

## Выравнивание перепада температур в зоне обжига туннельной печи

*В.Б. Бируля*

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет*

**Аннотация:** В статье описаны методы выравнивания перепадов температур в материале после предварительного нагрева в зоне подогрева. Разработан режим изменения температур материала и печного канала. Установлены оптимальная длина зоны обжига и время прохода материала, при которых поддерживается постоянная температура на поверхности материала. Приведены величины для оптимизации основных параметров.

**Ключевые слова:** обжиг, туннельная печь, выравнивание температур.

В настоящее время остро стоит вопрос импортозамещения качественных строительных материалов. Особенность исторического пути развития производства строительных материалов связана с быстрым переходом от доступного недорого сырья к доступным готовым импортным производственным линиям [1]. А затем - периодом санкций, и отказа в поставках технологий. Решить проблему возможно разработкой методов применения отечественного надежного тепломеханического оборудования в соответствии с современным опытом и возможностями автоматики. Задача может быть решена путем усовершенствования технологических процессов, в частности обжига, который является наиболее энергоемким и влияющим на качество изделий [2,3]. Процесс обжига проводят преимущественно в туннельных печах, оснащенных газогорелочными устройствами, работа которых влияет на интенсификацию теплообмена в печном канале. Применение разработанной методики позволит значительно повысить качество обжига и производительность, и снизить удельный расход топлива на обжиг.

В зарубежной литературе разрабатывается множество способов интенсификации теплообмена, представляющих более теоретический характер и без технико-экономического обоснования, вызывающих сомнения из-за перегруженности системы [4].

Цель исследования заключается в определении точных тепловых режимов работы туннельной печи, позволяющих в дальнейшем спроектировать систему газоснабжения. Это позволит добиться экономии топлива и повысить качество обжигаемой продукции. Необходимый режим, обеспечивающий тепловую обработку изделий, задается графиком распределения температур, требуемым по технологии производства стройкерамики.

Задача состоит в разработке методики расчета температурного перепада (получение максимальной изотермичности объема) применительно к автоматизированной системе газоснабжения конвейерной туннельной печи. Также преимуществом, связанным с организацией выравнивания температур в рабочем объеме, будет снижение температуры уходящих газов при использовании топлива с высокой жаропроизводительной способностью в низкотемпературном процессе.

Объектом исследования является туннельная печь конвейерной линии по производству керамической плитки [5]. Схема тепловых зон туннельной печи системы делится на 3 зоны: 1 – зона подогрева, 2 – обжига, 3 – охлаждения (рис. 1–3). Каждый из этих периодов характеризуется определенными физико-химическими процессами, которые проходят в керамической массе. Необходимо придерживаться четких требований к температурному режиму и продолжительности обжига на каждой позиции печи. От правильности этих параметров зависят конечные свойства изделий.

Материал выходит из зоны подогрева и попадает в зону выравнивания с температурами поверхности  $v_{moII}$  и нижней поверхности  $v_{mmII}$ , средней температурой средней  $v_{mII}$ , удельной энтальпией  $h_{mII}$  и величиной разности температур  $\Delta v_{mII}$ . Порядок индекса *II* – указывает на параметры в сечении начала зоны выравнивания температур, *III* – в сечении конца зоны выравнивания температур (рис. 1–3).

---

Распределение температуры по толщине  $v_{mII}$  представляет собой параболы с разными степенями. Рассмотрим разность температур, связанную с теплопроводностью в толще материала и неравномерностью нагрева. Длина зоны выравнивания  $L_g$ , либо время установления температуры в канале определяется при условии, что материал будет иметь при выходе требуемую конечную температуру поверхности  $v_{moII}$  и разность температур изменится от  $\Delta v_{mII}$  на требуемую меньшую  $\Delta v_{mIII} = v_{moIII} - v_{mmIII}$ , а температурный режим в материале будет соответствовать при средней температуре  $v_{mIII}$  и средней энтальпии материала  $h_{mIII}$ .

