

достигается через 55 мин.

Следует заметить, что при времени остывания ковша до 2 ч, снижение температуры разлитого в него расплава не превышает 45,5 °С, что всего на два градуса больше базового значения для предварительно прогретого ковша.

Выводы

Разработана математическая модель теплового состояния сталеразливочного ковша на участке внепечной обработки стали. На этой модели исследовано изменение температуры расплава в ковше при различных вариантах его подготовки под разливку. Установлена зависимость величины снижения температуры расплава, разлитого в ковш, от времени остывания последнего. Результаты исследований могут быть полезны для экономии энергоресурсов при подготовке сталеразливочных ковшей.

Библиографический список

1. Математическая модель процесса охлаждения расплава в сталеразливочном ковше / С.В. Бейцун, Н.В. Михайловский, ВФ. Сапов // Металургійна теплотехніка: зб. наук. пр. НМетАУ. – Дніпропетровськ: ПП Грек О.С. – 2006. – С. 8-15.
2. Технология автоматического определения теплосодержания сталеразливочного ковша / С.В. Агеев, А.Д. Чернопольский, И.А. Петушков и др. // Металлург. – 2011. – № 5. – С. 48-52.
3. Промышленные печи: Справочное руководство для расчетов и проектирования: 2-ое издание, перераб. и доп. / Е.И. Казанцев. – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.

Поступила 27.05.2013

УДК 661.666: 66.096.5

Федоров С.С. /к.т.н./

Национальная металлургическая Академия Украины

Наука

Анализ эффективности применения высокотемпературных секционных утилизаторов теплоты с кипящим слоем. Результаты исследований. Сообщение II

С целью повышения тепловой эффективности электротермических печей кипящего слоя при высокотемпературной переработке углеродных материалов изучена тепловая работа секционных утилизаторов теплоты готового продукта, предназначенных для нагрева исходного сырья. На основе математического моделирования исследовано влияние гранулометрического состава материала, рабочих температур, числа секций, тепловых потерь через футеровку и отношения расходных теплоемкостей теплоносителей. Ил. 3. Табл. 3. Библиогр.: 6 назв.

Ключевые слова: переработка углеродных материалов, высокотемпературная электротермическая печь, кипящий слой, повышение тепловой эффективности, секционный утилизатор теплоты готового продукта, нагрев сырья, математическое моделирование

In order to improve the thermal efficiency of electrothermal fluidized bed furnaces at high temperature processing of carbon materials studied thermal performance of heat recovery boilers sectional final product intended for heating the feedstock. On the basis of mathematical modeling studied the effect of particle size distribution of the material, operating temperature, number of sections, heat loss through the lining and the expenditure heats heat transfer fluids.

Keywords: recycling of carbon materials, high-temperature electrothermal furnace, fluidized bed, increasing thermal efficiency, heat recovery sectional final product, the heating of raw materials, mathematical modeling.

Важным аспектом организации кипящего слоя является обеспечение его устойчивой работы при минимальном уносе материала. При этом снижение уноса может достигаться как увеличением высоты надслоевого пространства, расширением сечения камеры, так и установкой улавливающих циклонов [1]. Как показал анализ гидродинамических режимов кипения слоя частиц материала (графита и антрацита) полифракционного состава 0,8-5 мм, проведенный ранее на «холодной» экспериментальной модели [2], при переходе из плотного состояния в псевдоожив-

женное наблюдается некоторый переходный режим, соответствующий постепенному включению в процесс кипения более тяжелых фракций. Выполненные расчеты критических скоростей витания частиц графита [3] при температурах потока азота до 3000 °С [4] показали, что такая тенденция сохраняется. При неоднородном составе материала, когда «тяжелые» фракции только включаются в режим кипения, «легкие» фракции на порядок меньшего размера уже достигают второй критической скорости начала уноса (рис. 1, 2). Таким образом, на основе полученных

данных можно сформулировать требование к неоднородности состава дисперсного материала $d_{ч\max}/d_{ч\min} < 10$. Полученное отношение является оценочным, поскольку область существования кипящего слоя зависит также от фракционного состава полидисперсного материала, формы и плотности частиц [5].

