АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТЕНДЕНЦИЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РЕКУПЕРАТИВНЫХ ГОРЕЛОК

А. Б. БИРЮКОВ, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой технической теплофизики, birukov.ttf@gmail.com; Я. С. ВЛАСОВ, аспирант кафедры технической теплофизики (Донецкий национальный технический университет, Украина, г. Донецк)

Аннотация. Рекуперативные горелки благодаря ряду существенных преимуществ по сравнению с обычными газогорелочными устройствами приобретают все большее распространение в газопечной теплотехнике. Однако широкое применение рекуперативных горелок сдерживается их высокой ценой. В связи с этим актуальными являются исследования по совершенствованию конструкций рекуперативных горелок и технологий отопления агрегатов с их использованием. Приведены результаты анализа современных направлений совершенствования конструкций и способов использования рекуперативных горелок, включая оптимизацию вопросов диагностики состояния теплообменной поверхности рекуперативной горелки. Рассмотрены проблемы выбора рациональных параметров оребрения встроенных рекуператоров. Важным направлением совершенствования рекуперативных горелок является совершенствование камер предварительного сжигания и распределения воздуха по ступеням сжигания. Отмечено, что в дополнение к традиционным системам двухступенчатого сжигания в последнее время появляются системы трехступенчатого сжигания. Показано, что при неблагоприятных режимах эксплуатации печи возможно существенное загрязнение поверхности рекуператора ранее установленного регламентного срока периодической очистки, что ведет к убыткам, связанным с ростом расхода топлива. С другой стороны, необоснованное сокращение срока эксплуатации печи между очистками поверхности рекуператора является неудобным в организационном плане. Разработана методика оперативной диагностики состояния рекуператора, по которой оценку состояния теплообменной поверхности встроенного рекуператора рекуперативной горелки предложено осуществлять путем идентификации текущих значений коэффициента рекуперации и их сопоставления с эталонными значениями. Методика позволяет регламентировать периодичность очистки поверхностей как центральных рекуператоров, так и рекуперативных горелок.

Ключевые слова: рекуперативная горелка, оптимизация теплообменной поверхности рекуператора, оребрение рекуператора, многоступенчатое сжигание топлива, диагностика рекуперативной горелки.

Ссылка для цитирования: Бирюков А.Б., Власов Я.С. Анализ современных тенденций совершенствования рекуперативных горелок // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. Т. 75. № 8. С. 971–978.

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-8-971-978

ANALYSIS OF MODERN TRENDS IN RECUPERATIVE BURNERS PERFECTION

A. B. BIRYUKOV, HD (Tech.), Prof., Head of Dpt. "Technical heat engineering", birukov.ttf@gmail.com; YA. S. VLASOV, Postgraduate, Dpt. "Technical heat engineering" (Donetsk National technical University, Ukraine, Donetsk)

Abstract. At present, recuperative burners are becoming more extended in the gas-heated facilities, thanks to their significant advantages comparing with conventional gas-burning devices. However, the wide application of the recuperative burners is restricted by their high price. Therefore, studies for perfection recuperative burner designs and technologies of aggregates heating with the burners application are very actual. Results of analysis of modern ways of the burners designs and methods of their application presented, including diagnostics of the recuperative burner heat-exchanging surface state, optimization of the heat-exchanging surface and others. Items of ribbing rational parameters selection for imbedded recuperative devices considered. Perfection of the preliminary combustion chambers and air distribution by combustion stages are important ways of the recuperative burner perfection. It was noted, that in addition to traditional two-stage combustion systems, three-stage combustion systems are appeared lately. It was showed, that under unfavorable conditions of a furnace running, a significant contamination of the recuperative device surface can take place earlier comparing with the set regulation time of periodical cleaning, resulting in losses related to increase of fuel consumption. From the other side, unjustified decrease of the furnace operation period between the recuperative device surfaces cleaning is inconvenient in organization. A methodology of operative diagnostic of a recuperative device state elaborated, due to which the estimation of the imbedded recuperative device heat-exchanging surface state can be done by the identification of the current values of recuperation coefficient and their comparing with the standard values. The methodology enables regulating the periods of cleaning of the surfaces of both the central recuperative devices and recuperative burners.

