

УДК 669.041

В.Ю. Зинченко ⁽¹⁾, доцент, к.т.н.
 А.П. Лютый ⁽²⁾, зам. директора, к.т.н.
 И.А. Овчинникова ⁽¹⁾, доцент, к.т.н.
 Р.Р. Матказина ⁽¹⁾, доцент
 Ю.Н. Радченко ⁽³⁾, доцент, к.т.н.
 Д.Д. Браилов ⁽¹⁾, студент

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СТАДИЙНОГО РЕЖИМА ОТОПЛЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКИХ КОЛОДЦЕВ

⁽¹⁾ Запорожская государственная инженерная академия,
⁽²⁾ ПАО «Электрометаллургический завод «Днепроспецсталь», г. Запорожье,
⁽³⁾ Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск

Виконані експериментальні дослідження теплової роботи термічних колодязів ПАО «Электрометалургійний завод «Днепроспецсталь». Показана можливість та ефективність переведення зазначених теплових агрегатів на стадійний режим опалювання.

Ключові слова: термічний колодязь, тепла робота, експериментальні дослідження, стадійний режим опалювання

Выполнены экспериментальные исследования тепловой работы термических колодцев ПАО «Электрометаллургический завод «Днепроспецсталь». Показана возможность и эффективность перевода указанных тепловых агрегатов на стадийный режим отопления.

Ключевые слова: термический колодец, тепловая работа, экспериментальные исследования, стадийный режим отопления

There are executed experimental researches of thermal work for thermal wells of PAJ «Electrometallurgy plant «Dneprospetssteel». There is shown possibility and efficiency of conversion of the indicated thermal aggregatases on the phasic mode of heating.

Keywords: thermal well, thermal work, experimental researchs, phasic mode of heating

Введение. Термические колодцы предназначены для отжига слитков высоколегированных сталей, обеспечивающего устранение внутренних напряжений в металле при разливке и охлаждении в изложницах. Основные технические характеристики данных агрегатов представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Технические характеристики термических колодцев

Площадь пода, м ²	6,5
Диаметр, мм	2800
Высота, мм	2500
Количество слитков, шт.	17
Масса садки, т	15
Производительность, т/ч	2,4
Топливо	Природно-доменная смесь
Его теплота сгорания, кВт/ч	1,86
Максимальный расход:	
- топлива	630
- воздуха	2500

В соответствии с первоначальным проектом термические колодцы имели подподовые топки

и специальные каналы для рециркуляции продуктов горения топлива. При этом практически полностью отсутствовал местный перегрев слитков при отжиге, перепад температуры в садке в период выдержки металла составлял ± 20 °С. Однако в процессе эксплуатации колодцев выявлена неудовлетворительная стойкость подины, приводящая к длительным простоям, связанным с ее ремонтом. В связи с этим вместо подподовых топок с рециркуляцией продуктов горения на расстоянии 2000 мм от уровня подины были установлены четыре горелки типа «труба в трубе». Кроме того, высоту колодца увеличили до 3000 мм. После реконструкции процесс сжигания топлива в агрегате происходит над слитками, а отвод продуктов горения – через дымоотводы, расположенные возле подины колодца. В результате наблюдали существенное изменение характера теплообмена в его рабочем объеме. Перепад температуры по высоте слитков в начале периода выдержки достигает 280 °С, а в конце данного периода его величина составляет 70...80 °С.

Установлено, что при увеличении массы садки от 15 до 20...30 т и сокращении длительности простоев колодцев качество нагрева металла ухудшается. Поэтому заданное качество терми-

ческой обработки металла достигали увеличением продолжительности выдержки металла и ограничением сортамента слитков, подвергаемых отжигу в данных агрегатах.

Проблему обеспечения качественного нагрева металла при высокой производительности термических колодцев решали путем определения рациональных методов отопления и управления тепловой работой.

