

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА НАГРЕВА ЕДИНИЧНОГО КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА

D. LOGVYNYENKO

THE ANALYTICAL STUDIES OF THE PROCESS OF HEATING OF A SINGLE CERAMIC BRICK

Анотация. Виконані аналітичні дослідження процесу нагрівання одиначної керамічної цеглини в тунельній печі. Запропоновано рішення для визначення температурного поля в будь-якому шаблі нагрівання, витримки або охолодження керамічної цегли в тунельних печах.

Ключові слова: цегла, випал, швидкість нагрівання, температура.

Аннотация. Выполнены аналитические исследования процесса нагрева единичного керамического кирпича в туннельной печи. Предложено решение для определения температурного поля в любой ступени нагрева, выдержки или охлаждения керамического кирпича в туннельных печах.

Ключевые слова: кирпич, обжиг, скорость нагрева, температура.

Annotation. The analytical studies of the process of heating of a single ceramic brick in the tunnel kiln are conducted. The solution for determining the temperature field at any stage of heating, holding and cooling of ceramic brick in tunnel kilns is proposed.

Key words: bricks, kiln, heating rate, temperature.

Одной из главных задач при обжиге глиняного кирпича в туннельных печах является интенсификация процесса нагрева. Процесс нагрева характеризуется двумя основными параметрами: температурой и скоростью нагрева. Конечной температурой нагрева является температура обжига, при которой завершается процесс образования «черепка» и кирпич поступает на охлаждение.

Имеющиеся в литературе данные многих исследователей, касающиеся значений температур, при которых происходят физико-химические процессы при сушке, обжиге, охлаждении кирпича, удовлетворительно согласуются между собой, а вот данные по скоростям нагрева до требуемых температур весьма противоречивы.

По данным [1] в процессе нагрева глиняного кирпича до 110°C происходит удаление остаточной формовочной влажности, в пределах температур от 400°C до 500°C удаляется основная масса конституционной влаги, а при температуре 573°C – перерождение β-кварца в α-кварц, связанное с увеличением объема. В период удаления конституционной влаги и перерождения кварца скорость нагрева можно не ограничивать. Однако при температурах 600...800 °C, в зависимости от состава глины, начинается образование жидкой фазы, которая заполняет и стягивает частицы основного материала, вызывая усадку. В интервале 700...1000°C скорость подъема температуры ограничивается допустимым перепадом внутри кирпича, величина которого составляет 80°C [2].

По данным [3] нагрев образцов до 800°C, высушенных предварительно до постоянной массы, является практически безопасным даже при обжиге глин, чувствительных к этому процессу. В период упругих деформаций, примерно до 800...850°C, по данным автора, скорость нагрева кирпича нормального размера, независимо от чувствительности глин к обжигу, в среднем составляет около 300 град/час и колеблется в отдельные периоды для различного сырья в пределах от 150 до 1000°C/час. Наиболее опасным в отношении трещинообразования является последующий период от 800°C до 900°C, связанный с разрушением или деформацией кристаллической решетки и глинистых минералов и значительными структурными изменениями.

Тепловая обработка кирпича в туннельных печах происходит по мере продвижения его вдоль рабочего пространства, которое принято условно разделять на зоны подогрева (досушки), обжига и охлаждения. Тепловой и температурный режимы не изменяются во времени, изменение их происходит по длине печи. В зонах рабочего пространства печи температуры распределяются неравномерно, особенно по высоте. В зоне подогрева, например, перепад температур по высоте может достигать 350°C и выше [4]. Поэтому кирпичи в верхних слоях садки нагреваются быстрее, чем в нижних слоях.

Температурные перепады наблюдаются не только в садке в целом, но и в каждом кирпиче.

Согласно закону теплопроводности тепловой поток, подведенный к поверхности кирпича, нагревает поверхностные слои быстрее, чем внутренние. Возникающий по толщине кирпича перепад температур зависит от скорости нагрева поверхности и теплофизических свойств материала кирпича. С увеличением скорости нагрева неравномерность нагрева по сечению кирпича увеличивается. Увеличивается при этом и величина внутренних напряжений, которые могут вызывать трещины и деформацию кирпича. Опасность разрушения возрастает и в интервале температур, в котором происходят структурные превращения, сопровождающиеся изменением объема. Поэтому основным параметром при выборе рационального режима тепловой обработки кирпича является максимально допустимая скорость нагрева его до технологически заданной температуры. Критерием при этом является максимально допустимая разность температур в кирпиче. Она зависит от физических свойств материала кирпича и не зависит от его размеров. Эта величина характеризует чувствительность материала кирпича к нагреву и определяется экспериментальным путём. По данным [5] значения её для некоторых глин приведены в табл. 1.

