



*The main schemes of recovery of waste gases heat, applied in fuel furnaces of metallurgical and machine-building production, are analysed, and also criteria of choice of recuperators construction depending on function and constructions of furnaces are considered.*

В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, И. А. ТРУСОВА, Д. В. МЕНДЕЛЕВ, БНТУ

УДК 669.04

## ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧЕЙ ПРИ РЕКУПЕРАЦИИ ТЕПЛОТЫ УХОДЯЩИХ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

Одним из показателей, характеризующим энергетическую эффективность работы печи, является коэффициент рекуперации (или регенерации), показывающий степень утилизации теплоты уходящих из печи дымовых газов. Чем выше степень утилизации теплоты продуктов сгорания, тем большая часть теплоты сжигаемого топлива используется непосредственно в объеме печи для реализации технологического процесса, и тем меньше удельные расходы топлива и соответственно себестоимость продукции.

Как известно, существуют стандартные схемы рекуперации теплоты уходящих дымовых газов, включающие использование рекуператоров, котлов-утилизаторов, а также комбинированное использование рекуператора и котла-утилизатора.

В работе [1] приведены основные три схемы утилизации теплоты дымовых газов. Первая схема предусматривает подогрев воздуха для подведения его в осенне-зимний период непосредственно к рабочим местам для обогрева, вторая – установку дополнительного газоводяного теплообменника для использования в системе горячего водоснабжения, третий вариант заключается в подаче нагретого воздуха к горелкам функционирующих печей.

Наиболее распространенная система утилизации теплоты дымовых газов нагревательных печей включает установленный за печью рекуператор и серийный котел-утилизатор с дымососом [2]. Недостатки этой системы, как отмечают авторы, заключаются в низкой стойкости рекуператора, что приводит к потере воздуха для горения. Кроме того, подсосы холодного воздуха через неплотности рекуператора и шиберов резко снижают эффективность работы котла-утилизатора. В результате температура дыма перед котлом-утилизато-

ром редко превышает 400–500 °С и поэтому котлы-утилизаторы зачастую имеют паропроизводительность на уровне 15–30% от проектной.

Для промышленных печей, функционирующих на машиностроительных предприятиях Республики Беларусь, использование комбинированной схемы утилизации теплоты уходящих газов, по мнению авторов [3], позволит повысить к. п. д. печей с 5–17 до 40–65%.

Для условий машиностроительного производства нагревательные печи для последующей обработки металла давлением (ковка, штамповка) имеют, как правило, невысокую производительность (до 20 т/ч) и по сравнению с печами металлургических предприятий общий объем уходящих газов относительно невелик. Поэтому, на наш взгляд, наиболее распространенной схемой утилизации теплоты уходящих газов может являться использование только рекуператора для подогрева воздуха горения.

Экономия топлива при температуре уходящих газов 800–900 °С (характерная температура для нагревательных печей машиностроительного и металлургического производства) при увеличении температуры подогрева воздуха горения последовательно с 200 до 700 °С на каждые 100 °С составляет около 5% [4, 5]. Таким образом, нагрев воздуха горения до температуры 400–500 °С позволяет сэкономить 20–25% топлива, а при повышении температуры нагрева воздуха до 700 °С экономия топлива может достигать 35%. Помимо прямой экономии топлива, подогрев воздуха позволяет повысить температуру факела и, тем самым, интенсифицировать теплообмен в печи. Вместе с тем, лимитирующим фактором является увеличение объема вредных выбросов ( $\text{NO}_x$ ) с уходящими дымовыми газами из печи.

Выбор типа и характеристик рекуператора, как правило, обусловлен рядом факторов, таких, как технологическое назначение и температура рабочего пространства печи, объем и температура уходящих газов, гидравлическое сопротивление рекуператора, удельная поверхность нагрева, теплосъем с поверхности нагрева, коэффициент теплопередачи и др. В технической литературе не существует единого подхода к выбору оптимальной конструкции и характеристик рекуператора.

В работе [6] для оценки конструкции металлических рекуператоров предложены частные критерии, в качестве которых автор использует температуру подогрева воздуха, температуру стенок теплообменного элемента, гидравлическое сопротивление, удельную массу поверхности нагрева, теплонапряжение поверхности нагрева, теплосъем единицы полезного объема, критерий Кирпичева, безразмерный коэффициент теплопередачи, эффективность теплообменника. Указана также целесообразность применения обобщенного критерия оптимизации на основе обобщенной функции желательности Харрингтона.

Авторами работы [7] рассмотрена оптимизация работы рекуператора с точки зрения минимизации его поверхности нагрева при ограничениях на температуры в опасных точках рекуператора, т. е. с учетом стойкости материала.

