

## РАЗРАБОТКА ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ФАКЕЛЬНОГО СЖИГАНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

В статье представлены результаты работы по разработке, созданию и экспериментальной отработке горелочных устройств для эффективного факельного сжигания водоугольного топлива в тепловых энергетических установках. Описаны конструкции горелочных устройств и основные принципы их работы. Приведены результаты экспериментальных исследований для горелочных устройств тепловых котлов серии Е, наиболее распространенных в коммунальной теплоэнергетике Украины. Сделаны выводы о том, что применение предложенных конструкций горелочных устройств позволяет обеспечить прямое сжигание водоугольного топлива в тепловых котлах и дает возможность перевода указанных котлов с работы на газе либо мазуте на водоугольное топливо.

В статті наведено результати роботи по розробці, створенню та експериментальному відпрацюванню пальникових пристроїв для ефективного факельного спалювання водовугільного палива в теплових енергетичних установках. Описано конструкції пальникових пристроїв та основні принципи їх роботи. Приведено результати експериментальних досліджень для паливних пристроїв теплових котлів серії Е, найбільш поширених в комунальній теплоенергетиці України. Зроблено висновки про те, що використання запропонованих конструкцій пальникових пристроїв дозволяє забезпечувати пряме спалювання водовугільного палива в теплових котлах та дає можливість переведенню вказаних котлів з роботи на газі або мазуті на водовугільне паливо.

The paper focuses on the results of investigations in the development, creation and experimental development work of burners for the high-performance flame combustion of coal-water fuel for thermal power plants. Designs and basic operational aspects of burners are examined. The experimental results for burners of boilers of the E-series commonly used for Ukraine's municipal power engineering are presented. Conclusions are drawn that the burners proposed help provide the direct combustion of coal-water fuel in boilers and convert oil- or gas-designed boilers in coal-water boilers.

**Ключевые слова:** тепловой котел, горелочное устройство, водоугольное топливо, факельное горение, кавитационно-импульсная технология, степень дисперсности, гранулометрический состав.

Эффективное сжигание водоугольного топлива является одной из приоритетных проблем перевода тепловых котлов, работающих на газе либо мазуте, на водоугольное топливо (ВУТ). Для эффективного сжигания водоугольного топлива его гранулометрический состав должен содержать не менее 50% фракции угля размером частиц не более 90 мкм. При этом процентное содержание угля в водоугольном топливе должно быть не менее 70%.

В Институте технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины (ИТМ НАНУ и ГКАУ) разработана кавитационно-импульсная технология приготовления водоугольного топлива [1 – 4], которая позволяет получить водоугольное топливо с концентрацией угля более 70% и степенью дисперсности 90% частиц менее 50 мкм при значительном (в несколько раз) уменьшении удельных энергозатрат на производство единицы продукции в сравнении с традиционными технологиями, базирующимися на применении шаровых и бисерных мельниц.

Экологически чистые технологии приготовления и сжигания тонкодисперсного водоугольного топлива являются важнейшими энергосберегающими технологиями, которые могут существенно повысить эффективность использования топливных ресурсов Украины. Их внедрение позволит уменьшить зависимость Украины от внешних поставок энергоносителей.

Анализ патентной и научно-технической литературы показал, что на со-

© О. В. Пилипенко, 2015

временном этапе развития технологий сжигания ВУТ существуют следующие способы сжигания ВУТ:

- факельное сжигание с подачей ВУТ через форсунки (центробежные, форкамерные, комбинированные и др.);
- сжигание в кипящем слое (полностью или частично);
- сжигание с газификацией ВУТ (полной или частичной);
- комбинированное сжигание с другими видами топлива: углём, газом, мазутом.

Факельное сжигание ВУТ осуществляется по классической схеме: топливо подается под давлением через распыляющую форсунку в камеру сгорания. Распыл ВУТ может производиться как сжатым воздухом, так и паром – выбор осуществляется в зависимости от типа теплового котла.

Факельное сжигание является на сегодня самым эффективным способом сжигания ВУТ в котлах малой, средней и большой мощности. Конструкция тепловых котлов, как правило, позволяет организовать факел внутри камеры сгорания таким образом, чтобы частицы угля, входящие в состав ВУТ, могли полностью выгореть.