Рассмотрим возможные методы выравнивания температурных перепадов:

а) Выравнивание режима при неизменной энтальпии материала, т.е.  $h_{mII} = const$ , а это означает, что и средняя температура  $v_{mII} = v_{mIII} = const$  в процессе выравнивания постоянна. Материал не принимает своей поверхностью никакого теплотока, т.е.  $q=0$ . В противоположность следующему способу здесь можно подводить теплоту почти всех продуктов сгорания, необходимых для процесса нагрева вблизи сечения II, и лишь меньшую часть продуктов подвести в зону выравнивания и отвести их через охлаждающую зону. Так как известна средняя температура материала в конце зоны нагрева  $v_{mII}$ , то можем с её помощью найти все величины в зоне нагрева, включая и её длину  $L_g$  (рис. 1).

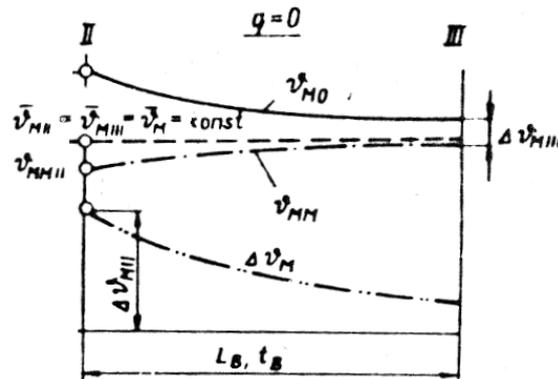


Рис. 1. – Способ выравнивания температур в зоне обжига при постоянной энтальпии материала

б) При постоянной температуре поверхности материала, т.е.  $v_{MOII} = v_{MOIII} = const$  (рис. 2).

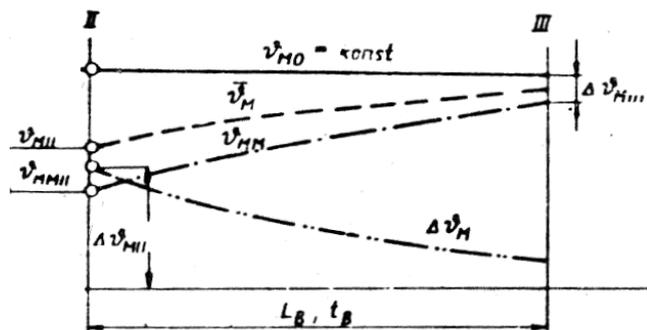


Рис. 2. – Способ выравнивания температур в зоне обжига при постоянной температуре поверхности материала

в) При постоянной температуре печи  $v_{oII} = v_{oIII} = const$  (рис. 3).

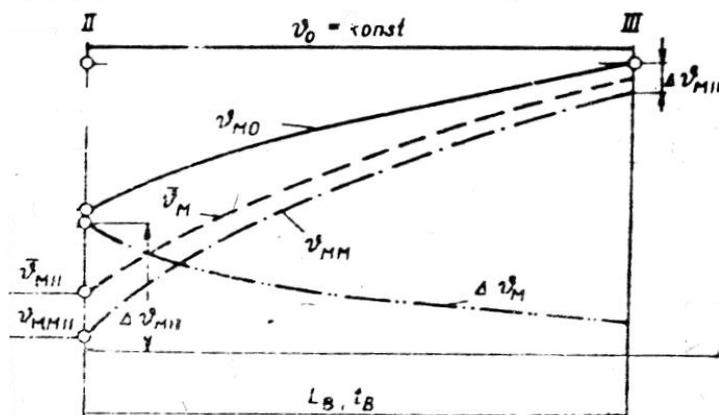


Рис. 3. – Способ выравнивания температур в зоне обжига при постоянной температуре газовой среды печи

Температура печи падает при способах а) и б), и постоянна в способе в). В способах б) и в) уменьшается плотность теплового потока на поверхность материала.

