

10. Muñoz Arroyo J.A., Martens G.G., Froment G.F., Marin G.B., Jacobs P.A., Martens J.A. // Applied Catalysis A: General. 2000. Vol. 192. P. 9—22.
11. Huybrechts W., Vanbutsele G., Houthoofda K.J., Bertin-champs F., Laxmi Narasimhan C.S. etc. // Catalysis Letters. 2005. Vol. 100. P. 235—242.
12. Kikhtyanin O.V., Toktarev A.V., Ayupov A.B., Echevsky G.V. // Applied Catalysis A: General. 2010. Vol. 378. P. 96—106.

УДК 662.61

КАТАЛИТИЧЕСКОЕ ОКИСЛЕНИЕ ПРИРОДНОГО ГАЗА С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПЛАМЕННЫХ ГОРЕЛОК НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ

© 2013 г. **Д.Л. Астановский,**
Л.З. Астановский,
П.В. Кустов

ООО «ФАСТ ИНЖИНИРИНГ», г. Москва

Введение

Большое разнообразие потребителей тепловой энергии и видов сжигаемого топлива, а также различные требования к температуре теплоносителей, технологии сжигания топлива, энергосбережению и защите окружающей среды вызывают необходимость индивидуального подхода к выбору камер сгорания топлива (горелок).

Традиционно применяемые горелки для сжигания топлива и теплообменные аппараты для утилизации тепловой энергии по ряду причин не могут в значительной мере решить вопросы энергосбережения и защиты окружающей среды.

Как правило, отходящий дымовой газ от разных потребителей тепловой энергии имеет температуру 140—200 °С и выше [1, 2]. Огромное количество сбрасываемого в окружающую среду дымового газа приводит к большим потерям тепловой энергии.

Сжигание топлива в факельных и другого типа горелках при температуре, превышающей 1100—1200 °С, вызывает образование значительного количества CO, NO_x и, кроме того, не обеспечивает полного сжигания топлива; в результате большое количество

вредных компонентов выбрасывается с отходящими дымовыми газами в окружающую среду [1—3].

Для целого ряда потребителей тепла, таких как газовые турбины, трубчатые печи, каталитические реакторы, подогреватели нефтепродуктов и др., имеет место ограничение температуры дымового газа (продуктов сгорания), поступающего на теплоиспользование. Это ограничение обусловлено, главным образом, жаропрочностью применяемых материалов и особенностями технологических процессов, как например коксообразование при подогреве нефтепродуктов и др.

Как правило, понижение температуры продуктов сгорания, используемых в качестве теплоносителя, осуществляют путем подачи избыточного воздуха на горение [2]. В процессе сжигания топлива независимо от коэффициента избытка воздуха для окисления потребляется только стехиометрическое количество подаваемого воздуха, а остальная его часть идет на разбавление продуктов сгорания. При этом адиабатическая температура горения в факеле горелки (до разбавления) остается высокой и составляет 1800—2100 °С в зависимости от вида сжигаемого топлива, что приводит к образованию большого количества вредных компонентов (CO и NO_x) в продуктах сгорания [3]. Чем больше коэффициент избытка воздуха, тем больше количество сбрасываемого в окружающую среду горячего дымового газа,

Астановский Д.Л. – канд. техн. наук, президент ООО «ФАСТ ИНЖИНИРИНГ». Тел.: (495) 718-81-96. E-mail: da2707@mail.ru

Астановский Л.З. – вице-президент той же организации. Тел. тот же. E-mail: femoscow@mail.ru

Кустов П.В. – нач. конструктор. отд. той же организации. Тел. тот же. E-mail: femoscow@mail.ru

и это приводит к увеличению потребления топлива, тепловых потерь и снижению КПД установки.

Факельные горелки, как правило, имеют ограничения по температуре поступающего на них воздуха, что в ряде случаев не позволяет в полной мере утилизировать тепло отходящих дымовых газов.

Разработанные в настоящее время каталитические горелки имеют ограничения по температуре получаемого теплоносителя (не более 1000 °С) [3–5].

