House of the South Ural State University, 2000. 18 p.
7. Vigriyanov P.G. The electromagnetic processes of multiphase valve engines: a monograph. Chelyabinsk: Publishing House of the South Ural State University, 2007. 143 p.
8. Vigriyanov P.G. The study of electromagnetic processes valve engines: a monograph. Chelyabinsk: Publishing Center SUR-MG, 2010. 161 p.

УДК 66.046.1

Нешпоренко Е.Г., Картавцев С.В., Сысуев Н.Е.

ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГЕНЕРАЦИИ ТЕПЛОТЫ ЧЕРЕЗ ПЕРФОРИРОВАННЫЕ ОГРАЖДЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ УСТАНОВОК

Аннотация. В данной работе производится обоснование эффективности регенерации теплоты через перфорированные ограждения высокотемпературных установок в условиях обработки расплавленного материала. Целью исследования является определение возможности снижения тепловых потерь через ограждение реактора с одновременным снижением расхода первичного энергоресурса.

Ключевые слова: энергосбережение, регенерация теплоты, перфорированное ограждение, теплотехнология.

Neshporenko E.G., Kartavtsev S.V., Sysuev N.E.

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF HEAT RECOVERY THROUGH THE PERFORATED FENCE HIGH-TEMPERATURE INSTALLATIONS

Abstract. In this paper is evaluation of the effectiveness of heat recovery through the perforated fence establish high-ments to the processing conditions of the molten material. The aim of the study is to identify opportunities to reduce heat loss through the fenced-denie reactor while reducing consumption of primary energy resources.

Keywords: energy, heat recovery, perforated fence thermal technology.

Задачи рационального использования минеральных и энергетических ресурсов в настоящее время наиболее значимы при производстве конечной продукции. Особенно это актуально для теплотехнологического комплекса черной металлургии, который является одним из крупнейших потребителей первичных природных ресурсов.

Значительная интенсивность процессов получения продукта приводит к необходимости применения принудительного охлаждения ограждений высокотемпературных технологических промышленных установок (ВТПУ), в которых реализуются главные теплотехнологические стадии обработки материалов. При этом увеличиваются тепловые потери через ограждения.

Применение водяного охлаждения (кессоны, панели) основных элементов конструкций в теплотехнических объектах черной металлургии увеличивает потери тепла через ограждения, но спасает их от физического износа. Например, в тепловом балансе доменной печи потери тепла с охлаждающей водой составляют 3-5%, в мартеновской печи 15-30%, в нагревательной печи прокатных станов 20-30%, в рудовосстановительных электропечах 8-12%, в сталеплавильных печах 17-20% [1], а в печах цветной металлургии применение гарнисажа привело к возрастанию этих потерь от 12-15 до 40-75% [2–5].

Учет тепловых потерь в окружающую среду во многом определяет видимый расход топлива на процесс. Особенно это актуально для процессов, в которых химическая энергия топлива не может быть полностью использована, например в восстановительных процессах жидкофазного получения чугуна.

Высокие температуры расплавленных материалов (1200-1800°С) обусловливают значительные потери теплоты через ограждения реакторов, которые находятся в непосредственном контакте с расплавами. Известные теплотехнические принципы регенерации тепловых потерь в окружающую среду, такие как «температурный барьер», фильтруемое и пористое ограждение, перфорированный слой технологического материала, могут быть применены только в низкотемпературном диапазоне процесса регенерации теплоты в высокотемпературных технологических промышленных установках, содержащих расплав.

В работах [6–8] на «теплой» модели ВТПУ, содержащей расплав, проведены экспериментальные исследования процесса снижения тепловых потерь через ограждения на всём температурном диапазоне. Эксперименты показали возможность осуществления такого процесса путем применения перфорированного ограждения в условиях прямого соприкосновения с расплавом технологического материала.

С теплотехнической точки зрения тепловые потери через ограждения могут быть регенерированы по разным направлениям, например для нагрева входящих потоков. Наиболее выгодным следует считать предварительный нагрев и термохимическую регенерацию входящего потока топлива, поскольку это позволит увеличить температуру его горения. Как известно, высокая температура способствует увеличению скорости химических реакций и, как следствие, приводит к увеличению удельной производительности установки.

Таким образом, обозначен способ регенерации тепловых потерь в окружающую среду применительно к реакторам, содержащим расплав. Обоснуем теоретически эффективность регенерации теплоты через перфорированные ограждения высокотемпературных установок.

