

The Efficiency of Coal Use in Power Engineering

Pivnyak G.G., Razumny Yu.T., Rukhlov A.V.

Nation Mining University, Dnepropetrovsk

The modern condition of Ukraine power industry is considered. The basic branch problems such as power industry modernization necessity, irregularity of daily electrical energy consumption schedule and low efficiency of fuel use on thermal power stations are analysed. The problems decision methods for power system operational stability and country power safety level increase are proposed.

Key words: energy, power station, fuel, efficiency, electrical energy consumption schedule.

Received November 3, 2009

УДК 669.183.217.4:662.614.2

Рекуперативный подогрев воздуха как метод повышения энергоэффективности печных агрегатов (Обзор)

Агеев К.В.

Институт газа НАН Украины, Киев

Рассмотрены основные методы повышения энергоэффективности печных агрегатов. Проведен анализ способов утилизации тепла отходящих дымовых газов и интенсификации отвода теплоты. Приведен обзор и сравнение основных конструкций теплообменников. Рассмотрены области применения технологии импактных струй и показана ее универсальность. Показаны технологические и экономические преимущества рекуператоров с активными вставками, а также актуальность научной задачи по разработке теплообменников на основе технологии импактных струй.

Ключевые слова: энергоэффективность печных агрегатов, импактные струи, рекуператор с активными вставками.

Розглянуто основні методи підвищення енергоефективності пічних агрегатів. Проведено аналіз способів утилізації тепла вихідних димових газів та інтенсифікації тепловідведення. Наведено огляд та порівняння основних конструкцій теплообмінників. Розглянуто області застосування технології імпактних струменів та показано її універсальність. Показано технологічні та економічні переваги рекуператорів з активними вставками, а також актуальність наукового завдання щодо розробки теплообмінників на основі технології імпактних струменів.

Ключові слова: енергоефективність пічних агрегатів, імпактні струмені, рекуператор з активними вставками.

Плавильные и нагревательные печи промышленных предприятий являются одним из наиболее крупных потребителей топлива в стране. По данным Министерства промышленной политики Украины, в докризисное время потребление природного газа в прокатном произ-

водстве составляло 1,2 млрд м³, еще такие же объемы, из которых значительная часть использовалась в нагревательных и термических печах, потреблялись на предприятиях машиностроения. Большинство печей имеют низкий термический КПД, иногда в пределах 15–25 %,

что обусловлено большими потерями теплоты с отходящими продуктами сгорания, составляющими 50–60 % теплоты, подводимой в печь [1].

Повышение эффективности использования топлива в печах для нагревания и выплавки металла и в других печных агрегатах путем подогрева воздуха для горения за счет использования теплоты уходящих газов в рекуператорах получила широкое распространение в промышленности как эффективный способ повышения технико-экономических и энерготехнологических показателей работы печей.

Рекуперация теплоты обеспечивает экономию топлив, расширяет возможности их использования, повышает термический КПД печей. Рекуперативный подогрев воздуха обеспечивает уменьшение расхода топлива в зависимости от температуры, позволяет использовать низкокалорийные топлива.

Регенерация отходящего тепла может достигаться предварительным подогревом шихты (садки печи) либо воздуха горения. Экономия топлива при использовании традиционных систем утилизации отходящего тепла для предварительного подогрева воздуха для обычных металлических рекуператоров составляет 20–30 %, а для керамических — более 40 %.

Известно, что передача тепла между различными телами может осуществляться теплопроводностью, конвекцией и излучением. По характеру теплообмена в промышленной теплотехнике различают две основные группы утилизационных теплообменников: с аккумуляцией тепла (регенераторы) и без аккумуляции тепла (рекуператоры) [2], а также устройства смешанного типа, теплообмен в которых осуществляется при непосредственном контакте сред (тел), между которыми происходит теплообмен и отсутствует промежуточная стенка [3, 4].

Регенеративные теплообменники при работе не только передают тепло, но и аккумулируют его. При этом регенераторы являются теплообменниками циклического действия и должны попеременно переключаться для контакта с теплоотдающим телом (средой) и с нагреваемым телом (средой). Передача тепла теплопроводностью может происходить только в одном и том же теле при наличии градиента температур или при контакте двух твердых тел с различной температурой. Регенераторы обеспечивают значительную экономию топлива, однако их установка требует значительных финансовых затрат и, по существу, требует строительства новой печи.

Технологическими недостатками регенеративных теплообменников являются необходимость установки клапанов (перекидка каждые

30–40 с для регенераторных горелок), сложная управляющая автоматика, засоряемость шариковых насадок и др. [1].