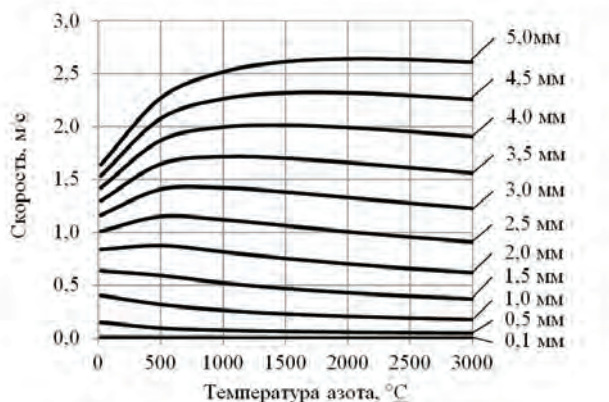


Рис. 1. Зависимость первой критической скорости псевдоожога от температуры азота (частицы графита 0,1-5,0 мм)

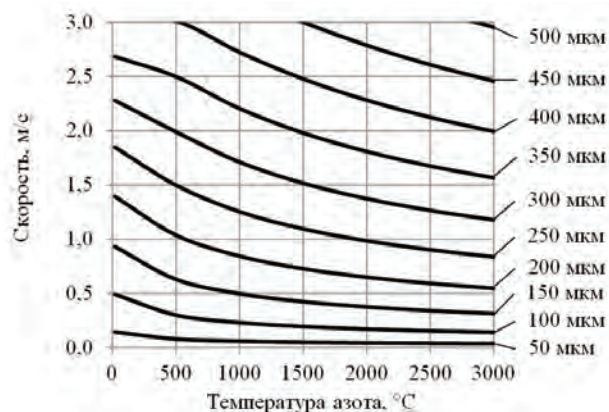


Рис. 2. Зависимость второй критической скорости псевдоожога от температуры азота (частицы графита 50-500 мкм)

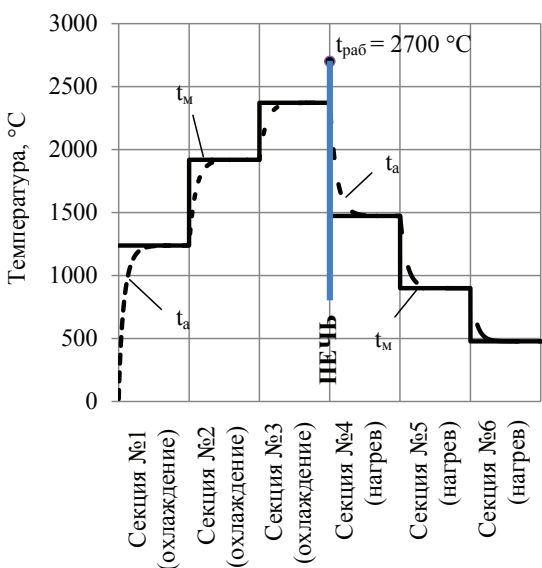


Рис. 3. Температурная диаграмма материала и азота в секционном утилизаторе теплоты

Отдельного внимания заслуживает температурная диаграмма материала и азота в секционном утилизаторе, поскольку она дает общее представление об

особенностях взаимного теплообмена между газовой и твердой фазой (рис. 3). Расчетное время пребывания материала в каждой из секций составляло порядка 5 мин; отношение расходных теплоемкостей газа и материала $W_a/W_m = 1,72$; рабочая температура в электротермической печи $t_{раб} = 2700\text{ °C}$.

Согласно полученным результатам теплообмен является завершенным в каждой камере, что согласуется с данными [1, 5]. Как видно, дискретный характер изменения температур значительно уступает классическому противотоку. При этом подогрев сырья составляет около 1500 °C , а температура готового продукта на выходе из утилизатора – 1250 °C . Отсюда следует, что использование таких утилизаторов однозначно требует установки дополнительного холодильника готового продукта.

В табл. 1, 2 представлены результаты исследования влияния числа секций на эффективность работы секционных утилизаторов кипящего слоя для рассматриваемого случая. Как видно, наиболее ощутимый качественный переход происходит при увеличении числа секций от схемы 1:1 к схеме 2:2, когда экономия энергии возрастает почти в два раза. В дальнейшем увеличение числа секций дает все меньший эффект, динамика роста температуры подогрева сырья замедляется, приближаясь постепенно к классическому противотоку. Что касается выбора оптимального числа секций, то здесь нет однозначного ответа. Можно с уверенностью сказать, целесообразно использовать утилизатор по схеме с числом камер не менее 2:2. Верхняя граница будет определяться целым рядом конструктивных и экономических факторов. По данным ряда исследований каскадных теплообменных систем [1, 6] оптимальной является именно 3-х ступенчатая схема. На наш взгляд, с учетом размеров этих теплообменников, наиболее реальны с практической точки зрения варианты схем – 2:2; 3:3; 4:4.

В случае замены парной компоновки на непарную, что может быть вызвано определенными технологическими особенностями, эффективность работы утилизатора снижается (табл. 2). При этом в исследованном интервале степень подогрева сырья практически не зависит от распределения секций между нижним и верхним теплообменниками.

