

УДК 66.046; 66.041

Пилипенко Р.А., Пилипенко А.В., Логвиненко Д.М.

Институт газа НАН Украины

СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИИ ПРИ ОБЖИГЕ КИРПИЧА

Енергозбереження при випалі цегли в тунельних печах можливе при інтенсифікації теплових процесів, оптимізації садки цегли, підвищенні рівномірності нагріву, зменшенні витрат тепла через огорожування печі та інших втрат, застосуванні швидкісних режимів сушіння та випалу. При проектуванні печей необхідно передбачати такі умови нагріву садки цегли, що найбільш наближені до умов окремої цегли.

Энергосбережение при обжиге кирпича в туннельных печах возможно при интенсификации тепловых процессов, оптимизации садки кирпича, повышении равномерности нагрева, уменьшении потерь тепла через ограждения печи и других потерь, применении скоростных режимов сушки и обжига. При проектировании печей необходимо предусматривать такие условия нагрева садки кирпича, которые наиболее приближены к условиям нагрева единичного кирпича.

It is possible to save heat during baking of bricks in tunnel furnaces using the acceleration of heat processes, the brick melt optimization and the even heat distribution. Not only the heat losses reduction through fencing of furnace and other losses, but also the rapid regimes application of drying and baking are useful for the heat saving. Designing furnaces it is necessary to provide such conditions of brick melt heating, that are fit the most to the conditions of heating of a single brick.

$G_{вл}, G_{с.к.}$ – масса удаляемой влаги и сухого кирпича, кг;

$F = F_{акт}$ – суммарная поверхность граней кирпича и поверхности его отверстий, m^2 ;

K – коэффициент теплопроводности массы, $m^2/ч$;

S – половина толщины изделия δ при двухстороннем нагреве, м;

T – время, ч;

t – температура, $^{\circ}C$;

$V_{доп}$ – допустимая скорость сушки кирпича, $кг/(m^2 \cdot ч)$;

$V_{доп}^н, V_{доп}^в, V_{доп}^о$ – допустимые скорости нагрева, выдержки и охлаждения кирпича, $^{\circ}C/ч$;

V – объем кирпича, m^3 ;

$\Delta\varphi_{max}$ – допустимый перепад влажности по толщине изделия между серединой и поверхностью, %;

Δt – допустимый по технологии перепад температур по толщине кирпича, $^{\circ}C$;

φ_n – начальная относительная влажность кирпича, %;

ρ_0 – плотность абсолютно сухой глины, $кг/m^3$.

Введение

Производство строительной керамики является одним из наиболее энергоемких.

Удельные затраты теплоты на обжиг в ведущих европейских странах составляют 1850...2100 кДж/кг.

В табл. 1 приведены средние показатели затрат электрической и тепловой энергии на производство кирпича для четырех стран ЕС (Бельгия, Испания, Италия, Голландия) по состоянию на 1991 г. [1].

Эти показатели для двух крупнейших производителей кирпича, Испании и Италии, имеют идентичные значения. В Голландии, где кирпич производится только из пластической массы, удельное потребление тепла выше среднего по ЕС (2500 кДж/кг).

Приведенные значения могут быть применены только для сравнения данных производственного цикла с теоретическими, поскольку промышленная реальность – это соединение во времени двух компонентов: ассортимента продукции и производственной технологии.

Табл. 1. Показатели некоторых стран ЕС по затратам энергии на производство кирпича

Страна	Производство, тыс. т	Потребление	
		топливо, ТДж	эл. энергия, ГВт·ч
Бельгия	2939	5003	133
Испания	10500	21840	451
Италия	13600	28600	720
Голландия	2873	7335	107

В Украине, к сожалению, энергетический менеджмент в этой отрасли практически отсутствует. Однако, известно, что на большинстве заводов из-за «морально и физически» устаревшего оборудования вышеупомянутые показатели значительно выше. Кроме того, по качеству отечественный кирпич, как правило, значительно уступает зарубежному и не удовлетворяет потребности рынка.