В работах [8, 9] предлагается в качестве критерия оптимизации работы рекуператоров использовать тип теплообменной поверхности. Автором выполнена оценка габаритных характеристик различных конструкций теплообменников в зависимости от способа оребрения поверхности, выбора турбулизатора, типа интенсификатора и т. д.

По мнению автора работы [10], наиболее обоснованным и удобным критерием оптимальности теплообменников является энергетический коэффициент М. В. Кирпичева. Оптимизация по энергетическому коэффициенту М. В. Кирпичева во всех случаях приводит к одинаковым результатам: расходы теплоносителей и толщина слоя изоляции равны минимально допустимым их значениям, а ширина воздушной щели и длина рекуператора – максимально допустимым. При этом величины безразмерного энергетического критерия технологической оптимальности, равные отношению полезного теплового потока к суммарным затратам энергии в единицу времени, и соответствующие максимальным значениям энергетического коэффициента М. В. Кирпичева, лежат в диапазоне от  $-1$  до  $4,5$ , т. е. полезный тепловой поток невелик в сравнении с энергетическими затратами на его получение или даже отсутствует (отрицателен).

Наряду с необходимостью совершенствования конструктивных параметров теплообменников, используемых на металлургических печах (снижение стоимости, аэродинамического сопротивления, повышение долговечности и уменьшения материалоемкости), одно из важных направлений – снижение стоимости рекуператоров [11].

Эффективным методом теплового проектирования аппаратов и анализа процессов является математическое моделирование с последующим проведением вычислительного эксперимента. Авторы работы [12] предлагают для анализа и выбора энергосберегающих конструкций теплообменных аппаратов использовать математическую модель эксергетической эффективности рекуператора. Но вместе с тем ими же отмечается, что разработанная модель требует дальнейших исследований при конструировании теплообменных аппаратов.

Наиболее полный учет всех критериев, подлежащих оптимизации, приведен в работах [13, 14]. Авторами показано, что эффективность использования топлива в печах может быть повышена путем сочетания мероприятий по обеспечению полного его сгорания при минимальном избытке воздуха и максимально возможной утилизации физической теплоты уходящих газов. Поэтому целесообразна максимально возможная, но экономически оправданная степень рекуперации теплоты уходящих газов. Значение экономически целесообразной степени рекуперации для конкретного значения температуры уходящих газов можно найти исходя из минимума приведенных затрат на рекуперацию и топливо. Анализ проведенных расчетов показал, что с повышением стоимости топлива и времени работы нагревательной печи значение оптимальной температуры подогрева воздуха увеличивается, а повышение стоимости рекуператора приводит к ее снижению.

Аналогичный подход был использован и при определении целесообразного уровня утилизации низкопотенциальной теплоты уходящих газов из рекуператора, установленного на нагревательной печи [15]. Использование теплоты низкопотенциальных газов связано со снижением температурного напора и, как следствие, с увеличением площади поверхности теплообмена теплоутилизационных установок, затрат на их сооружение и эксплуатацию. В качестве критерия оценки экономически целесообразной степени использования низкопотенциальной теплоты уходящих дымовых газов принимается разность переменной части затрат на теплоутилизационную установку и стоимости сэкономленного топлива, которая может быть получена в замещаемой теплоэнергетической установке.

Анализ проведенных расчетов показал, что с увеличением стоимости топлива, используемого в замещающей теплоэнергетической установке, годового времени ее работы, коэффициента теплопередачи в ней оптимальная температура уходящих газов на выходе из теплоутилизационной установки снижается, а с ростом затрат на теплоутилизационную установку, повышением температуры нагреваемого теплоносителя на входе в нее оптимальная температура уходящих газов на выходе из теплоутилизационной установки увеличивается.

Таким образом, очевидно, что одним из важнейших параметров тепловой работы рекуператора, определяющим энергоэффективность промышленной печи, является температура подогрева воздуха, идущего на горение.

По мнению авторов [16], наиболее целесообразно подогревать воздух горения до 450–500 °С, а дальнейшее повышение температуры невыгодно, так как требует применения жаропрочных сталей для рекуператора и внутренней футеровки воздухопроводов от рекуператора до горелок и самих горелок.

В свою очередь, авторы работы [17] считают, что подогрев воздуха горения для печей машиностроительного производства должен быть не более 300 °С, а целесообразность более высокого подогрева воздуха может быть оправдана только технологическими особенностями ведения высокотемпературного процесса. Отмечено также, что с ростом температуры подогрева воздуха для горения от 200 до 300 °С поверхность теплообмена рекуператора возрастает в 2 раза, а с ростом температуры от 200 до 380 °С – в 6 раз.