В способе а) материал поступает в зону выравнивания по сравнению с остальными способами с наивысшими температурами, а в способе в) с наинизшими. Это соответствует величине начальной энтальпии материала, пропорциональной средней температуре. Поэтому и её прирост  $h_m$  в случае в) – наибольший, а в случае а) – нулевой. Как можно видеть, суммарное время обжига, т.е. нагрева и выравнивания (или общая длина рабочего пространства печи) разные: в случае а) – самое короткое и в случае в) – самое длинное. Причем в таком же соотношении находятся и расходы топлива. Температура продуктов сгорания в сечении  $II$  в случае а) наивысшая, в случае в) наинизшая. Первый способ а) отличается перегревом внешних слоев материала. Это редко учитывается в связи с технологией обжига в туннельной печи. С точки зрения управления режимом нагрева, т.е. температурой печи в зоне выравнивания, самым простым способом является случай в).

Теперь найдем важные зависимости параметров, описывающие тепловой режим в печи, необходимый для организации подачи топлива и движения материала. В дальнейшем в первую очередь опишем режимы температур и определим длины зон выравнивания температур и нагрева для случаев б) и в).

### **Выравнивание температурного перепада при постоянной температуре поверхности материала $v_{mo}$**

По существу, это нагрев в граничных условиях первого рода при  $v_{moII} = v_{moIII}$  с начальным параболическим распределением температуры. При условии, что конечная температура поверхности материала из зоны нагрева равна конечной температуре поверхности в зоне обжига, можем установить с

---

помощью уравнений все величины, соответствующие сечению  $II$ . в особенности длину  $L_B$ , перепад температур  $\Delta v_{MII} = v_{MOII} - v_{MMII}$  в материале в начале выравнивания. Эта величина связана с тепловой оптимизацией технических и геометрических параметров печи.

Количественно определить важный коэффициент выравнивания [6], который связан с плотностью теплового потока в конце выравнивания:

$$\delta = \frac{\square v_{MII}}{\square v_{MMII}} = \frac{v_{MOII} - v_{MMII}}{v_{MII} - v_{MMII}} = \frac{q_{III} S}{\square v_{MII} \lambda_M} = \Phi(Fo) , \quad (1)$$

Зависимость между  $\delta$  и критерием Фурье  $Fo = at/S^2$  можно использовать для поиска температур в материале  $v_M$  и нижней ненагретой поверхности  $v_{MM}$ . Для  $Fo > 0,06$ :

$$Fo = 0,405 \ln\left(\frac{1,03}{\delta}\right) , \quad (2)$$

Причем время прохода через зону составляет:

Плотность теплового потока  $q$  при выравнивании:

$$q = \frac{2\lambda v_M}{S} = q_s + q_k , \text{ Дж/кг} \quad (3)$$

Соответствующая средняя температура материала

$$v_{MII} = v_{MOII} - \frac{2}{3} \square v_{MII} , \text{ }^\circ\text{C} \quad (4)$$

С помощью  $q$  устанавливается изменение температур в печи  $v_o$ , продуктов сгорания  $v_G$ , стен  $v_w$  и нижней поверхности материала  $v_{MM}$  или общего коэффициента теплопередачи  $\alpha$  в произвольном сечении. Для предварительного расчета в диапазоне температур продуктов сгорания 1000 - 1800 °C для пластины можно приблизительно принять  $q_k = (0,1-0,5) q_s$  [7].

Время выравнивания возрастает прямо пропорционально соответствующему значению критерия Фурье. Расчет изменения температур в зоне выравнивания и подогрева начинается с поступления материала из зоны обжига, где известна её конечная температура. Для этого прежде всего

необходимо установить среднюю плотность теплового потока следующим образом:

$$q_B = \frac{q_{II} - q_{III}}{\ln \frac{q_{II}}{q_{III}}}, \text{ Дж/кг} \quad (5)$$

Время выравнивания:

$$t_6 = Fo \frac{S^2}{a} = \frac{B_M S L_B \rho_M}{m_M}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (6)$$

а её длина:

$$L_B = w_M t_B, \text{ м} \quad (7)$$

**Выравнивание температурного перепада при постоянной температуре печи  $v_0$**

Это нагрев в условиях третьего рода, т.е. при постоянной температуре среды с параболическим распределением температуры в материале.