Для этого необходимо на уровне теплового баланса реактора рассмотреть возможное влияние процесса регенерации на главную характеристику – видимый расход топлива. В качестве базы сравнения примем тепловой баланс реактора, в котором отсутствует регенеративное использование тепловых потерь через ограждение в окружающую среду. Считаем, что в реакторе обрабатывается некоторый исходный материал, при этом имеют место только тепловые потери с отходящими газами $Q_{о.г}$, через ограждения в окружающую среду $Q^0_{о.с}$ и теплота технологического продукта $Q_{т.п}$. Запишем уравнение теплового баланса реактора:

$$Q_{х.т} = Q_{т.п} + Q_{о.г} + Q^0_{о.с}; \quad (1)$$

$$B^0 \cdot Q^р_н = Q_{т.п} + Q_{о.г} + Q^0_{о.с}, \quad (2)$$

где $Q_{х.т}$ – химическая теплота холодного топлива; B^0 – базовый расход топлива; $Q^р_н$ – низшая теплота сгорания топлива.

Введем параметр $\eta_{КИТ}$, характеризующий долю теплоты топлива, которая в заданных условиях может быть передана на теплотехнологический процесс (коэффициент использования теплоты); соответственно $(1-\eta_{КИТ})$ характеризует долю теплоты топлива, которая в заданных условиях не может быть передана на теплотехнологический процесс и теряется с отходящими газами.

Тогда упростить тепловой баланс можно путем исключения тепловых потерь с отходящими газами и учетом их с помощью $\eta_{КИТ}$ в приходной части:

$$B^0 \cdot Q^р_н \cdot \eta_{КИТ} = Q_{т.п} + Q^0_{о.с}. \quad (3)$$

Тогда базовый расход топлива определится так:

$$B^0 = \frac{Q_{т.п} + Q^0_{о.с}}{Q^р_н \cdot \eta_{КИТ}}. \quad (4)$$

Таким образом, снизить расход топлива можно путем регенерации тепловых потерь в окружающую среду через ограждение реактора.

Ниже исследуется возможное влияние регенерации теплоты, теряющейся через ограждение газообразным топливом, на расход последнего на основе анализа баланса процесса во всём возможном диапазоне решений.

При регенерации $Q^0_{о.с}$ заранее не известно, какая часть энергии от нагретого топлива была воспринята именно от $Q^0_{о.с}$, а какая от реакционной зоны. Поэтому необходимо введение параметра доли от общего количества теплоты топлива, которая была воспринята при его нагревании теплотой, ранее теряющейся через ограждение. Обозначим эту долю как $d_{рег}$.

При нагревании топлива теплота может затрачиваться как на нагрев $c_р \cdot \Delta t$, так и на преобразование его химических связей ΔQ. Общее количество теплоты, воспринятое топливом:

$$\Delta Q_т = d \cdot B \cdot (\Delta Q + c \cdot \Delta t), \quad (5)$$

где d – доля топлива от общего его количества, которая направлена на регенерацию; B – общий расход топлива на процесс с регенерацией $Q^0_{о.с}$.

Тогда теплота, воспринятая единицей топлива от $Q^0_{о.с}$, определится так:

$$\Delta Q^{о.с}_т = d \cdot B \cdot (\Delta Q + c \cdot \Delta t) \cdot d_{рег}. \quad (6)$$

Соответственно теплота, воспринятая единицей топлива от реакционной зоны

$$\Delta Q^{тп}_т = d \cdot B \cdot (\Delta Q + c \cdot \Delta t) \cdot (1 - d_{рег}). \quad (7)$$

Из **рис**. 1 видно, что ограничением для процесса регенерации теплоты, теряющейся через ограждение, является условие, которое характеризует свойства конкретного топлива:

$$d \cdot B \cdot (\Delta Q + c \cdot \Delta t) \cdot d_{рег} \le Q^0_{о.с}. \quad (8)$$

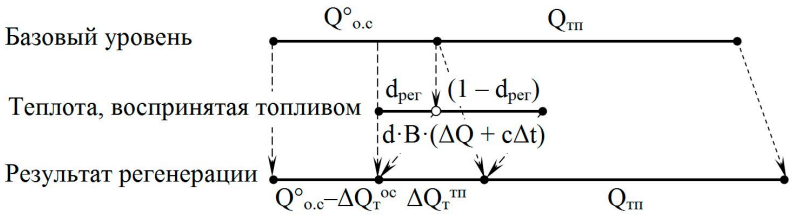


Рис. 1. **Графическое пояснение к формулам** (5)-(7)

Если условие (8) не выполняется, то это означает, что топливо принципиально нагревается на величину, большую, чем $Q^0_{о.с}$. При этом $Q^0_{о.с}$ регенерируется полностью при условии $d_{рег} < 1$, а остальная часть топлива нагревается от реакционной зоны (**рис**. 2).