В работе [18] рассмотрена эффективность энергосбережения при повышении температуры подогрева воздуха для горения в нагревательной печи машиностроительного производства, но при этом автор ограничился диапазоном температуры подогрева воздуха 300–400 °С.

В работе [19] приведены номограммы для определения относительного снижения расхода топлива при повышении температуры подогрева воздуха на 1 °С в зависимости от температуры уходящих газов и вида топлива, а также для определения относительного снижения расхода топлива на единицу уменьшения коэффициента избытка воздуха в зависимости от температуры, коэффициента избытка воздуха горения и вида топлива. Данные номограммы можно использовать для оценки эффективности систем автоматического управления процессом сжигания газа, модернизации горелок, внедрения технических решений с целью устранения подсосов воздуха и др.

В работах [18, 19], в частности, показано, что для природного газа при увеличении температуры подогрева воздуха для горения от 300 до 400 °С относительное снижение расхода топлива составит около 5%. В свою очередь, снижение коэффициента избытка воздуха со значения 1,3 до 1,2 при температуре воздуха горения 200 °С и температуре уходящих газов 1000 °С приводит к относительному снижению расхода топлива на 5,7%, а при температуре уходящих газов 400 °С лишь на 0,8%.

Помимо определения оптимальной температуры подогрева воздуха для горения, необходимо осуществить выбор типа рекуператора, удовлетворяющего условиям эксплуатации промышленных печей машиностроительного производства. В работе [3] отмечено, что используемые на печах заготовительного и механосборочного производств машиностроительных предприятий чугунные рекуператоры имеют ряд недостатков (низкая газоплотность, нетехнологичность сборки и плохие эксплуатационные характеристики). Однако, несмотря на их серьезные недостатки, в настоящее время они остаются единственным вариантом внедрения на промышленных печах машиностроительного комплекса (автор исключает внедрение трубчатых стальных рекуператоров). В основу использования чугунных рекуператоров положено их единственное достоинство – возможность изготовления в условиях завода с использованием ваграночного (вторичного) чугуна и отливкой в заводских условиях. Целесообразность использования чугунных рекуператоров для нагревательных печей производительностью до 20 т/ч (для типовых печей машиностроительного производства) обоснована также в работе [17]. При производительности нагревательных печей свыше 20 т/ч обосновано использование трубчатых петлевых рекуператоров.

В последующих работах этих авторов [20, 21] показано, что существующий сегодня чугунный рекуператор, используемый в качестве устройства для регенеративного теплоиспользования тепловых отходов (продукты сгорания органического топлива) промышленных печей машиностроительных и автотракторных предприятий, представляет собой жесткую конструкцию, собранную из большого числа игольчатых труб (типоряды 17,5 и 28), обогреваемую дымовыми газами, имеющими температуру 750–900 °С. Для этого диапазона температур уходящих газов авторы рекомендуют использовать в качестве материала игольчатых труб кремнистый чугун, при котором термические напряжения, возникающие в стенке, не превосходят

его прочностные характеристики. При запуске игольчатого рекуператора, выполненного из кремнистого чугуна, скорость разогрева стенки не должна превышать величину порядка 50 °С/мин.

Анализ изложенных выше подходов к определению оптимальных параметров теплообменников

показал необходимость проведения дальнейших исследований по выбору оптимальной температуры подогрева воздуха в чугунных игольчатых рекуператорах применительно к действующему парку нагревательных печей машиностроительного производства Республики Беларусь.