Для решения необходимо определить скорость подачи материала [8]:

$$\omega_M = \frac{m_M}{B_M S \rho_M}, \text{ м/ч} \quad (8)$$

где  $m_M$  – часовая производительность печи, кг/ч;  $B_M$  и  $S$  – толщина и площадь материала, м и м<sup>2</sup>;  $H$  и  $B$  – размеры печного канала, м.

Прежде всего для установления времени прохода  $t_6$ , длины  $L_B$  и режима температур определяется в конце зоны в сечении III плотность теплового потока следующим образом:

$$q_{III} = \frac{2\lambda_M v_{MIII}}{S}, \text{ Вт/м}^2 \quad (9)$$

Так как температура продуктов сгорания обычно изменяется по длине зоны в маленьком диапазоне, то эта величина особенно не отличается. Теперь мы можем вычислить температуру продуктов сгорания следующим образом [9]:

$$v_{GIII} = 100 \sqrt[4]{\frac{q_{SIII}}{c_{GIII}} - \left(\frac{T_{MOIII}}{100}\right)^4} - 273, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10)$$

где  $c_{GIII} = 5,67 \varepsilon_{GIII}$ , Вт/(м<sup>2</sup>К);  $q_{SIII} = q_{III} + q_{кIII}$ , Вт/м<sup>2</sup>

В соответствии с характеристиками определяем плотность теплового потока  $q_{кIII}$  в процентах от  $q_{III}$ . Если расчетная температура отличается от определенной ранее, то это необходимо исправить подбором значений соответствующих  $\varepsilon_{GIII}$  и  $c_{GIII}$ . Температура печи для всей зоны устанавливается до уравнению следующим образом:

$$v_{OIII} = v_{OII} = 100 \sqrt[4]{\frac{q_{SIII}}{c_o} - \left(\frac{T_{MOIII}}{100}\right)^4} - 273, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (11)$$

где  $c_o = 5,67 \varepsilon_{MIII}$

получаем главные величины в сечении III, за исключением подачи топлива. Величины в сечении II, представляющие одновременно и конец нагрева в воне предварительного нагрева, выводим из сечения III. Для этого расчета известна в сечении II только температура печи  $v_{oIII}$ , полученная в (14). Не достает температуры  $v_{MOII}$  и теплоемкости продуктов сгорания  $c_{GII}$ . Для этого необходимо установить главные параметры следующим подходом к решению.

Используя метод регулярных фаз Иванцова Г. П.[10] или номограммы Д. В. Будрина, можно найти безразмерные температуры и по ним вычислить температуры в центре  $v_m$  и на поверхности  $v_{MO}$  и  $v_{MM}$  (в зависимости от  $Fo$  и  $Bi$ ). По безразмерным температурам вычисляются температуры в центре и на поверхности. На вертикальной координате представлена зависимость безразмерной температуры как функция критериев  $Fo$  и  $Bi$ .

$$\frac{v_{MO} - v_o}{v_{MII} - v_o} = \Phi_{MO}(Fo, Bi), \quad (12)$$

$$\frac{v_{MM} - v_o}{v_{MII} - v_o} = \Phi_{MM}(Fo, Bi), \quad (13)$$

### **Заключение**

Разработана методика расчета параметров зоны обжига для выравнивания температурных перепадов в материале из зоны предварительного нагрева. Предложены три варианта возможных способов выравнивания температурных режимов. Описано выравнивание при постоянной температуре поверхности материала и предложен метод для определения температурных режимов, длины зоны и времени прохода. Обоснована оптимизация главных параметров.