Keywords: recuperative burner, recuperative device heat-exchanging surface optimization, recuperative device ribbing, multistage fuel combustion, recuperative burner diagnostics.

For citation: Biryukov A.B., Vlasov Ya.S. Analysis of modern trends in recuperative burners perfection. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2019, vol. 75, no. 8, pp. 971–978. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-8-971-978

Энергосбережение является актуальной и приоритетной задачей во всех областях промышленности. Это связано прежде всего с повышением цен на природный газ, который заменил большей частью другие виды топлива на промышленных предприятиях.

В настоящее время на значительном количестве печей в отечественной практике для отопления используется устаревшее оборудование для сжигания газообразных топлив. Перспективным видом оборудования являются рекуперативные горелки [1].

Рекуперативная горелка представляет собой газогорелочное устройство со встроенным в него теплообменным аппаратом (рекуператором). Принципиальной особенностью является то, что воздух, идущий на горение, предварительно подогревается во встроенном рекуператоре за счет использования части теплоты уходящих продуктов сгорания. Типовая схема рекуперативной горелки показана на рис. 1.

Среди лидеров на рынке рекуперативных горелок можно выделить немецкие фирмы Kromschroeder, WS и IBS с соответствующими сериями горелок Ecomax, Regemat и Regfire. На этом рынке в последнее время появляются и российские разработки. В 2011 г. научно-производственное предприятие ТЕСКА разработало и вывело на рынок рекуперативную горелку ГСС-Р. Эти горелки выпускаются в 14 типоразмерах по тепловой мощности, которая составляет от 100 кВт до 45 МВт. Также ОАО ВНИИМТ разработана скоростная рекуперативная горелка ГСР-150 мощностью 150 кВт.

Достоинствами рекуперативных горелок являются:

- более высокая температура подогрева воздуха, идущего на горение, по сравнению с системами внешней рекуперации;
- более высокие значения коэффициента использования топлива (КИТ), при температуре подогрева воздуха 700 °С величина КИТ достигает 0,7;
- более благоприятные условия работы воздушных вентиляторов перед горелками, так как вентилятором нагнетается холодный воздух;

Теплотехническая оптимизация поверхности рекуператора

При передаче заданного количества теплоты размеры и аэродинамическое сопротивление теплообменного аппарата зависят как от абсолютных значений средних скоростей потоков теплоносителей, так и от их соотношения. С целью определения оптимальных теплотехнических показателей рекуператора необходимо установить связь между тепловыми и аэродинамическими

– отсутствие изолированного дымового тракта за счет того, что дымовые газы покидают печь через кольцевой зазор между рекуператором и дымоотводящей гильзой при помощи эдуктора, движущей средой в котором является холодный воздух [1].

Рис. 1. Схема рекуперативной горелки:

- 1 — подвод газа; 2 — корпус горелки;
3 — канал для продуктов сгорания; 4 — рекуператор;
5 — воздушная направляющая труба;
6 — эдуктор для удаления продуктов сгорания

Fig. 1. Diagram of recuperative burner:

- 1 — gas supply; 2 — burner body; 3 — the channel for combustion products removal; 4 — recuperator;
5 — air guiding pipe; 6 — eductor for combustion products removal

Однако, несмотря на вышеперечисленные достоинства, широкое применение рекуперативных горелок сдерживается их высокой ценой.

В настоящее время проводится активная работа по совершенствованию конструкций рекуперативных горелок и технологий отопления агрегатов с их использованием. Есть основания ожидать, что со временем это позволит повысить распространенность рекуперативных горелок.

Целью данной работы является анализ способов совершенствования рекуперативных газовых горелок, а также исследование особенностей их тепловой работы.

факторами, которые характеризуют процесс передачи тепла.