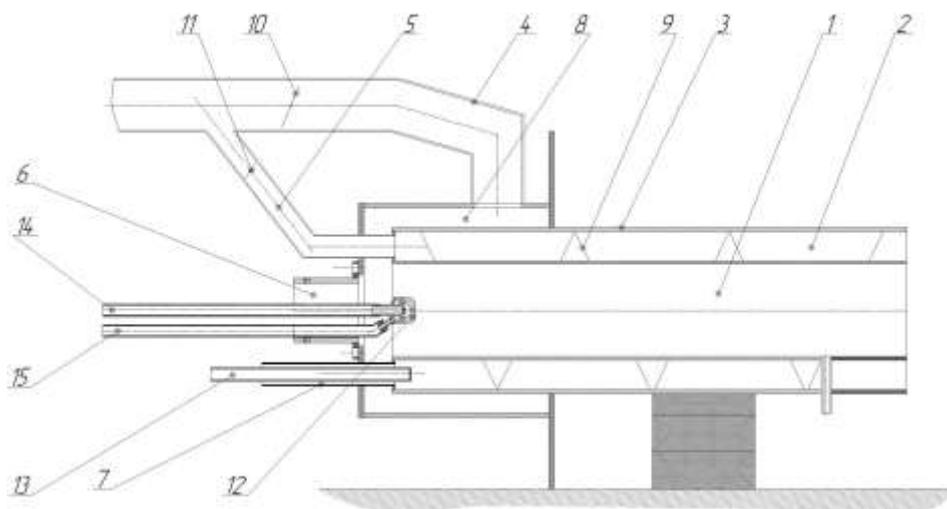
Известен ряд технических решений по разработке горелочных устройств, которые используются в Украине, Российской Федерации, Китае, США и др. Однако, информация как о конструкциях горелок в целом, так и об отдельных их конструктивных элементах и режимах работы содержит свои элементы "ноу-хау", что не дает возможности определить режимы работы и конкретные конструктивные параметры горелочных устройств.

При разработке горелочных устройств для сжигания водоугольного топлива в теплоэнергетических установках необходимо учитывать следующие основополагающие принципы [5, 6]:

- для обеспечения эффективного сжигания ВУТ конструкция форсунки должна обеспечивать тонкодисперсный распыл ВУТ и иметь рациональные параметры, обеспечивающие работу теплового котла на ВУТ;
- основными параметрами, которые влияют на время сжигания поданной порции ВУТ в топочное пространство, является начальная дисперсность частиц, их среднеобъемная скорость и начальная температура вдуваемого воздуха;
- с уменьшением начальной дисперсности и увеличением начальной скорости ВУТ расстояние от форсунки до зоны горения уменьшается;
- увеличение угла распыла частиц ВУТ, угловой скорости закрутки частиц или круговой скорости подаваемого воздуха приводит к более быстрому их сжиганию благодаря перемещению основной массы частиц в периферическую область горячего газа;
- максимальная температура в факеле сжигания наблюдается в окрестности внешней границы факела, где частицы максимально нагреваются при взаимодействии с горячей низкоскоростной окружающей средой; к частицам, которые сжигаются, поступает необходимое для процесса сжигания количество кислорода воздуха;
- закрутка частиц или подаваемого воздуха является более эффективным способом сокращения времени их сжигания по сравнению с увеличением угла распыла, дополнительная закрутка частиц во входном сечении еще больше интенсифицирует эти процессы.

Разработана принципиальная схема, конструкторская документация и изготовлена экспериментальная установка для исследований процессов сжигания ВУТ. На этой установке определены диапазоны расходов воздуха, необходимого для горения ВУТ, определены временные и температурные параметры предварительного нагрева топочного пространства горелочных устройств путем сжигания газа или жидкого топлива.

На основании проведенных исследований и полученных экспериментальных результатов изготовлены экспериментальные образцы ряда горелочных устройств для эффективного сжигания водоугольного топлива в теплоэнергетических установках и проведены их испытания.



1 – камера сгорания горелочного устройства; 2 – кольцевой канал; 3 – корпус; 4 – трубопровод подвода вторичного воздуха; 5 – подвод воздуха для сжигания газа разогрева; 6 – вход в топку; 7 – держатель газовой форсунки; 8 – воздушный коллектор; 9 – шнек; 10 – заслонка подачи вторичного воздуха; 11 – заслонка подачи воздуха разогрева; 12 – форсунка; 13 – газовая горелка; 14 – трубопровод подачи ВУТ; 15 – трубопровод подачи воздуха

Рис. 1 – Экспериментальная конструкция горелочного устройства

На рис. 1 показано первое испытанное в ИТМ НАНУ и ГКАУ горелочное устройство для исследования процессов сжигания ВУТ.

