

# Переработка сырья и ресурсосбережение

УДК 666.3.046.4:62-533.6

## Экспериментальное исследование режимов обжига кирпича полусухого прессования из сырья Чечельницкого месторождения

*Логвиненко Д.М.<sup>1</sup>, Пилипенко Р.А.<sup>1</sup>, Пикашов В.С.<sup>1</sup>,  
Пилипенко А.В.<sup>1</sup>, Почупайло В.В.<sup>2</sup>, Олейник Е.Г.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> *Институт газа НАН Украины, Киев*

<sup>2</sup> *Киевский национальный университет строительства и архитектуры*

<sup>3</sup> *Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев*

Выполнены исследования ускоренных режимов обжига образцов пористого (13,6 %) кирпича полусухого прессования из глинистого сырья Чечельницкого месторождения. Остаточная относительная влажность кирпича-сырца составляла до 4,5 %, температура загрузки печи — 200 °С, температура обжига — 1000–1050 °С. Исследовано влияние этих параметров на качество кирпича и возможность проведения ускоренных режимов обжига кирпича из указанного сырья.

**Ключевые слова:** кирпич, обжиг, остаточная влажность, температура обжига, продолжительность обжига.

Виконано дослідження прискорених режимів випалу зразків порожнистої (13,6 %) цегли напівсухого пресування з глинистої сировини Чечельницького родовища. Залишкова відносна вологість цегли-сирця становила до 4,5 %, температура печі при завантаженні — 200 °С, температура випалу — 1000–1050 °С. Досліджено вплив цих параметрів на якість цегли та можливість проведення прискорених режимів випалу із зазначеної сировини.

**Ключові слова:** цегла, випал, залишкова вологість, температура, витривалість випалу.

Общие тенденции интенсификации производства строительного керамического кирпича, уменьшения удельных затрат топлива и энергии на его производство определяют актуальность исследований, направленных на ускорение процессов сушки (досушки) и обжига кирпича [1].

Режимы сушки и обжига керамического кирпича определяются физико-химическими свойствами сырья, из которого формируется глина, способом формования, типом и конструкцией агрегатов, где эти процессы происходят [2]. Украина имеет большое разнообразие место-

рождений глинистого сырья, и обычно каждый кирпичный завод использует в качестве базовой составляющей формовочной массы глину местного месторождения. Поэтому для каждого производства необходимы детальное исследование и разработка индивидуальных режимов сушки и обжига, внесения соответствующих изменений в конструкции агрегатов.

В Институте газа НАН Украины выполняются научно-исследовательские работы по интенсификации режимов сушки и обжига керамического кирпича в туннельных печах. В со-

трудничестве с Киевским национальным университетом строительства и архитектуры проводятся работы по исследованию сушильных и обжиговых свойств глинистого сырья, разработке ускоренных режимов сушки и обжига.

Обычно кирпич-сырец пластического или полусухого прессования поступает на обжиг в печь (туннельную, кольцевую или камерную) после сушки (принудительной или естественной) с относительной остаточной влажностью, иногда до 10 %. В лучшем случае эта остаточная влажность близка к равновесной (до 2–4 %), при этом температура кирпича-сырца при загрузке в печь не превышает 100–120 °С. Для ускорения процессов досушки и обжига важным является увеличение этой температуры до 200 °С и увеличение скорости нагрева кирпича-сырца.

С целью определения влияния этих факторов на качество кирпича была проведена серия опытов по исследованию режимов обжига заранее подсушенных до равновесной относительной влажности натурных образцов кирпича полусухого прессования из глины Чечельницкого месторождения (Винницкая обл.) при температуре садки 200 °С и конечной температуре обжига 1000 и 1050 °С. Глина этого месторождения является гидрослюдистой и высокочувствительной к сушке [5].