Рекуперативные теплообменники — это агрегаты непрерывного действия, принцип работы которых основан на передаче тепла от нагретой среды через разделительную стенку к нагреваемой среде.

Невозможность создания единой универсальной конструкции рекуператора, которую можно было бы с одинаковой эффективностью применять для различных промышленных печей, показана в [5, 6]. Поскольку в рекуперативных теплообменниках промышленных печей утилизация тепла отходящих дымовых газов осуществляется конвективной теплопередачей от нагретой стенки к обтекающему ее газу (воздуху), в дальнейшем будем рассматривать лишь случай конвективного теплообмена при обтекании нагретой стенки рекуператора воздухом (газом).

По используемому материалу рекуперативные теплообменники в металлургическом производстве подразделяются на металлические и керамические (на основе огнеупорных материалов).

Керамические рекуператоры могут дать тот же уровень подогрева воздуха (утилизации вторичной теплоты), что и при регенеративном подогреве. По конструкции различают керамические рекуператоры из трубчатых элементов (температура подогрева воздуха 800–850 °С, температура дымовых газов 1200–1250 °С) и из керамических блоков (камней) (температура подогрева воздуха 500–750 °С).

Керамические рекуператоры имеют низкую герметичность, негазоплотность, связанную с утечками воздуха через трещины в стенках элементов керамических труб и кладки стен рекуператора. Это объясняется значительным градиентом температур и термическими напряжениями в верхнем ряду труб трубчатого рекуператора, куда подаются отходящие дымовые газы, излучением предрекуператорного пространства, а также градиентом температур в нижних рядах труб, омываемых холодным воздухом. Например, трещины в шамотных трубках образуются в интервале 375–425 °С и при перепаде температур наружной и внутренней стенки трубы свыше 250 °С. Утечка воздуха для керамических рекуператоров в холодном состоянии (в самом начале эксплуатации) обычно не превышает 12 % от количества воздуха перед рекуператором, а в процессе эксплуатации может увеличиваться до 30–40 %.

Керамический рекуператор из керамических блоков несколько уступает по газоплотности керамическому трубчатому рекуператору. Основным недостатком керамических рекупера-

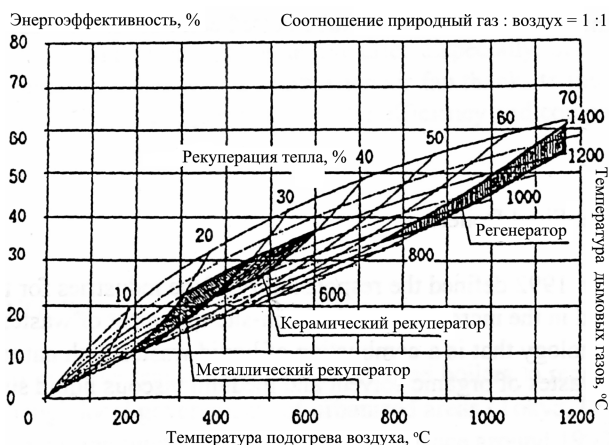


Рис.1. Степень энергосбережения при использовании предварительного подогрева воздуха в рекуператорах различного типа и температурный диапазон нагрева воздуха при соотношении природный газ : воздух = 1 : 1.

торов также можно назвать их чрезвычайную громоздкость, что в условиях необходимости экономии производственных площадей и энергоносителей в Украине является существенным недостатком. При этом керамические рекуператоры незаменимы при необходимости подогрева воздуха до 700–1000 °C (нагревательные колодцы) [1].

К преимуществам металлических рекуператоров относятся их относительная компактность, которая при одинаковой тепловой эффективности в 6–8 раз больше, чем керамических, возможность располагать металлические рекуператоры в любом месте по отношению к печи, а также высокая газоплотность [3, 7]. Предварительный подогрев воздуха в рекуператорах, исходя из практики промышленного применения, целесообразно проводить до 600–700 °C [8].

Для металлических рекуператоров уровень подогрева воздуха зависит от применяемых сталей. Влияние подогрева воздуха до 300–350 °C в рекуператорах из нелегированного металла на экономию топлива при отоплении природным газом и мазутом составляет 20–25 %, низкокалорийным углем — 35 % в обычных нагревательных печах при этом также показано, что с уменьшением теплопроводности топлива величина его экономии возрастает [1, 9].

В [10] предложена оценка эффективности использования топлив в зависимости от состава топлива и окислителя, их температуры, основанная на разности полных энтальпий КПД использования топлива в предположении об «идеальной печи». Независимо от методики оценки эффективности такого подогрева воздуха полученные результаты имеют близкие значения.

