

РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЯ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО УГОЛЬНОГО КОТЛОАГРЕГАТА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО КИПЯЩЕГО СЛОЯ С УСТРОЙСТВОМ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПУСКА

*А.В. Бондарев, к.т.н., ВА МТО, Санкт-Петербург
К.М. Маллаев, А.В. Смирнов д.т.н., ВИ(ИТ), Санкт-Петербург*

Выполнен анализ технического состояния котельных в муниципальных и ведомственных образованиях РФ. Дана краткая характеристика мероприятий по совершенствованию котлоагрегата высокотемпературного кипящего слоя КВП-1,74 ВТКС для сжигания твердого топлива в автоматическом режиме. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса пуска котла с автоматическим розжигом.

Системы теплоснабжения ведомственных и муниципальных образований Российской Федерации, включающие котельные установки, играют важную роль в обеспечении их жизнедеятельности.

Из общего числа котельных в системах теплоснабжения значительная часть приходится на низкоэффективные угольные котельные в диапазоне тепловых мощностей от 2 до 10 МВт.

Эти котельные преимущественно укомплектованы низкоэффективными котлами малой мощности устаревших конструкций с ручными слоевыми топками без какой-либо механизации и автоматизации технологических процессов, топливоподготовки, топливоподачи, горения, шлакозолоудаления, газоочистки.

Работа таких котельных характеризуется неудовлетворительными экономическими, экологическими и санитарно-гигиеническими показателями:

- низкими значениями КПД (40–50) % вследствие повышенных значений потерь теплоты от механической неполноты сгорания в слоевых топках;
- повышенным содержанием вредных выбросов в атмосферу (окислов серы, азота, золы и сажи) вследствие низкого качества организации горения угля в слоевых топках;
- тяжелым ручным трудом эксплуатационного персонала в условиях загазованных и запыленных помещений.

Техническое состояние котельных предопределяет необходимость проведения их комплексной

модернизации, включающей строительство и реконструкцию угольных котельных с применением новых энергоэффективных технологий и оборудования.

Одним из приоритетных направлений модернизации и технического перевооружения существующих угольных котельных в диапазоне мощностей от 1,5 до 9 Гкал/ч, является применение технологии сжигания угля в высокотемпературном «кипящем» слое (ВТКС).

В настоящее время на кафедре двигателей и тепловых установок Военного института (инженерно-технического) Военной Академии материально-технического обеспечения имени А.В. Хрулева (ВИ(ИТ) ВА МТО) накоплен значительный опыт разработки и промышленного изготовления высокоэффективных котлоагрегатов КВП-1,74-ВТКС, а также опыт проектирования, строительства и реконструкции угольных котельных с применением таких котлов. Котлоагрегаты КВП-1,74-ВТКС с высокотемпературным кипящим слоем с узкой наклонной подвижной колосниковой решеткой единичной мощностью 1,5 Гкал/ч (1,74 МВт) сертифицированы и могут серийно применяться к установке при строительстве и реконструкции угольных котельных [1, 2].

На рис. 1 приведен общий вид котла с топкой высокотемпературного кипящего слоя.

Данный котел работает следующим образом. Дутьевым вентилятором воздух в количестве примерно 50 % от общего расхода подается в дутьевые зоны первичного воздуха 4 под колосниковую решетку 3 через зазоры между колосниками для создания кипящего слоя и организации процесса горения твердого топлива. Остальная часть воздуха поступает в сопла вторичного дутья 7 для дожигания продуктов неполного сгорания (окислов углерода, серы, азота), в воздушный эжектор 9 для возврата легких фракций твердого топлива, унесенных из топки.