Таблица 1. Влияние количества секций на эффективность работы утилизатора при парной компоновке секций

Параметр	Схема утилизатора (секции – нижняя часть : верхняя часть)					
	1:1	2:2	3:3	4:4	5:5	6:6
Температура азота на выходе из холодильника, °C	1685	2164	2381	2496	2562	2604
Температура материала на выходе из подогревателя, °C	830	1258	1484	1618	1702	1757
Снижение энергозатрат, %	22,5	40,1	49,9	55,8	59,4	61,8

Таблица 2. Влияние количества секций на эффективность работы утилизатора при непарной компоновке секций

Параметр	Схема утилизатора (секции – нижняя часть : верхняя часть)					
	1:3	3:1	2:4	4:2	5:3	3:5
Температура азота на выходе из холодильника, °С	1685	2381	2164	2496	2562	2381
Температура материала на выходе из подогревателя, °С	1097	1119	1421	1429	1590	1588
Снижение энергозатрат, %	33,2	34,2	47,2	47,5	54,6	54,5

Анализ влияния рабочих температур обработки углеродного материала в диапазоне 2000-2700 °С показал, что экономия мощности в процентном выражении определяется в основном компоновкой секционного утилизатора. Другими словами, при использовании утилизатора по схеме 3:3 экономия составит порядка 50 % (табл. 2) независимо от температуры в печи.

Увеличение температуры подогрева сырья в секционном утилизаторе возможно также за счет повышения расхода и температуры азота на входе в верхний теплообменник. Оба эти параметра связаны между собой обратно пропорционально.

Как известно из классической теории теплообменных аппаратов, одинаковое изменение температур теплоносителей достигается при равенстве их средних расходных теплоемкостей (водяных эквивалентов). Для высокотемпературного секционного утилизатора теплоты со сложной схемой теплообмена (материал-газ-материал) и различными температурными режимами определить такое равенство прямым расчетом сложно, что обусловлено зависимостью теплоемкостей материала и газа от температуры.

Результаты численного эксперимента представлены в табл. 3.

Таблица 3. Влияние удельного расхода азота на подогрев материала

Параметр	Отношение расходных теплоемкостей газа и материала				
	1,72	2,15	2,58	3,01	3,44
Температура азота на выходе из холодильника, °С	2381	2232	2081	1934	1795
Температура материала на выходе из подогревателя, °С	1484	1572	1599	1582	1538

Выводы

Анализ критических скоростей витания дисперсного углеродного материала при температурах азота до 3000 °С позволила приближенно оценить предел неоднородности фракционного состава углеродного материала

$$d_{ч\max}/d_{ч\min} < 10.$$

На основе математического моделирования тепловых и гидродинамических процессов в секционных утилизаторах кипящего слоя установлено:

- наиболее эффективно использование утилизаторов при парной компоновке числа секций в холодильнике и подогревателе по схеме 2:2; 3:3; 4:4, которые обеспечивают экономию электроэнергии в основном технологическом процессе от 40 до 56 %.

Дальнейшее увеличение числа секций приводит к незначительному росту температуры подогрева;

- замена парной компоновки утилизатора на непарную сопровождается снижением эффективности работы утилизатора, при этом в исследованном диапазоне степень подогрева сырья практически не зависит от распределения секций между нижним и верхним теплообменниками.

Библиографический список

1. Разумов И.М. Псевдооживление и пневмотранспорт сипучих тел. – М.: Химия, 1972. – 240 с.
2. Electrothermal Fluidized bed furnace for thermal treatment of recycled battery wastes. Mykhailo V. Gubynskyi, Sergiy S. Fedorov, Mykola V. Livitan et al. 25th Symposium on Fluid Machinery. FEDSM2013-16630. URL: <http://www.asmeconferences.org/FEDSM2013>, (дата обращения: 21.02.2013).
3. Островский В.С., Виргильев Ю.С. Костиков В.И. и др. Искусственный графит. – М.: Metallurgia, 1986. – 272 с.
4. Теплофизические свойства технически важных газов при высоких температурах и давлениях: Справочник / В.Н. Зубарев, А.Д. Козлов, В.М. Кузнецов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 232 с.
5. Расчеты аппаратов кипящего слоя: Справочник / Под ред. И.П. Мухленова, Б.С. Сажина, В.Ф. Фролова. – Л.: Химия, 1986. – 352 с.
6. Бойко В.Н. Выбор технологической схемы циклонной печи для производства мелкодисперсной извести // Тр. XVI Междунар. конф. «Теплотехника и энергетика в металлургии». - Днепропетровск: Новая идеология, 2011. - С. 18-19.

Поступила 01.04.2013