Основными потребителями топлива в технологии производства кирпича являются сушилка и печи. Теплота сжигаемого топлива расходуется в них на физико-химические преобразования в сырье и компенсацию различных тепловых потерь в агрегате. Затраты теплоты на физико-химические преобразования определяются исходным сырьем и его состоянием, а компенсационные затраты зависят от организации процессов сушки и обжига и потерь в самих структурах агрегатов.

После сушки в сушилках кирпич с остаточной влажностью 0,5...8 % поступает в печь, где происходит его досушка (сушка), нагрев, обжиг и охлаждение обожженного кирпича.

Наиболее полно технологии промышленного производства отвечают туннельные печи. Одним из стратегических недостатков при строительстве кирпичных заводов в Украине было применение типовых проектов туннельных печей. Типовые проекты разрабатывались по производительности печи, например: 5, 10, 13, 16, 20, 25 или 30 млн. шт. условного кирпича в год. В качестве условного кирпича принимался стандартный полнотелый кирпич. По этому кирпичу проводим расчет продолжительности сушки, обжига и охлаждения

кирпича. Определялась длина печи, объем рабочего пространства. Особенности конкретного сырья, вида кирпича (его пустотность, размеры) учитывались путем варьирования интервала толкания и тепловой мощностью. Такая универсализация туннельных печей приводила, как правило, к дополнительным энергозатратам и снижению эффективности их работы.

Неоспоримыми достоинствами туннельных печей являются: непрерывный цикл работы, высокая производительность, возможность автоматизации процесса обжига. Недостатки: материалоемкость, инерционность, неравномерность обжига, нерациональные затраты тепла на потери с уходящими дымовыми газами, с нагретым продуктом и вагонетками и др.

Известно, что основными направлениями совершенствования конструкции и тепловой работы туннельных печей, направленными на энергосбережение и повышение качества кирпича, являются:

- разработка индивидуальных проектов печей для конкретных месторождений и технологий;
- разработка и применение скоростных режимов сушки и обжига;
- повышение качества сжигания топлива;
- применение новых эффективных горелочных устройств и импульсных систем отопления;
- оптимизация рабочего пространства печи и садки кирпича;
- разработка новых эффективных печей скоростного обжига;
- уменьшение тепловой инерции и потерь теплоты через стены и свод, с вагонетками и готовым кирпичом и др.;

- применение новых эффективных огнеупорных и теплоизоляционных материалов;
- использование PLC-контроля режимов обжига.

Цели исследования

В настоящей работе рассматриваются некоторые аспекты совершенствования расчетной базы при конструировании печей, их тепловой работы, а также предпосылки для разработки печей скоростного обжига.

Продолжительность сушки кирпича определяется допустимой скоростью сушки. Согласно традиционной методике расчета времени сушки [2] допустимая скорость сушки определяется по формуле:

$$V_{\text{доп}} = 0.04 \cdot K \cdot \rho_0 \cdot \frac{\Delta\varphi_{\text{MAX}}}{S} \quad (1)$$

Анализ этой формулы показывает, что допустимая скорость сушки зависит только от начальной влажности кирпича.

Однако, для пустотных кирпичей (с отверстия-

ми) и, следовательно, с развитой поверхностью $F_{\text{акт}}$, половина толщины изделия S не может считаться определяющим размером. Представляется наиболее обоснованным рассчитывать этот размер по формуле, принятой в гидродинамике для тел сложной формы [3]:

$$S = \frac{4V}{F} \quad (2)$$

Очевидно, что с увеличением $F_{\text{акт}}$ эффективная толщина изделия уменьшается и, следовательно, должна возрастать допустимая скорость сушки для кирпичей одной начальной влажности, но различной пустотности. Это означает, что продолжительность сушки пустотных кирпичей меньше, чем полнотелых при той же влажности и, следовательно, интервал проталкивания вагонеток может быть уменьшен.