Традиционно для каталитического сжигания топлива перед подачей газовой смеси на катализатор воздух и топливо смешивают в смесителях [4, 5]. При этом образуется взрывоопасная смесь, которая может воспламениться до поступления в слой катализатора.

Используемые в настоящее время пластинчатые, кожухотрубные и другие виды рекуператоров тепла отходящего дымового газа, в том числе для подогрева воздуха, теплофикационной воды и др. [2, 6], громоздки и недостаточно надежны при эксплуатации. Их применение ограничено расходом газовых потоков в одном аппарате и температурой использования.

В кожухотрубных и пластинчатых теплообменных аппаратах имеет место неравномерное распределение теплообменных сред по теплообменным поверхностям. В результате образуются застойные зоны и температурные перекосы, вызывающие повышенные механические напряжения в сварных швах и основном металле элементов конструкции теплообменных аппаратов, что приводит к их разрушению. Высокие механические напряжения ускоряют разрушающее действие коррозии. Возникает необходимость применять кожухотрубные аппараты с компенсатором на корпусе, с U-образными теплообменными трубками, с «плавающими» трубными досками и т.д. Как правило, такие аппараты металлоемки и имеют повышенное гидравлическое сопротивление.

Таким образом, основные потери тепла связаны с большим избытком воздуха, подаваемого на горение, высокой температурой отходящих дымовых газов и недоокислением части подаваемого топлива. Повышение эффективности сжигания топлива прежде всего связано с решением этих проблем.

Новые технические решения

ООО «ФАСТ ИНЖИНИРИНГ» созданы беспламенные горелки [7, 8] и теплообменные аппараты принципиально новой конструкции [9, 10], на основе которых разработана технология эффективного

сжигания топлива с глубокой рекуперацией тепла отходящих дымовых газов и поддержанием заданной адиабатической температуры горения [7, 8, 11].

Схема беспламенной горелки конструкции «ФАСТ ИНЖИНИРИНГ»[®] представлена на рис. 1.

В верхней части горелки концентрично установлены две перфорированные обечайки, кольцеобразное пространство между которыми заполнено зернистым материалом (катализатором). В зернистом слое установлены спиралеобразные перегородки, обеспечивающие равномерное распределение окислителя и топлива по спиралеобразным каналам от периферии к центру. В начале каждого спиралеобразного канала размещены перфорированные трубки, через которые в зернистый слой подается топливо. Смешение топлива с окислителем и его окисление осуществляются в зернистом слое.

В отличие от традиционно применяемых каталитических горелок, в которых воздух и топливо перед подачей газовой смеси на катализатор смешивают в смесителях, в горелке новой конструкции смешение топлива и окислителя осуществляется в зернистом слое катализатора. Такое техническое решение обеспечивает полную безопасность при экс-

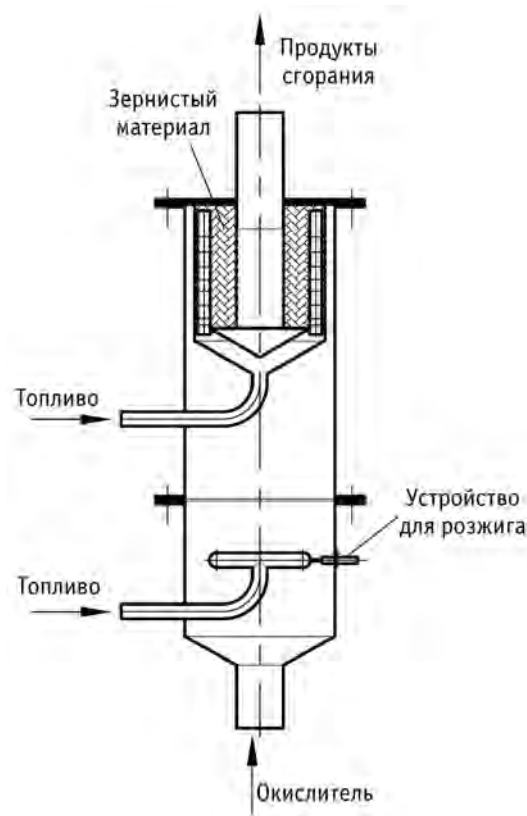


Рис. 1. Схема беспламенной горелки новой конструкции

плуатации и исключает возможность образования взрывоопасной газовой смеси.