Запишем тепловой баланс реактора с условием регенерации теплоты, теряющейся в окружающую среду путем нагрева части входящего потока топлива:

$$(1\text{-}d) \cdot B \cdot Q^р_{н1} + d \cdot B \cdot (Q^р_{н2} + c \cdot \Delta t) = Q^0_{о.с} - \Delta Q^{о.с}_т + Q_{тп} + \Delta Q^{тп}_т + Q_{ог1} + Q_{ог2}, \quad (9)$$

где первое слагаемое левой части есть энергия потока топлива, напрямую поступающего в реактор без нагрева, второе – энергия потока топлива, поступающего в реактор после регенерации теплоты в окружающую среду; $Q_{ог1}$ – теплота отходящих газов, образованная при сгорании первого потока топлива;

$Q_{ог2}$ – теплота отходящих газов, образованная при сгорании второго потока топлива; $Q^{р}_{н1}$ – низшая теплота сгорания первого потока топлива; $Q^{р}_{н2}$ – низшая теплота сгорания потока топлива, направленного на регенерацию. Так как при нагреве топлива может меняться его химический состав, то и теплота сгорания тоже изменится на величину ΔQ, тогда: $Q^{р}_{н2} = Q^{р}_{н1} + \Delta Q$.

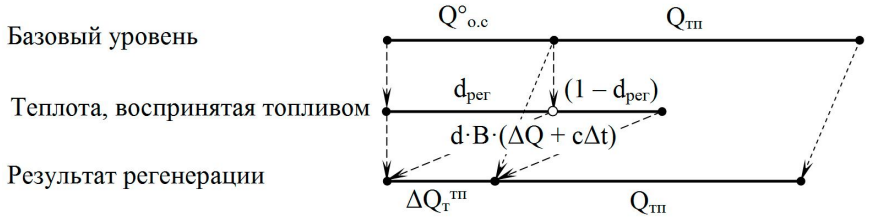


Рис. 2. **Графическое пояснение к условию** (8), $d_{рег}<1$

Учесть $Q_{ог1}$ и $Q_{ог2}$ можно, так же как и в базовом варианте, путем применения параметра $\eta_{КИТ}$. Однако первая часть топлива будет иметь свой $\eta_{КИТ1}$, а нагретая вторая часть свой $\eta_{КИТ2}$ (**рис**. 3). Тогда тепловой баланс изменится так:

$$\begin{aligned}&(1\text{-}d)\cdot B\cdot Q^{р}_{н1}\cdot d^{р}_{р1} + d\cdot B\cdot\left(Q^{р}_{н1} + \Delta Q + c\cdot\Delta t\right)\cdot d^{р}_{р2} = \\ &= Q^{0}_{о.с} - d\cdot B\cdot\left(\Delta Q + c\cdot\Delta t\right)\cdot d_{рег} + \\ &+ Q_{тп} + d\cdot B\cdot\left(\Delta Q + c\cdot\Delta t\right)\cdot\left(1 - d_{рег}\right).\end{aligned} \qquad (10)$$

На **рис**. 3 представлен график охлаждения продуктов сгорания единицы топлива. Видно, что при нагревании изменяется как температура горения, так и теплота его сгорания. Та часть теплоты, которая находится выше линии температурного уровня процесса, представляет собой теплоту, полезно используемую. Соответственно та часть теплоты, которая находится ниже линии температурного уровня процесса, представляет собой теплоту, которая теряется с отходящими газами.