При расчете допустимой скорости нагрева и охлаждения кирпича используется тот же определяющий размер S [2]:

Табл. 2. Количество влаги, подлежащее удалению в процессе сушки керамических кирпичей, кг/м²

Номер изделия	Масса сухого кирпича $G_{\text{с.к.}}$, кг	Количество влаги $G_{\text{вл}}/F_{\text{акт}}$, кг/м ²				$F_{\text{акт.}}$, м ²	Размеры и форма изделия	Пустотность, %
		Начальная влажность материала φ_n , %						
		1.0	2.0	4.0	6.0			
1	3.12	0.34	0.68	1.36	2.03	0.092	250x120x65; полнотелый	0
2	2.9	0.275	0.55	1.1	1.651	0.1054	250x120x65; 3 отв. $d = 30$ мм	7
3	2.71	0.215	0.43	0.86	1.29	0.126	250x120x65; 8 отв. $d = 30$ мм $l = 45$ мм	13
4	2.5	0.158	0.316	0.633	0.95	0.158	250x120x65; 19 отв. $d = 20$ мм	19
5	2.08	0.104	0.208	0.416	0.624	0.2	250x120x65; 32 отв. $d = 20$ мм	33

Табл. 3. Допускаемая скорость сушки, кг/м²·ч

Номер изделия	Допускаемая скорость сушки $V_{\text{доп}}$, кг/м ² ·ч				$\frac{S = \delta / 2}{S = 4V / F_{\text{акт}} / 2}$
	Начальная влажность материала φ_n , %				
	1.0	2.0	4.0	6.0	
1	0.0485	0.097	0.194	0.291	0.033
	0.0372	0.0744	0.149	0.223	0.043
2	0.0485	0.097	0.194	0.291	0.033
	0.0432	0.0864	0.173	0.259	0.037
3	0.0485	0.097	0.194	0.291	0.033
	0.0516	0.1	0.21	0.31	0.031
4	0.0485	0.097	0.194	0.291	0.033
	0.064	0.13	0.26	0.38	0.025
5	0.0485	0.097	0.194	0.291	0.033
	0.08	0.16	0.32	0.48	0.02

$$V_{\text{доп}}^{\text{Н}} = V_{\text{доп}}^{\text{О}} = \frac{40 \cdot \Delta t}{(100 \cdot S)^2}, \quad (3)$$

$$V_{\text{доп}}^{\text{В}} = 700 \cdot S^2, \quad (4)$$

поэтому такая корректировка этого размера может быть правомочна и для расчета продолжительности этих процессов.

Методы исследования

Нами проведен сравнительный анализ расчетных значений допустимой скорости сушки для кирпичей пустотностью 0 %, 7 %, 13 %, 19 % и 33 % для следующих значений их начальной относительной влажности: 1 %, 2 %, 4 % и 6 % и продолжительности обжига этих кирпичей. Расчеты выполнены по традиционной методике вычисления определяющего размера и определения его с учетом сложности формы кирпича.

Обсуждение результатов

Результаты расчетов допустимой скорости сушки и времени обжига по традиционной методике и с учетом сложной формы кирпича представлены в таблицах 2, 3, 4 и на рис. 1 и 2.

В табл. 2 приведены расчетные значения количества влаги, подлежащей удалению в процессе сушки этих кирпичей.

В табл. 3 приведены значения допустимой скорости сушки для этих же кирпичей.

Каждому значению относительной влажности для каждого типа кирпича соответствует два значения: верхнее определено при $S = \delta/2$, нижнее – при $S = 4 V / F_{\text{акт}} / 2$. Плотность глины, принятая в расчете, составляет 1600 кг/м^3 .

Приведенные в табл. 2 и 3 значения $V_{\text{доп}}$ и удельной влажности $G_{\text{вл}} / F_{\text{акт}}$ представлены графически на рис. 1.