Подготовительная работа на экспериментальной установке по сжиганию ВУТ начинается с разогрева топки горелочного устройства 1, которое осуществлялось с помощью 2-х газовых горелок 13, устанавливаемых в держателях газовых форсунок 7. Пламя газовых форсунок направлялось в кольцевой канал 2 между камерой сгорания 1 и корпусом 3, затем закручивалось по шнеку 9, а с помощью заслонки 11 устанавливался режим наиболее полного сгорания газа в кольцевом канале.

После достижения температуры разогрева от 900 °С до 1100 °С через форсунку 12 в камеру сгорания подавалось ВУТ.

На установке рис. 1 было экспериментально определено соотношение водоугольного топлива и воздуха, необходимое для полного и качественного сгорания ВУТ. Испытания показали положительные стороны конструкции горелочного устройства и ее недостатки.

Недостатками конструкции являются такие факторы, как:

– вторичный воздух, поступающий для горения топлива, не подогревался и не закручивался;

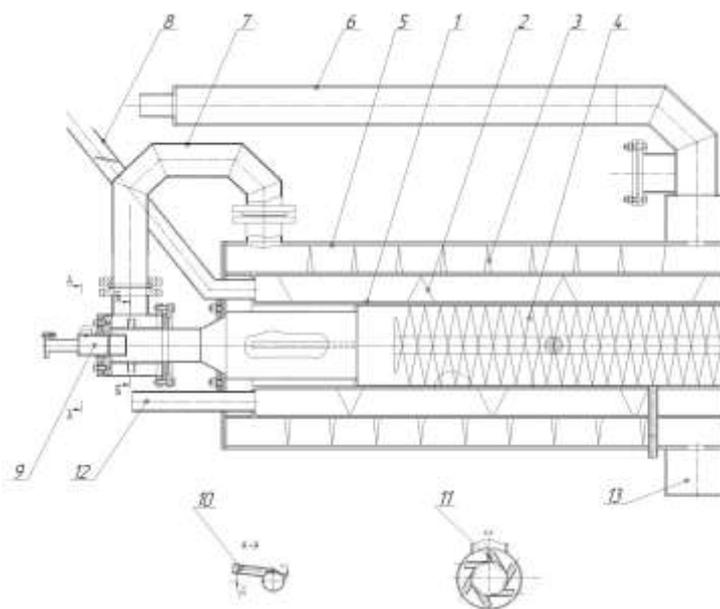
– форсунка имела кратковременный ресурс работы, так как водоугольное топливо скапливалось в коллекторе, а отверстия соплового аппарата имели недостаточное проходное сечение для выхода ВУТ в камеру смешения, в результате чего прекращалась эффективная работа форсунки по распылу водоугольного топлива в топочном пространстве экспериментальной установки;

– для предварительного разогрева топочного пространства горелочного устройства с помощью 2-х газовых горелок до температуры, необходимой для горения водоугольной смеси, требовалось большое количество газа (до 30 л/час), что экономически нецелесообразно в условиях эксплуатации энергетических установок;

– размеры топочного пространства горелочного устройства по длине и диаметру камеры сгорания не являлись достаточными для эффективного сжигания ВУТ; в ряде случаев во время экспериментов водоугольное топливо не сгорало в топочном пространстве и выносилось воздушным потоком за пределы камеры сгорания, не воспламеняясь.

В результате проведенных испытаний вышеуказанного горелочного устройства (рис. 1) было принято решение о доработке конструкции камеры сгорания и полной замене конструкции форсунки распыла ВУТ.

На рис. 2 представлено доработанное, а фактически новое, горелочное устройство для сжигания ВУТ.



1 – камера сгорания; 2 – шнек разогрева топки; 3 – шнек подогрева вторичного воздуха; 4 – шнек закрутки водоугольного топлива; 5 – воздушный кожух; 6 – трубопровод подвода вторичного воздуха; 7 – трубопровод подвода воздуха на форсунку; 8 – трубопровод подвода воздуха к шнеку разогрева топки; 9 – форсунка; 10 – трубопровод тангенциального подвода ВУТ; 11 – коллектор закрутки вторичного воздуха; 12 – держатель разогрева газовой горелки; 13 – воздушный коллектор