Химический состав глины Чечельницкого месторождения, % (мас.): SiO<sub>2</sub> – 69,37; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 9,20; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 3,32; TiO<sub>2</sub> – 0,68; CaO – 5,54; MgO – 1,45; SO<sub>3</sub> – 0,04; K<sub>2</sub>O – 1,75; Na<sub>2</sub>O – 0,73; п.п.п. – 7,57; сумма – 99,65. В перерасчете на прокаленное вещество, % (мас.): Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 9,95; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 3,59; TiO<sub>2</sub> – 0,74.

В соответствии с ДТА-исследованиями, граничная температура обжига для этого кирпича составляет 1000–1050 °С, рекомендуемая стандартными расчетами продолжительность обжига – до 48 ч (32 ч – сушка и обжиг, 16 ч – охлаждение). Температура печи при посадке – не выше 100 °С.

Для исследования было отобрано 8 образцов кирпичей полусухого прессования после сушки, с пустотностью 13,6 %. Относительная влажность кирпича-сырца, размеры и масса до и после обжига кирпичей приведены в табл.1. Кирпич имеет 8 односторонних отверстий глубиной 45 мм и диаметром 30 мм. Размеры определялись при помощи металлической линейки по ГОСТ 427-56 с длиной шкалы от 0 до 50,5 см. Масса определялась на весах типа ВНЦ марки ВТЦ-10 по ГОСТ 7327-55 со шкалой от 0 до 1000 г, ценой деления 5 г, максимальным взвешиванием 10 кг, с точностью измерения ± 2,5 г.

**Таблица 1. Параметры исследуемых кирпичей до и после обжига**

Номер образца	Размеры, мм	Относительная влажность, %	Масса кирпича, г		
			до обжига	абсолютно сухого	после обжига
1	245×119×62	4,28	3225	3087	2870
2	246×119×61	4,00	3250	3120	2900
3	245×119×63	4,13	3170	3039	2825
4	245×119×65	3,89	3240	3114	2895
5	246×119×63	4,30	3305	3163	2940
6	245×119×60	4,54	3020	2883	2680
7	245×119×62	4,22	3100	2969	2760
8	245×119×60	4,02	3160	3033	2820

**Таблица 2. Режимы обжига кирпича**

Программа	Время, мин	
	Режим I, T <sub>к</sub> = 1000 °С	Режим II, T <sub>к</sub> = 1050 °С
Загрузка и выдержка при 200 °С	30	30
Нагрев до 580 °С	120	120
Выдержка при 580 °С	30	30
Нагрев до 850 °С	180	–
Выдержка при 850 °С	30	–
Нагрев до 1000 °С	90	210
Выдержка при 1000 °С	30	–
Нагрев до 1050 °С	–	90
Выдержка при 1050 °С	–	30

*Примечание.* T<sub>к</sub> – конечная температура обжига.

Обжиг кирпича происходил по программам, приведенным в табл.2.

Различие программ состоит в конечной температуре обжига (1000 °С и 1050 °С) и наличии промежуточной выдержки при 850 °С в режиме I. Выдержка по обоим программам при 580 °С обусловлена внутренним превращением α-кварца в β-кварц в теле черепка, а выдержка при конечной температуре 1000 °С та 1050 °С является изотермической выдержкой процесса спекания. Критерием качества обжига является соответствие кирпича показателям прочности на сжатие, изгиб и водопоглощение.

Образцы №№ 1–4 обжигались по программе I, образцы №№ 5–8 по программе II. Обжиг осуществлялся в типовой лабораторной электрической печи сопротивления СНОЛ 16254/11-М1 с регулятором температуры РТ на базе оптического производства львовского предприятия «Термоприлад».

На рис.1 приведена схема рабочего пространства и размещения термодар в теле кирпича. Печь 9 представляет собою теплоизолиро-

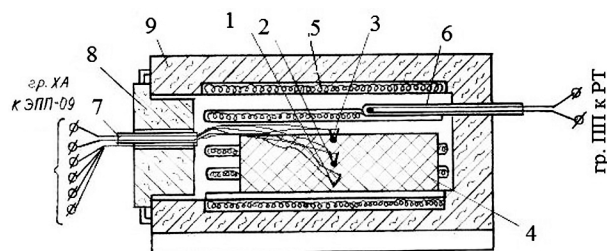


Рис.1. Схема рабочего пространства электрической печи сопротивления и кирпича с термопарами.