Степень энергосбережения при использовании предварительного подогрева воздуха в

рекуператорах различного типа и температурный диапазон нагрева воздуха при соотношении природный газ : воздух = 1 : 1 показана на рис.1. Видно, что максимальный энергосберегающий эффект около 60 % может обеспечить только применение теплообменника регенеративного типа либо керамических рекуператоров, а температура подогрева воздуха может достигать свыше 1100 °C.

Экономичность при изготовлении металлических рекуператоров достигается возможностью использования мягких углеродистых и низколегированных сталей, а также возможностью применения сварных работ. Углеродистые стали способны обеспечить подогрев воздуха в рекуператорах до 300 °C. Стойкость металлических рекуператоров, как правило, составляет 1,5–2 года, их замена связана с дополнительными расходами. Применение легированных сталей и чугунов с высоким содержанием Cr (12–18 %), Ni и Mo (до 0,6 %) расширяет температурный диапазон металлических рекуператоров при значительном удорожании их изготовления [8].

К недостаткам металлических рекуператоров следует отнести относительно высокую стоимость их изготовления вследствие дороговизны легированного металла, а также невысокие значения коэффициента теплоотдачи. Среди многочисленных конструкций металлических рекуператоров широкое распространение получили трубчатые рекуператоры благодаря простоте их изготовления, относительно легко достигаемой температурной компенсации при термическом расширении металла.

Гидродинамическая теория теплообмена гласит, что аэродинамическое сопротивление (потери давления) потока пропорционально связано с коэффициентом теплоотдачи α . При установлении связи между сопротивлением и теплоотдачей исходили из того, что турбулентный поток состоит из турбулентного ядра и пограничного ламинарного слоя, попадая в который частицы ядра изменяют скорость движения и вытесняются постепенно обратно в ядро частицами с более высокой скоростью. Выделяют также турбулентный пограничный слой. Для движения в круглой трубе коэффициент теплоотдачи $\alpha = 1/8 \xi \cdot \rho \cdot c \cdot \omega \cdot E$ ккал/(м²·с·°C), где ξ — коэффициент гидравлического сопротивления; ρ , ω — значения физических параметров жидкости; E — поправка на движение ламинарного пограничного слоя.

Из данного уравнения в результате несложных преобразований получим основное уравнение в критериальном виде: $Nu = 1/8 \xi \cdot Re \cdot E$ [11].

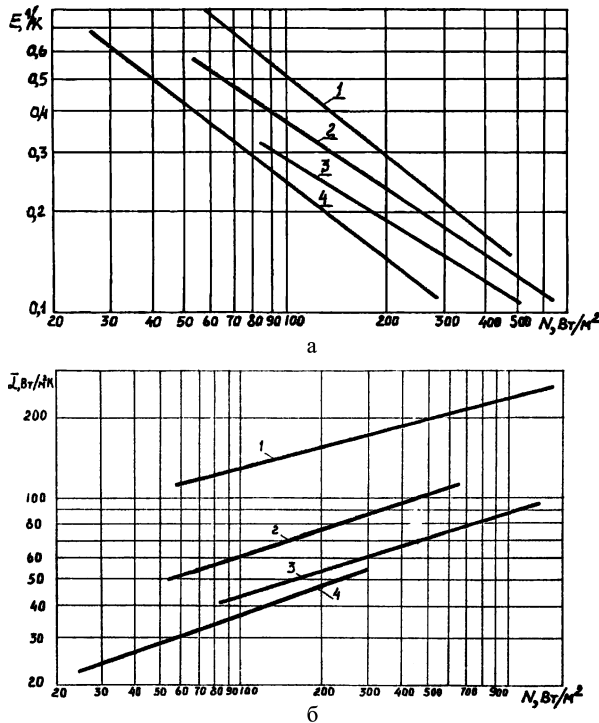


Рис.2. Зависимость энергетического коэффициента (а) и среднего коэффициента теплоотдачи (б) от затрат энергии на перемещение воздуха при различных схемах теплообмена: 1 — струйное натекание воздуха; 2 — канал типа диффузор-конфузор; 3 — канал с оребренной стенкой; 4 — канал с гладкими стенками.

Таким образом, интенсификация конвективного теплообмена на воздушной стороне рекуператора за счет увеличения скорости воздушного потока, установки вставок различной формы и конструкции, использования эффекта натекания струй воздуха на отдающую теплоту поверхность, согласно гидродинамической теории теплообмена, связана с затратами энергии на турбулизацию воздушного потока.

В последнее время для повышения эффективности металлических трубчатых рекуператоров применяются внутренние вставки в трубы. Эти вставки могут иметь форму трубы, спирали и др. Установка вставок позволяет увеличить температуру подогрева воздуха до 80 °С при той же температуре уходящих газов или уменьшении температуры горячей стенки рекуператора на 70–80 °С при той же температуре подогрева воздуха, что значительно продлевает срок его службы в условиях агрессивных сред.