Для оптимизации параметров встроенного рекуператора могут использоваться наработки, имеющиеся для похожего оборудования. Например, аналогичные задачи в значительной мере решены при совершенствовании конструкций теплообменников газотурбинных установок, работающих по регенеративному циклу, которые

предназначены для подогрева сжатого воздуха за счет теплоты уходящих продуктов сгорания [2]. В этой работе показан пример решения задачи оптимизации технологических параметров газо-газового теплообменника за счет определения соотношения между средними скоростями теплоносителей, при котором коэффициент теплопередачи системы достигает максимума.

Для интенсификации процесса теплопередачи в теплообменных аппаратах достаточно продуктивно применяется оребрение рабочей поверхности теплообменника со стороны теплоносителя с меньшим коэффициентом теплоотдачи. Рекуперативная горелка работает по схеме противотока, где продукты сгорания через разделительную стенку отдают тепло воздуху, идущему на горение. Оба теплоносителя имеют крайне низкие коэффициенты теплоотдачи, поэтому рекуператор оребрен с наружной и внутренней сторон [3].

Ребра в таких рекуператорах могут быть либо сварными, либо литыми. При температуре дымовых газов до 1100 °С применяются стальные рекуператоры, изготовленные из высокожаропрочных сталей, в случаях использования горелок при температуре до 1300 °С используют реакционноспеченный карбид кремния [4].

Важнейшим показателем эффективности теплообменного устройства является коэффициент энергетической эффективности, который характеризует способность аппарата качественно выполнять свои функции при высокой отказоустойчивости, низкой цене и наибольшей тепловой мощности, передаваемой в системе на единицу затрат мощности на прокачку теплоносителей [5]:

$$E = \frac{Q}{N},$$

где Q — передаваемый поток теплоты, Вт; N — затрачиваемая мощность на прокачку теплоносителя, Вт.

При этом важны начальная стоимость материалов и изготовления, срок окупаемости, технологичность производства, надежность и простота в эксплуатации. Основным элементом теплообменного аппарата является поверхность теплообмена. Взаимодействие теплоносителя с поверхностью теплообмена характеризуется одновременным протеканием процессов переноса тепла и импульса. Одновременное протекание процессов на поверхности теплообмена приводит к противоречивости отношений между передаваемым потоком тепла Q и затрачиваемой мощностью N на прокачку теплоносителя. Кроме того, тепловой поток пропорционален площади поверхности теплообмена. Это означает, что при

стремлении получить лучшую теплообменную поверхность необходимо создать такую физическую обстановку, при которой перенос теплоты на ней будет происходить с наибольшей интенсивностью, а аэродинамический процесс течения теплоносителя и потери энергии потока — с наименьшей [6].

Таким образом, выбор геометрии ребра, его размера, а также материала является важнейшей задачей при оптимизации поверхности рекуператора, так как влияет на целый ряд теплотехнических параметров, таких как: интенсивность теплопередачи, аэродинамическое сопротивление, коэффициент рекуперации тепла и в целом на энергетический коэффициент.

Увеличение высоты оребрения уменьшает коэффициент эффективности ребра и снижает коэффициент теплоотдачи. Используя суживающиеся по высоте ребра, можно снизить массу ребер и уменьшить аэродинамическое сопротивление в потоке между ребрами за счет увеличения проходных сечений около вершин ребер.

Увеличение относительной глубины ребер, которая характеризуется отношением высоты к шагу ребер, приводит к эффекту вытеснения потока из межреберных каналов из-за нарастания толщины пограничного слоя на ребрах, что снижает интенсивность теплоотдачи и повышает аэродинамическое сопротивление ребристой поверхности. Увеличение коэффициента эффективности ребра аналогичным образом требует уменьшения высоты и длины ребра, а также увеличения его толщины [7].

Так как наличие ребер увеличивает массу теплообменного устройства, необходимо оптимизировать их число и геометрические характеристики. Если известен материал, из которого изготовлены ребра, а также радиус трубы, то имеется пять неопределенных параметров математической модели: масса, число ребер, высота и толщина ребра, а также передаваемый через теплообменную поверхность тепловой поток [8].

Толщина ребра также является важным геометрическим параметром, от правильности выбора которого зависит общая масса ребристой поверхности. Уменьшение его толщины приводит, с одной стороны, к снижению массы поверхности, с другой — к уменьшению коэффициента эффективности ребра и ухудшению теплоотводящих возможностей самого ребра [9].

