяет контролировать состояние всего температурного поля печи [7].

На предприятиях в Германии, Корею применяются решения с использованием методов прогнозирования среднемаховой температуры материала и центра заготовки [8], с расчетом внешнего и внутреннего теплообмена [9].

Разработка [7] системы мониторинга температурного поля в металлургических печах позволила определять точную температуру заготовок в реальном времени. Апробация системы выявила множество недостатков печей и существующих систем контроля. Возможный недостаток системы – большие габариты контейнера с элементами системы, что затрудняет использование в печах малого объема.

Предлагается метод измерения температурного поля шахтной печи для газовой цементации стали. Метод основан на выявлении зависимости температуры поверхности детали от температуры внешней стенки печи ( $T_{дет}(T_{дат})$ ) с помощью математического и компьютерного моделирования среды «деталь-газ-нагреватели-теплоизоляция-воздух». Модели систем с распределенными параметрами позволяют решать задачи в различных областях промышленности – горном деле [10], нефтегазовой отрасли [11–13], извлечении гидроминеральных ресурсов [14–16], энергетике [17, 18], металлургии [19, 20].

Преимуществами являются:

- простота реализации, так как нет необходимости приобретать дорогое оборудование, зависимость будет реализована программно в уже существующем алгоритме управления;
- простота монтажа датчиков, их можно установить на любую глубину футеровки и на любой высоте;
- возможность установить датчики в соответствии с расположением нагревателей по высоте, что позволяет сохранить логику формирования входного воздействия распределенным высокоточным регулятором.

Цель работы – исследовать функциональную зависимость  $T_{дет}(T_{дат})$  для возможности реализации системы управления с обратной связью с помощью расположения датчиков температуры на поверхности печи.

Объект исследования – процесс распределения тепла в шахтной печи для газовой цементации стали и зависимость  $T_{дет}(T_{дат})$ .

### III. МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ

Проведение математического моделирования объекта исследования объясняется сложностью проведения экспериментов на реальном объекте, так как это отличается дороговизной и повышенной опасностью. Математическое моделирование процесса нагрева шахтной печи основано на дифференциальном уравнении (1) теплопроводности в частных производных, где  $\nabla^2$  – оператор Лапласа в декартовой системе координат,  $a$  – коэффициент температуропроводности.

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \nabla^2 T \quad (1)$$

Для построения математической модели нагрева печи (рис. 1) были определены начальные, граничные, геометрические и физические условия объекта.

Так как печь имеет форму цилиндра, то для (1) известны координаты  $x, r, \varphi$ . Также учитывались граничные условия и границы раздела сред рабочего пространства и слоев крышки печи с футеровкой.

Для моделирования боковой стенки печи известно уравнение (2), где  $T(x, y, \tau)$  – температурное поле;  $x, y$  – пространственные координаты;  $\tau$  – время.

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

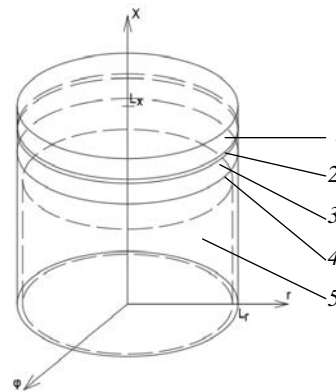


Рис. 1. Трехмерное представление внутреннего пространства печи, где 1 – окружающее пространство (воздух); 2 – крышка печи; 3 – футеровка крышки; 4 – рабочее пространство (газ); 5 – технологическая корзина с деталями

Схема модели стенки представлена на рис. 2. Модель включает в себя 2 границы раздел сред.

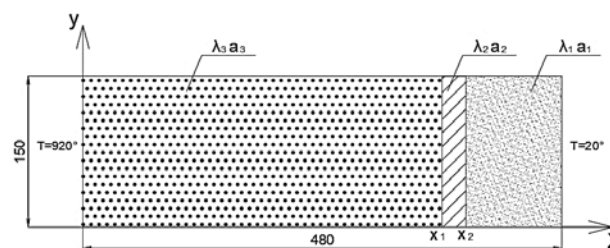


Рис. 2. Двумерное представление боковой стенки печи с границами сред (в разрезе)

Геометрические размеры сред и их теплофизические характеристики приведены в табл. 1. Размеры моделируемого пространства: 480x150 мм. Порядковые номера сред на рис. 2 соответствуют номерам сред в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. ХАРАКТЕРИСТИКИ СВОЙСТВ СРЕД

