

**В.Г. Демченко, канд. техн. наук**

(Украина, Киев, Институт технической теплофизики НАН Украины)

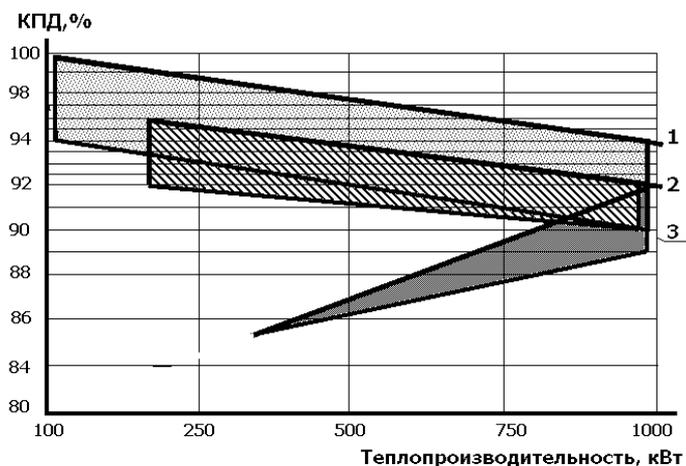
## СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНСТРУКЦИИ КОТЛОВ

По назначению водогрейные котлы малой мощности подразделяют на отопительные, предназначенные только для отопления, и комбинированные, или двухфункциональные, предназначенные для отопления и горячего водоснабжения и оборудованные встроенным водоподогревателем. По виду используемого топлива котлы подразделяют на: многопливные котлы, пригодные для работы на различных видах топлива без переоборудования, требующего демонтажа котла; многопливные котлы могут иметь одну или две топки; котлы на твердом топливе; котлы на газообразном топливе; котлы на жидком топливе [1]. По способу производства и получения тепла: высокотемпературные – температура котловой воды превышает  $115^{\circ}\text{C}$ , а объём котловой воды составляет 2,63-4,54 л/кВт; низкотемпературные – температура котловой воды не превышает  $115^{\circ}\text{C}$ , с плавно понижаемой температурой котловой воды – температура котловой воды не превышает  $100^{\circ}\text{C}$  и зависит от потребности в тепле, а объём котловой воды составляет 1,51-3,5 л/кВт, конденсационные и вакуумные – использующие скрытую теплоту парообразования и фазовых переходов, за счёт развитых поверхностей теплообмена, либо вакуумирования котловой воды. Надо отметить, что применение конденсационных котлов малой мощности ограничено 1500 кВт, в связи с проблемой утилизации конденсата и дополнительными затратами на его нейтрализацию.

Анализ тенденции развития современного котлостроения показывает, что в последние годы производители котельного оборудования направляют свои усилия на: повышение КПД котлов за счёт изменения конструктивных решений; снижение объёма котловой воды; изменение конструктивных решений – переход от принципа дымогарных котлов к водотрубным; подготовка газо-воздушной смеси в форкамерах; применение новых конструктивных материалов, – широкое использование алюминия и меди, огнеупорных сэндвич-панелей; создание нагревательных модулей состоящих из отдельных секционных котлов; широкого использования альтернативных видов топлива; перевод котлов в низкотемпературные режимы работы; снижение себестоимости котлов за счёт упрощения их конструкции; установка встроенных экономайзеров и пр.

Основным показателем эффективности работы котла является его КПД, который зависит от многих факторов, но в первую очередь определяется его конструкцией, рис. 1. Следует отметить, что конструктивные особенности существенно влияют на возможности регулирования теплопроизводительности по мощности котла и его КПД на малых и больших нагрузках. Учитывая тот факт, что мощность котла рассчитывается на максимальные нагрузки, которые возникают при максимальных отрицательных температурах, то большую часть времени отопительного сезона котёл работает на малых и средних режимах. По мнению автора наибольшей экономии топлива можно достичь, используя конструкции низкотемпературных котлов.