Конструкция беспламенной горелки предусматривает предварительный разогрев зернистого материала (катализатора) факельной горелкой до температуры 500–600 °С. Для этой цели в нижней части горелки размещена факельная горелка с запальным устройством для розжига. Топливо (природный газ или другое) подается через боковые патрубки раздельно для факельной и каталитической горелок. Продукты сгорания при розжиге факельной горелки проходят через зернистый слой, нагревая его при этом до температуры начала окисления топлива.

После разогрева зернистого материала отключается подача топлива на факельную горелку и открывается подача топлива на каталитическую горелку. Окислитель поступает через нижний патрубок и, пройдя по кольцевому зазору, через наружную перфорированную обечайку подается в зернистый слой. Топливо подается через боковой патрубок, равномерно распределяется по перфорированным трубкам и поступает в спиралеобразные каналы, заполненные катализатором. При этом в зернистом слое катализатора происходит смешение топлива с окислителем и процесс окисления. Продукты сгорания выходят через внутреннюю перфорированную обечайку и через верхний патрубок направляются потребителю для использования тепла.

Такая конструкция каталитической камеры сгорания обеспечивает беспламенное горение даже бедных топливных смесей. При этом продукты сгорания имеют одинаковую температуру по всему объему. Количество воздуха, подаваемого в горелку, соответствует стехиометрическому или близкому к нему количеству, необходимому для полного сгорания топлива. Коэффициент избытка воздуха при этом равен 1,00–1,05.



Рис. 2. Катализатор окисления углеводородов

В горелку был загружен разработанный ООО «ФАСТ ИНЖИНИРИНГ» экструдированный катализатор окисления углеводородов цилиндрической формы, представляющий собой носитель, изготовленный из глинозема, с нанесенным на него оксидом никеля NiO (рис. 2).

При разработке катализатора окисления углеводородов за основу был взят промышленный катализатор (см. таблицу) паровоздушной конверсии природного газа, который в течение длительного времени (4–5 лет) непрерывно работает при температуре 1000–1300 °С (в лобовом слое) в установках производства аммиака [2].

Созданные ООО «ФАСТ ИНЖИНИРИНГ» теплообменные аппараты радиально-спирального типа (рис. 3) успешно эксплуатируются в России и за рубежом в энергетике, химической, нефтеперерабатывающей и других отраслях промышленности в ка-

Характеристика катализатора окисления углеводородов

Наименование	Значение
Диаметр гранул, мм	1,3
Высота гранул, мм	2,0–6,0
Механическая прочность, кг/мм ²	2,8
Насыпная плотность, г/см ³	1,46
Доля оксида никеля, мас. %	9,0
Удельная поверхность гранулы, см ² /см ³	31,8

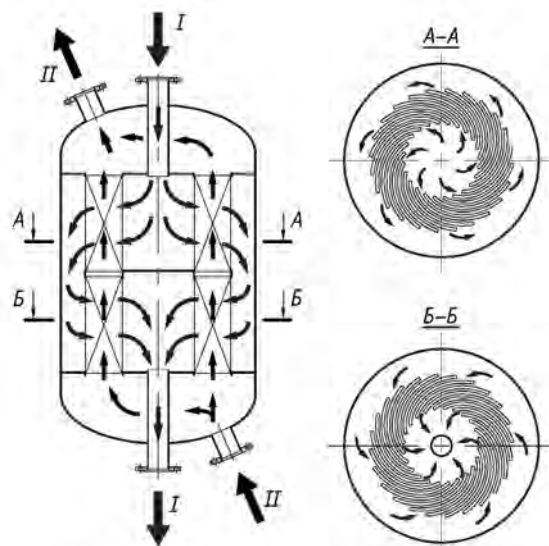


Рис. 3. Теплообменный аппарат радиально-спирального типа конструкции «ФАСТ ИНЖИНИРИНГ»: I и II – первый и второй теплоносители соответственно