### Литература

1. Ермаков О. Н. Интенсификация теплообмена и энергосбережения при работе газовоздушных теплообменников / О. Н. Ермаков [и др.] // Интенсификация теплообмена. Радиационный и сложный теплообмен: Тр. третьей рос. нац. конф. по теплообмену. М., 21–25 окт. 2002 г. В 8-ми т. Т. 6. С. 105–106.
2. Братова Т. П. Эффективная утилизация тепла дымовых газов термических и нагревательных печей / Т. П. Братова, А. З. Рыжавский // *Металлург*. 2003. № 4. С. 35.
3. Несенчук А. П. Промышленный унифицированный рекуператор на базе модульных элементов «СИЛАЛ» М-I 115×460×860-05 и «СИЛАЛ» М-II 230×460×860-1,0 (типоряд М-I и М-II) // *Изв. высш. учеб. завед. и энергет. объедин. СНГ. Энергетика*. 2007. № 2. С. 53–59.
4. Немзер Г. Г. Теплотехнология кузнечно-прессового производства / Г. Г. Немзер. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1988.
5. Щелоков Я. М. Энергоаудит и сертификация топливотребляющего оборудования / Я. М. Щелоков // *Пече-трубостроение: тепловые режимы, конструкции, автоматизация и экология: материалы I междунар. конгресса*. 2004. С. 56–60.
6. Хандрига Г. С. Математическая модель и многокритериальная оптимизация рекуперативного пластинчатого теплообменника (РПТ) / Г. С. Хандрига // *Металлургическая теплотехника: сб. науч. тр. НМетАУ: в 3-х т. Днепропетровск, 2000. Т. 3. С. 207–214.*
7. Бойко И. И. Выбор минимальной поверхности нагрева многосекционного рекуператора с учетом ограничивающих температур теплообменных элементов / И. И. Бойко, М. Е. Антонов // *Металлургическая теплотехника: сб. науч. тр. НМетАУ: в 2-х кн. Днепропетровск, 2005. Кн. 1. С. 32–40.*
8. Горобец В. Г. Сравнительный анализ тепловых и гидравлических характеристик современных типов развитых поверхностей теплообмена и перспективы их применения в теплообменных устройствах металлургических производств / В. Г. Горобец // *Металлургическая теплотехника: сб. науч. тр. НМетАУ: в 2-х кн. Днепропетровск, 2005. Кн. 1. С. 132–140.*
9. Горобец В. Г. Методы интенсификации теплообмена и выбор оптимальных конструкций теплообменных аппаратов для утилизации теплоты сбросных газов металлургических производств / В. Г. Горобец // *Теплотехника и энергетика в металлургии: сб. тр. XV междунар. конф., Днепропетровск, 7–9 октября 2008 г. С. 67–68.*
10. Логинов В. Е. Об одном энергетическом критерии оптимальности радиационных рекуператоров / В. Е. Логинов // *Тез. докл. и сообщ.: VI Минский междунар. форум по тепло- и массообмену. Минск, 19–23 мая 2008 г. Т. 2. С. 268–269.*
11. Воробьева Л. А. Перспективные направления утилизации теплоты в промышленных печах / Л. А. Воробьева // *Металлургическая теплотехника: сб. науч. тр.: в 2-х кн. Днепропетровск, 2005. Кн. 1. С. 80–86.*
12. Долгополов И. С. Топологоэнергетический подход к анализу теплообменного аппарата / И. С. Долгополов, П. А. Словиковский, В. Т. Тучин // *Металлургическая теплотехника: сб. науч. тр. НМетАУ: в 2-х кн. Днепропетровск, 2005. Кн. 1. С. 186–197.*
13. Парамонов А. М. Определение оптимальной степени рекуперации теплоты дымовых газов нагревательных устройств / А. М. Парамонов, В. В. Крайнов // *Промышленная энергетика*. 2005. № 7. С. 32–35.
14. Парамонов А. М. Определение оптимальной степени рекуперации теплоты дымовых газов / А. М. Парамонов, В. В. Крайнов // *Кузнечно-штамповочное производство*. 2006. № 4. С. 26–30.
15. Парамонов А. М. Экономически целесообразный уровень использования низкопотенциальной теплоты уходящих газов после нагревательных печей / А. М. Парамонов, В. В. Крайнов // *Промышленная энергетика*. 2005. № 3. С. 41–43.
16. Дружинин Г. М. Опыт ОАО «ВНИИМТ» в разработке печей и горелочных устройств для металлургии и машиностроения / Г. М. Дружинин, И. М. Дистергефт // *Пече-трубостроение: тепловые режимы, конструкции, автоматизация и экология: материалы II междунар. конгресса*. 2006. С. 49–62.
17. Несенчук А. П. Анализ эффективности использования различных типов рекуператоров в нагревательных печах металлургического производства / А. П. Несенчук [и др.] // *Изв. высш. учеб. завед. и энергет. объедин. СНГ. Энергетика*. 2008. № 5. С. 46–53.
18. Соколов А. К. Оценка эффективности энергосбережения при снижении температуры уходящих газов / А. К. Соколов // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2007. № 10. С. 46–49.
19. Соколов А. К. Номограммы для оценки энергосбережения при повышении температуры или снижении коэффициента избытка воздуха на горение / А. К. Соколов // *Промышленная энергетика*. 2006. № 5. С. 40–42.
20. Несенчук А. П. Стойкость унифицированного модульного чугунного рекуператора нагревательных печей высокотемпературных теплотехнологий машиностроительных и автотракторных предприятий / А. П. Несенчук [и др.] // *Изв. высш. учеб. завед. и энергет. объедин. СНГ. Энергетика*. 2010. № 3. С. 48–54.
21. Шидловский В. В. К определению скорости нагревания стенки элемента поверхности модульного промышленного рекуператора печей высокотемпературных теплотехнологий машиностроительных и автотракторных заводов / В. В. Шидловский // *Изв. высш. учеб. завед. и энергет. объедин. СНГ. Энергетика*. 2010. № 2. С. 48–51.