ванную камеру из огнеупора с внутренними размерами, мм: длина — 300; ширина — 170; высота — 110. Внутри печи в каналах огнеупорных стенок, поду и своде расположены нагревательные элементы 5 в виде спиралей из стали 0Х27Ю5А. Максимальная рабочая температура печи 1100 °С.

Температура в печи измеряется платино-платинородиевой термопарой 6 гр.ПП в изолированном чехле. Сигнал от термопары выведен на регулятор температуры РТ.

Исследуемый кирпич 4 устанавливали широкой гранью на дно камеры посередине печи на подставках. Температуру образца в процессе обжига измеряли термопарами 1–3. Использовались хромель-алюмелевые термопары с диаметром термоэлектродов 0,3 мм. Спай имел размеры около 1,0–1,2 мм. Диаметр отверстий в кирпиче для ввода термопар — 1,6 мм. Спаи устанавливались на дно отверстий 1–3, где уплотнялись глиной. Провода термопар выводились через отверстие 7 в дверцах 8 и подключались к многоточечному регистрирующему потенциометру ЭПП-09, гр.ХА, с диапазоном измерений 0–1100 °С.

Результаты обжига кирпичей №№ 1–4 по программе I приведены на рис.2. Кривая нагрева практически совпадает с запрограммированной температурой печи, максимальное отклоне-

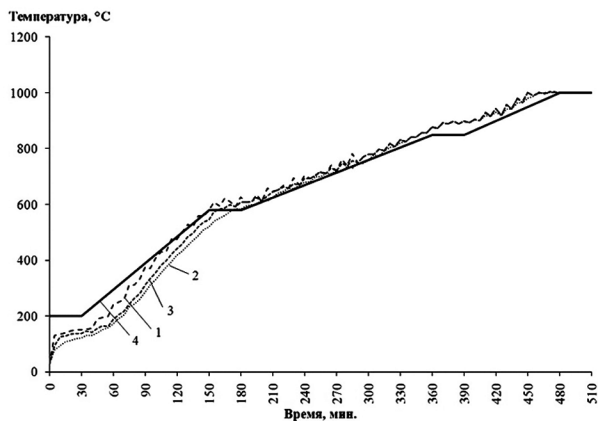


Рис.2. Кривые обжига кирпича по программе I: 1, 3 — температура внешних поверхностей; 2 — температура центра кирпича; 4 — запрограммированный режим обжига.

ние температуры составляет 50 °С, температура центра кирпича достигает 575 °С в конце запрограммированной выдержки при этой температуре. Анализ кривых показывает, что досушка кирпича (удаление физически связанной влаги) заканчивается при температуре печи 200–220 °С, а удаление химически связанной влаги — при температуре 550–580 °С. Начиная с 580 °С, перепад температуры по толщине кирпича составляет  $\pm 2$  °С. Суммарное время нагрева до 1000 °С составило 460 мин, с учетом 30-минутной выдержки — 490 мин, что на 20 мин меньше заданного времени обжига. Начиная с 800 °С, темп нагрева кирпича превысил темп роста температуры печи, при этом повышение температуры составило около 50 °С.

Волнообразный характер кривых нагрева поверхности можно объяснить влиянием режима регулирования температуры печи «включено-выключено». Опережающий рост температуры кирпича может быть вызван экзотермическим эффектом, который возникает в теле черепка из-за перекристаллизации аморфных продуктов глинистых минералов с образованием новых кристаллических фаз.

Результаты опытов по обжигу кирпичей №№ 5–8 по программе II приведены на рис.3. Суммарное время обжига кирпича по этому режиму составило 450 мин, что на 60 мин меньше заданного. Температура центра образца при температуре печи 575 °С достигла этой температуры в течение 30 мин. Сравнение кривых двух режимов обжига показывает, что досушка кирпича протекает при постоянной скорости при температуре печи 200 °С.