Постановка задачи. Целью исследований является определение методов отопления и управления внешним теплообменом, которые обеспечивают технологически необходимое качество обработки металла при отжиге слитков специальных сталей с сохранением высокой производительности термических колодцев.

Основная часть исследований. Экспериментальные исследования предусматривали оценку полей температуры в рабочей камере колодцев при различной тепловой нагрузке и определение рациональных методов управления полем температуры.

При изучении распределения температуры по высоте колодца в его рабочую камеру помещали измерительный зонд с гибкими датчиками (хромель-алюмелевыми термопреобразователями), размещенными в нем на расстоянии 430 мм друг от друга. Расположение датчиков температуры позволяло замерять температуру, как по высоте рабочей камеры печи, так и по радиусу между слитками

Выполняли четыре контрольных отжига сопоставимых садок слитков массой 25...30 т для ряда марок стали. Установлено, что при наличии некоторых отличий в характере изменения тепловой нагрузки, расхода воздуха и давления в рабочей камере колодца для всех выполненных отжигов зафиксировали одинаковую закономерность изменения температуры в контрольных точках.

$$\Delta T^{\text{II}} = \frac{[Q_{\text{H}}^p]_{\alpha_1}^{\text{H2}} + T^{\text{I}} \cdot (C_{\text{H2C}} \cdot V_{\alpha_1} + C_{\text{e}} \cdot L_0^{\text{II}} \cdot \alpha_2 - C_{\text{H2C}} \cdot V_{\alpha_2}^{\text{II}})}{C_{\text{H2C}} \cdot V_{\alpha_2}^{\text{II}}}, \quad (2)$$

где индекс «II» – вторая стадия сжигания топлива; $[Q_{\text{H}}^p]_{\alpha_1}^{\text{H2}}$ – теплота горения топлива на второй стадии его сжигания при коэффициенте расхода первичного воздуха $\alpha_1 < 1,0$; C_{e} – объемная теплоемкость воздуха; L_0^{II} – теоретически необходимый объем воздуха для полного сжигания продуктов горения; α_2 – коэффициент расхода вторичного воздуха.

Выражения (1) и (2) позволяют выполнить количественную оценку изменения температуры продуктов горения в зависимости от условий их сжигания в термическом колодце и, тем самым,

Рациональное сжигание топлива в рабочей камере термических колодцев возможно путем организации его начального сгорания при коэффициенте расхода первичного воздуха $\alpha_1 < 1,0$ и последующего дожига смеси продуктов неполного горения непосредственно в газовом потоке [1,2].

Известно, что процесс горения в потоке при постоянном давлении, согласно классической теории [3,4], выполняют путем подвода вторичного воздуха в горючую смесь, при этом стадийный режим рассматривают как процесс факельного сжигания с полным внешним перемешиванием [5].

Анализ температурных условий первичного сжигания топлива и последующего дожига горючих составляющих выполняли на основе составления тепловых балансов для каждой стадии режима отопления, полученных в работе [6].

Снижение температуры продуктов горения топлива ΔT^{I} за счет химического недожога на первой стадии определяют с использованием формулы:

$$\Delta T_{\text{H2C}}^{\text{I}} = T_{\text{H2C}}^0 - T_{\text{H2C}}^{\text{I}} = \frac{[Q_{\text{H}}^p]_{\alpha_1=1}}{C_{\text{H2C}} \cdot V_0} - \frac{[Q_{\text{H}}^p]_{\alpha_1}}{C_{\text{H2C}} \cdot V_{\alpha_1}}, \quad (1)$$

где индекс «0» – условие полного сжигания топлива; индекс «I» – первая стадия сжигания топлива; $[Q_{\text{H}}^p]_{\alpha_1=1,0}$, $[Q_{\text{H}}^p]_{\alpha_1}$ – теплота горения топлива при коэффициенте расхода воздуха $\alpha_1 = 1,0$ и α_1 , соответственно; V_{α_1} , C_{H2C} – объемный расход продуктов горения и их теплоемкость, соответственно.