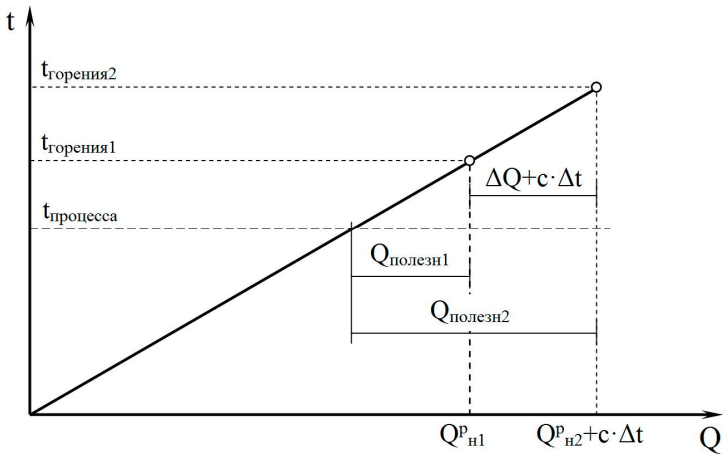


Рис. 3. **Охлаждение продуктов сгорания единицы холодного и нагретого топлива**

Анализируя **рис**. 3, можно записать выражение для коэффициента $\eta_{КИТ2}$ через известную долю $\eta_{КИТ1}$. Получим следующее выражение:

$$\eta_{КИТ1} = \frac{Q_{полезн1}}{Q^{р}_{н1}}; \qquad Q_{полезн1} = Q^{р}_{н1}\cdot\eta_{КИТ1};$$

$$\eta_{КИТ2} = \frac{Q_{полезн2}}{Q^{р}_{н2} + c\cdot\Delta t};$$

$$Q_{полезн2} = Q_{полезн1} + \Delta Q + c\cdot\Delta t;$$

откуда

$$\eta_{КИТ2} = \frac{Q^{р}_{н1}\cdot\eta_{КИТ1} + \Delta Q + c\cdot\Delta t}{Q^{р}_{н1} + \Delta Q + c\cdot\Delta t}. \qquad (11)$$

Подставляя выражение (11) в (10) и упрощая последнее, в результате получим расход топлива с учетом регенерации теплоты в окружающую среду:

$$B = \frac{Q^{0}_{о.с} + Q_{тп}}{Q^{р}_{н1}\cdot\eta_{КИТ1} + 2\cdot d\cdot d_{рег}\cdot\left(\Delta Q + c\cdot\Delta t\right)}. \qquad (12)$$

Отношение разницы базового расхода топлива и расхода с регенерацией к базовому показывает, какую долю топлива принципиально можно сэкономить:

$$b = \frac{B^{0} - B}{B^{0}} =$$

$$= 1 - \frac{Q^{р}_{н1}\cdot\eta_{КИТ1}}{Q^{р}_{н1}\cdot\eta_{КИТ1} + 2\cdot d\cdot d_{рег}\cdot\left(\Delta Q + c\cdot\Delta t\right)},$$

$$b = 1 - \frac{1}{1 + 2\cdot d\cdot d_{рег}\cdot\dfrac{\Delta Q + c\cdot\Delta t}{Q^{р}_{н1}\cdot\eta_{КИТ1}}}. \qquad (13)$$

Введем следующее обозначение: $a = \dfrac{\Delta Q + c\cdot\Delta t}{Q^{р}_{н1}\cdot\eta_{КИТ1}}$, тогда относительный расход топлива запишется так:

$$b = 1 - \frac{1}{1 + 2\cdot d\cdot d_{рег}\cdot a}. \qquad (14)$$

Параметр «а» характеризует физические свойства исходного топлива. Например, для метана $Q^{р}_{н}$=35800 кДж/м^3, при его нагревании до температуры 1600°С потребуется теплоты около 8900 кДж/м^3 = ΔQ+c·Δt. Эта теплота пойдет на нагрев и разложение метана до сажеводородной смеси [9]. При условии, что температурный уровень процесса 1600°С доля полезного использования теплоты топлива $\eta_{КИТ1}$ составит 0,38 при коэффициенте избытка кислорода 0,55 (холодные метан и кис-

лород), что характерно для восстановительных условий организации процесса. Исходя из этого параметр «а» для метана составит 0,65. При фиксированном параметре «а» можно получить поле решений (**рис**. 4), так как относительный расход топлива есть функция от двух переменных d и d_{per}.