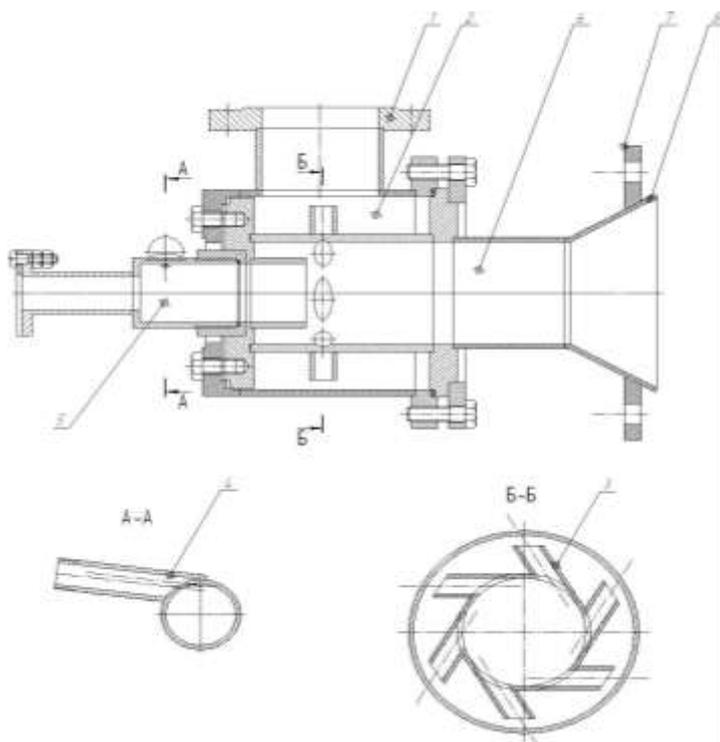
Рис. 2 – Горелочное устройство для сжигания ВУТ

Указанное горелочное устройство отличается от вышеприведенного тем, что внутри камеры сгорания 1 установлен шнек 4 с целью увеличения времени пребывания ВУТ в топочном пространстве.

Кроме того, горелочное устройство оборудовано воздушным коллектором 13 для пропорционального распределения вторичного воздуха, поступающего через коллектор подогрева воздуха с закручивающим устройством 3 на форсунку 9 по трубопроводу 7, соединяющему указанный коллектор с форсункой.

Предварительный разогрев топочного устройства, как и в предыдущем устройстве, осуществлялся с помощью двух газовых горелок, установленных в держателях 12, пламя от которых направлялось в коллектор разогрева 2. Вторичный воздух подавался под давлением из специальной накопительной емкости.

На рис. 3 представлена конструкция форсунки, примененная в горелочном устройстве рис. 2.



1 – фланец крепления воздуховода; 2 – коллектор; 3 – патрубок завихрителя; 4 – тангенциальный подвод водоугольной смеси; 5 – трубопровод подачи ВУТ; 6 – трубопровод смешения воздуха и ВУТ; 7 – фланец крепления форсунки к горелочному устройству; 8 – конический формирователь потока

Рис. 3 – Форсунка горелочного устройства

В данной конструкции ВУТ подводилось к форсунке по трубопроводу 4, тангенциально закручивалось в трубопроводе 5 и попадало в закрученный воздушный поток, образованный шестью патрубками тангенциального завихрителя 3, а затем, смешиваясь с закрученным воздушным потоком, поступало в трубопровод 6, и по коническому формирователю потока воздушно-водоугольная смесь попадала в топочное пространство горелочного устройства.

Основные преимущества горелочного устройства рис. 2 по сравнению с предыдущей конструкцией горелочного устройства заключаются в следующем:

- вторичный воздух, проходя через коллектор 13 рис. 2 попадает в разогретое пространство, образованное воздушным кожухом 5 и расположенным в нем шнеком 3, и далее подается на форсунку 9, что способствует более интенсивному испарению влаги из водоугольного топлива;

- с помощью шнека 4 значительно увеличивается время нахождения ВУТ в топочном пространстве горелочного устройства, что приводит к более полному сгоранию водоугольного топлива.

В результате проведения ряда испытаний были выяснены и недостатки представленной конструкции:

- для устойчивой работы горелочного устройства необходимо подавать в топочное пространство до 0,5 м<sup>3</sup>/с вторичного воздуха под давлением 4 атм; отсутствие в экспериментальном оборудовании соответствующего компрессора большой производительности (компрессор, обеспечивающий требуемые расходы и давление воздуха, имеет габаритные размеры в мм: 4060×1800×2050; масса компрессора – 8500 кг; потребляемая мощность – 400 кВт) приводит к весьма ограниченному по времени пускам;

- габаритная длина камеры сгорания все же недостаточна для полного сгорания воздушно-водоугольной смеси;

- при работе температура металла конструкции форсунки увеличивается, что требует дополнительного ее охлаждения.