Недостатком многих находящихся в эксплуатации водогрейных и паровых котлов является малоэффективная теплоотдача в топке и обусловленные этим высокая температура уходящих газов (до  $200 - 250^{\circ}\text{C}$ ) и низкий КПД (до 85...87 %). Для решения этой проблемы широкое развитие могут получить методы интенсификации топочного теплообмена путём изменения геометрии топочного пространства с учётом процессов аэродинамики, распределения температурных градиентов, скоростей и полноты протекания химических реакций. Одним из путей повышения эффективности использования топлива в котлах, и соответственно повышения их КПД и уменьшения газовых выбросов в атмосферу (включая  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , и др.), является интенсификация теплообмена и соответственно теплоотдачи в топочной камере. При сжигании природного газа в относительно небольших топочных объёмах котлов с развитым экранирова-



**Рис. 1.** Влияние тепловой нагрузки на КПД 1МВт. водогрейного газового котла: 1-конденсационный, 2-низкотемпературный, 3-высокотемпературный котёл.

нием стенок, с точки зрения интенсификации теплообмена и надежной стабилизации факела целесообразна установка вторичных излучателей - твердых нагретых до высоких температур тел, являющихся как бы "тепловыми зеркалами", передающими излучение к поверхностям нагрева [2].

Действие вторичных излучателей основано на том, что они воспринимают тепло селективным излучением и конвекцией от продуктов сгорания и передают его полным спектром излучения к водоохлаждаемым поверхностям, расположенным в топке. Находясь в стационарном режиме при неизменной температуре, промежуточные излучатели весь падающий на них тепловой поток переизлучают на поверхности экрана в виде отраженного тепла и собственного излучения.

Установка вторичных излучателей в топочной камере котла обеспечивает интенсификацию лучистого теплообмена, за счет чего увеличивается теплоотдача в топке и соответственно повышается КПД котлов и уменьшается расход топлива. Кроме того, введение в зону факела вторичных излучателей позволяет снизить максимальные температуры в ядре зоны горения, за счет чего уменьшаются образование и соответственно выбросы токсичных веществ, в первую очередь оксидов азота. В результате снижения как максимальных температур в зоне горения, так и температур на выходе из топки и за котлом, облегчаются условия работы, повышается надежность и увеличивается срок эксплуатации котла. Известно, что большое влияние на качество процессов сжигания органического топлива оказывают режимно-технологические методы.

Все известные в настоящее время способы нейтрализации вредных выбросов промышленных котлов можно подразделить на две основные группы:

- технологические методы снижения концентрации вредных выбросов;
- методы, связанные с применением специального оборудования для химической очистки дымовых газов.

К технологическим методам относятся: подготовка топлива (добавление присадок, воды и (или) пара 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.

Физическое значение этих методов, в комплексе с другими режимными способами, например снижении избытка воздуха подаваемого на горение и рециркуляцией дымовых газов для снижения концентрации вредных выбросов в первую очередь NOx, в дымовых газах, состоит в организации дополнительного теплоотведения из зоны максимальных температур факела и соответственно в снижении максимальной температуры со снижением соотношения топливо/воздух и концентрации реагирующих элементов.

Наиболее распространённым способом является инсталляция в зону горения дополнительных охлаждаемых поверхностей, изготовленных из высокотемпературных материалов. Это приводит к стабилизации факела, интенсификации процесса горения и снижению вредных выбросов CO и NOx.

Практически, все известные в настоящее время способы нейтрализации вредных выбросов направлены на снижение температуры очага горения или растягивание факела по объёму топки.

Основным способом достижения равномерности нагрева топки является рациональное управление движением газов, обеспечивающее равномерный перенос теплоты к локальным участкам тепловоспринимающей поверхности.

В существующих топках равномерности нагрева добиваются путём применения внутренней и внешней рециркуляции, реверса печных газов, импульсного нагрева и другими способами управления температурным полем. Эти методы также связаны, в основном, с устранением локальных высокотемпературных зон факела и созданием стандартных условий нагрева.

