

УДК 658.567.1: 662.613.125: 662.661.25

Ерёмин А.О. – канд. техн. наук, доц., НМетАУ

СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ ОТОПЛЕНИЯ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

Проанализированы современные способы отопления топливных промышленных нагревательных печей с точки зрения качества нагрева металла, энерго- и ресурсосбережения и снижения количества вредных выбросов в атмосферу. Предложен новый объёмно-регенеративный способ сжигания топлива, применение которого в промышленных нагревательных печах обеспечивает высокий уровень технико-экономических показателей. Приведены данные по результатам промышленной эксплуатации нагревательной печи с реализованным объёмно-регенеративным сжиганием топлива.

Введение

Современная теория печей рассматривает комплексный подход к теплотехническим и технологическим процессам, проходящим в нагревательных устройствах. Печная теплотехника направлена на обеспечение заданной технологии тепловой обработки материала, но, в то же время, технологический процесс может происходить в рабочем пространстве печи одновременно с теплотехническим, как, например, при выплавке металла, обжиге огнеупоров, при термообработке. В другом случае технологический процесс следует за теплотехническим и происходит вне печи, например, при нагреве металла перед обработкой давлением: прокаткой, ковкой, прессованием. И, наконец, теплотехнический режим может определяться технологией предыдущего процесса – как это происходит при нагреве слитков с жидкой сердцевиной в нагревательных колодцах. Таким образом, теплотехнические процессы, проходящие в нагревательных устройствах, тесно связаны и неразделимы с технологическими.

Целью теории печей является конструирование агрегатов, удовлетворяющих всем технологическим требованиям к производимой продукции, имеющих современные технико-экономические показатели и соответствующие экологическим нормам по вредным выбросам, загрязняющим окружающую среду. Теория печей – это теория их конструирования и эксплуатации.

Постановка задачи

В настоящей работе рассматриваются современные широко распространенные способы сжигания топлива в промышленных нагревательных печах. Проанализированы недостатки существующих методов отопления печей. Целью является разработка принципов нового объёмно-регенеративного способа сжигания топлива, при котором достигаются высокие технико-экономические показатели работы печи при условии обеспечения высокого качества нагрева металла.

Анализ существующих способов отопления промышленных нагревательных печей

Основным показателем тепловой работы печей является их экономичность при условии соблюдения требований по качеству обрабатываемого материала. Потребление энергии в большинстве нагревательных устройств отечественных предприятий превышает уровень, достигнутый в промышленно развитых странах в несколько, а иногда и в десятки раз. Это объясняется неудовлетворительной работой топливосжигающих устройств, несовершенством системы утилизации теплоты дымовых газов, высокими потерями теплоты через ограждение печи и другими причинами. Технология также влияет на топливопотребление печей – неравномерность и нестандартность нагрева садки вынуждает искусственно затягивать процесс обработки материалов, что также увеличивает потребление топлива.

Основной причиной перерасхода энергии, по мнению многих авторов, является неудовлетворительная утилизация теплоты дымовых газов [1 – 3]. Ряд печей эксплуатируется и вовсе без теплоутилизаторов. Доля потерь тепла с уходящими дымовыми газами в тепловом балансе нагревательных печей может достигать 50 и более процентов. Поэтому основным резервом экономии топлива является возврат теплового потенциала дымовых газов в рабочее пространство печи с реагентами горения и, реже, с нагреваемым материалом.

Как показывает опыт эксплуатации современных нагревательных печей максимальную экономию топлива можно получить, применяя современные горелочно-утилизационные устройства – в первую очередь – регенеративные горелки [4, 5]. Экономия топлива при их применении может достигать 50 %. Эффективность работы регенеративных горелок и теплообменников с высокоразвитой поверхностью теплообмена объясняется тем, что в этих устройствах утилизируется до 90 % теплоты дымовых газов. С 80-х годов прошлого века, когда регенеративные горелки стали активно внедряться в производ-

ство, по настоящее время реконструированы практически все типы нагревательных печей. Известны примеры использования регенеративных горелок в нагревательных колодцах, методических, камерных нагревательных и термических печах, печах для плавления алюминия и стекольных плавильных печах [2, 4, 6, 13, 16]. Регенеративные горелки используют в котлах и для нагрева ковшей [7], в термических печах разнообразной конструкции.