Топливо сгорает в кипящем слое в основном в нижней части колосниковой решетки (над первыми тремя дутьевыми зонами). Твердые очаговые остатки (шлак) оседают на решетке и

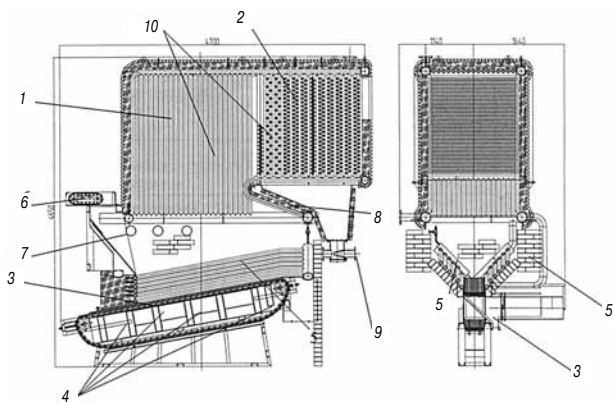


Рис. 1. Конструктивная схема котла ВТКС:

1, 2 — экранные и конвективные поверхности нагрева; 3 — механическое топочное устройство, выполненное в виде подвижной колосниковой решетки, наклонной к горизонту; 4 — дутьевые зоны первичного воздуха и удаления провала уноса; 5 — трубная панель охлаждения; 6 — пластиковый питатель угля; 7 — коллектора вторичного дутья; 8 — бункер возврата уноса; 9 — воздушный эжектор; 10 — перегородки конвективных поверхностей нагрева

затем удаляются в шлаковый канал. Газы вместе с мелкой фракцией топлива огибают поворотный экран 10. Несгоревшее топливо оседает в бункере возврата уноса 8 и воздушным эжектором 9 возвращается в топку на дожигание. Газы поступают в конвективный пучок труб 2 и, охлаждаясь в нем, поступают в систему газоочистки, а далее дымососом удаляются в дымовую трубу.

Для снижения потерь тепла с механическим недожогом и уменьшения концентрации твердых выбросов применяется система возврата уноса. Для этого котел оборудуется специальной поворотной камерой и расположенной под ней камерой осаждения уноса.

Поворотная камера выделена внутри топочного объема частично газоплотными задним экраном топки и поворотным экраном. Благодаря резкому развороту и снижению скорости дымовых газов происходит сепарация значительного количества грубых частиц уноса. Осажденный в камере унос направляется с помощью эжектора возврата уноса в зону активного горения, где не догоревший углерод уноса дожигается, а зола уноса переводится в шлак.

Применяемая в котле технология ВТКС позво-

ляет достичь высоких экономических, технологических и экологических показателей:

- эффективность выгорания топлива составляет 95–98 %;
- коэффициент полезного действия котлоагрегата достигает 80–83 %;
- минимальные значения выбросов оксида азота, золовых и сажистых веществ за счет внутритопочных методов их подавления (сопел вторичного дутья и системы возврата уноса);
- высокая надежность работы котла за счет гравитационной подачи топлива в топку и эффективного охлаждения колосниковой решетки;
- удобство монтажа за счет изготовления котлов крупными блоками.

Общий вид котла КВП-1,74-ВТКС и его отдельные блоки приведены на рис. 2.

Конструктивное решение данного котла защищено патентом RU38041 U1 [2] на полезную модель [3].

Применение технологии сжигания угля в высокотемпературном кипящем слое реализовано на двух пилотных объектах:

- экспериментальной механизированной угольной котельной (рис. 3) с котлами КВП-1,74 ВТКС (п. Горская, Ленинградской обл.);
- теплоэнергетическом учебно-исследовательском комплексе (рис 4) с котлами кипящего слоя, расположенном на полигоне ВИ(ИТ) в поселке Приветнинское, Ленинградской обл.