В связи с экономической нецелесообразностью использования компрессора большой производительности было принято решение о разработке новой конструкции горелочного устройства, использующей для нагнетания и закручивания вторичного воздуха промышленный центробежный вентилятор ВЦ 6-28 №5, а для подачи первичного воздуха – 2 компрессора малой производительности РМ-3129.04.



Рис. 4 – Фотографии факела горения водоугольного топлива

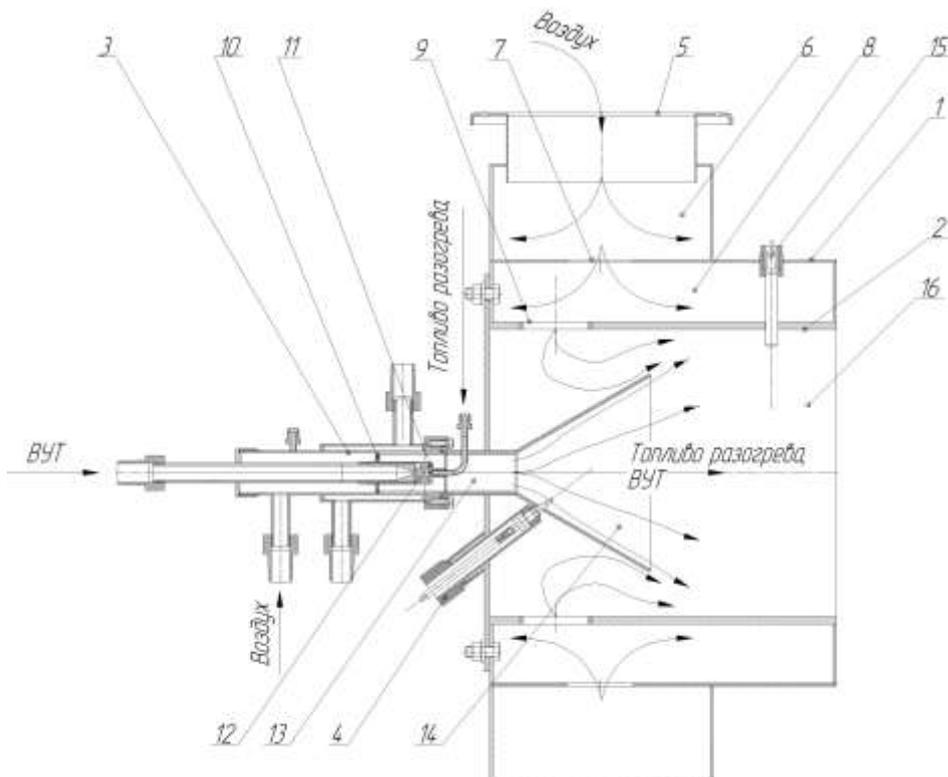
На рисунке 4 показано факельное горение водоугольного топлива. Яркая область фотографии – горящий факел.

В качестве технологического топлива для предварительного разогрева топочного пространства предложено использовать дизельное топливо либо керосин и объединить в одном устройстве форсунку для распыла технологического топлива и форсунку для распыла ВУТ.

Для отработки конструктивных параметров новой форсунки было принято решение вначале разработать и изготовить имитатор горелочного устройства, состоящий из основных конструктивных узлов, присущих будущему горелочному устройству.

Имитатор был спроектирован и изготовлен. Топочное пространство имитатора изготовлено в укороченном варианте для удобства определения параметров факела распыла форсунки, дисперсности распыла технологического топлива и, главное, дисперсности распыла водоугольного топлива. Кроме того, на имитаторе необходимо было отработать новую конструкцию устройства поджига технологического топлива в виде стандартной газовой горелки.

На рис. 5 показана конструкция имитатора горелочного устройства.



1 – кожух; 2 – камера сгорания; 3 – форсунка; 4 – устройство поджига; 5 – канал подвода воздуха от вентилятора; 6 – коллектор воздушный; 7 – отверстия пере-пуска воздуха; 8 – зарубашечный коллектор; 9 – отверстие завихрителя; 10 – завихритель форсунки; 11 – жиклер подвода топлива разогрева; 12 – жиклер подачи ВУТ; 13 – канал смешения компонентов; 14 – конический формирователь потока; 15 – термопара контроля температуры; 16 – топочное пространство

Рис. 5 – Конструкция имитатора горелочного устройства

Работа имитатора осуществлялась следующим образом.