Однако применение высокотемпературного подогрева воздуха имеет и ряд недостатков, которые не позволяют говорить о решении проблемы теплотехники печных агрегатов и совершенстве их тепловой работы.

Во-первых, известно, что образование оксидов азота, являющихся основными загрязнителями при сжигании топлива, напрямую связано с температурой факела. Согласно механизму образования оксидов азота, предложенному Я.Б. Зельдовичем ещё в 1947 году [8] «быстрые» и «топливные» оксиды азота образуются в области сравнительно низких температур (1000 – 1900 К) – в корневой части факела. Скорости образования «быстрых» и «топливных» оксидов азота слабо зависят от температуры, но и их количество не является определяющим. «Термические» оксиды азота образуются при температурах свыше 1300 К. На содержание «термических» NO_x в продуктах сгорания наибольшее влияние оказывают: температура факела и продуктов горения, условия смесеобразования и температуры подогрева компонентов горения [9]. Содержание оксидов азота в дымовых газах зависит, в основном, от количества «термических» NO_x , образовавшихся при горении. Таким образом, высокотемпературный подогрев воздуха в регенераторах регенеративных горелок приводит к резкому возрастанию количества выбросов оксидов азота, не компенсирующихся даже снижением расхода топлива.

Во-вторых, высокотемпературный факел, образующийся при использовании регенеративных горелок усиливает эффект неравномерного нагрева садки как по длине рабочего пространства (нестандартность нагрева), так и по сечению нагреваемого металла – за счёт возрастания теплового потока на поверхности металла, обращённой к факелу. К недостатку факельного сжигания в регенеративных печах можно отнести местный перегрев и оплавление металла высокотемпературным факелом [10].

В-третьих, по этой же причине, интенсифицируется процесс окалинообразования, скорость которого также зависит от температуры среды и печной атмосферы [11].

В настоящее время имеется ряд решений, направленных на устранение перечисленных недостатков в топливных промышленных печах.

Все известные в настоящее время способы нейтрализации вредных выбросов промышленных печей можно подразделить на две основные группы [12]:

- технологические методы снижения концентрации вредных выбросов;

- методы, связанные с применением специального оборудования для химической очистки дымовых газов. Следует отметить, что химические, сорбционные, окислительно-сорбционные и восстановительные методы снижения вредных выбросов очень дороги и связаны с введением в технологические линии дополнительных очистных систем и агрегатов, стоимость которых зачастую превышает стоимость основного оборудования.

К технологическим методам относятся:

- подготовка топлива (добавление присадок, воды и (или) пара, обессеривание топлива и др.);

- впрыск воды и (или) пара в воздух горения;

- впрыск воды и добавление пара в очаг горения;

- искусственная и естественная рециркуляция;

- ступенчатое и многоступенчатое сжигание топлива;

- сжигание с малым избытком воздуха;

- улучшение условий теплообмена (повышение светимости факела) и т.д.

Практически, все перечисленные методы направлены на снижение температуры очага горения или растягивание факела по объёму печи.

Основным способом достижения равномерности нагрева садки в печах является рациональное управление движением газов, обеспечивающее равномерный перенос теплоты к локальным участкам металла и футеровки [10].

В существующих печах равномерности и стандартности нагрева добиваются путём применения внутренней и внешней рециркуляции, реверса печных газов, импульсного нагрева, качания горелок, изменения направления факела струёй компрессорного воздуха и другими способами управления температурным полем.

Эти методы также связаны, в основном, с устранением локальных высокотемпературных зон факела и созданием для металла равнозначных (стандартных) условий нагрева. Ниже приведены некоторые

примеры создания равномерных условий нагрева металла в пламенных нагревательных печах.

В работе [14] снижение температуры факела в нагревательных колодцах предлагается осуществлять за счёт подмешивания дыма в воздух горения. При этом снижается выход оксидов азота в атмосферу, существенно повышается равномерность нагрева, увеличивается количество движения продуктов сгорания. Это дополнительно приводит к росту конвективного теплообмена.