### **Литература**

1. Щулькин, Л.П. Модернизация технологической линии по производству керамического кирпича // Инженерный вестник Дона, 2013, № 4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2177](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2177).
2. Нохратян К.А. Сушка и обжиг в промышленности строительной керамики – Москва: Госстройиздат, 1962 – 603 с.
3. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим – Москва: Гостехиздат, 1954 – 408 с.
4. Karimi, H.J., Saidi, M.H. Heat transfer and energy analysis of a pusher type reheating furnace using oxygen enhanced air for combustion. // J. Iron Steel Res. Int. 17, 2010, pp. 12–17. URL: [doi.org/10.1016/S1006-706X\(10\)60079-9](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(10)60079-9).
5. Шкаровский, А.Л., Бируля В.Б. Модернизация туннельных печей для производства стройкерамики с целью снижения расхода теплоносителей // Вестник гражданских инженеров, 2017, № 6. URL: [doi.org/10.23968/1999-5571-2017-14-6-206-212](https://doi.org/10.23968/1999-5571-2017-14-6-206-212).
6. Кейс В.М., Дулькина И.Н. Конвективный тепло- и массообмен Перевод с англ. – Москва: Энергия, 1972 - 446 с.
7. Pongam T., Srisertpol J. and Khomphis V. Manufacturing Process Identification for the Reheating Furnace Walking Hearth Type Using Genetic

Algorithm // International Journal of Modeling and Optimization, 2012 vol. 2, no. 2, pp. 114–118.

8. Масленский, В.В. Экспериментальные исследования и математическое моделирование тепловых процессов на участке дуговой сталеплавильной печи // Инженерный вестник Дона, 2021, № 8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2021/7127.

9. Howell, J.R., Menguc, M.P., Siegel, R. Thermal Radiation Heat Transfer (5th ed.) // CRC Press, 2010. URL: doi.org/10.1201/9781439894552.

10. Ключников, А.Д., Иванцов Г.П. Теплопередача излучением в огнетехнических установках: (Инж. решения задач) – Москва: Энергия, 1970 – 400 с.

### References

1. Shchul'kin, L.P. Inzhenernyy vestnik Dona, 2013, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2177.

2. Nohratjan K.A. Sushka i obzhig v promyshlennosti stroitel'noj keramiki [Drying and firing in the building ceramics industry]. Moskva: Gosstrojizdat, 1962, 603 p.

3. Kondrat'ev G.M. Reguljarnyj teplovoj rezhim [Regular heat regime]. Moskva: Gostehizdat, 1954, 408 p.

4. Karimi, H.J., Saidi, M.H. J. Iron Steel Res. Int. 17, 2010, pp. 12–17. URL: doi.org/10.1016/S1006-706X(10)60079-9.

5. Shkarovskiy, A.L., Birulia V.B. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov, 2017, № 6. URL: doi.org/10.23968/1999-5571-2017-14-6-206-212.

6. Kejs V.M., Dul'kina I.N. Konvektivnyj teplo- i massoobmen [Convective heat and mass transfer]. Moskva: Jenergija, 1972, 446 p.

7. Pongam T., Srisertpol J. and Khomphis V. International Journal of Modeling and Optimization, 2012, vol. 2, no. 2, pp. 114–118. URL: doi.org/10.7763/IJMO.2012.V2.96.



8. Maslenskij, V.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, № 8. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2021/7127>.

9. Howell, J.R., Menguc, M.P., & Siegel, R. Thermal Radiation Heat Transfer (5th ed.). CRC Press. 2010 URL: [doi.org/10.1201/9781439894552](https://doi.org/10.1201/9781439894552).

10. Kljuchnikov, A.D., Ivancov G.P. Teploperedacha izlucheniem v ognetekhnicheskikh ustanovkakh: (Inzh. resheniya zadach) [Heat transfer by radiation in fire-technical installations: (Eng. problem solving)]. Moskva: Jenergija, 1970, 400 p.