Развитие эта идея получила в современной технологии сжигания топлива, получившей название FLOX® (flammlöse Oxidation)» [3]. Продукты сгорания 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. Объёмное сжигание топлива является эффективным способом улучшения равномерности нагрева топочного объёма и снижения количества выбросов в атмосферу. Объёмное сжигание топлива может быть организовано различными способами. Это возможно с помощью интенсивной крупномасштабной рециркуляции продуктов горения в топке. Такой способ реализован в FLOX® технологии сжигания топлива. Он позволяет удалить от среза горелки область максимальных температур, уровень которых существенно снижается. При температурах нагрева воздуха до 900°C уровень оксидов азота на порядок ниже чем при двух- и многостадийном сжигании топлива.

Другим способом является сжигание топлива при регулируемом перемешивании его с воздухом. Сюда 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) связана с рядом трудностей. Если кратность рециркуляции выбрана неправильно, то в определённом интервале изменения мощности горелочного устройства это приводит к затуханию факела. Если же

кратность рециркуляции увеличить выше определённого предела, то сгорание газообразного топлива переходит в устойчивое объёмное горение. Диапазон регулирования горелок, весьма узок в связи с необходимостью обеспечения кратности рециркуляции в нужных пределах и поддержания условий объёмного горения. Изменение геометрии объёма топки при установке, вторичных излучателей позволяет избежать данной ситуации и стабилизировать процесс горения во всём диапазоне регулирования горелки.

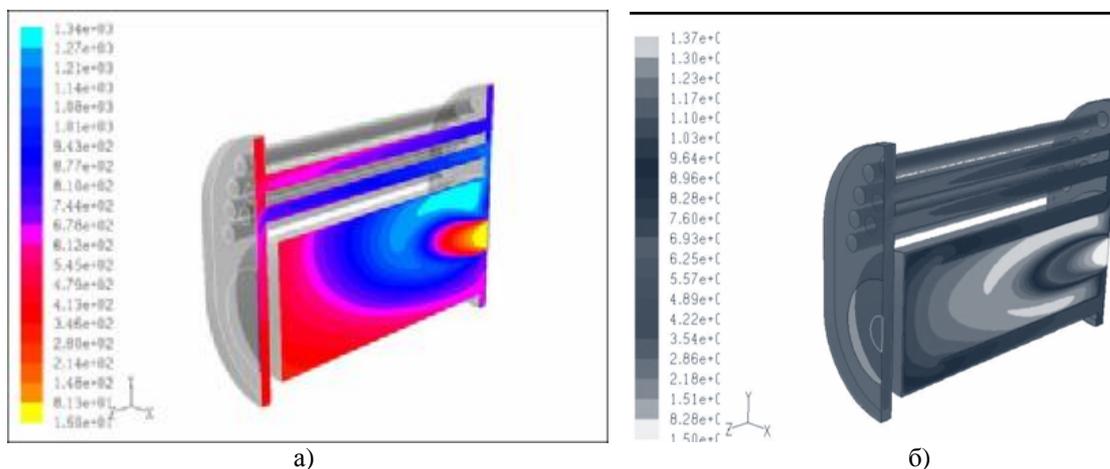
Полученные в ходе экспериментальных работ и промышленных испытаний данные показывают, что установка вторичных излучателей позволяет: увеличить теплоотдачу в топке котла на 10...30%; уменьшить расход топлива (природного газа) в котлах: производительностью до 1.0 Гкал на 3...5%, производительностью 1.0 – 6.0 Гкал на 1...3%, производительностью 6.0 – 30.0 Гкал на 0,6...1%; снизить образование оксидов азота на 20...30%; снизить температуру уходящих газов на 60 - 90<sup>0</sup>С; повысить надёжность эксплуатации и увеличить срок службы котлов (на 10...20%, или на 3 - 5 лет) за счет снижения максимальных температур в зоне горения на 30 - 70<sup>0</sup>С. Технология не требует больших капитальных вложений и эксплуатационных расходов, срок окупаемости составляет 1 - 2 года в зависимости от типа котла.