Оптимальная высота ребер может отличаться на стороне воздуха и дымовых газов из-за различных условий.

Еще одним важным параметром оптимизации рекуператора является высота кольцевого зазора. Уменьшение высоты кольцевого зазора со стороны дымовых газов приводит к увеличению потерь давления. В противоположность этому

передача тепла только слегка возрастает. Если высота зазора уменьшается со стороны воздуха, потери давления также увеличиваются, но передача тепла значительно улучшается по сравнению со стороной дымовых газов [10, 11].

Описание и суть совершенствования многоступенчатого сжигания

Одной из принципиальных особенностей рекуперативных горелок является ступенчатая подача воздуха для сжигания топлива, которая, в свою очередь, позволяет уменьшить уровень образования оксидов азота и углерода.

В своих трудах многие ученые отражают возможность совершенствования технологических параметров эксплуатации рекуперативной горелки за счет выбора рациональных параметров камеры предварительного сжигания и рационального распределения воздуха по ступеням сжигания. В большинстве случаев используется двухступенчатая схема сжигания воздуха в рекуперативных горелках. Обычно доля первичного

воздуха, подаваемого в камеру предварительного сжигания, составляет 20–40 % [12, 13].

В работе Арсеева Н.Б. предложена трехступенчатая схема сжигания топлива. Первичный воздух поступает практически холодным в камеру предварительного сжигания вместе с топливом. Вторичный воздух частично подогревается и поступает в камеру предварительного сжигания ближе к выходу смеси. Третий, основной, поток воздуха нагревается до наибольшей температуры и поступает в печное пространство через кольцевую щель, образованную камерой сгорания и воздушным корпусом горелки [14].

Оценка теплотехнической эффективности рекуперативных горелок

В работе [15] обоснована и предложена новая, более объективная зависимость для расчета коэффициента использования топлива при отоплении агрегата рекуперативными горелками. Для решения этой задачи были проанализированы условия нагрева каждого из потоков воздуха для двух- или многоступенчатой схемы подачи воздуха в камеру предварительного сжигания. Сделан вывод, что различные потоки воздуха не могут быть нагреты до одинаковой температуры. Наилучшие условия нагрева имеют место для основного потока воздуха (вторичный или третичный воздух), поступающего непосредственно в печное пространство через кольцевой зазор, ввиду наиболее продолжительного контакта с уходящими продуктами сгорания. То есть, очевидно, что все потоки воздуха будут нагреты до различных температур и наибольшее значение будет иметь температура основного потока воздуха.

Важнейшей характеристикой печной системы является величина КИТ. Для случая, когда воздух и газ, поступающие в печную систему, являются холодными, вычисление значения КИТ проводится по следующей зависимости:

$$\eta_{\text{КИТ}} = \frac{Q_p^n - V_{yx} c^{t_{yx}} t_{yx} (1 - k_r)}{Q_p^n},$$

где k_r — коэффициент рекуперации (доля теплоты уходящих из рабочей камеры продуктов сгорания, возвращаемая в нее с подогретым в рекуператоре воздухом, идущим на горение топ-

лива, и в ряде случаев с топливом); Q_p^n — низшая теплота сгорания топлива, Дж/м³; V_{yx} — удельный выход продуктов сгорания с единицы топлива, м³/м³; t_{yx} — температура продуктов сгорания, покидающих печную камеру, °С; c — теплоемкость продуктов сгорания при их температуре, Дж/(м³·К).

Очевидно, что ключевым вопросом для определения КИТ печной системы, использующей рекуперативные горелки, является корректное определение величины k_r .