Развитие эта идея получила в современной технологии сжигания топлива, получившей название «FLOX[®]» (flammlose Oxidation)» [15]. Инертный газ, в основном – дым, образующийся при горении, смешивается с реагентами – топливом и воздухом в такой пропорции, что пики температуры во фронте пламени сглаживаются, и горение переходит из факельного сжигания в объёмное.

Организации двухстадийной подачи топлива в регенеративных нагревательных колодцах посвящена работа [17]. Авторами предлагается улучшить качество сжигания топлива путём одновременной подачи части топлива и воздуха под углом 90° друг к другу и увеличением пути перемешивания за счёт организованного двухстадийного сжигания, когда вторая часть топлива смешивается с продуктами сгорания, включающими избыточный кислород. Способ отопления нагревательного колодца с изменением расхода воздуха при постоянном расходе топлива описан в [18]. Изменение температурного поля и формы факела реализовано с помощью периодического добавления высококалорийного топлива в низкокалорийное [19].

Таким образом, известные решения по улучшению равномерности и стандартности нагрева металла авторы большинства работ связывают с улучшением условий внешнего теплообмена в рабочем пространстве печи, главным образом с переходом факельного сжигания топлива в режимы, приближённые к объёмному сжиганию.

Объёмное сжигание топлива в печах

Объёмное сжигание топлива или приближённый к нему режим многостадийного сжигания существенно снижает и окалинообразование в печах. Разработкой и внедрением печных агрегатов малоокислительного нагрева с многоступенчатым (стадийным) сжиганием топлива активно занимались ГПИ «Стальпроект», ПО «Теплопроект», МИСиС, НМетАУ и другие организации. Нагревательные печи малоокислительного нагрева были построены и эксплуатировались в Днепропетровске (ДМК им. Дзержинского), Ступинском и Челябинском металлургических комбинатах, других машиностроительных за-

водах. Ряд нагревательных печей традиционной конструкции также были переведены на стадийное сжигание топлива. Это относится к нагревательным методическим печам комбината «Криворожсталь», Орско-Халиловского металлургического комбината и др. Эксплуатация кольцевой печи Челябинского металлургического комбината, в которой под наблюдением специалистов было нагрето 50 тыс. тонн трансформаторной стали, показала 5 – 6 кратное снижение количества угара металла при стадийном процессе сжигания топлива в печи [20].

Как было показано выше, применение объёмного сжигания топлива приводит к изменению условий локальной теплопередачи от нагревающей среды к металлу и футеровке в различных точках, то есть к выравниванию условий внешнего теплообмена. Отсутствие концентрированных источников теплоты, наиболее ярко выраженных при факельном способе сжигания топлива, приводит к тому, что вся поверхность нагреваемого металла находится в равнозначных условиях нагревания. При объёмном сжигании топлива не имеет значения расположение и количество дымовых окон и горелочных устройств, так как в этом случае отсутствует ярко выраженная траектория охлаждающихся, по мере движения, дымовых газов и, соответственно, не наблюдается переменное температурное поле по ходу движения греющей среды. Единственным условием стандартности нагрева садки при объёмном сжигании является отсутствие застойных зон, а точнее металла, находящегося в застойных зонах. Именно с этой точки зрения важен выбор типа, количества горелочных устройств и дымовых окон в печи. Объёмное сжигание топлива является эффективным способом улучшения равномерности нагрева металла, снижения количества выбросов в атмосферу и уменьшения угара металла.

Объёмное сжигание топлива может быть организовано различными способами. Это возможно с помощью интенсивной крупномасштабной рециркуляции продуктов горения в печи. Такой способ реализован в уже упомянутой «FLOX[®]» технологии сжигания топлива. Другим способом является сжигание топлива при регулируемом перемешивании его с воздухом. К нему можно отнести импульсное отопление, работу горелок на переменной во времени мощности, изменение направления факела и т.д. При этом к объёмному сжиганию наиболее близок способ многоступенчатого (или иначе стадийного) сжигания топлива.