Для изготовления излучателей могут использоваться нержавеющей жаропрочная сталь типа Х28Н18, либо огнеупорные материалы на основе оксидов или тугоплавких соединений, обеспечивающие возможность длительной эксплуатации в условиях высоких температур в окислительно-восстановительной среде при возможности реализации достаточно большого числа теплосмен. В случае изготовления вторичных излучателей из металла необходимо, чтобы в состав соединений не входили элементы с большими атомными номерами, которым присущи высокие значения массовых коэффициентов поглощения для полезного излучения, поскольку это приводит к уменьшению выхода характеристического излучения. Например, для термических печей, работающих с контролируемой атмосферой, применяют радиационные трубы, назначение которых заключается в муфельировании пламени в печах и обеспечении равномерного теплообмена в рабочем пространстве печей. К этим трубам относятся: тупиковые радиационные трубы типа ТРТ, предназначенные для горизонтальной установки в печах с рабочей температурой до 900<sup>0</sup>С; тупиковые радиационные трубы типа ТРР с рециркуляцией продуктов сгорания, предназначенные для горизонтальной или вертикальной установки в печах с рабочей температурой до 950<sup>0</sup>С с горелкой ВНИИМТ-Стальпроект [4].

Интерес также представляет применение в промышленных печах излучающих (радиационных) труб из SiSiC керамики для непрямого нагрева. Преимуществом данной технологии является то, что: трубы обладают в 2 раза большей излучающей способностью, чем металлические; максимальная излучающая способность составляет 50 кВт/м<sup>2</sup> с температурой до 1100<sup>0</sup>С; керамика не подвержена термическому износу; максимальная единичная мощность излучающих труб составляет до 3000 кВт.; вес на 75% меньше в сравнении с металлическими трубами, при одинаковых габаритных размерах; могут применяться в котлах вместо горелочных устройств.

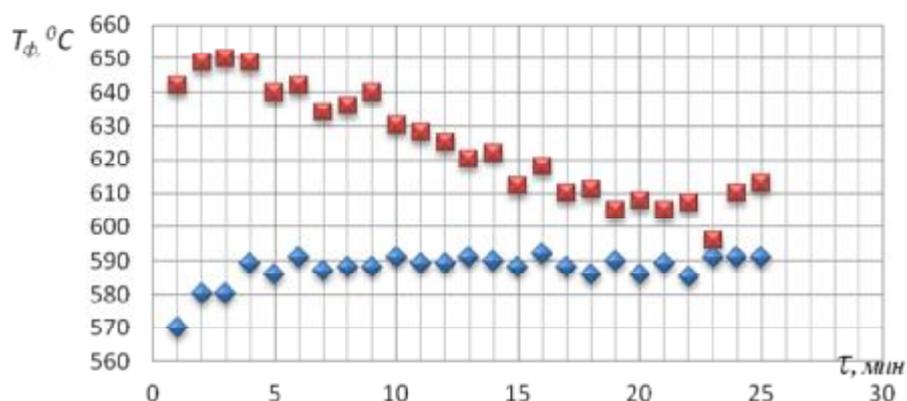
Рабочая поверхность вторичного излучателя должна быть по возможности большой и располагаться в области наиболее высоких скоростей и температур газов. Этому условию наилучшим образом соответствуют вторичные излучатели, разработанные в ИТТФ НАН Украины [5].

Проведенное компьютерное моделирование иллюстрирует изменение относительной температуры по глубине топки в вертикальной осевой плоскости при работе котла на номинальной нагрузке, с вторичным излучателем и без него, рис. 2. Если без вторичного излучателя поле температур неравномерно, то при его установке наблюдается заметное возрастание температуры по длине к задней стенке топки. Для оценки эффективности применения вторичных излучателей в виде ребренного цилиндра, установленного по оси горелочного устройства в жаровую трубу были проведены исследования работы стального жаротрубного котла поверхностью нагрева 3,65м<sup>2</sup>, оборудованного вентиляторной горелкой. Влияние вторичных излучателей на теплообмен в топке было также выявлено в сравнительных испытаниях котла типа ВК-21, ВК-22 и импортных котлов Viessmann и Riello с вентиляторными горелками производства фирм Weishaupt и Girsh (Германия), Риелло (Италия). В качестве вторичных излучателей использовались сплошные и перфорированные металлические цилиндры, располагавшиеся вдоль центральной оси камеры сгорания, стенки которой охлаждались водой.