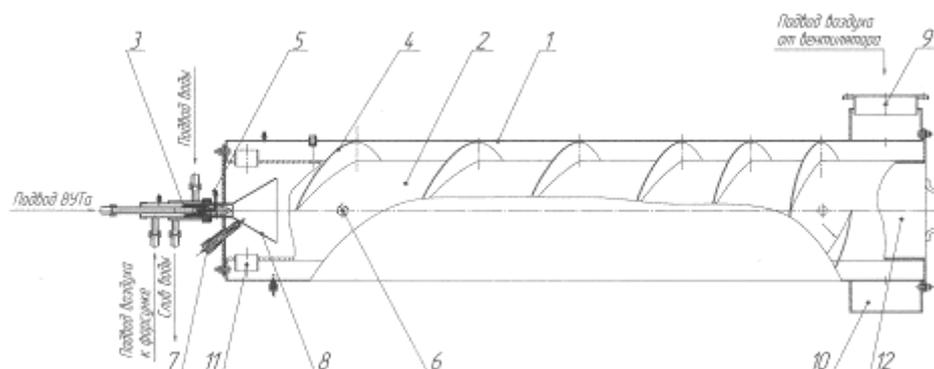
Топливо разогрева, проходя через жиклер 11, попадает в канал смешения компонентов 13 и поджигается с помощью устройства поджига 4. После достижения определенной температуры, необходимой для устойчивого горения технологического топлива на поверхности конического формирователя потока 14, в него через завихритель форсунки 10 подается воздух на распыл, в результате чего в топочном пространстве 16 создается горящий факел, необходимый для разогрева внутренней поверхности камеры сгорания 2. Система поджига отключается. После разогрева камеры сгорания до температуры от 900 °С до 1100 °С включается подача водоугольного топлива, которое через жиклер подачи ВУТ 12, попадая в канал смешения 13, смешивается с топли-

вом разогрева и направляется в камеру сгорания. Одновременно с этим подаётся вторичный воздух от вентилятора по воздуховоду 5 в воздушный коллектор 6 через отверстия перепуска воздуха 7 в кольцевой канал 8 и затем через отверстия завихрителя 9 в топочное пространство 16. После выхода из форсунки распыленное водоугольное топливо попадает в разогретое пространство камеры сгорания и воспламеняется. После этого подача технологического топлива прекращается, а управлением количеством подводимого вторичного воздуха регулируется режим горения.

В результате многочисленных испытаний, проведенных на имитаторе горелочного устройства, были определены конструктивные параметры форсуночного устройства как в части распыла технологического топлива, так и в части тонкодисперсного распыла ВУТ, отработаны системы подачи первичного и вторичного воздуха, системы подачи технологического топлива и ВУТ, система поджига, определены параметры предварительного разогрева топочного пространства и многое другое.

В результате анализа результатов испытаний, проведенных с помощью имитатора горелочного устройства, было принято решение разработать конструкцию и изготовить новое горелочное устройство.

Конструктивная схема нового горелочного устройства для факельного сжигания водоугольного топлива представлена на рис. 6.



1 – корпус; 2 – камера сгорания; 3 – форсунка; 4 – шнек с переменным шагом; 5 – штуцер подвода топлива; 6 – термopа; 7 – устройство поджига; 8 – формирoватель потока; 9 – патрубок; 10 – кольцевой коллектор; 11 – воздушный завихритель; 12 – замыкатель

Рис. 6 – Горелочное устройство

В отличие от всех предыдущих конструкций горелочных устройств, новая конструкция оснащена кольцевым каналом с двухзаходным шнеком переменного шага, предназначенным для предварительного подогрева вторичного воздуха. Длина камеры сгорания горелочного устройства увеличена в два раза по сравнению с камерами сгорания предыдущих конструкций горелочных устройств. Усовершенствована конструкция устройства поджига.