В ходе экспериментальных исследований котлов КВП-1,74-ВТКС на некоторых статических и переходных режимах были выявлены следующие недостатки, которые определили необходимость некоторых дополнительных конструктивных

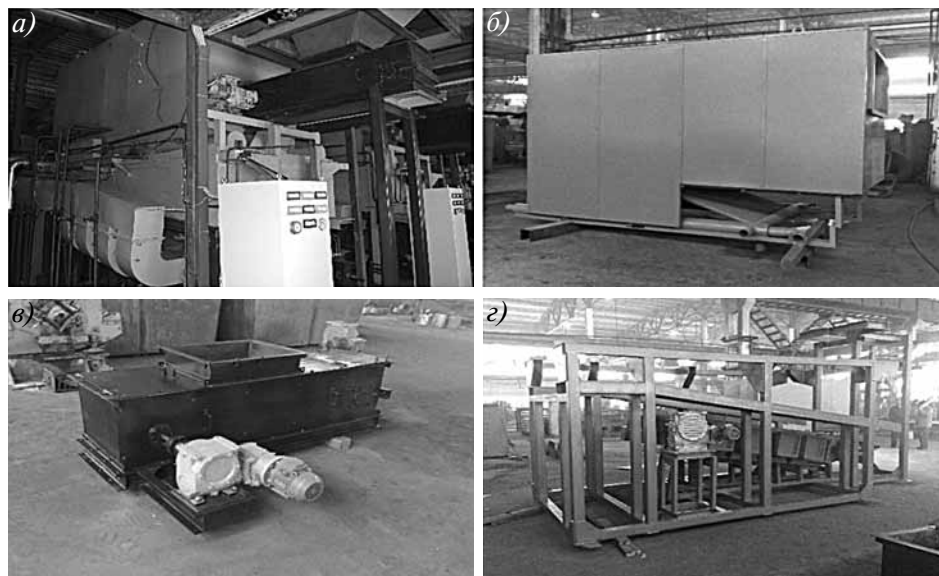


Рис. 2. Общий вид котла КВП-1,74-ВТКС и его отдельные блоки:

а — котлоагрегат КВП-1,74-ВТКС; б — трубная система в тепловой изоляции; в — питатель топлива с мотор-редуктором; з — рама котла с колосниковой решеткой



Рис. 3. Общий вид экспериментальной механизированной угольной котельной с котлами КВП-1.74-ВТКС (п. Горская, Ленинградской обл.)



Рис. 4. Общий вид теплоэнергетического комплекса с котлами кипящего слоя (п. Приветнинское, Ленинградской обл.)

доработок: неравномерность (порционность) подачи топлива скребковым питателем, увеличение температуры горения с последующим шлакованием колосниковой решетки, возникновение очагов кратерного горения из-за наклонной подачи первичного воздуха под колосниковую решетку, недостаточно эффективное снижение уноса мелких фракций топлива соплами вторичного воздуха круглого сечения.

Для устранения данных недостатков предложена усовершенствованная конструкция котла с топкой ВТКС [4] (рис. 5).

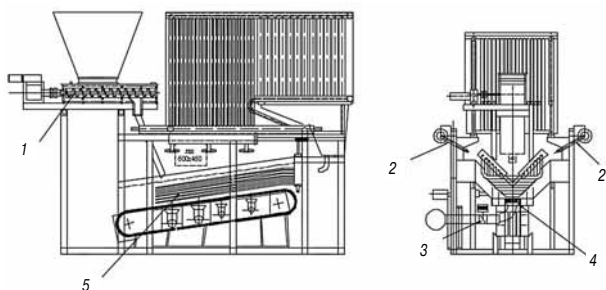


Рис. 5. Конструктивная схема модернизированного котла ВТКС:

1 — шнековый питатель; 2 — щелевые сопла вторичного дутья; 3 — патрубок рециркуляции дымовых газов; 4 — поворотный шибер круглого сечения; 5 — дополнительная секция трубной панели охлаждения

В данном решении применен шнековый питатель, щелевые сопла вторичного дутья, гнутый патрубок для вертикального подвода первичного воздуха, рециркуляция дымовых газов и др.

