

УДК 669.162.23:536.24

УСЛОВИЯ РАБОТЫ НАСАДКИ И ПОДНАСАДОЧНОГО УСТРОЙСТВА ДОМЕННЫХ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ В ФОРСИРОВАННЫХ РЕЖИМАХ

*В. М. Кошельник, Б. А. Левченко, Э. Я. Лившиц,
Г. И. Павловский, В. В. Соловей*

Одним из способов повышения температуры дутья доменных печей является интенсификация работы воздухонагревателей путем повышения скоростей теплоносителей в насадке и температуры отходящих дымовых газов. С ростом уровня температуры повышаются требования к эксплуатационной надежности основных элементов воздухонагревателей — насадки и поднасадочного устройства. Для обоснованного выбора режимных параметров, обеспечивающих приемлемые условия службы огнеупоров насадки и несущих конструкций поднасадочного устройства, необходимо располагать данными об их тепловом и термонапряженном состояниях.

Информация о температурном состоянии исследуемых объектов получена с помощью конечно-разностной математической модели, основанной на численном решении нелинейной задачи теплопроводности методом элементарных балансов [1]. На основе этого метода составлены алгоритмы и разработаны методики расчета одномерного температурного поля по высоте насадки для последовательного и попарно-параллельного режимов работы воздухонагревателей [2, 3] и двумерного температурного поля по толщине кирпича насадки, используемого при определении температурных напряжений.

Сведения о динамике температуры теплоносителей, полученные для одномерной задачи, использованы для определения температурных полей по толщине кирпича насадки и элементов поднасадочного устройства. Расчет температурных напряжений производили по формуле [4]

$$\sigma_{\max} = \frac{\beta E}{1 - \mu} [\bar{t} - t_{\text{п}}],$$

где β — коэффициент линейного расширения; E — модуль упругости; μ — коэффициент Пуассона; \bar{t} — средняя по сечению температура кирпича; $t_{\text{п}}$ — температура поверхности.

Данная методика расчета теплообмена в насадке в отличие от изложенной в работе [5] позволяет так же, как и методика, приведенная в работе [6], рассматривать как квазистационарные, так и нестационарные условия работы воздухонагревателей. При этом учитывается зависимость теплофизических характеристик материала насадки и теплоносителей от температуры. Кроме того, применение метода элементарных балансов позволило построить математическую модель процесса теплообмена в насадке, удобную для реализации на ЭВМ как в одномерной, так и в двумерной постановке и обладающую хорошим быстродействием. Так, время расчета цикла нагрева — охлаждения насадки длительностью $\tau_{\text{ц}}=4$ ч составляет на ЭВМ М-222 в среднем 0,015 ч.

Расчетно-теоретическое исследование условий работы насадки и поднасадочного устройства проведено на базе воздухонагревателей, обеспечивающих дутьем в количестве $V_{\text{д}}=3650 \text{ м}^3/\text{мин}$ доменную печь объемом 2000 м^3 . Поверхность нагрева воздухонагревателя H составляет $31\,680 \text{ м}^2$, живое сечение насадки F_0 равно $9,9 \text{ м}^2$, размер ячейки $45 \times 45 \text{ мм}$, скорость дутья $\frac{V_{\text{д}}}{F_0} = 6,1 \text{ м/с}$, температура дымовых газов на входе в насадку $T_{\text{Г}}$ равна 1550°C , а температура холодного дутья $T_{\text{х.д}}=150^\circ\text{C}$.

Интенсивность теплообмена определяли по критериальным зависимостям, рекомендованным для данного типа насадки [7] и для элементов под-