На второй стадии дожига продуктов неполного горения газообразного топлива повышение их температуры ΔT^{II} рассчитывают как

определить эффективность стадийного режима отопления для конкретных условий. Рассматривали случай отопления колодца смесью природ-

ного и доменного газов с тепловой сгорания 10550 кДж/м^3 .

При расчете состава продуктов горения указанной смеси принимали допущение об аддитивности газовых смесей. Результаты расчетов неполного горения каждой составляющей смеси приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты расчетов неполного горения газовой смеси

Параметр	Размерность	Коэффициент расхода первичного воздуха α_1			
		0,65	0,70	0,80	0,90
$[Q_H^p]_{\alpha_1}^{\text{аз}}$	кДж/м ³	2456	26439	3042	3410
$L_{\alpha_1}^{\text{аз}}$	м ³ /м ³	0,46	0,52	0,58	0,62
$[Q_H^p]_{x,n}^{\text{аз}}$	кДж/м ³	1320	1132	755	386
$L_{\alpha_2}^{\text{аз}}$	м ³ /м ³	1,28	1,42	1,47	1,50
$[Q_H^p]_{\alpha_1}^{\text{нз}}$	кДж/м ³	17212	19650	22775	28678
$L_{\alpha_1}^{\text{нз}}$	м ³ /м ³	6,21	6,50	7,45	8,59
$[Q_H^p]_{x,n}^{\text{нз}}$	кДж/м ³	16265	15789	9876	4998
$L_{\alpha_2}^{\text{нз}}$	м ³ /м ³	5,98	6,52	7,21	8,32
$[Q_H^p]_{\alpha_1}^{\text{сз}}$	кДж/м ³	5756	6342	7248	8025
$L_{\alpha_1}^{\text{сз}}$	м ³ /м ³	1,65	1,72	2,08	2,26
$[Q_H^p]_{x,n}^{\text{сз}}$	кДж/м ³	4526	3865	2578	1289
$L_{\alpha_2}^{\text{сз}}$	м ³ /м ³	2,22	2,34	2,68	2,96
при $\alpha_2 = 1,0$					
$[CO]_{\alpha_2}^{\text{аз}}$		5,52	4,34	3,45	1,50
$[CO]_{\alpha_2}^{\text{нз}}$		4,02	3,96	3,45	1,98
$[CO]_{\alpha_2}^{\text{сз}}$		3,98	3,65	2,64	1,52
$[CO]_{\alpha_2}^{\text{нз}}$		0,54	0,42	0,30	0,10

В табл. 3 представлены результаты определения снижения температуры продуктов горения топлива ΔT^I на первой стадии сжигания

Таблица 3 – Изменение температуры продуктов горения топлива ΔT^I на первой стадии

Снижение температуры, ΔT^I	Коэффициент расхода первичного воздуха α_1			
	0,65	0,70	0,80	0,90
°С	454	442	326	170

В табл. 4 приведены результаты расчетов повышения температуры продуктов горения топлива ΔT^{II} при подводе вторичного воздуха в рабочий объем термического колодца из окружающей его атмосферы.

Таблица 4 – Изменение температуры продуктов горения топлива ΔT^{II} на второй стадии

Температура после первой стадии	Коэффициент расхода вторичного воздуха α_2			
	0,65	0,70	0,80	0,90
400	982	715	636	320
500	984	724	640	325
600	985	728	645	328
700	986	732	649	332
800	987	737	652	334
900	988	741	657	336
1000	988	746	660	339

Установлено, что при дожигании с использованием подсосов атмосферного воздуха имеет место более существенное приращение температуры на второй стадии горения топлива, так как к моменту дожигания наблюдается достаточный подогрев воздуха при его перемешивании с греющими газами.

Повышение уровня температуры в верхней части камеры можно объяснить близостью к факельной зоне горелок, снижение его уровня в нижней части камеры – теплоотдачей к садке и кладке колодца, а также охлаждающим действием необогреваемой подины. По мере нагрева садки слитков и кладки рабочей камеры происходит выравнивание поля температуры в вертикальном сечении колодца.