Управление работой котла ВТКС осуществляется оператором со щита автоматики в дистанционном режиме в соответствии с режимной картой. В этих щитах имеются органы частотного регулирования подачи топлива, разрежения, удаления шлака из топки котла, а также органы управления однооборотными механизмами для регулирования подачи первичного и вторичного воздуха. Однако ручное управление работой котла в переходных процессах сопряжено с перерасходом топлива. Для повышения экономичности работы котлов в переходных процессах на кафедре разработано комплектное устройство [5] управления топочными процессами на основе современного программируемого логического контроллера (рис. 6).

Данная схема позволяет осуществлять управление работой котла по всем каналам регулирования (расхода топлива и воздуха, разрежения, расхода шлака) с выводом на программируемый логический контроллер.

В настоящее время на всех промышленных и экспериментальных образцах котлов малой

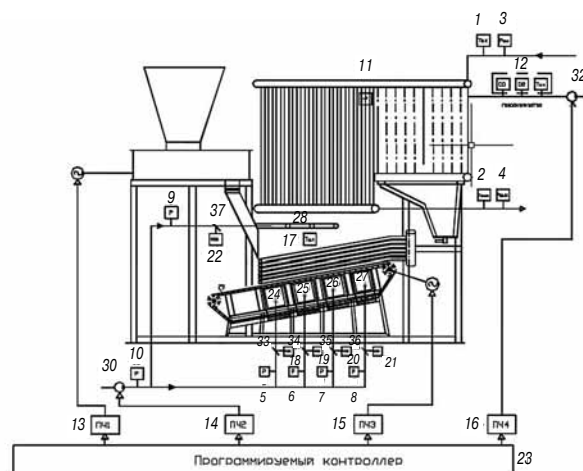


Рис. 6. Схема комплектного устройства управления топочными процессами котла ВТКС:

1–2 — датчики температуры обратной и прямой сетевой воды; 3–4 — датчики давления обратной и прямой сетевой воды; 5–8 — датчики давления позонного регулирования первичного воздуха; 9, 10 — датчики давления вторичного воздуха и общего воздуховода; 11 — датчик разрежения; 12 — газоанализатор; 13–16 — частотно-регулируемые приводы; 17 — датчики температуры кипящего слоя; 18–21 — исполнительные механизмы с электроприводом МЭО линии первичного дутья; 22 — исполнительный механизм МЭО линии вторичного дутья; 23 — программируемый логический контроллер; 24–27 — воздуховоды первичного дутья; 28 — сопла вторичного дутья; 29 — подвижная колосниковая решетка; 30 — вентилятор; 31 — питатель топлива; 32 — дымосос; 33–36 — шиберы позонного регулирования первичного воздуха; 37 — шибер регулирования вторичного дутья

мощности с топками ВТКС розжиг твердого топлива во время их пуска осуществляется ручным способом за счет воспламенения древесного топлива, помещенного заблаговременно в топку. Отсутствие технических решений не позволяет обеспечить пуск таких котлов в автоматическом режиме. Кроме того, процедура розжига твердого топлива дровами создает определенные неудобства обслуживающему персоналу и занимает довольно продолжительное время. В целях предупреждения травматизма повторный пуск котла, остановленного по тем или иным причинам, необходимо остудить перед загрузкой дров в топку котла для розжига твердого топлива.

Для устранения этого недостатка разработано техническое решение, позволяющее осуществить растопку котла в автоматическом режиме, на которое получено положительное решение о выдаче патента на полезную модель (заявка на полезную модель № 2016106051 от 20.02.2016).

Конструктивная схема такого решения (приведена на рис. 7) предусматривает установку в потолочном экране котла горелки на жидком топливе, позволяющей осуществить разогрев угля в первой дутьевой зоне до температуры воспламенения. Данное техническое решение дает возможность осуществить автоматизацию пуска котла ВТКС. С этой целью разработана модернизированная схема автоматизации с каналом управления розжиговой горелкой (рис. 8), на которую получено положительное решение о выдаче патента на полезную модель (заявка на полезную модель № 2016106051 от 05.12.2016).