Кривые допустимой скорости сушки для различных типов кирпичей (изделия 1-5) изображены в виде семейств отдельных пар пересекающихся кривых. Линии, параллельные оси абсцисс, характеризуют допустимую скорость сушки, рассчитанную по определяющему размеру $S = \delta / 2 = 0.033 \text{ м}$ (где $\delta = 65 \text{ мм}$). Кривые, пересекающие эти линии, характеризуют допустимую скорость сушки, рассчитанную по определяющему размеру $S = 4 V / F_{\text{акт}} / 2$. Кривые 1-4 наглядно

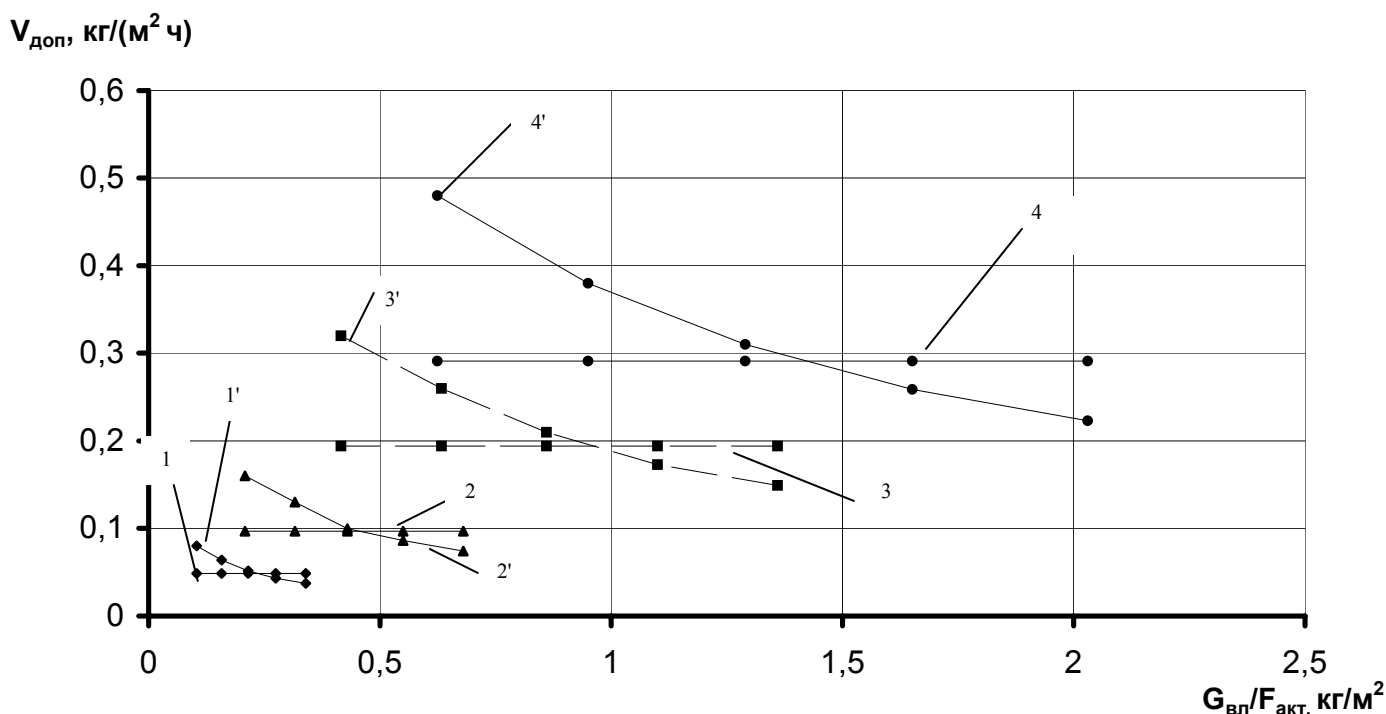


Рис. 1. Зависимость допустимой скорости сушки единичного кирпича от удельной влажности 1, 1' - $\varphi_{\text{н}} = 1 \%$; 2, 2' - 2% ; 3, 3' - 4% ; 4, 4' - 6% .