До температуры фазовых превращений 575 °С перепад температуры по толщине кирпича присутствует и колеблется в начале сушки от  $\pm 25$  °С

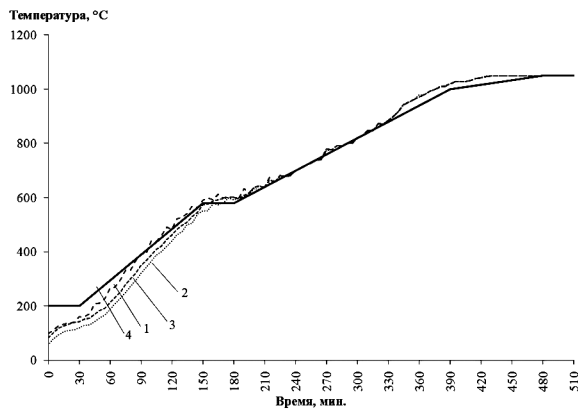


Рис.3. Кривые обжига кирпича по программе II. Номера кривых как на рис.2.

Таблица 3. Результаты анализа на показатели качества обожженного кирпича

Показатель	Требования ДСТУ Б.В.2.7-61-97	Фактические данные испытаний образцов	
		режим I, 1000 °С	режим II, 1050 °С
Длина, мм	250 ± 5	248	248
Ширина, мм	120 ± 4	121	121
Толщина, мм	65 ± 3	63	63
Предел прочности при сжатии, МПа, не менее	M75 – 7,5; M100 – 10,0	8,30	10,61
Предел прочности при сгибе, МПа, не менее	M75 – 1,4; M100 – 1,6	1,44	1,63
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup> , не более	1600	1530	1500
Водопоглощение, %	не нормируется для рядового кирпича	18,9	17,2
Известняковые включения	допускаются не вызываю- щие отколов, которые не превышают допустимые по ДСТУ Б.В.2.7-61-97	отколы ≤ 5,0 мм	отколы ≤ 3,0 мм
Пережог и недожог	не допускается	отсутствует	отсутствует
Масса обожженного кирпича, кг	4,3 (полнотелого)	3,0	2,9
Марка кирпича		75	100

до ± 2 °С в конце. Обожженные кирпичи были исследованы по показателям качества, которые приведены в табл.3.

Анализ данных, полученных при первичных исследованиях режима обжига, показывает, что только кирпич, обожженный по программе II, имеет вполне удовлетворительные результаты по соответствию рядового кирпича высокому качеству, а именно, марке M100. Анализ, выполненный для сырья Чечельницкого месторождения, показывает также, что при равных условиях обжига превалярующим фактором влияния на качество является конечная температура обжига, а скорость подъема температуры не снижает качества кирпича. Из кирпича для этого сырья является допустимой повышенная температура загрузки при остаточной влажности до 4,5 %. Эти данные показывают возможность повышения скорости нагрева, а граничные значения скорости нагрева и времени выдержки необходимо исследовать в дальнейших экспериментах.

Для определения погрешности экспериментов проведено решение задачи про неустановившейся тепловой режим полуграниченного тела при одинаковой начальной температуре  $t_0$  и постоянной температуре поверхности  $t_{\text{п}}$  [3].

Для проверки взята первая ступень нагрева кирпича до 200 °С. Решение этой задачи имеет следующий вид:

$$t = t_{\text{п}} + (t_0 - t_{\text{п}}) \operatorname{erf}(1/(2 Fo_x^{1/2})), \quad (1)$$

где  $t_{\text{п}}$  – температура кирпича,  $t_{\text{п}} = 13$  °С;  $t_0$  – температура печи,  $t_0 = 200$  °С;  $Fo_x$  – число Фурье,

$Fo_x = a \tau / x^2$  (здесь  $a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/ч;  $\tau$  – время,  $\tau = 0,5$  ч;  $x$  – определяющий размер,  $x = S/2 = 0,065/2 = 0,0325$  м);  $\operatorname{erf}(u)$  – табулированная функция, которая называется функцией ошибок Гаусса [4].