Вставки в трубы металлических рекуператоров являются пассивными и, по существу, несколько увеличивают теплообменные поверхности. В трубчатых рекуператорах со вставками и без них нагреваемый воздух движется вдоль поверхности теплообменника. Коэффициент теп-

лопередачи конвекцией существенно увеличивается при увеличении угла атаки. Поэтому конструкция активных (перфорированных) вставок в рекуператорах предполагает истечение нагретого воздуха перпендикулярно горячей стенке рекуператора. При этом ожидается, что коэффициент теплопередачи возрастет от 20–25 до 70–75 ккал/(м²·ч·°С), что приведет к пропорциональному уменьшению габаритов рекуператора и снижению материалоемкости при его изготовлении. При струйном натекании воздуха на теплообменную поверхность интенсивность теплоотдачи увеличивается в 2–4 раза по сравнению с другими методами интенсификации теплообмена при одинаковых затратах энергии и равном подогреве воздуха.

Принимая во внимание, что на предприятиях машиностроительной и металлургической отрасли находятся сотни печных агрегатов, изучение и разработка рекуперативных теплообменников с активными вставками является актуальной научной задачей.

На выбор типа рекуперативного теплообменника для конкретного печного агрегата будут одновременно влиять колебания температуры продуктов сгорания и особенности конструкции рекуператора: устойчивость к температурам, габариты, стоимость, а также экономическая обоснованность применения конструкции рекуператора для данной промышленной печи.

Конструктивно турбулизация всего потока может осуществляться применением продольного оребрения в воздушном канале. Результаты исследования влияния прерывистых продольных ребер на теплообмен и турбулизацию всего потока за счет применения оребрения в воздушном канале приведены в [12–14]. При этом теплоотдача увеличивается пропорционально увеличению скорости, а следовательно, и турбулизации потока: $Nu = 0,018 Re^{0,8}$.

По методике, предложенной в [15–18], по расчетным данным в Институте газа выполнено сравнение различных способов интенсификации теплообмена в рекуператорах для разных схем теплоотвода по энергетическому коэффициенту (рис.2,а) и по коэффициентам теплоотдачи (рис.2,б) [19].

Энергетический коэффициент является показателем энергоэффективности установки и определяется отношением количества тепла, переданного стенкой рабочему телу — воздуху, или, наоборот, к энергетическим потерям на сопротивление движению теплоносителя.

Из рис.2,а видно, что энергоэффективность теплообменной установки со струйным натеканием при одинаковых значениях теплотерь

может быть примерно на 40 % выше, чем при теплообмене в канале с гладкими стенками (традиционная конструкция металлического рекуператора без внутренних вставок). При этом тепловая устойчивость теплообменной поверхности также повышается за счет снижения температуры самой теплообменной стенки (повышения эффективности теплообмена воздуха со стенкой) при струйном натекании по сравнению с течением воздуха в канале с гладкими стенками в 1,3–2,2 раза. При сравнении поверхностей теплообмена в указанных выше схемах при равенстве перепада температур можно говорить о том, что при струйном натекании для нагрева воздуха до заданной температуры потребуется поверхность в 2–3 раза меньшей площади, чем для традиционной конструкции металлического рекуператора, и в 1,3–1,5 раза меньшая, чем для канала типа диффузор-конфузор.

Анализ кривых рис.2,а показывает увеличение коэффициента теплоотдачи от стенки к воздуху при увеличении затрат энергии на перемещение воздуха, что для струйного натекания может означать большую турбулизацию потока воздуха, чем при традиционной конструкции рекуператора, а следовательно, большую скорость воздуха в канале (или истекания из сопла), что подтверждается расчетными величинами, представленными в [19].

Однако увеличение затрат энергии на перемещение воздуха является лимитирующим фактором для энергоэффективности рекуперативной установки со струйным натеканием (импактными или ударными струями). Следовательно, достижение определенных значений этих затрат (согласно [19]) будет приводить к снижению энергоэффективности до 40 %. Поэтому оптимальной величиной потерь для схемы с импактными струями можно считать 100 Вт/м^2 , но не более 200 Вт/м^2 , при дальнейшем росте величины энергопотерь коэффициент теплоотдачи будет расти незначительно, а энергетический коэффициент (энергоэффективность) снизится в 1,7–2,5 раза (~ 40 %).