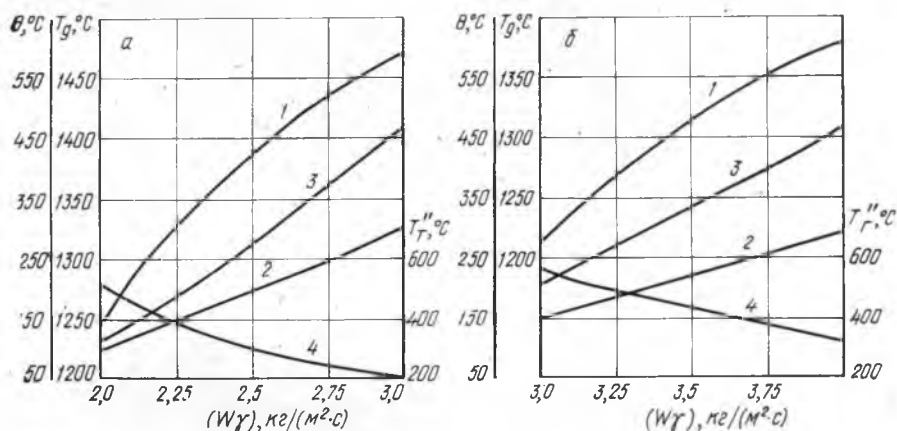


Рис. 1. Температурные характеристики работы воздухонагревателей при различных скоростях дымовых газов в режимах со скоростью дутья, равной $6,1 \text{ м/с}$ (а) и $9,15 \text{ м/с}$ (б): 1 — температура горячего дутья; 2 — температура отходящих газов; 3, 4 — колебания температуры $\theta = t(\tau = \tau_1)$, $-t(\tau = \tau_2)$ в нижнем ($h=0 \text{ м}$) и верхнем ($h=36 \text{ м}$) сечениях насадки за цикл

насадочного устройства [8] с введением лучистой составляющей теплового потока в газовый период.

В работе [9] проведено исследование воздухонагревателей при изменении температуры отходящего дыма от 300 до 600°C и скорости дутья $V_{\text{д}}/F_0$ от 4 до 15 м/с . На основе технико-экономических расчетов установлено, что значение $V_{\text{д}}/F_0$, равное $8-9 \text{ м/с}$, при максимальной температуре дыма $480-550^\circ\text{C}$ соответствует минимуму приведенных затрат и является оптимальным. Нами рассмотрен этот вопрос с точки зрения термонапряженного состояния и условий работы насадки и элементов поднасадочного устройства. Исследованы режимы работы воздухонагревателей со скоростью дутья $6,1$ и $9,15 \text{ м/с}$ при ограничении максимальной температуры отходящего дыма $T_{\text{Г}}^*$ до 600°C , т. е. в диапазоне величин, рекомендуемых в работе [9].

Результаты расчетов температурных полей насадки и теплоносителей по высоте воздухонагревателей с различными массовыми скоростями ($W\gamma$) дымовых газов при $\tau_{\text{н}}=4 \text{ ч}$ представлены на рис. 1, откуда видно, что увеличение ($W\gamma$) приводит к повышению температур нагрева дутья и уходящего дыма. При этом наблюдается увеличение колебаний температуры в нижних зонах насадки и смещение зоны высоких температур в ее нижние слои. Исследование температурного поля по толщине кирпича насадки и оценка температурных напряжений выполнены для входных сечений насадки ($h=0$ и $h=36 \text{ м}$), где наблюдается максимальная разность (Δt_{max}) или высокий уровень температур.

В режимах со скоростью дутья $6,1 \text{ м/с}$ величина Δt_{max} , фиксируемая в начале газового периода в верхнем сечении насадки при $\tau=90 \div 180 \text{ с}$,

снижается с увеличением ($W\gamma$). Максимальные температурные напряжения σ_{\max} в газовый период достигают величины порядка 0,7 МПа, а затем в связи с уменьшением Δt_{\max} их величина резко снижается. В дутьевой период максимальные температурные напряжения наблюдаются в конце периода, а их величина не превышает 0,3 МПа при увеличении ($W\gamma$) до 3 кг/(м²·с). Наиболее опасным по величине Δt_{\max} , а следовательно, и σ_{\max} , является нижнее сечение. Значения Δt_{\max} , наблюдаемые в начале дутьевого периода,

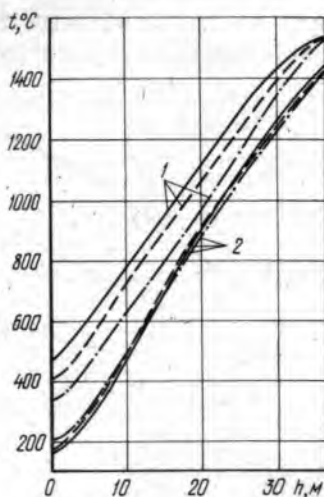


Рис. 2. Влияние длительности цикла на температурное поле насадки:

— $\tau_{\text{ц}} = 4$ ч; — — $\tau_{\text{ц}} = 3$ ч; — — — $\tau_{\text{ц}} = 2$ ч. Здесь и на рис. 3: 1 — конец периода нагрева; 2 — охлаждение

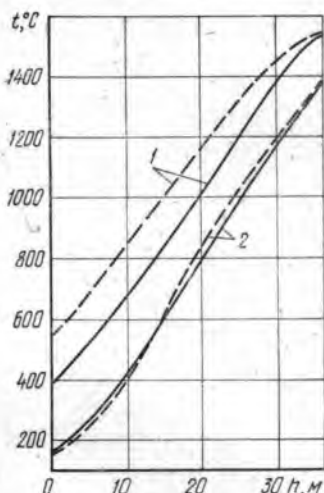


Рис. 3. Распределение температуры по высоте насадки:

— $\frac{V_{\text{д}}}{F_{\text{о}}} = 6,1$ м/с;
— — — $\frac{V_{\text{д}}}{F_{\text{о}}} = 9,15$ м/с

могут в пять-шесть раз превышать аналогичные, полученные в газовом периоде. Максимальные термические напряжения составляют при ($W\gamma$), равной 2,5 и 2,75 кг/(м²·с), и температуре дыма 487 и 598°C соответственно 1,28 и 1,74 МПа, что на порядок ниже предела прочности при сжатии [10], а суммарные напряжения σ_{Σ} с учетом веса насадки равны 2,0 и 2,46 МПа. Необходимо отметить, что полученные значения σ_{\max} являются несколько завышенными, так как нагрев дутьевого воздуха в зоне поднасадочного устройства не учитывали.

Возрастание колебания температуры насадки в цикле нагрев — охлаждение и повышение температуры в зоне поднасадочного устройства в форсированных режимах можно уменьшить при переводе воздухонагревателей на работу с укороченной длительностью цикла или на попарно-параллельный режим. Расчеты последовательного режима работы воздухонагревателей показали, что уменьшение $\tau_{\text{ц}}$ с четырех до трех и двух часов при одинаковой температуре нагреваемого воздуха ($T_{\text{д}} = 1400^{\circ}\text{C}$) приводит к снижению температуры дымовых газов на выходе из насадки соответственно с 518 до 454 и 378°C. При этом значительно уменьшаются и колебания температуры по высоте насадки (рис. 2).

При переводе воздухонагревателей на попарно-параллельный режим с сохранением заданной величины $T_{\text{д}}$ и $\tau_{\text{ц}} = 4$ ч температура уходящих газов понижается на 114 град, что также улучшает условия службы огнеупоров. С увеличением скорости дутья до 9,15 м/с температурные напряжения в верхнем сечении насадки достигают экстремальных значений до 0,9 МПа

при $(W\gamma)=3,5\div 3,75 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. В нижнем сечении насадки в связи с увеличением интенсивности теплообмена значения σ_{max} возрастают и составляют 2,5 МПа при $(W\gamma)=3,75 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ и $T_r''=609^\circ\text{C}$, что также ниже предела прочности при сжатии, а значение σ_Σ с учетом веса насадки равно 3,22 МПа.

Получение одинаковой температуры дутья ($T_d=1350^\circ\text{C}$) в режимах со скоростью дутья V_d/F_0 , равной 6,1 и 9,15 м/с, связано с повышением максимальной температуры дыма с 428 до 609°C.

Характер распределения температуры по высоте насадки (рис. 3) свидетельствует об изменении температурных условий службы огнеупоров для сравниваемых случаев. Колебания температуры по высоте насадки при этом оказываются более существенными и составляют соответственно для верхнего сечения 133 и 140°C, а для нижнего сечения 223 и 402°C. Максимальные температурные напряжения, фиксируемые в начале дутьевого периода в нижнем сечении насадки, достигают величины 1,22 и 2,5 МПа, т. е. возрастают примерно в полтора раза. Суммарные напряжения с учетом веса насадки равны 1,92 и 3,22 МПа, однако их величина значительно ниже предела прочности при сжатии.