Принимаем по [3]: коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,58$  Вт/(м·К); теплоемкость  $c = 880$  Дж/(кг·К); плотность  $\rho = 1600$  кг/м<sup>3</sup>.

Тогда  $a = \lambda / (c \rho) = 0,00148$  м<sup>2</sup>/ч;  $Fo_x = 0,7$ . По [4] определяем  $\operatorname{erf}[1/(2 Fo_x^{1/2})] = 0,602$ . Тогда после подстановки  $t = 13 + (200 - 13) \cdot 0,602 = 125,5$  °С.

Рассчитанное значение температуры в середине кирпича после выдержки 30 мин при 200 °С превышает на 4,5 °С экспериментальное значение температуры  $t_3 = 121$  °С. Погрешность эксперимента составила  $\delta = (t - t_3) / t = 3,6$  %.

### Выводы

В результате проведенных исследований режимов обжига рядового кирпича полусухого прессования пористостью 13,6 % из глинистого сырья Чечельницкого месторождения установлено, что обжиг кирпича из этого сырья возможен при высокой (200 °С) температуре загрузки и начальной относительной влажности до 4,5 %. На качество обожженного кирпича указанные показатели не влияют, а значительно влияют конечная температура обжига и время нахождения кирпича в интервале температур 900–1050 °С.

Удаление физически связанной влаги из кирпича происходит при температуре печи до

200 °С, а удаление химически связанной влаги и прогрев по толщине — до 580 °С. Перепад температур между поверхностью и центром в конце прогрева до 580 °С не превышает ± 2 °С.

Продолжительность обжига исследуемых кирпичей почти в 2 раза меньше рекомендуемой стандартными методиками расчетов по ДТА-исследованиям. Получение качественного (М100) рядового кирпича из глины Чечельницкого месторождения при указанных начальных условиях возможно при температуре не ниже 1050 °С.

#### Список литературы

1. Энергосбережение в производстве кирпича и керамики // Материали семінару з раціонального ви-

користання енергії в промисловості будівельної кераміки в Україні, Київ, 29 жовт. 1997 р. — Київ, 1997. — С. 1–3.

2. Нохратян К.А. Сушка и обжиг в промышленности строительной керамики. — М. : Госстройиздат, 1968. — 526 с.
3. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчеты теплового режима твердых тел. — Л. : Энергия, 1976. — 352 с.
4. Сегал Б.И., Семендяев К.А. Пятизначные математические таблицы. — М. : Гос. изд. физико-математической литературы, 1962. — 464 с.
5. Дослідження та розробка методів інтенсифікації теплообміну при спалюванні газу та рідкого палива в промислових установках : (Звіт відділу проблем промислової теплотехніки Інституту газу НАНУ за НДР № 317В).

Поступила в редакцию 30.12.10

## The Experimental Study of Firing Conditions of Dry Pressing Bricks from Chechelnizky Deposit Raw

*Logvynenko D.M.<sup>1</sup>, Pilipenko R.A.<sup>1</sup>, Pikashov V.S.<sup>1</sup>,  
Pilipenko O.V.<sup>1</sup>, Pochupaylo V.V.<sup>2</sup>, Oliinyk I.G.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>*The Gas Institute of NASU, Kiev*

<sup>2</sup>*Kiev National University of Construction and Architecture*

<sup>3</sup>*National Technical University of Ukraine «KPI», Kiev*

The experiments of accelerated firing conditions for porous (13,6 %) dry pressing bricks samples from Chechelnizky deposit raw are conducted. The residual relative moisture of air brick amount is up to 4,5 %, charge temperature — 200 °С, firing temperature — 1000–1050 °С. The influence of the parameters on bricks quality and accelerated firing regimes realization possibility are analyzed.

**Key words:** brick, firing, residual moisture, firing temperature, firing duration.

Received December 30, 2010