**Рис. 2. Поле температур:**  
**а** – распределение температур в топке двухходового жаротрубного котла;  
**б** – изменения поля температур после установки вторичного излучателя

В результате опытов было установлено, что при большом расходе газа безразмерная температура на выходе из камеры (отношение средней измеренной температуры продуктов горения к теоретической  $T_r/T_a$ ) при установке продольного излучателя понизилась на 20 %, а при малых расходах газа даже на 30 % по сравнению с температурой, полученной в опытах, проведенных без излучателя, рис.3.



**Рис.3. Изменение температуры продуктов сгорания на выходе из топки:**  
**■** - с вторичным излучателем, **◆** - без вторичного излучателя

Полученные в этих экспериментах данные могут быть использованы для приближенной оценки эффективности работы вторичных излучателей, так как реальные условия их работы в топочных камерах котлов отличаются от тех, в которых проводились исследования. Наличие в топке вторичных излучателей повышает устойчивость горения газа, особенно при растопке котла и пониженных нагрузках. Наибольший эффект от применения вторичных излучателей был получен при омывании их потоком раскаленных продуктов горения. При этом возникает внутренняя рециркуляция продуктов сгорания, что способствует интенсификации теплообмена и снижению объема вредных выбросов в атмосферу. Таким образом, при наличии вторичных излучателей и правильном расположении их экран получает дополнительное количество тепла от этих поверхностей, кроме излучения от газов.

## Выводы

Проведенный анализ развития котлостроения показывает общую тенденцию снижения металлоёмкости котлов и применение прогрессивных конструктивных решений. Одним из направлений при проектировании новых и модернизации существующих котлов может стать широкое использование вторичных излучателей изменяющих способ сжигания органических топлив.

Предложенный способ сжигания имеет следующие преимущества по сравнению с широко распространенным факельным сжиганием газа в котлах и известными способами объёмного сжигания топлива.

Достигается хорошая равномерность нагрева, как по высоте, так и по длине рабочего пространства топочной камеры. За счёт появления внутренней рециркуляции снижается количество воздуха идущего на горение и достигается 2–5 % экономия топлива при снижении выбросов CO и NO<sub>x</sub> на 30-50%.

Применение цилиндрических оребренных вторичных излучателей, устанавливаемых по оси горелочного устройства, обеспечивает использование всех видов теплообмена, что обеспечивает интенсификацию теплосъёма в топке.

Успешная промышленная эксплуатация водогрейных котлов с вторичными излучателями показала перспективность развития данного направления и целесообразность реконструкции котлов и нагревательных печей для реализации предложенного мероприятия.

#### Список литературы

1. ГОСТ 30735-2001. Котлы отопительные водогрейные теплопроизводительностью от 0,1 до 4,0 МВт, ОКС 27.060.30, 97.100, ОКП 49 3120, Дата введения 2003–01–01.
2. Эстеркин, Р.И. Перевод промышленных котлов на газообразное топливо [Текст] / Р.И. Эстеркин, 1967, 208 с.
3. Пьяных, К.Е. Математическое моделирование низкоэмиссионного сжигания природного газа и совершенствование горелочных устройств на этой основе [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / К.Е. Пьяных - Киев, 2004, 169 с.
4. Горелочные устройства промышленных печей и топок (конструкции и технические характеристики) [Текст]: справочник / А.А. Винтовкин, М.Г. Ладыгичев, В.Л. Гусоевский, Т.В. Калинова.– М: "Интермет Инжиниринг" 1999. – 560 с.
5. Демченко, В.Г. Удосконалення топкових камер жаротрубних опалювальних котлів [Текст] / В.Г. Демченко, І.В. Макарчук // Восточно европейский журнал передовых технологий. 1/1 (49) 2011, с. 56-60.

*Рекомендовано до друку проф. Куваєвим В.Н.*