честве подогревателей, охладителей, конденсаторов, аппаратов воздушного охлаждения, рекуператоров тепла дымовых газов для подогрева воздуха, подаваемого в горелки, котлов-утилизаторов и т.д. [7, 8].

Теплообменный аппарат новой конструкции представляет собой цилиндрический корпус, в котором вдоль оси установлены теплообменные блоки с теплообменными поверхностями, сформированными из теплообменных элементов, образующими щелевые каналы для потоков теплообменных сред — радиально-спиральные и аксиальные. В сечении, перпендикулярном оси аппарата, теплообменные элементы, формирующие теплообменную поверхность, имеют форму спирали Архимеда.

Теплообменные элементы аппаратов конструкции «ФАСТ ИНЖИНИРИНГ»[®] полностью исключают проблемы, связанные с термическими расширениями, не имеют местных концентраций напряжений ни в основном металле, ни в сварных швах и могут быть успешно использованы при требуемом перепаде давлений и температур теплообменных сред, при глубоком вакууме и высоком давлении, в широком диапазоне температур. Температура применения зависит только от материалов, использованных для изготовления теплообменных элементов и корпуса аппарата.

Теплообменные аппараты новой конструкции компактны, имеют максимальную удельную поверхность теплообмена в единице объема цилиндрического аппарата и позволяют проводить процесс теплообмена газовых и жидкостных потоков практически любой требуемой производительности в одном аппарате в широком диапазоне перепадов давлений и температур теплообменных сред. По сравнению с традиционно применяемыми аппаратами эти аппараты имеют практически идеальное равномерное распределение теплообменных сред по щелевым каналам. Благодаря этому, как показал длительный опыт их эксплуатации (более 5 лет), исключается образование застойных зон, а также выпадение солей жесткости (накипи) на теплообменной поверхности.

На рис. 4 приведен вариант принципиальной схемы эффективного сжигания топлива с утилизацией тепла отходящих дымовых газов и поддержанием заданной адиабатической температуры горения.

Природный газ (или другое топливо) и воздух с добавленной к нему частью отходящего дымового газа, предварительно нагретые дымовым газом, выходящим из приемника тепла, поступают на горелку, где происходит горение топлива. Заданная адиабатическая температура горения топлива (не более 1200 °C)

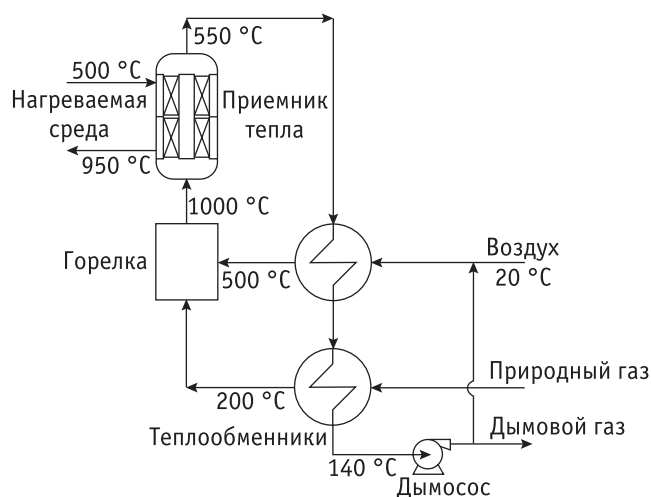


Рис. 4. Вариант принципиальной схемы эффективного сжигания топлива

поддерживается количеством рециркулирующего дымового газа. Дымовой газ после горелки направляется в приемник тепла, где охлаждается, отдавая тепло потребителю, после чего проходит последовательно подогреватели окислителя и топлива. Охлажденный дымовой газ частично подмешивается к воздуху, и оставшаяся его часть сбрасывается в атмосферу.