Расчетные кривые рис.2,б также позволяют сделать вывод о гранично допустимых значениях потерь энергии на транспортировку воздуха к охлаждаемой поверхности для традиционной конструкции рекуператора, которая составляет не более 100 Вт/м^2 . Увеличение потерь до 200 Вт/м^2 будет приводить к падению энергоэффективности традиционного рекуператора в 1,7 раза, а величина коэффициента теплоотдачи α для традиционного рекуператора повысится незначительно.

Таким образом, наиболее приемлемыми с точки зрения энергоэффективности — степени рекуперации тепла отходящих газов, технологичности изготовления и отсутствия необходимости использования в конструкции высоколегированных сталей (возможно применение методов сварки), а также учитывая температурный диапазон отходящих газов до $600 \text{ }^\circ\text{C}$, можно считать металлические трубчатые рекуператоры, энергоэффективность которых в случае применения активных теплообменных вставок можно повысить до 30 %, обеспечить большую компактность обменников этой конструкции.

При температурах отходящих продуктов сгорания (дымовых газов) $1100\text{--}1000 \text{ }^\circ\text{C}$ для металлических рекуператоров температура предварительного подогрева воздуха может составлять $200\text{--}500 \text{ }^\circ\text{C}$, при перепаде температур $100\text{--}(600\text{--}500) \text{ }^\circ\text{C}$ рекуператор будет бесконечно большим и тяжелым [9]. При указанных температурах теплопередача будет осуществляться за счет конвективного теплообмена между нагреваемой дымовыми газами поверхности и воздухом при отсутствии лучевой составляющей теплообмена.

Таким образом, интенсификация теплообмена может быть достигнута за счет увеличения скорости движения газообразных продуктов сгорания, а следовательно, турбулизации потока. Начальная скорость воздуха в рекуператорах на практике не превышает $15\text{--}20 \text{ м/с}$ вследствие увеличения затрат энергии на преодоление трения и естественного сопротивления каналов, которое с ростом скорости потока увеличивается пропорционально ее квадрату.

Энергоэффективность теплообменника определяется поверхностью теплообмена и величиной локального (местного) коэффициента теплоотдачи, ккал:

$$Q = \alpha (t_1 - t_2) F \tau,$$

где α — коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Выше была показана экономическая неэффективность управления величиной теплоотдачи посредством увеличения поверхности теплообмена. Увеличение энергоэффективности теплообменника (рекуператора) может достигаться при интенсификации местного теплообмена, для чего активно применяют охлаждение поверхностей с помощью импактных струй. Достижение необходимого распределения температуры теплоотдающей поверхности или теплового потока может происходить за счет изменения геометрических и режимных параметров струйного потока.

При использовании металлических трубчатых рекуператоров можно добиться утилизации тепла до 75 вместо традиционных 20–25 ккал/(м²·ч·°С) за счет создания рекуператора из множества труб с развитой поверхностью теплообмена, однако такой рекуперативный теплообменник является нетехнологичным и металлоемким в изготовлении [1].

Один из современных способов рекуперации тепла дымовых газов — конструктивное сочетание рекуперативного металлического (с возможным применением струйной технологии) либо керамического теплообменника и горелочного устройства (например, модель RECUMAT, ECOMAX со вставками из карбида кремния SICAFLEX) в одном изделии.

Принцип работы таких горелок состоит в подогреве сжигаемого воздуха теплом отходящих газов из рабочего пространства печи непосредственно в системе горелки и отвод через систему горелки отработанных газов печи. Возможность использования современных рекуперативных горелок с металлическим рекуператором типа RECUMAT ограничивается температурой процесса до 1150 °С. При применении полностью керамического зубчатого рекуператора RECUMAT возможна работа горелки при температурах до 1300 °С [7].

Принципиальная схема рекуперативной горелки с металлическим рекуператором и вставками из карбида кремния показана на рис.3 [20]. Температура подогрева воздуха в горелках данной конструкции может достигать 800 °С. Однако область применения рекуперативных горелок ограничена по мощности величиной около 500 кВт, в то время как регенеративные горелки позволяют получить большие значения мощности.

Стоимость RECUMAT для предприятий Украины составляет 16 тыс. евро. За рубежом рекуперативные горелки получили широкое распространение благодаря своим техническим

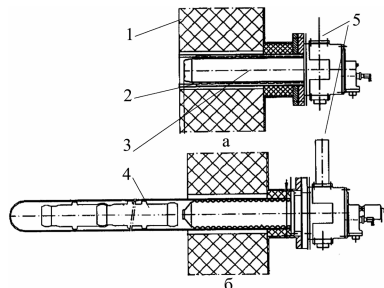


Рис.3. Принципиальная схема рекуперативной горелки с металлическим рекуператором (а) и рекуперативными вставками из карбида кремния (б): 1 — футеровка; 2 — рекуператор; 3 — горелочное устройство; 4 — вставки SiC; 5 — отходящие печные газы.