Усредненные результаты контрольных отжигов отмечены на рис. 1 пунктирной линией. При отжиге зафиксировали понижение температуры в верхней части рабочей камеры за счет снижения температуры горения в факеле, и ее повышение – в нижней части, возле подины за счет дожигания продуктов неполного горения.

По мере нагрева садки слитков и кладки рабочей камеры наблюдается выравнивание поля температуры в вертикальном сечении колодца.

На рис. 2 приведено изменение во времени перепада температуры по высоте ΔT_{5-1} и диаметру колодца при различных тепловых режимах: существующем $B_{m_1}(\tau)$ и с реализацией неполного сжигания топлива $B_{m_2}(\tau)$.

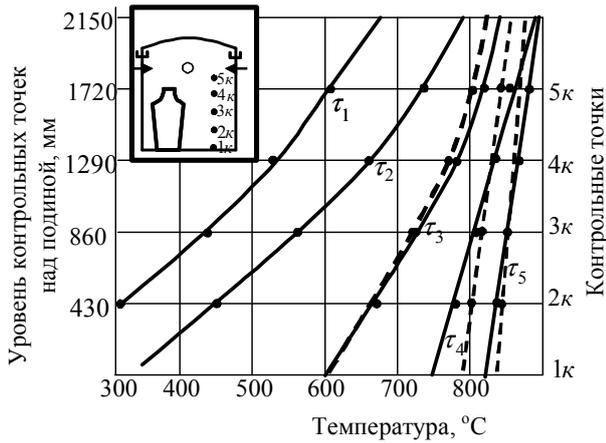


Рисунок 1 – Усредненные кривые распределения температуры по высоте колодца в фиксированные моменты времени: τ_1 – начало периода нагрева; τ_2 – середина нагрева; τ_3 – завершение периода нагрева; τ_4 – начало периода выдержки; τ_5 – завершение периода выдержки

При реализации предложенного стадийного режима отопления неравномерность поля температуры по высоте колодца не превышает в конце периода выдержки 20°C , в то время как при существующем режиме отопления достигает величины 70°C . Из рис. 2 следует, что величина перепада температуры по диаметру колодца существенно зависит от его тепловой нагрузки, а, следовательно, и объемного расхода продуктов горения. При увеличении расхода топлива и количества греющих газов улучшается перемешивание в рабочей камере колодца и снижается величина перепада температуры.

Согласно результатам экспериментов, температурное поле в рабочей камере термического колодца является нестационарным по времени и определяется как тепловой нагрузкой печи, так и нерегулярными случайными возмущениями со стороны подачи топлива и воздуха, а также гидравлическим режимом печи.