Исходя из анализа различных схем рекуперативных горелок видно, что только основной поток воздуха получает всю теплоту для своего нагрева от уходящих продуктов сгорания. Что касается потоков первичного и вторичного воздуха (для горелок с трехступенчатым сжиганием), то они большую часть теплоты получают от контакта со стенками камеры предварительного сгорания. С точки зрения кинетики горения и обеспечения заданных параметров работы камеры предварительного сгорания основное значение имеет достигнутая температура воздуха. А с точки зрения определения КИТ важную роль играет непосредственно источник энергии для нагрева воздушного потока. Отбор теплоты от стенок камеры предварительного сгорания эквивалентен нагреву воздуха за счет энергии топочного пространства и к повышению КИТ не приводит. Исходя из вышеперечисленного была предложена формула для определения коэффициента рекуперации тепла рекуперативных горелок с многоступенчатой подачей воздуха:

$$k_r = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i V_B c_B \chi_i \Delta t_{bi}}{V_{yx} c_{yx} t_{yx}},$$

где i — номер индекса потока; V_B — действительный расход воздуха для сжигания единицы топлива, $\text{м}^3/\text{м}^3$; c_B — средняя теплоемкость воздуха для интервала температур, соответствующего его пребыванию в рекуператоре, $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$; γ_i — доля удельного расхода воздуха V_B , идущая на формирование i -го потока, $^\circ\text{C}$; χ_i — доля энергии, отобранной от уходящих продуктов сгорания,

в нагреве i -го потока; Δt_{bi} — повышение температуры i -го потока воздуха, $^\circ\text{C}$.

В работе [15] показано, что если не учитывать различные условия нагрева воздушных потоков при определении величины k_r и считать, что весь поток воздуха нагревается до максимальной температуры, то получим существенное завышение величины КИТ (до 20 %). А это, в свою очередь, может привести к некорректным выводам при решении технико-экономической задачи о выборе схемы отопления конкретного агрегата.

Диагностика работы рекуперативной горелки

При тепловой обработке металла имеет место загрязнение отложениями пылинок окалины теплообменных поверхностей рекуператора со стороны дымовых газов. Эта ситуация распространяется как на случай использования центральных рекуператоров, так и на рекуперативные горелки.

Загрязнение теплообменной поверхности приводит к снижению коэффициента теплопередачи в рекуператоре, уменьшению температуры подогрева воздуха, которое впоследствии ведет к уменьшению величины КИТ и увеличению удельного расхода топлива. Поэтому существует регламент периодичности очистки поверхностей рекуператоров.

В ряде случаев при неблагоприятных режимах эксплуатации печи существенное загрязнение поверхности рекуператора может быть достигнуто ранее установленного регламентного срока периодической очистки. Такая ситуация ведет к убыткам, связанным с ростом расхода топлива. С другой стороны, необоснованное сокращение срока эксплуатации печи между очистками поверхности рекуператора является неудобным в организационном плане. В связи с этим целесообразна разработка методики оперативной диагностики состояния рекуператора. Такая методика предложена в работе [16].

На первом этапе реализации системы диагностики тепловой работы встроенного рекуператора должно быть проведено установление эталонных значений k_r в начале его первого ввода в эксплуатацию или после чистки и обслуживания.

Величина k_r не является константой даже для какого-либо конкретного рекуператора, но зависит от относительной тепловой нагрузки горелки $Q_{\text{печь}}$. Также величина k_r зависит от температуры продуктов сгорания, покидающих печь. Поэтому речь идет о построении семейства эталонных

кривых, описывающих зависимость k_r от тепловой нагрузки печи, построенных для разных температур дымовых газов с заданным довольно узким шагом. Каждая из таких кривых является динамической тепловой характеристикой рекуператора.

Эталонная кривая снимается следующим образом. Выделяются характерные температуры продуктов сгорания, покидающих печь. В течение непродолжительного периода эксплуатации печи накапливается информация о наборах значений k_r , соответствующих каждой выделенной температуре при различных тепловых нагрузках печи. Аппроксимируя опытные точки, получаем одну из динамических тепловых характеристик, соответствующую данной температуре уходящих продуктов сгорания. В результате получаем семейство динамических тепловых характеристик.