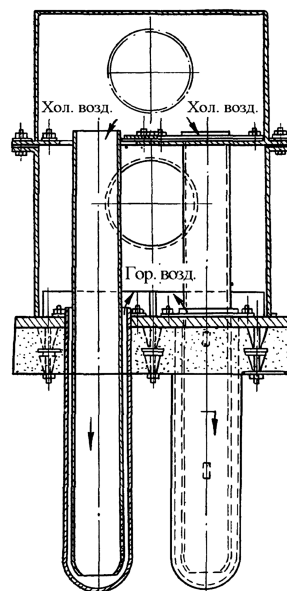


Рис.4. Теплообменная секция трубчатого рекуператора двойной циркуляции.

показателям. Однако применение горелок с рекуператором требует решения вопроса газоплотности печи и режима циркуляции продуктов сгорания в ее рабочем пространстве, чтобы обеспечить устойчивое движение отходящих дымовых газов в теплообменник горелки.

Прообразом технологии интенсификации теплообмена в рекуператоре за счет использования активных вставок с импактными струями можно считать рекуператор двойной циркуляции (рис.4) [1].

Принцип работы рекуператора основан на двойной циркуляции воздуха в металлической трубчатой насадке. Теплообменная секция состоит из наружной глухой трубы и внутренней трубы с открытым концом, смонтированных коаксиально и прикрепленных к камере воздушной коробки. Холодный воздух нагнетается в верхнюю воздушную камеру, опускается по внутренней трубе и, отражаясь от глухого конца наружной трубы, нагревается, поднимаясь по кольцевому зазору между трубами, за счет конвективного теплообмена с нагретой отходящими дымовыми газами стенки наружной трубы, а также за счет теплообмена с наружной стенкой внутренней трубы. Зазор между трубами для рекуператора указанной конструкции около 10 мм. Нагретый воздух из кольцевого пространства между трубами поступает в нижнюю воздушную камеру, а оттуда в трубопровод горячего воздуха.

Очевидным преимуществом данной конструкции является несколько большая тепловая устойчивость данной системы, поскольку темпе-

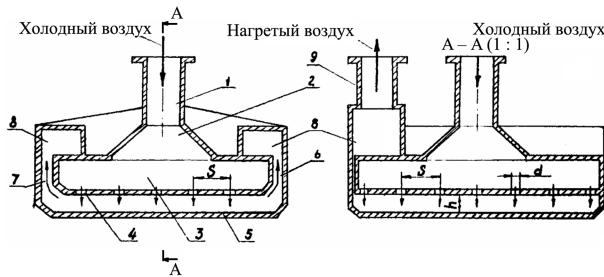


Рис.5. Схема модуля струйного рекуператора конструкции Института газа: 1 – подводящий патрубок; 2 – диффузор; 3 – успокоительная камера; 4 – сопла; 5 – поверхность теплообмена; 6, 7 – щели для отвода воздуха; 8 – П-образный воздухоохладитель; 9 – отводящий патрубок.

ратура стенки наружной трубы снижается не только за счет конвективной теплопередачи нагреваемому воздуху, но и за счет лучистой передачи тепла от наружной трубы внутренней. Можно отметить большую воздухоплотность рекуператора и возможность осмотра либо замены его отдельной теплообменной секции.

К недостаткам приведенной конструкции относятся несколько повышенная прецизионность изготовления и монтажа теплообменника, ограничения по давлению нагнетаемого воздуха при использовании песчаного затвора между трубами и воздушными коробками и возможность установки рекуператора только в горизонтальных дымоходах.

В работе [10] разработан модельный ряд стандартных струйных модульных рекуператоров для установки в дымовых каналах промышленных печей (рис.5). Особенностью приведенной конструкции является то, что теплообменник состоит из отдельных модулей, устанавливаемых в дымовом канале печи и образующих одну из его стенок.

Принцип действия рекуператора состоит в следующем. Охлаждающий воздух подается по подводящему патрубку 1 и диффузору 2 в успокоительную камеру 3. Из нее воздух поступает к соплам 4 и через них набегает на целевую (охлаждаемую) поверхность 5, нагревается за счет конвективного теплообмена с поверхностью и отводится из рекуператора через щели 6, 7, П-образный воздухоохладитель 8 и отводящий патрубок 9.

К преимуществам данной конструкции можно отнести повышенную теплоотдачу от продуктов сгорания к поверхности теплообмена за счет излучения кладки дымового канала, а также возможность проектировать рекуператоры требуемой производительности по известным характеристикам одного модуля.