Работа нового горелочного устройства основана на тех же принципах сжигания водоугольного топлива, что и работа описанных выше горелочных устройств. Работа установки начинается с предварительного разогрева топочного пространства с помощью технологического топлива, подаваемого в форсуночное устройство 3 через штуцер подвода топлива 5, в форсуночном устройстве топливо закручивается воздушным потоком и в распыленном ви-

де поступает в камеру сгорания. В формирователе потока 8 с помощью устройства поджига 7 смесь воспламеняется и в виде горящего факела поступает в камеру сгорания 2. Начинается разогрев топочного пространства. Необходимое количество воздуха для стабильного горения технологического топлива подается от вентилятора через патрубок 9, откуда воздух поступает в кольцевой коллектор 10. Из коллектора, равномерно распределяясь, воздух направляется в кольцевой канал с двухзаходным шнеком переменного шага 4, в котором воздух закручивается, подогревается и через воздушный завихритель 11 нагнетается в топочное пространство. После достижения необходимой температуры (от 900 °С до 1100 °С), через форсуночное устройство подается водоугольное топливо, которое после выхода из соплового аппарата форсунки через формирователь потока распыляется внутри топочного пространства и воспламеняется. Подача технологического топлива прекращается.

После установки необходимых параметров подачи первичного и вторичного воздуха протекает процесс устойчивого эффективного факельного горения водоугольного топлива.

График изменения во времени температур на входе в камеру сгорания (т.к. 2), на выходе из нее (т.к. 3) и в кольцевом канале подогрева вторичного воздуха (т.к. 4) представлен на рисунке 7. Из приведенного рисунка видно, что при факельном горении водоугольного топлива температура в камере сгорания остается стабильной и поддерживается на уровне ~ 1000 °С. Температура в кольцевом канале составляет ~ 600 °С.

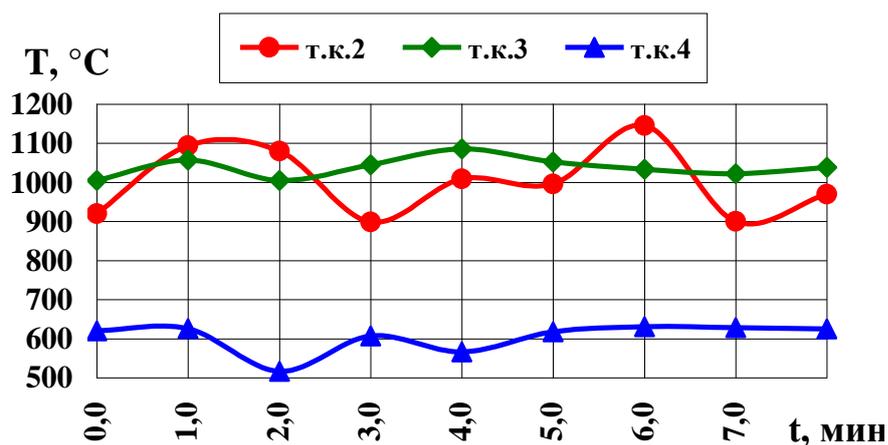


Рис. 7 – Изменение температуры в камере сгорания и кольцевом канале при факельном горении водоугольного топлива

На рис. 8 представлена фотография горелочного устройства, подготовленного к огневым испытаниям.

На рис. 9 – 10 показаны фрагменты огневых испытаний горелочного устройства на водоугольном топливе, приготовленном по кавитационно-импульсной технологии, разработанной в ИТМ НАНУ и ГКАУ, из отходов обогатительной фабрики (шламоконцентрата). Состав топлива – 71 % шламоконцентрата, 29 % воды. Степень дисперсности топлива – 90 % частиц менее 50 мкм.

На рисунках отчетливо виден светящийся факел, образованный продуктами сгорания водоугольного топлива. Аналогичные результаты получены и при сжигании водоугольного топлива, приготовленного на основе угля АШ по той же технологии.