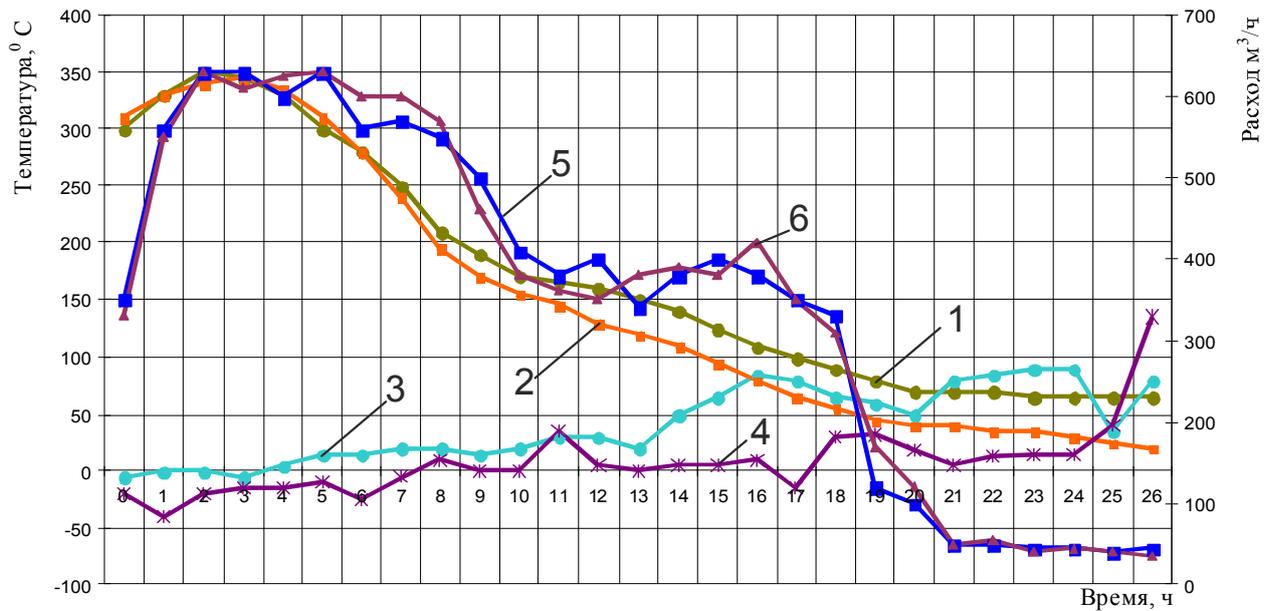


Рисунок 2 – Изменение во времени расхода топлива и перепада температуры по высоте колодца при различных способах отопления

1, 3 – разность температуры между точками 1к и 5к при режимах $B_{1\text{Max}}$ и $B_{2\text{Max}}$, соответственно; 2, 4 – разность температуры между точками 3к и 5к при режимах $B_{1\text{Max}}$ и $B_{2\text{Max}}$, соответственно; 5, 6 – расход газа при режимах $B_{1\text{Max}}$ и $B_{2\text{Max}}$, соответственно

При реализации предложенного стадийного режима отопления неравномерность поля температуры по высоте колодца не превышает в конце периода выдержки 20°C , в то время как при существующем режиме отопления достигает величины 70°C . Из рис. 2 следует, что величина перепада температуры по диаметру колодца существенно зависит от тепловой нагрузки печи, а, следовательно, и от объемного расхода продуктов горения. При увеличении расхода то-

плива и количества греющих газов улучшается перемешивание в рабочей камере колодца и снижается величина перепада температуры в ней.

Согласно результатам экспериментов, температурное поле в рабочей камере термического колодца является нестационарным по времени и определяется как его тепловой нагрузкой, так и нерегулярными случайными возмущениями со

стороны подачи топлива и воздуха, а также гидравлическим режимом печи.

В связи с этим оценка качества управления отоплением колодца по отдельным прямым замерам распределения температуры в его рабочей камере не всегда является объективной, так как не позволяет выполнять сравнение различных режимов отопления. Очевидно, более целесообразным служит использование интегральных оценок вида

$$I = \int_0^{T_k} \Delta T_{1-5} d\tau . \quad (3)$$

При рассмотрении термических колодцев стадийный режим отопления $B_{m_2}(\tau)$ более предпочтительный, чем существующий режим $B_{m_1}(\tau)$, так как $I_2 < I_1$ (рис. 2).

В связи с этим в системе управления было реализовано отопление термического колодца с использованием концентрированного подвода топлива и отвода продуктов горения, смещенного по высоте рабочей камеры. Это обеспечивает в начале сжигание топлива с недостатком воздуха и дожигание продуктов неполного горения топлива в зонах пониженной температуры за счет управляемого подсоса атмосферного воздуха в указанные зоны.