№	Наименование среды	Температуропроводность $a$ , м <sup>2</sup> /с	Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м <sup>2</sup> град)	Геометрический размер по толщине, м
1	Воздух	0,000021	0,023	0,36
2	Обшивка	0,000014	28	0,024
3	Футеровка	0,00000075	0,21	0,096

Для температурного поля стенки в начальный момент времени известна функция:

$$T(x, y, t_0) = 20^\circ\text{C}.$$

Граничные условия I рода задаются с внутренней и внешней сторон печи как температура нагрева печи и температура воздуха соответственно:

$$T_1(0, y, t) = 920^\circ\text{C}, \quad 0 < y < L_y;$$

$$T_2(x_{n-1}, y, t) = 20^\circ\text{C}, \quad 0 < y < L_y.$$

Граничные условия II рода определяют отсутствие изменения температуры в начальной и конечной точках по оси  $y$ :

$$\frac{\partial T_3(x,0,\tau)}{\partial y} = 0, 0 < x < L_x;$$

$$\frac{\partial T_4(x, y_{n-1}, \tau)}{\partial y} = 0, 0 < x < L_x.$$

Граничные условия IV рода характеризуют особенности протекания процесса на границах раздела сред. Тогда граничные условия IV рода для раздела сред «футеровка – обшивка корпуса печи»:

$$\lambda_3 \frac{\partial T_3(x_1, y, \tau)}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(x_1, y, \tau)}{\partial x},$$

$$T_3(x_1, y, \tau) = T_2(x_1, y, \tau),$$

$$0 < y < L_y, \tau > 0.$$

Уравнения для границы раздела сред «обшивка корпуса печи – воздух»:

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2(x_2, y, \tau)}{\partial x} = \lambda_1 \frac{\partial T_1(x_2, y, \tau)}{\partial x},$$

$$T_2(x_2, y, \tau) = T_1(x_2, y, \tau),$$

$$0 < y < L_y, \tau > 0.$$

В результате компьютерного моделирования процесса нагрева шахтной печи стали получены графики зависимости температуры в точке на поверхности детали и на внешней стенке печи от времени (рис. 3, 4). Входное воздействие для нагрева печи  $T=1100^\circ\text{C}$ . По графикам видно, что температура на внешней стенке печи начинает изменяться не в начальные моменты времени, а с запаздыванием.

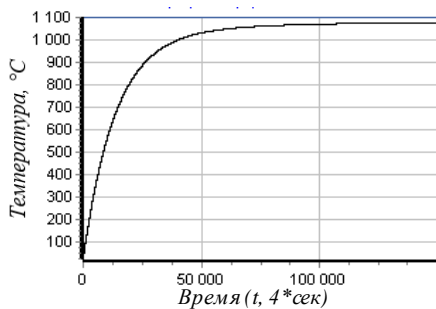


Рис. 3. Зависимость температуры на поверхности детали от времени

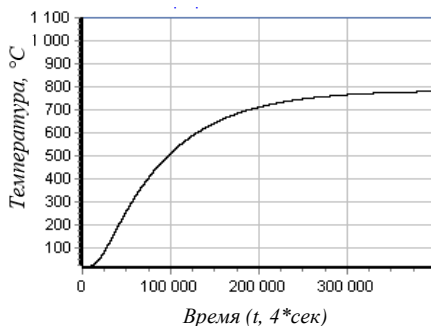


Рис. 4. Зависимость температуры на внешней стенке от времени

Для анализа зависимости определим коэффициент пропорциональности  $k$  (3) – отношение температуры на поверхности детали  $T_{дет}$  к температуре на внешней стенке печи  $T_{дат}$ .

$$k = \frac{T_{дет}}{T_{дат}} \quad (3)$$

Коэффициент  $k$  изменяется нелинейно в зависимости от времени в первый час процесса нагрева (рис. 5), что подтверждает физику процесса, так как стенка печи нагревается медленнее, чем поверхность деталей.

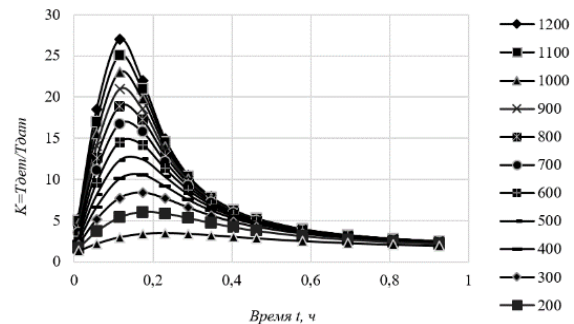


Рис. 5. Зависимость коэффициента пропорциональности от времени.