Возможность применения «FLOX[®]» технологии сжигания топлива (или иначе беспламенного окисления) в промышленных печах связана с рядом вопросов. J.G. Wüning в рекламной статье о беспламенном окислении FLOX[®] говорит о том, что «горение не происходит при

любом составе предварительной смеси. Если при горении со стабильным пламенем подмешивать в воздух для горения инертный газ (имеется в виду дым, Примечание автора), горение происходит стабильно лишь до определенной степени. Как только эти границы пересекаются, пламя становится нестабильным, обрывается и, в конце концов, гаснет». То есть организация внутренней рециркуляции печных газов в определённом интервале кратности рециркуляции приводит к затуханию факела. Если же кратность рециркуляции увеличить выше определённого предела, то «газообразное топливо невидимо и бесшумно полностью реагирует...».

Таким образом, не понятно, как можно изменять мощность горелок FLOX® без риска погасания факела при переходе к объёмному горению или при возврате из объёмного горения к факельному. Также не ясно, как изменяется кратность рециркуляции при изменении тепловой мощности горелки. В работе [15] и в рекламных материалах не показан диапазон регулирования горелок, который, по видимому, весьма узок в связи с необходимостью обеспечения кратности рециркуляции в нужных пределах и поддержания условий устойчивого объёмного горения.

Практическая реализация ступенчатого сжигания топлива для промышленных печей также сопряжена с рядом трудностей. Это и сложная система трубопроводов, и дополнительная запорная и регулирующая арматура, и усложнение системы автоматики. Наряду с этим остаётся нерешённым вопрос организации многоступенчатого режима сжигания при переменной тепловой мощности горелок, связанной с ведением теплового процесса. В работе [20] отмечается, что при простое прокатного оборудования и вынужденной выдержки в печи металла, снижение расхода топлива приводило к сложности, а подчас и невозможности поддержания в печи заданного избыточного давления и контролируемой атмосферы. Также, во избежание перегрева металла, приходилось искусственно переносить дожигание топлива за рекуператор в боров, что не могло не сказаться на ухудшении технико-экономических показателей печи и условий эксплуатации рекуператора. При нарушении подачи топлива или воздуха в одну из горелок возникали неконтролируемые высокотемпературные зоны, приводящие к оплавлению металла. Кроме этого, для предотвращения попадания продуктов неполного сгорания в цех, над печами приходилось устанавливать кожухи, под которые подавался воздух.

Сложность практической реализации «беспламенного окисления» и многоступенчатого горения в промышленных печах даёт основание для организации объёмного горения путём заданного замедленного

перемешивания топлива с воздухом. При этом становится возможной локальная подача в рабочую камеру печи воздуха в количестве, необходимом для полного сжигания топлива. Топливо в рабочем пространстве печи сгорает с недостатком воздуха. Факел становится растянутым, без высокотемпературных зон. Полное горение заканчивается после выхода из печи дымовых газов и небольшого остатка топлива и окислителя.

Объёмно-регенеративный способ сжигания топлива

До настоящего времени принудительное некачественное перемешивание топлива с воздухом в промышленных печах не получило распространения. Традиционные горелочные устройства проектируются таким образом, чтобы обеспечить наиболее полное перемешивание топлива с воздухом. Неудовлетворительное перемешивание реагентов горения ведёт к образованию, так называемого, физического недожога и перерасходу топлива на обеспечение технологического процесса. Это можно отнести практически ко всем нагревательным печам, оборудованным рекуператорами или эксплуатируемым без теплоутилизаторов. Дожигание топлива вне рабочего пространства рекуперативных печей ведёт к перегреву рекуператоров, выходу их из строя, а в случае, когда теплообменник отсутствует – вообще к прямым потерям топлива.