показывают, что допустимая скорость сушки кирпичей различной пустотности при одинаковой влажности является величиной постоянной, а кривые 1'-4', напротив, указывают на переменность допустимой скорости сушки для тех же кирпичей. Полученный результат нуждается в экспериментальной проверке и уточнении. При получении положительного результата в методику расчета процесса сушки можно будет ввести коэффициент, корректирующий определяющий размер изделия и, следовательно, продолжительность сушки.

Следует иметь в виду, что в туннельную печь кирпичи загружаются в виде пакетов садок на вагонетках. Сложная система укладки кирпичей в пакеты приводит к тому, что время сушки, как и время обжига кирпичей в пакете не соответствует таковым для единичного кирпича.

В табл. 4 приведены для сравнения допустимые скорости подогрева, обжига и охлаждения полнотелого и пустотного кирпича (13% и 33%), выполненные для двух значений определяющего размера S : равного половине толщины кирпича, 0.033 м, и рассчитанного для тела сложной формы, 0.031 м и 0.02 м. Если скорость нагрева (охлаждения) пустотелых кирпичей рассчитывать при $S = 0.033$ м, то продолжительность их обжига будет такой же как и полнотелого кирпича. С учетом же принятой поправки продолжительность

обжига кирпича с пустотностью 13 % сокращается на 12 %, а с пустотностью 33 % - более чем в 2 раза.

На рис. 2 представлены сравнительные кривые обжига единичного кирпича (1 - расчетная кривая для кирпича с 13 % пустотностью) и реальных садок кирпича с различной емкостью пакета (2-5).

Как видно из рисунка, единичный кирпич обжигается, в среднем, за 12 часов. Пакетная садка из 200 шт. кирпича с пустотностью 13% (кривая 2) обжигалась в малогабаритной туннельной печи приблизительно за 18 часов (с учетом времени сушки) [4]. Время обжига пакетной садки из 1150 шт. кирпича (кривая 3) составляет 36 часов. Пакеты садки емкостью 2100 шт. и 2800 шт. кирпича обжигают за 40-50 часов. Известны ускоренные режимы обжига кирпича, где продолжительность обжига составляет 24-30 часов [1, 5]. Это связано с тем, что в сравнении с единичным кирпичом садки обладают, во-первых, большей массой; во-вторых, условия нагрева каждого кирпича в пакете существенно отличаются от таковых при таком же двухстороннем нагреве единичного кирпича. Часть теплоносителя омывает пакет снаружи, а часть проходит через продольные каналы пакета и, чем больше их сечение, тем большее количество теплоносителя проходит через пакет и, тем интенсивнее процесс нагрева каждого кирпича в пакете. Одним из основных условий, определяющих

Табл. 4. Допускаемая скорость обжига и охлаждения, °С/час, и их продолжительность, час

Номер изделия	Полуготолщина S, м	Пустотность, %	Подогрев,	Обжиг,		Охлаждение,			Суммарное время, час
			$\frac{V_{\text{доп}}}{T}$	$\frac{V_{\text{доп}}}{T}$	$\frac{V_{\text{доп}}}{T}$	$\frac{V_{\text{доп}}}{T}$	$\frac{V_{\text{доп}}}{T}$		
			$\Delta t = 110 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta t = 85 \text{ }^\circ\text{C}$	выдержка	$\Delta t = 30 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta t = 125 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta t = 150 \text{ }^\circ\text{C}$	
			120...700 °С	700...1050 °С	1050 °С	1050...850 °С	850...150 °С	150...50 °С	
1	0.033	0	404 °С/час	312		110	459	550	6.85
			1.44 час	1.12	0.76	1.82	1.53	0.18	
3	0.031	13	458 °С/час	354		125	520	624	6.04
			1.27 час	0.99	0.67	1.6	1.35	0.16	
5	0.2	33	1100 °С/час	850		300	1250	1500	2.52
			0.53 час	0.41	0.28	0.67	0.56	0.067	