Таблица 1

Допустимые перепады температур в массе при обжиге

Наименование	Нагрев, °С			Охлаждение, °С		
	100...700	700...1000	1000...1200	1200...1000	1000...850	850...100
Киевская спондиловая глина	110	85	–	–	30	125
Часовая глина	135	75	70	20	100	130
Часовая глина 60% и часовая шамот 40%	120	85	80	30	125	140

Величина допустимой скорости нагрева зависит также от условий нагрева кирпича в садке. При несимметричном нагреве, т.е. нагреве с неодинаковыми условиями теплообмена относительно кирпича, допустимый перепад температур достигается при более низких значениях скорости нагрева по сравнению с симметричным нагревом, при котором она имеет максимальное значение.

Поэтому, наряду с исследованиями, направленными на повышение равномерности нагрева садки в целом, представляет интерес определение допустимых перепадов, а, следовательно, и допустимых скоростей нагрева единичного кирпича как при симметричном, так и при несимметричном нагревах.

Необходимо провести аналитические исследования процесса нагрева единичного кирпича с дальнейшей проверкой и уточнением полученных данных при экспериментальном нагреве образцов кирпичей из глин различных месторождений.

Рассмотрим двухсторонний симметричный нагрев кирпича при линейном изменении температуры поверхности, что наиболее близко соответствует нагреву его в туннельных печах.

Принимая во внимание, что поверхность узких граней стандартного одинарного кирпича составляет 44% от суммарной его поверхности, причём до 50% поверхности узких граней в обычной печной садке бывает закрыто, для расчёта можно воспользоваться решением уравнения теплопроводности для нагрева неограниченной пластины при линейном изменении температуры на поверхности [6]. Если учесть, что нагрев кирпича в туннельной печи производят таким образом, что его скорости задаются в определенных интервалах температур исходя из допустимых перепадов по толщине, то целесообразно рассмотреть многоступенчатый режим нагрева, при котором изменение температуры на поверхности происходит по ломаной линии, состоящей из прямолинейных участков, тем более, что любую температурную кривую нагрева можно заменить ломаной с прямолинейными отрезками.

Решение уравнения теплопроводности при линейном изменении температуры на поверхности для многоступенчатого нагрева имеет вид [6]:

- для первой ступени нагрева

$$t = C_1 \cdot \tau + \sum_{l=1}^{\infty} A_{ll}(\tau) \cos \delta_l \cdot \frac{x}{S}, \tag{1}$$

где $A_{ll}(\tau) = -\frac{C_1 \cdot S^2}{a} \cdot \frac{2 \cdot (-1)^{l+1}}{\delta_l^3} \cdot \left(1 - e^{-\delta_l^2 \cdot \frac{a \cdot \tau}{S^2}} \right), \tag{2}$

$$\delta_l = \frac{2l-1}{2} \cdot \pi \quad (l=1, 2, 3);$$

- для второй степени нагрева

$$t = C_1 \cdot \tau_1 + C_2 \cdot (\tau - \tau_1) - \frac{C_1 \cdot S^2}{a} \cdot \sum M_l \cdot \left(1 - e^{-\delta_l^2 \frac{a\tau_1}{S^2}} \right) e^{-\delta_l^2 \frac{a(\tau-\tau_1)}{S^2}} - \frac{C_2 \cdot S^2}{a} \cdot \sum M_l \cdot \left(1 - e^{-\delta_l^2 \frac{a(\tau-\tau_1)}{S^2}} \right), \quad (3)$$

где $M_l = \frac{2 \cdot (-1)^{l+1}}{\delta_l^3} \cdot \cos \delta_l \cdot \frac{x}{S};$

- для m -й степени нагрева

$$t = t_{II} + \frac{C_m \cdot S^2}{2a} \cdot \left(\frac{x^2}{S^2} - 1 \right) + \frac{S^2}{a} \cdot \sum_{l=1}^{\infty} M_l \cdot \left[C_1 \cdot e^{-\delta_l^2 \frac{a\tau}{S^2}} + (C_2 - C_1) \cdot e^{-\delta_l^2 \frac{a(\tau-\tau_1)}{S^2}} + \dots \right] + (C_m - C_{m-1}) \cdot e^{-\delta_l^2 \frac{a}{S^2} \left(\tau - \sum_{e=1}^{m-1} \tau_e \right)}, \quad (4)$$