В разработанной технологии эффективного сжигания топлива требуемая адиабатическая температура горения обеспечивается дозированием дымовых газов в воздух, подаваемый на горелку. Беспламенная горелка конструкции «ФАСТ ИНЖИНИРИНГ»[®] может эффективно работать при низком содержании углеводородов в топливно-воздушных смесях и при подаче практически стехиометрического количества воздуха, необходимого для полного сжигания топлива. Разбавление воздуха дымовым газом приводит к снижению концентрации кислорода в окислителе (смесь воздуха с дымовым газом), что в свою очередь снижает адиабатическую температуру горения топлива. Чем ниже концентрация кислорода в окислителе, тем ниже адиабатическая температура горения топлива. Таким образом, регулируя количество подмешиваемого в воздух дымового газа, можно регулировать и поддерживать требуемую адиабатическую температуру сгорания топлива.

Сжигание топлива при адиабатической температуре горения не выше 1200 °C практически исключает в отходящих дымовых газах CO и NO_x [8].

При этом глубокая рекуперация тепла отходящих дымовых газов обеспечивает уменьшение расхода топлива, количества отходящих дымовых газов и вредных выбросов (CO, NO_x) в окружающую среду.

Экспериментальные исследования

Испытания горелки новой конструкции проводили на экспериментальном стенде (рис. 5).

Расход топлива (природного газа) измеряли расходомером топлива NPM-G4, расход окислителя (смеси воздуха с азотом) — ротаметром РС 7. Количество несгоревших углеводородов, концентрации O_2 , CO и NO_x в продуктах сгорания, а также температуру дымовых газов определяли на выходе из горелки портативным анализатором дымовых газов Testo 350XL. Аэродинамическое сопротивление зернистого слоя измеряли U-образным манометром.

Результаты испытаний показали, что конструкция горелки обеспечивает устойчивое бесшумное, беспламенное горение топлива в зернистом слое катализатора в диапазоне адиабатических температур горения топлива 600—1200 °С. Прочность гранул катализатора после проведенных испытаний не изменилась и составила 2,8 кг/мм². Сжигание топлива проводили при коэффициенте избытка воздуха, равном 1,00—1,05.

При повышении адиабатической температуры горения топлива от 600 до 1200 °С содержание несгоревших углеводородов снижалось. Влияние объемной скорости на содержание несгоревших углеводородов

Рис. 5. Схема экспериментального стенда:

1 – горелка; 2 – расходомер окислителя; 3 – расходомер топлива; 4 – воздухоподувка; 5, 6 – регулировочные вентили

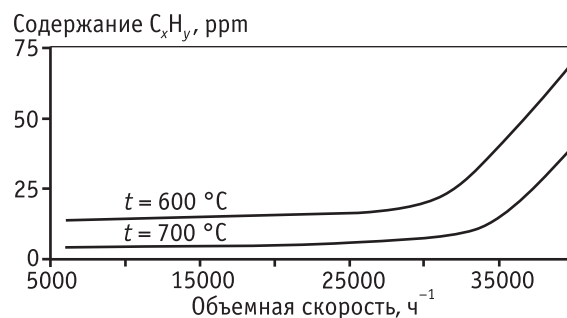
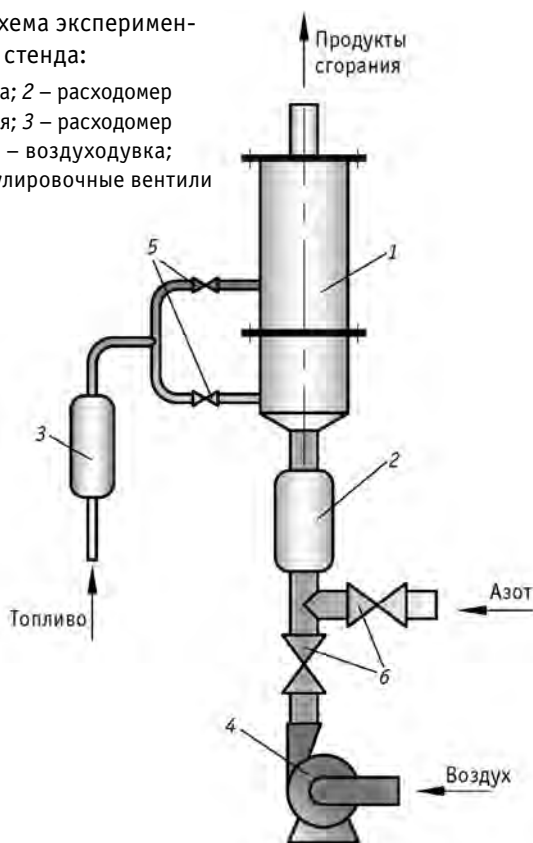