Далее в процессе эксплуатации печи периодически на основании расчетной обработки сигналов от измерительных приборов производится определение текущего значения коэффициента рекуперации. Сопоставление точки с координатами $(Q_{\text{печь}}, k_r)$ с соответствующей температурой продуктов сгорания эталонной динамической тепловой характеристикой позволяет вынести суждение о состоянии теплообменной поверхности встроенного рекуператора. В идеальном случае (при отсутствии загрязнений поверхности и погрешности расчета) текущая точка ложится на эталонную кривую. При влиянии загрязнения теплообменной поверхности идентифицированная текущая точка лежит ниже эталонной кривой.

Для того чтобы учесть погрешность и в то же время иметь конкретное условие, на основании которого принимается решение о необходимости остановки печи и очистки встроенных рекуператоров, предлагается наряду с эталонными кривыми $k_r = f(Q_{\text{печь}})$ построить нижнюю допускаемую

границу по k_r , например, с учетом 10 %-го снижения от эталона $k_r = 0,9f(Q_{\text{печь}})$.

На рис. 2 показан пример использования предложенной системы для диагностики состояния центрального рекуператора печи с выкатным подом. Ввиду подобия задач данная система без всяких изменений используется для диагностики состояния теплообменных поверхностей встроенных рекуператоров рекуперативных горелок.

Если идентифицированная точка имеет значение k_r меньше, чем у соответствующей точки на кривой, описывающей нижнюю границу (т2 и т6), то в этом случае есть необходимость очистки поверхности рекуператора. Если точка лежит на эталонной кривой (т5) или на кривой нижней границы эксплуатации (т4), или между ними (т1 и т7), эксплуатация рекуператора может быть продолжена. Расположение идентифицированной точки выше эталонной кривой (т3) наиболее вероятно говорит о погрешности в работе системы диагностики и необходимости ее подстройки.

В результате разработанная методика тепловой работы рекуператора позволяет регламентировать периодичность очистки поверхностей как центральных рекуператоров, так и рекуперативных горелок.

Рис. 2. Схема анализа тепловой работы рекуператора:

1 — эталонная тепловая характеристика, соответствующая рассматриваемому значению температуры уходящих из печи продуктов сгорания; 2 — кривая, соответствующая нижней границе k_r , при которых допускается эксплуатация рекуператора; т1, т2, т3, т4, т5, т6, т7 — примеры точек, описывающих характерные для анализа тепловой работы рекуператора случаи

Fig. 2. Diagram of the recuperator heat operation analysis: 1 — reference heat characteristic, correspondent to considered value of combustion products temperature, when leaving the furnace; 2 — the curve, correspondent to lower k_r border, at which the recuperator operation admitted; т1, т2, т3, т4, т5, т6, т7 — examples of points, describing situations, typical for analysis of recuperator heat operation

Вывод

Основным направлением совершенствования конструкций рекуперативных горелок является оптимизация поверхности встроенного рекуператора прежде всего за счет выбора оптимальных параметров оребрения. Возможны различные критерии оптимизации, например, по минимуму массы, по максимуму удельного теплового потока, по максимуму энергетического коэффициента.

Также важным направлением является совершенствование камер предварительного сжигания и распределения воздуха по ступеням сжигания. В дополнение к традиционным системам двухступенчатого сжигания в последнее время появляются системы трехступенчатого сжигания.

Для объективной оценки КИТ печной системы, использующей рекуперативные горелки, целесообразно применять расчетные зависимости, учитывающие температуру и условия нагрева каждого из воздушных потоков, распределенных по ступеням сжигания.

Оценку состояния теплообменной поверхности встроенного рекуператора рекуперативной горелки можно в реальном времени проводить при помощи системы диагностики, основанной на идентификации текущих значений коэффициента рекуперации и их сопоставлении с эталонными значениями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бирюков А.Б. Современные аспекты использования рекуперативных горелок для отопления пламенных печей // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2015. № 8 (1388). С. 73–79.
2. Дедусенко Ю.М., Дедков Г.В. Оптимизация тепловых схем сложных газотурбинных установок. — Киев: Наукова думка, 1972. — 124 с.
3. Вохмяков А.М., Казяев М.Д., Казяев Д.М. Исследование конвективного теплообмена в проходной печи, оснащенной скоростными горелками // Цветные металлы. 2011. № 12. С. 89–93.