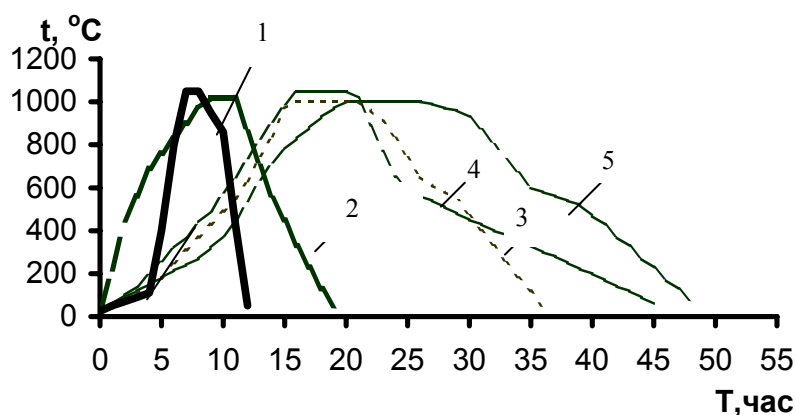


Рис. 2. Кривые обжига кирпича: 1 - теоретическая для одного кирпича, $\varphi = 1\%$; 2 - вагонетка емкостью 200 шт., $L_n = 24 \text{ м}$, $\varphi = 1\%$; 3 - 1150 шт., $L_n = 62 \text{ м}$, $\varphi = 8\%$; 4 - 2800 шт., $L_n = 124,3 \text{ м}$, $\varphi = 4\%$; 5 - 2100 шт., $L_n = 105,7 \text{ м}$, $\varphi = 4\%$.

скорость нагрева каждого кирпича в садке, является симметричность его нагрева. Коэффициент симметричности μ в садке для отдельных кирпичей меняется от 0,5 (двусторонний симметричный нагрев) до 1,0 (односторонний нагрев) [6]. Очевидно, что обеспечение скоростного обжига кирпича в пакете возможно лишь при создании условий его нагрева, близких к условиям двустороннего симметричного нагрева единичного кирпича.

Исходя из вышеизложенного, представляется необходимым оптимизация габаритных размеров пакетов садок для печей различной ширины и увеличение пустотности пакета, что позволит сократить продолжительность процессов и сократить удельные энергозатраты на производство кирпича.

Выводы

В результате проведенных аналитических исследований установлена зависимость продолжительности сушки кирпича от его удельной влажности. Показано, что скорость обжига кирпича при соблюдении симметричного двустороннего нагрева может быть увеличена, например, для кирпича с пустотностью 33 % – почти вдвое по сравнению с полнотелым кирпичом. Полученные результаты являются основанием для дальнейших экспериментальных исследований процессов

сушки и нагрева, направленных на разработку скоростных режимов сушки и обжига и разработку экономичных и эффективных печей скоростного обжига кирпича.

ЛИТЕРАТУРА

1. Энергосбережение в производстве кирпича и керамики// Матеріали семінару з раціонального використання енергії в промисловості будівельної кераміки в Україні. Київ, 29 жовтня 1997 р.- С.1-3.
2. Левченко П.В. Расчеты печей и сушил силикатной промышленности.- М. «Высшая школа», 1968.- С. 220-223.
3. Осипова В.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена.- М. «Энергия», 1969.- С. 225-229.
4. Пулипенко Р.А., Еринов А.Е. Малогабаритная туннельная печь для обжига керамического кирпича// Международная научно-практическая конференция «Региональные проблемы энергосбережения в производстве и потреблении энергии», 25-29 октября 1999 г. Украина. Киев. Тез. докл. С.156.
5. Наумов М.М. и др. Технология глиняного кирпича.- М.- 1969.- С. 201-202.
6. Китаев Б.И. и др. Теплотехнические расчеты металлургических печей.- М.- 1970.С. 51-52.