Сокращение длительности цикла с четырех до трех и двух часов при $T_d=1350^\circ\text{C}$ дает снижение температуры дыма с 609 до 510 и 432°C, что приводит к уменьшению колебаний температуры за цикл и снижению температурных напряжений.

Исследование условий работы решеток и колонн поднасадочного устройства выполнено с учетом определяемой по экспериментальным данным [10] неравномерности распределения потоков теплоносителей. Максимальный уровень температуры металла и температурные разности по толщине опор и решеток представлены ниже; там же приведены изменения суммарных напряжений за цикл σ_Σ и экстремальные значения главных напряжений сжатия в решетке и опоре, обусловленные суммарным эффектом воздействия температурных напряжений и механических нагрузок, вызываемых весом насадки и поднасадочного устройства:

Наименование элемента	Материал	T_r'' , °C	$\Delta t_{\text{max}}'$, °C	σ_{max}' , МПа	σ_Σ' , МПа
Решетка	Чугун	550	4,0	6,0	9,9—21,9
	ЖЧХ-08	700	7,2	8,1	7,9—24,0
Опора	Чугун	550	1,7	2,5	40,0—45,0
	ЖЧХ-30	700	4,7	7,0	34,5—49,5

Из вышеприведенных данных следует, что в режимах с повышенной интенсивностью теплообмена максимальные напряжения в решетке и опоре не превышают предела текучести в рассматриваемом интервале температур. Кроме того, надежность эксплуатации элементов поднасадочного устройства можно повысить, применяя жаропрочные материалы, путем их экранирования или использования охлаждаемых конструкций [11].

Таким образом, форсирование работы доменных воздухонагревателей увеличением скорости дутья до 9 м/с и температуры отходящего дыма до 500—550°C является допустимым с точки зрения температурных напряжений в насадке и элементах поднасадочного устройства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ваничев А. П. — «Труды НИИ-1». М., Изд-во «Бюро новой техники», 1947 (НИИ. Сб. Вып. 25), с. 62.
2. Левченко Б. А., Кошельник В. М. — «Энергетическое машиностроение», 1974, № 17, с. 19—24.
3. Левченко Б. А., Кошельник В. М. — «Энергетическое машиностроение», 1976, № 21, с. 41—45.

4. Тайц Н. Ю. Технология нагрева стали. М., Metallurgizdat, 1963. 567 с. с ил.
5. Тимофеев В. Н., Малкин В. М., Шкляр Ф. Р. — «Тепло- и массообмен в слое и каналах, теплотехника доменных и теплообменных аппаратов». М., «Металлургия», 1970 (ВНИИМТ. Сб. № 20), с. 184—204.
6. Советкин В. Л., Швыдкий В. С., Шкляр Ф. Р., Ярошенко Ю. Г. — «Изв. вуз. Черная металлургия», 1973, № 12, с. 130—134.
7. Шкляр Ф. Р., Тимофеев В. М., Малкин В. М. — «Регенеративный теплообмен». М., Metallurgizdat, 1962 (ВНИИМТ. Сб. № 8), с. 137—161.
8. Лившиц Э. Я., Грановский Б. Р., Дульфан Я. Н. — В кн.: Использование вторичных энергоресурсов и охлаждение агрегатов в черной металлургии. М., «Металлургия», 1972, с. 109—113.
9. Шкляр Ф. Р., Агафонова М. И., Лекомцева Е. Д., Лившиц Э. Я. — «Металлургическая теплотехника». М., «Металлургия», 1975 (ВНИИМТ. Сб. № 4), с. 6—12.
10. Доменное производство. Справочник. Т. I. Под ред. И. П. Бардина. М., Metallurgizdat, 1963. 648 с. с ил.
11. Лившиц Э. Я., Моисеев Г. Г., Дудко В. М., Пейтнев Л. М. — «Бюл. ЦИИИ ЧМ», 1972, № 7, с. 30—31.

Харьковский политехнический институт
Поступила 16 августа 1976 г.