Рис. 6. Зависимость остаточного содержания углеводородов в продуктах сгорания от объемной скорости и температуры горения топлива

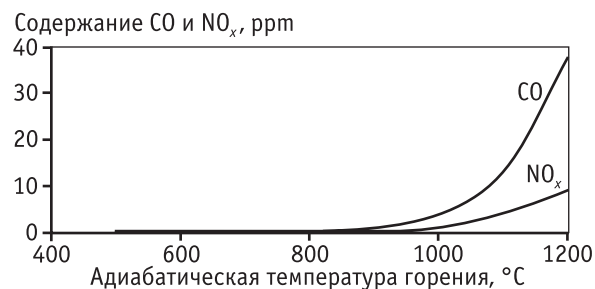


Рис. 7. Зависимость содержания CO и NO_x в продуктах сгорания от адиабатической температуры горения топлива

в продуктах сгорания показано на рис. 6. При температурах выше 800 °С в диапазоне объемных скоростей 5000—40000 ч⁻¹ несгоревшие углеводороды в продуктах сгорания практически отсутствовали.

На рис. 7 показана зависимость содержания CO и NO_x в продуктах сгорания от адиабатической температуры горения топлива. При адиабатических температурах горения 800—900 °С и менее содержание CO и NO_x в продуктах сгорания практически равно нулю. При температуре 1100 °С и более наблюдалось увеличение их концентрации, но даже при этих температурах содержание CO и NO_x в продуктах сгорания более чем на порядок ниже, чем в факельных горелках [1].

Зависимость аэродинамического сопротивления зернистого слоя горелки от расхода топливно-воздушной смеси и адиабатической температуры сгорания топлива показана на рис. 8.

Результаты исследования подтвердили возможность поддержания адиабатической температуры горения топлива в диапазоне 600—1200 °С путем разбавления воздуха, подаваемого в горелку, инертным газом. Наиболее эффективно горелка новой конструкции может быть применена в технологических процессах при использовании в качестве инертного газа продуктов сгорания и подогреве окислителя и топлива отходящим дымовым газом.

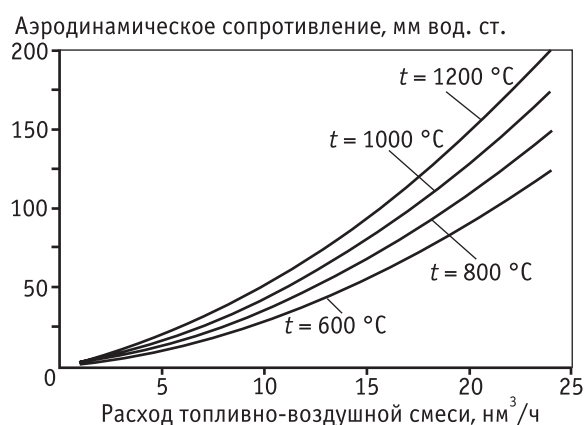


Рис. 8. Зависимость аэродинамического сопротивления слоя катализатора горелки от расхода топливно-воздушной смеси и адиабатической температуры горения топлива

В каждом конкретном случае при разработке промышленных беспламенных горелок новой конструкции характеристики горелки будут определяться типом, размерами и формой применяемого катализатора, видом топлива, требуемой температурой продуктов сгорания (теплоносителя), допустимым аэродинамическим сопротивлением и др.