4. Ядченко Д.С. Опыт использования рекуперативных горелочных устройств в печах периодического действия для термообработки заготовок в СПЦ-2 ОАО “БМЗ – управляющая компания холдинга “БМК” // *Литье и металлургия*. 2017. № 4. С. 32–36.
5. Бухмиров В.В., Ракутина Д.В., Солнышкова Ю.С., Пророкова М.В. Тепловой расчет рекуперативного теплообменного аппарата. — Иваново: ФГБОУ ВПО “Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина”, 2013. — 124 с.
6. Мелехин А.А. Оптимизация параметров теплообменных аппаратов систем воздушного отопления: дис. ... канд. техн. наук. — Пермь, 2012. — 151 с.
7. Зарубин В.С., Пешкова М.А. Оптимизация параметров излучающей оребренной трубы // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия “Естественные науки”*. 2007. № 3. С. 28–41.
8. Письменный Е.Н., Терех А.М. Конструктивные методы повышения теплоаэродинамической эффективности трубчатых поперечно-оребранных поверхностей теплообмена. Ч. 3. Поверхности из профилированных труб с неполным оребрением // *Промышленная теплотехника*. 1999. Т. 21. № 6. С. 5–11.
9. Лаптев А.Г., Николаев Н.А., Башаров М.М. Методы интенсификации и моделирования тепломассообменных процессов: учебно-справочное пособие. — М.: Теплотехник, 2011. — 335 с.
10. Kremer H., Schmitz G. Untersuchung der Wärmerückgewinnung an industriellen Gasbrennern mit integriertem Rekuperator (Teil II) // *Gaswärme International*. 1982. V. 31. Heft 1. S. 18–25.
11. Brune M., Konold U., Kremer H., Flamme M. Entwicklung und Optimierung drallstabilisierter, keramischer Flachflammenrekuperatorbrenner zur dezentralen Wärmerückgewinnung // *Schlussbericht zum Forschungsvorhaben, AiF-Vorhaben, Nr. 11436N*, 2001.
12. Барташ М.Р., Дружинин Г.М., Лошкарев Н.Б. и др. Новая скоростная рекуперативная газовая горелка для прямого нагрева металла в промышленных печах // *Сталь*. 2010. № 3. С. 125–127.
13. Лошкарев Н.Б., Мухамадиева А.Х. Скоростная рекуперативная горелка ГСР-150 // *Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сб. докл. IV Всерос. научно-практич. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (ТИМ’2015) (г. Екатеринбург, 26–27 марта 2015 г.)*. — Екатеринбург: УрФУ, 2015. С. 96–100.
14. Арсеев Н.Б. Развитие элементов рекуперативных топливосжигающих устройств при модернизации металлургических нагревательных печей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Екатеринбург: НИЧ ФГАО ВПО УрФУ, 2011. — 32 с.
15. Бирюков А.Б., Гнителиев П.А., Власов Я.С. Методика прогнозирования теплотехнической эффективности использования рекуперативных горелок // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. 2018. № 1. С. 13–19.
16. Бирюков А.Б. Диагностика тепловой работы печного рекуператора // *Сталь*. 2019. № 2. С. 70–73.

Поступила 18 мая 2019 г.