Функция зависимости  $T_{дет}(T_{дат})$  (рис. 6) имеет линейный характер в установившемся режиме, когда нагрев уже завершен, что происходит после 6 часов работы цикла. Полученный график зависимости в установившемся режиме аппроксимирован как линейная функция (4, 5).

$$T_{дет} = k \cdot T_{дат} - b \quad (4)$$

$$T_{дет} = 1,387 \cdot T_{дат} - 7,75 \quad (5)$$

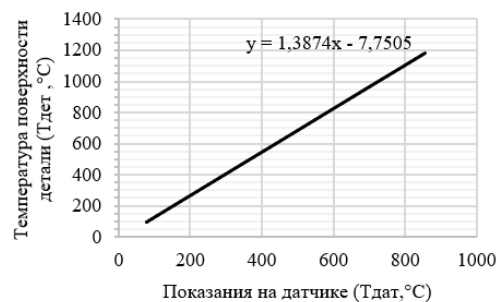


Рис. 6. Зависимость температуры на поверхности детали от показаний на датчике

Для корректного управления нагревом необходимо определить функциональную зависимость в первые 6 часов работы печи.

По рис. 5 можно заметить, что  $k$  сильнее зависит от температуры нагрева в первый час работы. Поэтому невозможно определить одну функцию расчета температуры для первых 6 ч. Необходимо выявить зависимость коэффициентов  $k$  и  $b$  от времени для (4).

Полученные графики зависимостей  $k(t)$  и  $b(t)$  аппроксимированы как степенные функции (6) и (7).

$$k = 0,0036 \cdot t^6 - 0,0856 \cdot t^5 + 0,8072 \cdot t^4 - 3,89 \cdot t^3 + 10,12 \cdot t^2 - 13,655 \cdot t + 9,14 \quad (6)$$

$$b = 28,8 \cdot t^{-1,94} \quad (7)$$

Подставляя текущее время процесса  $t$  в (6) и (7), узнаем коэффициенты  $k$  и  $b$ . Далее, подставляя  $k$ ,  $b$  и текущее показание температуры на датчике в (4), можно рассчитать текущее значение температуры на поверхности детали.

#### IV. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В результате получен расчет зависимости значений на внешней стенке печи и детали от температуры на нагревателях. Подразумевается снятие показаний температуры со стенки печи с помощью термодатчиков и передача данных на контроллер. Преимуществами такой системы являются простота и небольшая себестоимость реализации, так как все вычисления будут производиться за счет ПЛК, уже имеющегося в системе управления.

В процессе анализа результатов проверки соответствия расчетных значений значениям в модели удалось установить, что выведенные функции  $k(t)$  (6) и  $b(t)$  (7) позволяют с большой точностью определить температуру на поверхности детали после времени  $t_{уст}$ , когда достигается установившееся значение температуры на деталях замкнутой системы управления, то есть после 1,7 ч. Однако при интервале времени  $t \in (0; t_{уст})$  нет возможности точно определить зависимость, так как из-за запаздывания по времени разница температур слишком велика.

Наибольшая точность регулирования будет достигнута при определении температуры на поверхности деталей по трем интервалам времени:

- На интервале времени  $t \in (0; t_{уст})$  использовать уже разработанный алгоритм замкнутой системы управления.
- На интервале времени  $t \in (t_{уст}; 6)$  использовать функциональные зависимости (6) и (7), подставляя полученные коэффициенты в (4).
- На интервале времени  $t \in (6; t_{конц})$  использовать функциональную зависимость (5).

Полученная функциональная зависимость температуры на поверхности детали от температуры на датчике имеет погрешность до 0,5%.