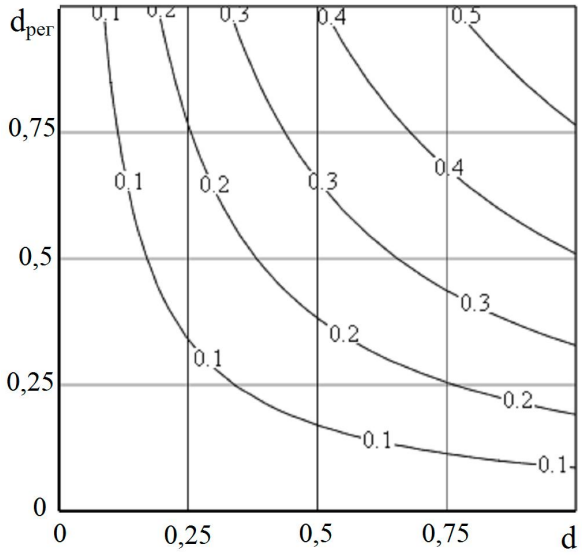


Рис. 4. **Поле возможных решений относительного снижения расхода топлива при регенерации теплоты** $Q_{o.c}$ **при а** = 0,65

Анализ выражения (14) показывает, что при а=0,65:

$$b = \begin{cases} 0, & \text{при } d = 0, \quad d_{per.} = 1; \\ 0, & \text{при } d = 1, \quad d_{per.} = 0; \\ 0{,}57, & \text{при } d = 1, \quad d_{per.} = 1. \end{cases} \qquad (15)$$

Полученное решение говорит о том, что в данном случае принципиально возможно максимально снизить суммарный расход топлива на 57% по сравнению с базовым вариантом. Таким образом, произведенные вычисления показывают целесообразность применения перфорированных ограждений или частичное их использование для целей снижения тепловых потерь через ограждения высокотемпературных технологических промышленных установок.

Список литературы

1. Глинков М.А., Глинков Г.М. Общая теория тепловой работы печей: учебник для вузов. М.: Металлургия, 1990. 232 с.
2. Андоньев С.М. Испарительное охлаждение металлургических печей. М.: Металлургия, 1970. 424 с.
3. Неуструев А.А., Ходоровский Г.Л. Вакуумные гарниссажные печи. М.: Металлургия, 1967. 272 с.
4. Рафалович И.М. Теплопередача в расплавах, растворах и футеровке печей и аппаратов. М.: Энергия, 1977. 304 с.
5. Руссо В.Л. Теплофизика металлургических гарниссажных аппаратов. М.: Металлургия, 1978. 248 с.
6. Нешпоренко Е.Г., Картавцев С.В. Вопросы энергоресурсосбережения при извлечении железа из руд: монография. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. 153 с.
7. Нешпоренко Е.Г. Регенерация тепловых потерь через перфорированное ограждение высокотемпературных технологических установок // Вестник МЭИ. 2008. №1. С. 74-78.
8. Нешпоренко Е.Г. Экспериментальное исследование гарниссажного режима регенерации теплоты через перфорированное ограждение // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2010. №4. С. 74-78.
9. Картавцев С.В. Природный газ в восстановительной плавке. СВС и ЭХА: монография. Магнитогорск, МГТУ, 2000. 188 с.

References

1. Glinkov M.A., Glinkov G.M. The general theory of heat furnaces: Textbook for universities. Moscow, Metallurgy, 1990. 232 p.
2. Andoniev S.M. Isparitelnoe cooling metallurgical pewhose. Moscow, Metallurgy, 1970. 424 p.
3. Neustruev A.A., Hodorowsky G.L. Garnissag vacuum furnace. Moscow, Metallurgy, 1967. 272 p.
4. Raphalovich I.M. Heat transfer in fused, solutions and protection furnaces and devices. Moscow, Energy, 1977. 304 p.
5. Russo V.L. Thermophysics metallurgical of garnissage apparatus. Moscow, Metallurgy, 1978. 248 p.
6. Neshporenko E.G., Kartavtsev S.V. Issues of energy saving when extracting iron from ore: monograph. Magnitogorsk: MSTU, 2007. 153 p.
7. Neshporenko EG Regeneration of heat loss through a perforated barrier of high technological equipment // Bulletin of MEI. 2008. №1. Pp. 74-78.
8. Neshporenko EG Experimental study garnissag mode of heat regeneration through the perforated fence // Vestnik of MGTU named after G.I. Nosova. 2010. №4. Pp. 74-78.
9. Neshporenko E.G., Kartavtsev S.V. Question savings of resources and energy at extraction of iron from ores: monography. Magnitogorsk: MGTU, 2007. 153 p.