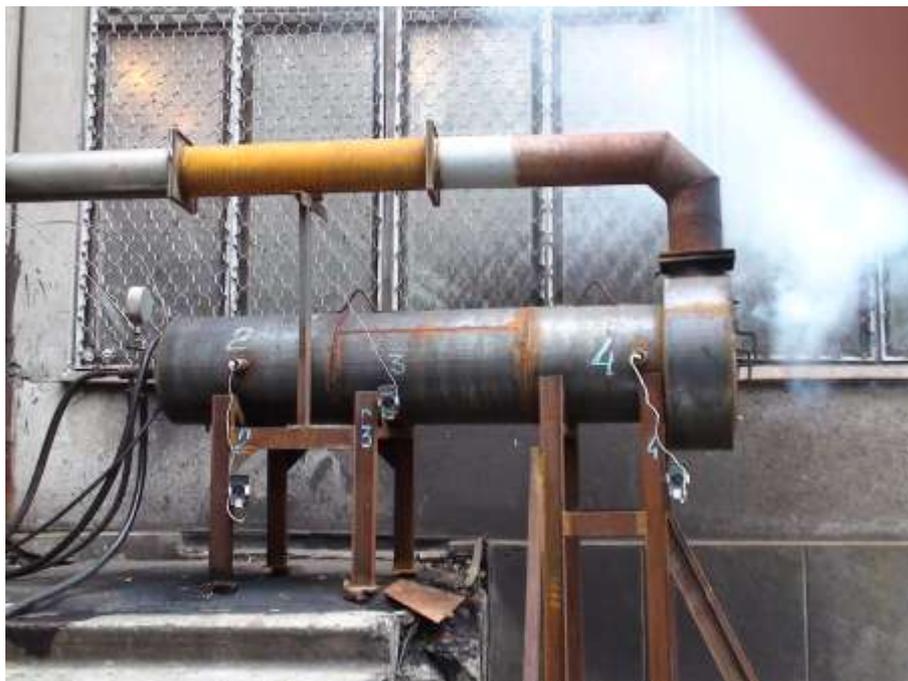


Рис. 8 – Фотография горелочного устройства, подготовленного к огневым испытаниям



Рис. 9 – Фотография испытания горелочного устройства



Рис. 10 – Фотография факельного горения водоугольного топлива

**Выводы.** На основании проведенных экспериментальных исследований и полученных результатов разработаны и изготовлены экспериментальные образцы горелочных устройств для эффективного сжигания водоугольного топлива в теплоэнергетических установках (тепловые котлы серии Е), проведены их испытания и получено устойчивое эффективное факельное горение водоугольного топлива, приготовленного по кавитационно-импульсной технологии как на основе угля, так и на основе шламоконцентрата.

Подтверждено, что эффективное факельное горение водоугольного топлива в топочном пространстве горелочного устройства можно обеспечить путем тонкодисперсного распыла капель ВУТ со степенью дисперсности 90 % частиц размером менее чем 50 мкм в разогретой до 1000 °С камере сгорания.

1. Исследование высоконапорных струйных течений жидкости при наличии противодействия / *В. В. Пилипенко, В. ф. Бугаенко, Г. Г. Гончаров, И. И. Зайденс* / Материалы III Всесоюзн. совещ. по гидроавтоматике. – Калуга : Изд-во Ин-та проблем упр. АН СССР, 1974. – С. 42 – 45.
2. А. С. 2590124. Устройство для получения тонкодисперсных систем / *Пилипенко В. В., Задонцев В. А., Манько И. К., Дзоз Н. А., Волков В. В., Северин В. П., Костюк В. И.* (СССР). – опубл. 1990, Бюл. №33.
3. *Pilipenko V. V.* The Features of Cavitation Self-excited Oscillations Interaction in Supply of Propulsion System with Space Vehicle Flexible Body / *V. V. Pilipenko, Yu. Ye. Grigoriyev, O. Ye. Tcherneavskiy* // The Second Russian-Sino Symposium on Astronautically Science and Technique: the Symposium dedicate to 50<sup>th</sup> Anniversary of Samara Aviation Institute Founding, June, 30 – July, 4, 1992, Samara, Russia. – Samara, 1992. – P. 60.
4. *Pilipenko O. V.* Use of Cavitation Pulse Generator of high-frequency, high-amplitude self-oscillations / *O. V. Pilipenko, L. G. Zapolsky, Yu. A. Kvasha* // ID : CA V03-OS-2-3-004 Fifth International Symposium on Cavitation (CAV 2003), November, 2003, Osaka, Japan.
5. *Тимошенко В. И.* Газовая динамика высокотемпературных технологических процессов / *В. И. Тимошенко*. – Днепропетровск : Институт технической механики НАНУ и НКАУ, 2003. – 460 с.
6. Исследование процессов в горелочных установках для высокоскоростного газопламенного напыления порошковых материалов с использованием расходного способа воздействия на поток / *В. И. Тимошенко, И. С. Белоцерковец, В. П. Галинский, В. Х. Кадыров, В. М. Кисель, Ю. И. Евдокименко* // Инженерно-физический журнал. – 2001. – Т. 74, №6. – С. 156 – 161.

Институт технической механики  
Национальной академии наук Украины и  
Государственного космического агентства Украины,  
Днепропетровск

Получено 28.10.2015,  
в окончательном варианте 28.10.2015