В регенеративных печах ситуация несколько иная. Если полное сжигание топлива организовать до выхода дымовых газов из насадки регенераторов, то выделившаяся химическая теплота будет возвращена в печь с подогретым воздухом или топливом во время цикла нагрева реагентов в регенераторе. Единственным условием в таком случае является недопущение дожигания топлива после насадки регенераторов. Таким образом, в нагревательных печах, оборудованных регенераторами, возможна организация объёмного сжигания топлива за счёт регулируемого качества перемешивания топлива и воздуха, подогретого в регенераторах, при котором во всём объёме рабочей камеры создаётся малоокислительная атмосфера. Следует отметить, что применение регенераторов с высокоразвитой поверхностью теплообмена, например с шариковой или сотовой насадкой, в таком случае предпочтительно. Это объясняется тем, что, благодаря малым размерам насадки таких регенераторов, они размещаются в непосредственной близости к печи. Уменьшаются потери теплоты при движении горячего дыма и подогретого воздуха на участке между регенератором и печью, полностью исключаются подсосы холодного воздуха в дым и

выбивание подогретого воздуха, связанные с негазоплотностью бороз, имеющих место при традиционных кирпичных регенераторах.

Организация такого объёмно-регенеративного способа сжигания топлива в нагревательных печах возможна путём разделения потоков топлива и воздуха в горелочном устройстве, которое обеспечивало бы заданное качество перемешивания этих реагентов. На качество смешивания влияют две группы факторов: конструктивные и газодинамические. Принцип организации объёмно-регенеративного способа сжигания топлива изложен ниже.

Благодаря выбору количества, геометрических параметров и взаимного расположения газовых сопел и каналов для подвода подогретого в регенераторах воздуха для горения, а также выбору динамических характеристик потоков топлива и воздуха в газовых соплах и каналах для подвода воздуха, создаются такие условия перемешивания реагентов горения, при которых сжигание происходит во всём объёме рабочего пространства регенеративной нагревательной печи. Угол встречи потоков реагентов, форма профиля потоков и скорость истечения топлива и воздуха рассчитываются в соответствии с требуемой технологией и температурными параметрами нагрева. Регулирование скорости перемешивания обеспечивает физический недожог на выходе из рабочего пространства регенеративной нагревательной печи на уровне 0,1 – 5 %. При меньшей величине физического недожога на выходе из регенеративной нагревательной печи в рабочей камере происходит полное сжигание и объёмно-регенеративный способ сжигания переходит в факельный. Так как на выходе из рабочего пространства в дымовых газах имеется несгоревшее топливо и неиспользованный для горения кислород, горение продолжается при движении продуктов сгорания от рабочего пространства до регенераторов нагревательной печи. Возможно также догорание топлива и в верхних рядах насадки регенераторов. Если величина физического недожога на выходе из рабочего пространства регенеративной нагревательной печи превышает 5 %, то процесс горения будет продолжаться после регенераторов и коэффициент использования топлива в рабочем пространстве регенеративной нагревательной печи снизится. В любом случае анализ дыма на выходе из регенератора не должен выявлять наличие монооксида углерода CO, водорода и других горючих элементов топлива. Отсутствие высокотемпературных зон горения, присущих факельному способу сжигания, при объёмно-регенеративном способе сжигания топлива приводит к снижению количества образовавшихся в процессе горения оксидов азота на 20 – 50 % [21].

Равномерное температурное поле в рабочем пространстве печи при объёмно-регенеративном способе сжигания топлива в сочетании с реверсивным изменением направления траектории движения дымовых газов в регенеративной печи, предопределяет равномерность нагрева изделий во всём объёме рабочего пространства.

Кроме этого при объёмно-регенеративном сжигании топлива за счёт высокотемпературного подогрева реагентов горения экономия топлива достигает величины, характерной для традиционных регенеративных горелок – до 50 %.

Реализация объёмно-регенеративного способа сжигания топлива

Принцип объёмно-регенеративного сжигания топлива реализован в промышленных условиях. По проекту кафедры ТЭМП в 2003 – 2004 г.г. на комбинате «Криворожсталь» была проведена реконструкция системы отопления типового рекуперативного нагревательного колодца с центральной горелкой путём замены трубчатых керамических рекуператоров на малогабаритные регенераторы с насадкой, состоящей из корундовых окатышей [22].

По результатам работы нагревательного колодца с шариковыми регенераторами за четыре года его эксплуатации нами были сделаны следующие выводы.