Выводы

Применение беспламенных горелок для окисления углеводородов и теплообменных аппаратов нового поколения для рекуперации тепла отходящих дымовых газов, а также применение способа эффективного сжигания топлива «ФАСТ ИНЖИНИРИНГ»®, позволяющего поддерживать заданную адиабатическую температуру горения топлива, обеспечивает требуемую температуру продуктов сгорания перед потребителем тепловой энергии.

За счет утилизации низкопотенциального тепла отходящих дымовых газов и практически полного исключения подачи в горелку избыточного воздуха обеспечивается значительное сокращение потребления топлива. Сжигание топлива при адиабатической температуре горения не выше 1200 °C практически исключает в отходящих дымовых газах CO и NO_x.

Созданные беспламенная горелка и теплообменные аппараты нового поколения, а также технология эффективного сжигания топлива позволяют в значительной мере решить вопросы энергосбережения и защиты окружающей среды.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» по государственному контракту от 05.04.11 г. № 16.513.11.3012.

Литература

1. Винтовкин А.А., Ладыгичев М.Г., Гусовский В.Л., Калинова Т.В. Горелочные устройства промышленных печей и топок (Конструкции и технические характеристики): Справочник. М.: Интермет Инжиниринг, 1999. 560 с.: ил.
2. Справочник азотчика: Физико-химические свойства газов и жидкостей. Производство технологических газов. Очистка технологических газов. Синтез аммиака. 2-е изд. М.: Химия, 1986. 512 с.: ил.
3. Раяк М.Б., Бернер Г.Я., Кинкер М.Г. Совершенствование процесса сжигания топлива. Обзор зарубежных технологий // Новости теплоснабжения. 2011. № 12.
4. Leicher J., Giese A., Gorner K., Scherer V., Schulzke T. A Flexible Burner System for Use of Low Calorific Gases in Micro Gas Turbines, Conference «Heat processes and refractory materials in industry», Energy saving systems of burning, Dusseldorf, 2011.
5. Брайнин Б.И., Ведешкин Г.К., Гольцев А.В., Евстигнеев А.А., Захаров В.М., Котельников Ю.Л., Солонин В.И., Фаворский О.Н., Хритов К.М., Исмаилов З.Р. Разработка опытно-промышленной каталитической камеры сгорания энергетической ГТУ // Газотурбинные технологии. 2010. № 8. С. 2–6.
6. Добряков Т.С., Мигай В.К., Назаренко В.С., Надыров И.И., Федоров И.И. Воздухоподогреватели котельных установок. Л.: Энергия, 1977. 184 с.: ил.
7. Астановский Л.З., Астановский Д.Л. Эффективное сжигание топлива в газотурбинных установках // «Авиадвигатели XXI века»: Материалы конф. Электрон. дан. М.: ЦИАМ, 2010.
8. Астановский Д.Л., Астановский Л.З. Эффективное сжигание топлива в беспламенных горелках с поддержанием заданной адиабатической температуры горения // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2012. № 3. С. 19–22.
9. Астановский Д.Л., Астановский Л.З. Высокоэффективный теплообменный аппарат конструкции «ФАСТ ИНЖИНИРИНГ»® // Химическая техника. 2005. № 10. С. 10–13.
10. Астановский Д.Л., Астановский Л.З. Использование теплообменных аппаратов новой конструкции в теплоэнергетике // Теплоэнергетика. 2007. № 7. С. 46–51.
11. Пат. 2347977 РФ от 09.07.2007 г., F 23 C 9/00. Способ сжигания топлива / Д.Л. Астановский, Л.З. Астановский, П.В. Вертелецкий.