Система автоматического управления тепловой работой термического колодца содержит регуляторы температуры, соотношения «топливо-воздух» и давления в колодце, воздействующие, соответственно, на приводы регулирующего дросселя трубопровода подачи газообразного топлива в колодец, дросселя трубопровода подачи воздуха и привод шибера для отвода продуктов горения. Кроме того, в состав системы входят блоки коррекции давления в колодце по содержанию кислорода в отходящих продуктах горения и соотношения «топливо-воздух» в зависимости от разности температуры в рабочей

камере колодца и продуктов горения на выходе из рабочей камеры.

При работе горелок происходит неполное сжигание газообразного топлива в рабочей камере термического колодца, которое поддерживают регуляторы температуры и соотношения «топливо-воздух». Соотношение расходов топлива и воздуха соответствует коэффициенту расхода первичного воздуха $\alpha_1 < 1$. Блок коррекции соотношения расходов выбирает величину данного коэффициента, при котором перепад температуры между греющими газами в рабочей камере и на выходе из нее будет иметь минимальное значение. С использованием подсосов атмосферного воздуха (через дополнительные каналы) выполняется объемное дожигание продуктов неполного горения топлива в нижней части рабочей камеры колодца (в зоне пониженной температуры), выравнивая тем самым температурное поле по ее высоте. При превышении содержания кислорода в продуктах горения заданной величины специальный блок корректирует задание регулятору давления в колодце, который изменяет разрежение в рабочей камере, увеличивая подсосы вторичного воздуха. Возмущения по давлению в рабочей камере, связанные с изменением расхода топлива и воздуха, регулятор давления отрабатывает воздействием на привод шибера. Следовательно, осуществляется стадийное сжигание топлива, которое обеспечивает равномерное поле температуры в рабочем объеме термического колодца при исключении выброса канцерогенных веществ в атмосферу, что контролирует стационарный газоанализатор на оксид углерода и другие вещества.

Выводы. Экспериментальные исследования тепловой работы термических колодцев ПАО «Электрометаллургический завод «Днепроспецсталь» позволили выявить условия рационального сжигания топлива в данных тепловых агрегатах.

Библиографический список

1. Шульц, Л. А. По следам разработки и внедрения печей со стадийным сжиганием топлива и перспективы их развития в металлургии [Текст] / Л. А. Шульц // Известия Вузов. Черная металлургия. – 2005. – № 10. – С. 62-69. – Библиогр.: с. 69.
2. Арутюнов, В. А. Дожигание горючих компонентов атмосферы в рабочих камерах промышленных печей [Текст] / В. А. Арутюнов, А. В. Егоров, А. Я. Стамахин // Известия Вузов. Черная металлургия. – 2003. – № 3. – С. 46-55. – Библиогр.: с. 54-55.
3. Хзманян, Д. М. Теория горения и топочных устройств [Текст] : учеб. пособие / Д. М. Хзманян, А. Я. Качан ; под ред. Д. М. Хзманяна. – М. : Энергоатомиздат, 1960. – 350 с. – Библиогр.: с. 346-348. – 6300 экз.
4. Щетинков, Е. С. Физика горения газов [Текст] / Е. С. Щетинков. – М. : Наука, 1965. – 739 с. – Библиогр.: с. 727-739. – 4100 экз.
5. Семикин, И. Д. Топлива и топливное хозяйство металлургических заводов [Текст] : учеб. пособие / И. Д. Семикин, С. И. Аверин, И. И. Радченко. – М. : Металлургия, 1965. – 392 с. – Библиогр.: с. 381-384. –

3300 экз.

6. **Ревун, М. П.** Дослідження особливостей стадійного режиму опалювання полуменевих термічних печей камерного типу [Текст] / М. П. Ревун, В. Ю. Зінченко, В. І. Іванов, О. І. Чепрасов // *Металургія : наукові праці Запорізької державної інженерної академії.* – 2015. – Вип.. 1(33). – С. 76-79. – Библиогр.: с. 79.

Стаття надійшла до редакції 03.03.2016 р.
Рецензент, проф. І.Г. Яковлева

Текст даної статті знаходиться на сайті ЗДІА в розділі Наука
<http://www.zgia.zp.ua>