Также в дальнейших исследованиях будет рассмотрена возможность определения зависимости с помощью идентификации переходного процесса нагрева внешней стенки печи как аperiodическое звено с запаздыванием в замкнутом контуре управления и сравнение этих методов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Методика прогнозирования результатов цементации легированных сталей / Майсурадзе М.В., Юдин Ю.В., Кукулина А.А., Абакумов К.В. // *Сталь*. 2025. №9. С.36-43.
- [2] Приходько Е.В. Разработка способов контроля процесса разогрева футеровок высокотемпературных агрегатов // *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*. 2020. №13(4). С. 462-472.
- [3] Парамонов А.М. О повышении энергосбережения в кузнечных и термических цехах / А.М. Парамонов, Е.М. Резанов, В.Л. Юша // *Известия Транссиба*. 2022. №1(49). С. 95-101.
- [4] Martirosyan A.V., Martirosyan K.V., Grudyaeva E.K., Chernyshev A.B. (2021). Calculation of the Temperature Maximum Value Access Time at the Observation Point. Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Elconrus 2021, 1014-1018. <https://doi.org/10.1109/ElConRus51938.2021.9396287>
- [5] Pyushin, Y., Golovina, E. Stability of temperature field of the distributed control system (2020) *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 15 (5), pp. 664-668.
- [6] Виленчик Б., Попов В. Автоматические системы управления технологическими процессами газовой цементации // *Жур. СТА* №1, 2012, с. 56-64.
- [7] Использование автономной автоматизированной системы компании Phoenix TM для мониторинга температурного поля нагреваемого металла в металлургических печах / А.А. Улановский, М. Тааке, А.М. Бельский, А.Н. Бурсин, С.И. Чибизова // *Черные металлы*, 2019, с. 54–60.
- [8] Ким А.А., Шатохин К.С. Совершенствование АСУ ТП нагрева металла в методических печах // *Эл. а. УрФУ*, 2022, с. 90-94.
- [9] Ботхен С. Повышение производительности и качества нагрева в результате модернизации системы автоматических печей с шагающими балками / С. Ботхен, К. Нолте, А. Пфанненшмидт // *Черные металлы*, №11, 2004, с. 32-35.
- [10] Sidorenko A.A., Sirenko Y.G., Sidorenko S.A. (2019). An assessment of multiple seam stress conditions using a 3-D numerical modelling approach. *Journal of Physics Conference Series*, 1333(3), Article 032078. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1333/3/032078>.
- [11] Kleshnia V.A., Kukharova T.V., Fedosov I.S., Tsapleva V.V. (2025). Modeling of Pressure Control System in Oil Wells Accounting for Reservoir Non-Homogeneity. Proceedings of 2025 6th International Conference on Control in Technical Systems Cts 2025, 64-67. <https://doi.org/10.1109/CTS67336.2025.11196275>.
- [12] Martirosyan A.V., Romashin D.V. (2026). Investigation of the Control Strategies for Enhancing the Efficiency of Natural Gas Separation and Purification Processes. *Processes*, 14(4), Article 700. <https://doi.org/10.3390/pr14040700>.
- [13] Kukharova T., Maltsev P., Abramkin S., Novozhilov I. (2026). Analysis of Modern Challenges and Technological Solutions in Natural Gas Production at Fields with Complex Geological Structure: A Review. *Resources*, 15(2), Article 32. <https://doi.org/10.3390/resources15020032>.
- [14] Asadulagi, M.M. The Use of Distributed and Lumped Type Controllers for the Hydro-lithospheric Process Control System of the Kislovodskoye Field / M.M. Asadulagi, O.S. Vasilkov // Proceedings of 2019 3rd International Conference on Control in Technical Systems, CTS 2019, St. Petersburg: IEEE Inc., 2019. – P. 7-10. – <https://doi.org/10.1109/CTS48763.2019.8973272>.
- [15] Golovina, E.I. (2017). Strategic issues groundwater extraction management in Russia. *Journal of Ecological Engineering*, 18(3), 13-21. <https://doi.org/10.12911/22998993/70202>
- [16] Martirosyan A.V., Martirosyan K.V., Mir-Amal A.M., Chernyshev A.B. (2022). Assessment of a Hydrogeological Object's Distributed Control System Stability. Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Elconrus 2022, 768-771. <https://doi.org/10.1109/ElConRus54750.2022.9755601>
- [17] Afanaseva O., Pervukhin D., Afanasyev M., Khatrusov A. (2026). Assessment of the State and Development Trends of Centrifugal Compressors for Marine Power Plants. *Energies*, 19(4), Article 991. <https://doi.org/10.3390/en19040991>.
- [18] Afanaseva O., Pervukhin D., Khatrusov A. (2025). Vibration-Based Condition Monitoring of Diesel Engines in Industrial Energy Applications: A Scoping Review. *Energies*, 18(21), Article 5717. <https://doi.org/10.3390/en18215717>.
- [19] Pyushin, Y.V., Boronko, E.A. Development of a Mathematical Model of the Electromagnetic Field Formation Process Based on System Analysis Methods. *Mathematics* 2026, 14, 399. <https://doi.org/10.3390/math14030399>.
- [20] Fetisov V.G., Nikolaev A.K., Lykov Y.V., Duchnevich, L.N., Mathematical modeling of non-stationary gas flow in gas pipeline IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018.2.pp.1-6.