REFERENCES

1. Biryukov A.B. Modern aspects of recuperative burners application for heating flame furnaces. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2015, no. 8 (1388), pp. 73–79. (In Russ.).
2. Dedusenko Yu.M., Dedkov G.V. *Optimizatsiya teplovykh skhem slozhnykh gazoturbinykh ustanovok* [Optimization of heating charts of complicated gas-turbine facilities]. Kiev: Naukova dumka, 1972, 124 p. (In Russ.).
3. Vokhmyakov A.M., Kazyayev M.D., Kazyayev D.M. Study convection heat exchange in a pusher furnace, equipped by high-speed burners. *Tsvetnye metally*, 2011, no. 12, pp. 89–93. (In Russ.).
4. Yadchenko D.S. Experience of application of recuperative burners in the furnaces of periodical operation for semi-product thermal treatment in OJSC “BMZ-managing company of “BMK” Holding steelmaking shop No. 2. *Lit'e i metallurgiya*, 2017, no. 4, pp. 32–36. (In Russ.).
5. Bukhmirov V.V., Rakutina D.V., Solnyshkova Yu.S., Prorokova M.V. *Teplovoi raschet rekuperativnogo teploobmennogo apparata* [Thermal calculation of recuperative heat-exchanging facility]. Ivanovo: FGBOU VPO “Ivanovskii gosudarstvennyi energeticheskii universitet im. V.I. Lenina”, 2013, 124 p. (In Russ.).
6. Melekhin A.A. *Optimizatsiya parametrov teploobmennyykh apparatov sistem vozdushnogo otopleniya: dis. ... kand. tekh. nauk* [Optimization parameters of heat-exchanging facilities of air heating systems. Cand. Sci. Dis.]. Perm', 2012, 151 p. (In Russ.).
7. Zarubin V.S., Peshkova M.A. Optimization parameters of radiating ribbed pipe. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Seriya “Estestvennye nauki”*, 2007, no. 3, pp. 28–41. (In Russ.).
8. Pis'mennyy E.N., Terekh A.M. Construction methods of increasing heat-aerodynamic efficiency of pipe cross-ribbed surface of heat-exchange. Part 3. Surfaces from profiled pipes with incomplete ribbing. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 1999, vol. 21, no. 6, pp. 5–11. (In Russ.).
9. Laptev A.G., Nikolaev N.A., Basharov M.M. *Metody intensifikatsii i modelirovaniya teplomassoobmennyykh protsessov* [Methods of intensification and simulation heat and mass-exchanging processes]. Moscow: Teplotekhnika, 2011, 335 p. (In Russ.).
10. Kremer H., Schmitz G. Untersuchung der Wärmerückgewinnung an industriellen Gasbrennern mit integriertem Rekuperator (Teil II). *Gaswärme International*, 1982, vol. 31, no. 1, pp. 18–25.

11. Brune M., Konold U., Kremer H., Flamme M. Entwicklung und Optimierung drallstabilisierter, keramischer Flachflammenrekuperatorbrenner zur dezentralen Wärmerückgewinnung. *Schlussbericht zum Forschungsvorhaben, AiF-Vorhaben*, no. 11436N, 2001.
12. Bartash M.R., Druzhinin G.M., Loshkarev N.B., Popov A.B., Khammatov I.M. A new high-speed recuperative gas burner for direct heating of metal in industrial furnaces. *Stal'*, 2010, no. 3, pp. 125–127. (In Russ.).
13. Loshkarev N.B., Mukhamadieva A.Kh. *Skorostnaya rekuperativnaya gorelka GSR-150* [A high-speed recuperative burner ГСР-150]. *Teplotekhnika i informatika v obrazovanii, nauke i proizvodstve: sb. dokl. IV Vseros. nauchno-praktich. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh (TIM'2015), Ekaterinburg, 26–27 marta 2015 g.* [Heat engineering and computer science in education, science and production: Sat. doc. IV All-Russia. scientific and practical conf. students, graduate students and young scientists (TIM'2015), Yekaterinburg, March 26–27, 2015]. Ekaterinburg: UrFU, 2015, pp. 96–100. (In Russ.).
14. Arseev N.B. *Razvitie elementov rekuperativnykh toplivoszhigayushchikh ustroystv pri modernizatsii metallurgicheskikh nagrevatel'nykh pechei: Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of elements of recuperative fuel-combustion facilities at modernization of metallurgical reheating furnaces. Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.]. Ekaterinburg: NICH FGAO VPO UrFU, 2011, 32 p. (In Russ.).
15. Biryukov A.B., Gnitiev P.A., Vlasov Ya.S. Methodology of prediction heat-engineering efficiency of recuperative burners application. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2018, no. 1, pp. 13–19. (In Russ.).
16. Biryukov A.B. Diagnostics of thermal operation of a furnace recuperative device. *Stal'*, 2019, no. 2, pp. 70–73. (In Russ.).

Received May 18, 2019