Теплообмен с помощью импактных (ударных) струй на сегодняшний день является признанным и хорошо зарекомендовавшим себя ме-

тодом нагрева, охлаждения или сушки какой-либо поверхности и используется в рекуперативных теплообменниках для повышения энергоэффективности печных агрегатов и уменьшения расхода топлива.

Данная технология широко применяется в промышленности в Украине и за рубежом. Например, охлаждение с помощью систем импактных струй применяют в современных газотурбинных двигателях для охлаждения лопаток турбин, работающих при высоких температурах, для увеличения энергоэффективности и тепловой мощности этих установок (рис.6, 7).

Для газовых турбин решающим фактором, ограничивающим мощностные характеристики, являются значительные термические нагрузки отдельных компонентов (в частности, лопаток турбин). Поэтому охлаждение системой импактных струй применяется не только для охлаждения лопаток, но и форсунок камер сгорания (рис.6). При этом охлаждающий воздух обычно подводится от компрессора и смешивается с горячим газом после прохождения системы охлаждения импактными струями, а также может применяться дополнительное охлаждение камеры сгорания через дополнительный слой импактных струй [21].

Обычно вся наружная поверхность лопаток турбин покрыта слоем, охлаждаемым импактными струями для предохранения от раскаленных рабочих газов. Кроме того, поверхность лопаток турбин охлаждается изнутри либо по обычным, либо по змеевидным каналам подачи воздуха. Импактные струи применяют при необходимости снизить чрезмерную тепловую нагрузку на лопатки. На рис.7,б показана литая лопатка турбины, в которой камеры охлажда-

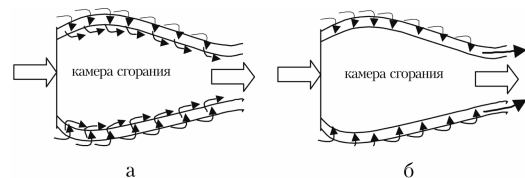


Рис.6. Охлаждение внутренних поверхностей турбины импактными струями (а), лопатка турбины с внутренним охлаждением импактными струями (б).

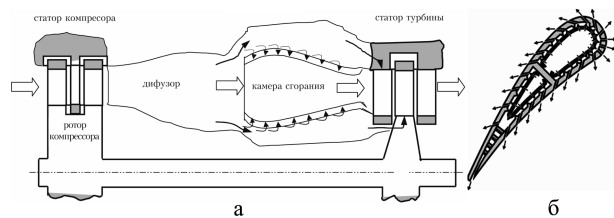


Рис.7. Схема струйного охлаждения камеры сгорания газовой турбины: а – охлаждение в слое; б – без охлаждения в слое.

ются импактными струями и обычным набегом воздуха.

Технология использования принципа струйного натекания воздуха на теплообменную поверхность широко применяется для увеличения энергоэффективности работы теплообменников и обладает свойством универсальности относительно процесса нагрева-охлаждения [21].

Выводы

Для утилизации тепла отходящих газов в печах возможно применение двух методов: рекуперация и регенерация тепла. Преимуществами систем рекуперативной утилизации отходящего тепла являются относительная простота по сравнению с регенерационной системой, более низкие капитальные вложения и простота обслуживания рекуператоров. Невозможность создания единой конструкции рекуператора определяется разнообразием парка печей, выполняемых ими задач и температурных режимов их эксплуатации. Правильный выбор метода утилизации тепла дымовых газов для конкретного печного агрегата дает возможность осуществлять управление энергозатратами предприятия, увеличивает срок эксплуатации печного агрегата и самого рекуператора, а главное — обеспечивает снижение расхода топлива.

Установлено, что наиболее перспективной технологией интенсификации конвективного теплообмена в металлических рекуператорах является использование технологии импактных струй (*impinging jets*). Данная технология обладает свойством универсальности относительно того, производится охлаждение или нагрев целевой поверхности (*target plate*). При струйном натекании воздуха на теплообменную поверхность интенсивность теплоотдачи увеличивается в 2–4 раза по сравнению с другими методами интенсификации теплообмена при одинаковых затратах энергии и равном подогреве воздуха, а также обеспечивается повышение эффективности теплообмена в рекуператорах с активными вставками по сравнению с традиционной конструкцией металлических рекуперативных насадок с пассивными вставками.

К основным недостаткам данной технологии можно отнести значительные аэродинамические потери в воздушном тракте, что связано с необходимостью достижения скорости истечения воздуха из сопел до 20 м/с для формирования турбулентного потока, а также опасность засорения воздушных сопел.

Применение струйной технологии при разработке конструкций металлических рекупера-

торов новых типов и исследование процессов, протекающих в активной струйной насадке, являются актуальной научной задачей и одним из современных методов повышения энергоэффективности печных агрегатов.