или $t = t_{II} + \frac{C_m \cdot S^2}{2a} \cdot \left(\frac{x^2}{S^2} - 1 \right) + \frac{S^2}{a} \cdot [C_1 \cdot \Phi^1 + (C_2 - C_1) \cdot \Phi^{11} + \dots + (C_m - C_{m-1}) \cdot \Phi^m], \quad (5)$

где $t_{II} = C_1 \cdot \tau_1 + C_2 \cdot \tau_2 + \dots + C_m \cdot \left(\tau - \sum_{e=1}^{m-1} \tau_e \right).$

В этих решениях:

t_{II} – температура поверхности, °С;

C_1, C_2, \dots, C_m – скорости нагрева в первой, второй, ..., m -ой степени;

x – размер по толщине кирпича до точки, в которой определяется температура, м;

a – коэффициент температуропроводности материала кирпича, м²/час;

$\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_i$ – соответственно общее время нагрева, промежутки времени, час;

$\frac{a \cdot \tau}{S^2}$ – критерий Фурье;

S – расчётная толщина кирпича (для двустороннего симметричного нагрева равна половине толщины кирпича), м.

В решении (5) количество членов, входящих в сумму бесконечного ряда, равно числу ступеней нагрева. Каждый из членов является произведением разностей скорости нагрева в данном и предыдущем участках и функции Φ , которая определяется по зависимостям для одноступенчатого нагрева для всего времени от начала данного участка [6].

Принимая во внимание известные данные, проанализирован двуступенчатый, по скорости, нагрев кирпича. В первой степени температура поверхности широких граней изменялась от температуры 100°С (условно принятой для конца досушки кирпича в туннельной печи) до 700°С, во второй – от 700°С до конечной температуры обжига, равной 950°С. На рис. 1 представлены графики расчета двустороннего симметричного нагрева полнотелого кирпича размером 250×120×65 мм при двух реальных для нагрева глиняного кирпича значениях скорости нагрева, 300°С/час и 200°С/час.

Режим нагрева соответствует кривой тп. Кривая t_2 характеризует температуру среды в печи. Расчетная продолжительность нагрева составила 195 минут, из них – 120 минут со скоростью 300 град/час от начальной температуры 100°С до температуры поверхности 700°С, 75 минут – со скоростью 200 град/час в интервале температур нагрева кирпича 700...950°С. При этом конечная температура t_2 составила 1080°С. При скорости нагрева 300 град/час максимальный перепад температуры между поверхностью и средним сечением кирпича составил 120°С. Перепад температуры между поверхностью и центром кирпича в конце нагрева составил 72°С. Это указывает на необходимость проведения выдержки в конце каждого периода нагрева для выравнивания температуры по толщине кирпича и снятия температурных напряжений. График

изменения разности температур представлен на рис. 2.