– Благодаря объёмному сжиганию топлива, реверсу и рециркуляции газов отсутствует перепад температур по высоте камеры колодца, характерный для рекуперативных колодцев с отоплением из центра подины.

– В связи с выравниванием температуры по высоте камеры спуск жидкого шлака происходит при более низких, по сравнению с рекуперативными нагревательными колодцами, температурах в ячейке (1340 – 1350 °С), фиксируемых стационарным прибором.

– Выравнивание температуры по высоте колодца привело к снижению длительности томления слитков и общей длительности нагрева.

– Уменьшилось время пребывания слитков в условиях высоких температур и угар металла. Снижение количества окалины подтверждено исследованиями теплотехнической лаборатории комбината.

– Температура подогрева воздуха в шариковых регенераторах нагревательного колодца превышает 1000 °С в результате чего коэффициент использования теплоты топлива увеличился с 0,55 до 0,75.

– Экономия топлива в реконструированном нагревательном колодце в среднем составила 30 %. Срок окупаемости реконструкции

нагревательного колодца – 1 год. Восстановление газовых рекуператоров позволит получить дополнительную экономию топлива.

Положительный опыт эксплуатации нагревательного колодца цеха Блюминг-1 «АрселорМиттал Кривой Рог» (бывш. «Криворожсталь») стал основанием для реконструкции ещё одного нагревательного колодца этого предприятия, которая была осуществлена силами комбината. Второй регенеративный нагревательный колодец, в котором был реализован объёмно-регенеративный принцип сжигания топлива был пущен в промышленную эксплуатацию в 2007 году. Все решения по реализации принципа объёмно-регенеративного способа сжигания топлива получены на кафедре ТЕМП с помощью математического и физического моделирования [23, 24].

Выводы

Предложенный объёмно-регенеративный способ сжигания топлива имеет следующие преимущества по сравнению с широко распространённым факельным сжиганием газа в печах и известными способами объёмного сжигания топлива.

Достигается хорошая равномерность нагрева металла как по высоте, так и по длине рабочего пространства нагревательной печи.

За счёт высокотемпературного подогрева воздуха горения достигается 25 – 50 % экономия топлива.

Снижается угар металла и количество вредных выбросов, образующихся при сжигании топлива за счёт устранения высокотемпературных зон в печи.

Успешная четырёхлетняя промышленная эксплуатация нагревательного колодца с реализованным объёмно-регенеративным способом сжигания топлива показала перспективность развития данного направления топливоиспользования и целесообразность реконструкции нагревательных печей для реализации предложенного мероприятия.

Список литературы

1. Губинский В.И. Нагревательные печи металлургии – сегодня и завтра // Теория и практика металлургии. – 2004. – № 6. – С. 56 – 60.

2. Дистергефт И.М., Дружинин Г.М., Щербинин В.И., Савельев В.А., Звонарёв С.В., Петухов В.Б. Регенеративные системы отопления для нагревательных печей прокатного и кузнечного производства (история развития, теория и практика) // Металлургическая теплотехника: Сб. научн. тр. НМетАУ. – Том 5. – Днепропетровск: НМетАУ, 2002. – С. 44 – 57.

3. Сорока Б.С. Интенсификация тепловых процессов в топливных печах. – К.: Наук. Думка, 1992. – 416 с.