Список литературы

1. Тебеньков В.Д. Рекуператоры для промышленных печей. — М. : Металлургия, 1975. — 294 с.
2. Шак А. Промышленная теплопередача. — М. : Металлургиздат, 1961. — 524 с.
3. Шорин С.Н. Теплопередача. — М.; Л. : Госстройиздат, 1952. — 339 с.
4. Якоб М. Вопросы теплопередачи. — М. : Изд-во иностр. лит., 1960. — 360 с.
5. Еринов А.Е. Экономия топливно-энергетических ресурсов в нагревательных и термических печах металлопрокатного производства. — Киев : РДЭНТП, 1981. — 21 с.
6. Медюкритский Е.Л. Экономия природного газа при применении современных рекуператоров // Обзор. информ. ВНИИЭгазпрома. Сер. Использование газа в народном хозяйстве. — Вып. 8. — С. 1–51.
7. Wuenning J. Die neu Rekupeatorbrenner mit niedrigen Emissionen von NO₂ // Gaswaermeinternational. — 1988. — Vol. 37. — S. 98–101.
8. Металлургические печи / Под. ред. М.А.Глинкова. — М. : Металлургиздат, 1951. — 976 с.
9. Natural Gas Technologies : A Driving Force for Market Development // Conf. Proc., Berlin, Germany, 1–4 Sept., 1996.
10. Сорока Б.С., Кудрявцев В.С., Карабчиевская Р.С. Энергоэкологический анализ эффективности использования топлива и энергии с применением математического и компьютерного моделирования. 1. Методика расчета энергетической эффективности и ее теплофизическое обоснование // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2010. — № 1. — С. 11–20.
11. Михеев М.А. Основы теплопередачи. — М. : Госэнергоиздат, 1949. — 396 с.
12. Каплунов П.Ф., Еринов А.Е., Григорьев В.Н. Радиационно-конвективный рекуператор для высокотемпературных печей // Сталь. — 1972. — № 9. — С. 853–854.
13. Ройзен Л.И., Дулькин И.Н. Тепловой расчет обретенных поверхностей. — М. : Энергия, 1977. — 252 с.
14. Сезоненко Б.Д., Еринов А.Е., Частухин И.В. Исследование радиационных и комбинированных рекуператоров и внедрение их на машиностроительных заводах // Прогрессивная технология и оборудование для нагрева под штамповку. — М. : МДНТП, 1976. — С. 80–86.
15. Антуфьев В.М., Велецкий Г.С. Теплопередача и аэродинамическое сопротивление трубчатых поверхностей в поперечном потоке. — М. : Машгиз, 1948. — 178 с.

16. Антуфьев В.М. Эффективность различных форм конвективных поверхностей нагрева. — М.; Л. : Энергия, 1966. — 180 с.
17. Антуфьев В.М. Теплообменные аппараты из профильных листов. — Л. : Энергия, 1972. — 128 с.
18. Кирпичев М.В. О наиболее выгоднейшей форме поверхности нагрева // Изв. ЭНИИ им. Г.М.Кржижановского. — 1944. — Т. 12. — С. 170.
19. Создать и внедрить модульные воздухонагреватели для утилизации тепла отходящих дымовых газов технологических печей, обеспечивающие сокращение расхода газа на 20–30 процентов : (Заключ. отчет) / АН УССР. Ин-т газа; Руводители темы А.Е.Еринов, Б.Д.Сезоненко. — № ГР 81091903; Инв. № РН 04.03.Ц02. — Киев, 1985. — 151 с.
20. Рекуперативные газовые горелки ECOMAX®/LBE Elster GmbH, Wuppertal. — 2008. — 10 S.
21. Osama M. A. Al-aql. Heat Transfer Distributions on the Walls of a Narrow Channel with Jet Impingement and Cross Flow. — Pittsburgh : University of Pittsburgh, 2003. — 117 p.

Поступила в редакцию 20.05.10

Recuperative Air Heating as the Method of Furnaces Units Energy Efficiency Increase (Review)

Agyeyev K. V.

The Gas Institute of NASU, Kiev

The main methods of furnace units energy efficiency increase are considered. The analysis of smoked gases heat utilization and heat extraction intensification methods are adduced. The main heat exchanger constructions are reviewed and comprised. The fields of impinging jets technology application are considered. The technology universality is displayed. The technological and economical advantages of active insert elements recuperators are displayed. The scientific urgency of heat exchangers construction based on impinging jets technology is exhibited.

Key words: furnace units energy efficiency, impinging jets, active insert elements recuperator.

Received May 20, 2010