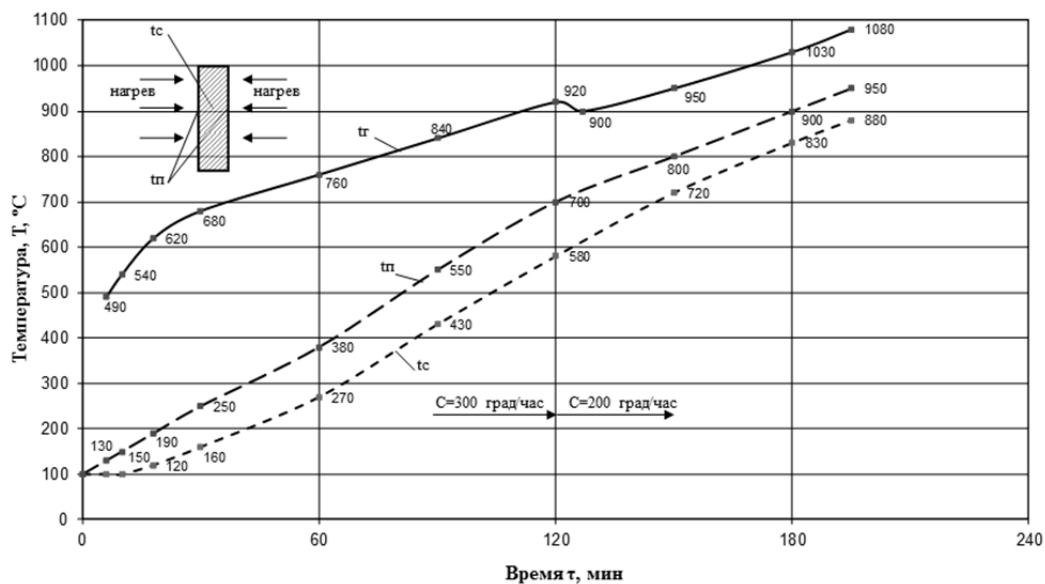


Рис. 1. Нагрев двусторонний симметричный полностью кирпич толщиной 65 мм при линейном изменении температуры поверхности со скоростью нагрева 300°C/час от 100 до 700°C и со скоростью 200°C/час от 700 до 950°C

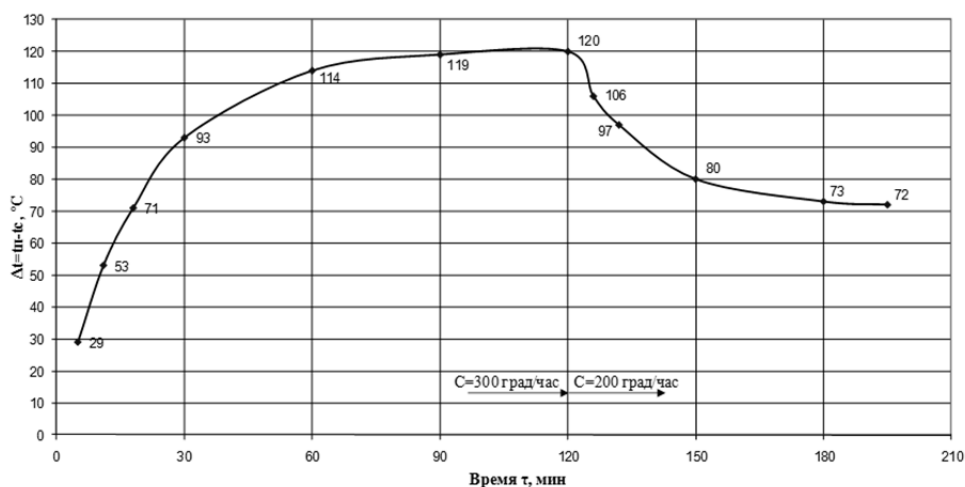


Рис. 2. Изменение разности температур поверхности и середины кирпича толщиной 65 мм при двустороннем симметричном двухступенчатом нагреве со скоростью 300°C/час от 100 до 700°C и со скоростью 200°C/час от 700 до 950°C

При линейном изменении температуры поверхности и при неизменном среднем значении коэффициента температуропроводности разность температур поверхности t_n и середины t_c во время нагрева увеличивается, пока не достигнет наибольшего значения Δt_m , которое далее при значениях $F_0 > 1$ не меняется. Эта максимальная разность температур прямо пропорциональна скорости нагрева, квадрату толщины и обратно пропорциональна коэффициенту температуропроводности и практически не зависит от характера нагрева в первой ступени:

$$\Delta t_m = \frac{C \cdot S^2}{2a} \quad (6)$$

Истинная зависимость λ , a , C_p огнеупорных материалов от температуры с учётом эндо- и экзотермических эффектов сложна. Для решения теплофизических задач в целях упрощения обычно принимается прямолинейная зависимость их значений от температуры, что достаточно хорошо совпадает с экспериментальными данными. В указанном решении приняты постоянные

значения теплофизических свойств нагреваемого материала.

На рис. 3 представлены значения максимального перепада температуры по толщине кирпича для глины с разными коэффициентами теплопроводности для двух температурных диапазонов: $0,00132 \text{ м}^2/\text{час}$ (кривая 1) и $0,00158 \text{ м}^2/\text{час}$ (кривая 2). Сравнение кривых показывает, что с увеличением коэффициента теплопроводности уменьшается максимально допустимый температурный перепад по толщине кирпича и с увеличением скорости нагрева это отличие возрастает.

Этот результат показывает необходимость разработки индивидуальных режимов обжига для разных типов глины и, следовательно, ограничивает возможность применения типовых проектов агрегатов.

Расчётные данные, приведенные на вышепредставленных графиках, позволяют выбрать скорость нагрева в зависимости от допустимого перепада температур по толщине полнотелого кирпича. Можно сделать вывод о том, что для указанных в таблице 1 глины при допустимом температурном перепаде $110...135^\circ\text{C}$ в интервале изменения температуры $100...700^\circ\text{C}$ и $75...85^\circ\text{C}$ в интервале $700...950^\circ\text{C}$ допустимая скорость нагрева не должна превышать $275...335 \text{ град}/\text{час}$ и $220...225 \text{ град}/\text{час}$ соответственно.