4. Сезоненко Б.Д., Орлик В.Н., Алексеенко В.В. Повышение эффективности использования природного газа при отоплении промышленных печей регенеративными горелками // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 1996. – № 1. – С. 14 – 18.
5. Губинский В.И. Metallurgical heat technology on the threshold of centuries // Сб. научн. тр. «Современные проблемы металлургии». – Выпуск 1. – Днепропетровск, 1999. – С. 197 – 207.
6. Bowers J.D., McMan F.C. Experience with regenerative burners in increasing glass melter efficiency // Ind. Heat. – 1988. – Vol. 55, № 4. – P. 24 – 26.
7. Moshida S., Hasegawa T., Tanaka R. Advanced application of excess enthalpy combustion technology to boiler system // Inter. Symp., Tulsa, Okla., 1993.
8. Зельдович Я.Б. Избранные труды. Химическая физика и гидродинамика / Под ред. Ю.Б. Харитона. – М.: Наука, 1984. – 374 с.
9. Сорока Б.С. Анализ и пути повышения энергоэкологической эффективности топливных нагревательных печей. – Киев: Знание, 1989. – 43 с.
10. Губинский В.И. Актуальные задачи реконструкции нагревательных печей // Metallurgical heat technology: Сб. научн. тр. НМетАУ. В двух книгах. – Книга первая. – Днепропетровск: Пороги, 2005. – С. 149 – 156.
11. Губинский В.И. Окисление стали в нагревательных печах и способы его уменьшения: Учебное пособие. – К.: УМК ВО, 1992. – 44 с.
12. Шульц Л.А. Элементы безотходной технологии в металлургии. – М.: Металлургия, 1991. – 174 с.
13. Алексеенко В.В. Исследования и разработка систем отопления промышленных печей на основе регенеративных горелочных устройств. – Рукопись. Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.06 – «Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика». – Институт газа НАН Украины, Киев, 2004.
14. Костырко Н.А., Парахин Н.Ф. Сравнительная оценка способов отопления рекуперативных нагревательных колодцев с отоплением из центра подины // Изв. вуз. Чёрная металлургия. – 1990. – № 2. – С. 86 – 87.
15. K. Telger, W. Roth. Опыт работы при применении горелок с режимом беспламенного окисления // Журнал «Gaswärme international», том 44 (1995), журналы номер 7 – 8, стр. 332 – 337, издательство «Vulkan», 45127 Essen.

16. Хоу Чэн Лян. Современное состояние и перспективы развития высокотемпературных регенеративных печей в КНР. // *Металлургическая теплотехника: Сб. научн. тр. ГМетАУ.* – Т. 1. – Днепропетровск, 1999. – С. 195 – 199.

17. Патент України, МКІ С21 Д 9/70 Регенеративний нагрівальний колодязь / Е.О. Цкітшвілі, В.Ф. Сапов, М.А. Кияшко, Ю.В. Лук'янов // *Опуб. 16.07.2001. Бюл. № 6.*

18. А. С. 1500686 СССР. Кл. МКІ С21 Д 9/70. Губинский В.И., Романчук А.Н., Проценко Ю.Ю. и др. Способ отопления регенеративных нагревательных колодцев. – *Бюл. № 30.* – 1989 г.

19. А. С. 1491897 СССР. Кл. МКІ С21 Д 9/70. Проценко Ю.Ю., Миронов Е.К., Кияшко Н.А. и др. Способ отопления регенеративных нагревательных колодцев. – *Бюл. № 25.* – 1989 г.

20. Л.А. Шульц. По следам разработки и внедрения печей со стадийным сжиганием топлива и перспективы их развития в металлургии // *Известия ВУЗов. Черная металлургия.* – 2005. – № 10. – С. 62 – 69.

21. Патент на корисну модель № 26272. Об'ємно-регенеративний спосіб спалювання палива при нагріванні металу / Єрьомін О.О., Губинський В.Й, Сибір А.В. – *Опубл. Бюл. № 14, 2007.*

22. Ерёмин А.О. Промышленная эксплуатация регенеративного нагревательного колодца 11-1 комбината «Криворожсталь» // *Металлургическая теплотехника. Сб. научн. тр. НМетАУ. В двух книгах.* – Книга первая. – Днепропетровск: Пороги, 2005. – С. 214 – 221.

23. Ерёмин А.О. Энергосберегающие системы отопления промышленных печей металлургических предприятий Украины. Печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии и машиностроении // *Труды IV международной научно-практической конференции (3 – 4 апреля 2008 г., МИСиС), Москва, 2008.* – С. 167 – 174.

24. Губинский В.И., Губинский М.В., Ерёмин А.О., Сибирь А.В., Воробьева Л.А. Теория и практика конструирования топливных нагревательных и термических печей нового поколения // *Тезисы докладов и сообщений VI-го Минского международного форума по тепло- и массообмену, 19-23 мая 2008 г., Минск.* – Т. 2. – С. 314 – 315.

Рукопись поступила 03.05.2008 г.