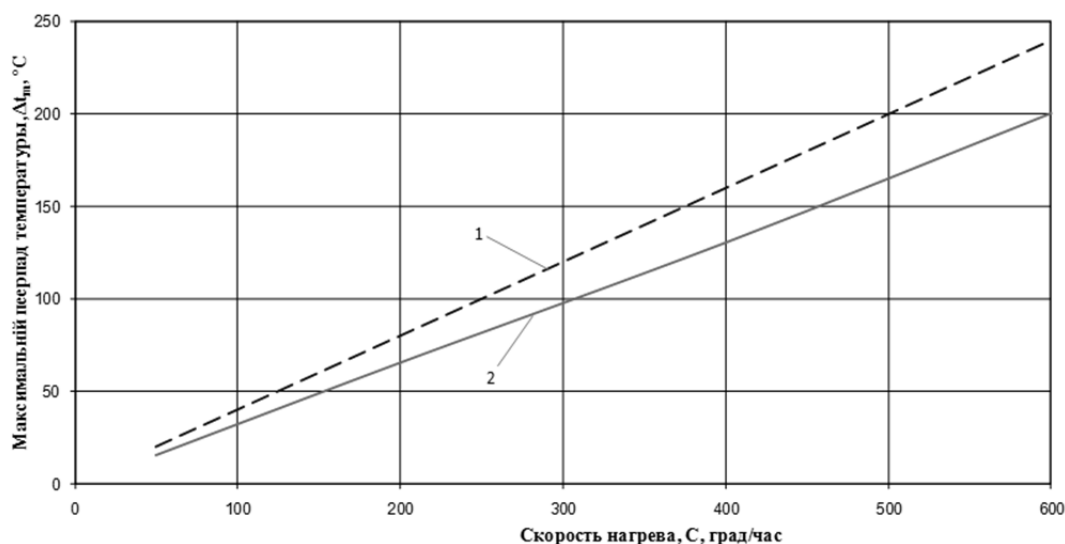


Рис. 3. Зависимость максимального перепада температур по толщине полнотелого кирпича от скорости нагрева в области регулярного режима нагрева при $F_0 > 1$:

1 – в интервале температур $100...700^\circ\text{C}$, $a=0,00132 \text{ м}^2/\text{ч}$;

2 – то же $700...950^\circ\text{C}$, $a=0,00158 \text{ м}^2/\text{ч}$

Выводы

1. Предложенное решение позволяет определять температурное поле в теле кирпича на любой ступени нагрева, выдержки или охлаждения.
2. С увеличением коэффициента теплопроводности глины уменьшается максимально допустимый температурный перепад по толщине кирпича и с увеличением скорости нагрева это отличие возрастает.
3. На основании предложенного решения может быть определена допустимая скорость нагрева для каждого конкретного типа глины.
4. С увеличением скорости нагрева возрастает перепад температуры по толщине кирпича, что свидетельствует о необходимости обязательной выдержки при смене скорости нагрева.
5. Результаты аналитического расчета показывают необходимость выполнения индивидуальных проектов туннельных печей для каждого типа глинистого сырья.

Литература

1. Левченко П.В. Расчёты печей и сушил силикатной промышленности. – М.: Высшая шк., 1968. – 367 с.
2. Гинзбург Д.Б. и др. Печи и сушила силикатной промышленности. –М.: Промстройиздат, 1963. –305с.

3. Лундина М.Г., Беренштейн П. И. Блох Г. С. Производство кирпича методом полусухого прессования. М.: ГИЛСАСМ. 1958. – 158 с.
4. Нохратян К. А. Сушка и обжиг в промышленности строительной керамики. М. Госстройиздат – 1962. – С. 602.
5. Гинзбург Д.Б. и др. Теплотехнические расчёты установок силикатной промышленности. Промстройиздат, 1950. – 360 с.
6. Тайц Н.Ю. Технология нагрева стали. Изд. 2-е., испр. и доп. М. «Металлургиздат» – 1962. 567с.
7. Дослідження та розробка методів інтенсифікації процесів тепло- та масообміну в теплових агрегатах. Звіт відділу проблем промислової теплотехніки Інституту газу НАНУ за НДР №293В.