Для подтверждения работоспособности конструктивного решения котла ВТКС с пусковой

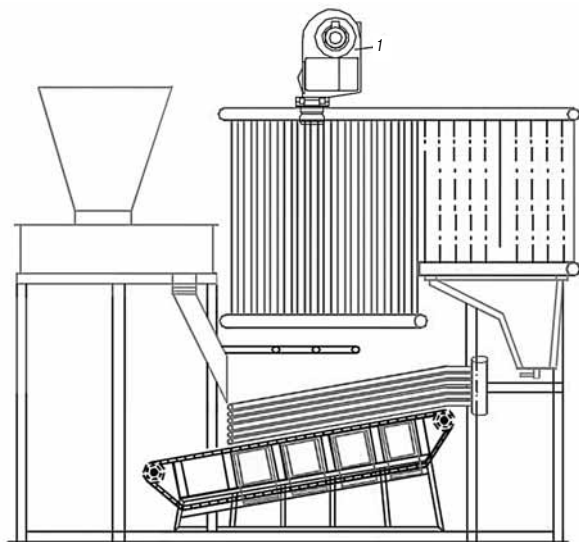


Рис. 7. Конструктивная схема модернизированного котла с пусковой горелкой на жидком топливе:
1 — розжиговая горелка на жидком топливе

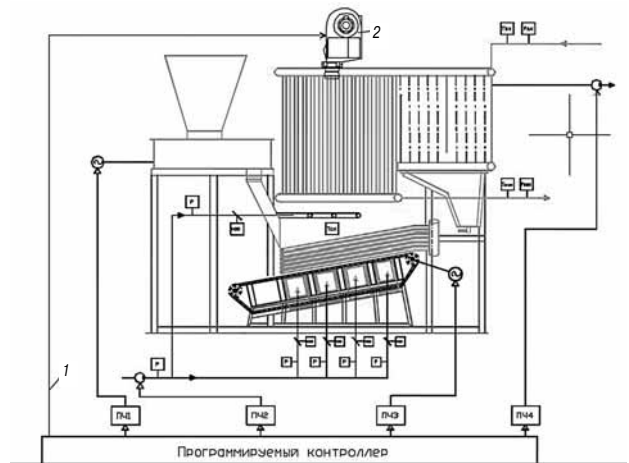


Рис. 8. Схема автоматизации котла ВТКС с каналом управления пусковой горелкой:

1 — канал управления розжиговой горелкой; 2 — розжиговая горелка на жидком топливе

горелкой на кафедре проведены теоретические и экспериментальные исследования пусков.

При моделировании пусковых процессов котла ВТКС за основу принята известная математическая модель переходных процессов, разработанная в исследованиях Карпова М.А., Юферева Ю.В. [6].

Расчетная схема математической модели, разработанная на основе известной в работе [6] схемы контура КС, представлена на рис. 9.

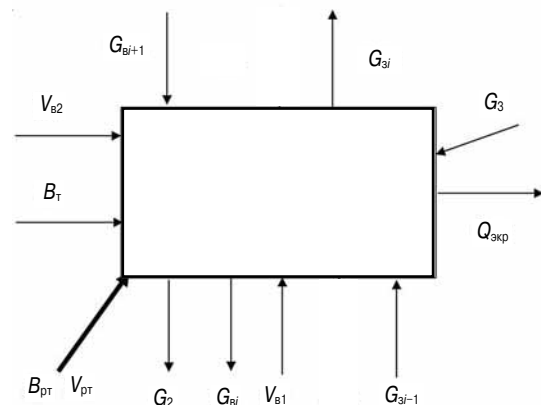


Рис. 9. Расчетная схема математической модели пусковых режимов котла ВТКС:

V_{B1} — количество первичного воздуха, необходимого для ожигения топлива в топке котла; V_{B2} — количество вторичного воздуха, необходимого для дожигания топлива; V_{PT} — количество воздуха, необходимого для сжигания жидкого топлива; B_T — количество твердого топлива, поступающего в топку; B_{PT} — количество жидкого топлива, поступающего в топку; G_2 — расход слива, состоящего в основном из частиц большого размера, не способных быть вынесенными газом из топочной камеры; G_3 — расход твердых частиц по линии возврата, направляющихся обратно в топочную камеру; G_{B1} и G_{B2} — подъемные и опускные токи твердой фазы.

В соответствии с расчетной схемой рис. 9 для каждого универсального блока i рассматривается система балансовых уравнений для массы золы, углерода, тепловых потоков и потоков газовых реагентов, включающих соотношения, описывающие скорость химического реагирования и теплоотдачу к теплообменным поверхностям.

Ниже представлена система уравнений, описывающая произвольный блок контура КС в соответствии с рис. 9:

➤ уравнение материального баланса по золе

$$\frac{dm_i}{d\delta} = B_{\delta} \cdot \frac{\dot{A}^{\delta}}{100} + G_{\dot{a}i+1} + G_{3i+1} + G_3 - G_2 - G_{\dot{a}i} - G_{3i};$$

➤ уравнение материального баланса по углероду

$$\frac{d}{d\tau}(m_i \cdot f_{Ci}) = B_{\delta} \cdot \frac{\dot{N}^{\delta}}{100} + B_{\delta\delta} \cdot \frac{\dot{N}^{\delta}}{100} + G_{\dot{a}i+1} \cdot f_{Ci+1} + G_{3i+1} \cdot f_{Ci+1} + G_3 \cdot f_{C3} - G_{Ci} \cdot G_2 \cdot f_{Ci} - G_{\dot{a}i} \cdot f_{Ci} - G_{3i} \cdot f_{Ci};$$

➤ уравнение материального баланса по кислороду

$$\frac{d}{d\delta}(V_i \cdot \dot{a}_i \cdot C_{O_2i}) = C_{O_2\dot{a}} \cdot V_{\dot{a}1} + \dot{N}_{1,\dot{a}} \cdot V_{\dot{a}2} + \dot{N}_{1,\dot{a}} \cdot V_{\delta\delta} + G_{\dot{a}i-1} \cdot C_{O_2i} - \frac{1}{\dot{a}} \cdot G_{Ci} - G_{\dot{a}i} \cdot C_{O_2i};$$

➤ уравнение материального баланса по газу

$$\frac{d}{d\delta}(V_i \cdot \dot{a}_i \cdot \dot{n}_{\dot{a}}) = V_{\dot{a}1} + V_{\dot{a}2} + V_{\delta\delta} + \sum_{n=1}^i G_{Ci} + G_{\dot{a}i-1} - G_{\dot{a}i};$$

➤ уравнение теплового баланса

$$\frac{d}{d\delta}(V_i \cdot \dot{a}_i \cdot \dot{n}_{\dot{a}} \cdot \dot{n}_{\dot{a}} \cdot t_i + m_i \cdot c_3 \cdot t_i) = G_{\dot{a}i+1} \cdot c_3 \cdot t_{i+1} + G_{3i+1} \cdot c_3 \cdot t_{i+1} + G_3 \cdot c_3 \cdot t_3 + Q_{Ci} \cdot Q_{\text{ввод}} - G_2 \cdot c_3 \cdot t_i - G_{\dot{a}i} \cdot c_3 \cdot t_i - G_{3i} \cdot c_3 \cdot t_i;$$

Как видно из расчетной схемы и системы балансовых уравнений, отличительной особенностью усовершенствованной модели пусковых режимов котла ВТКС является наличие дополнительных параметров $B_{\text{пр}}$, (количество растопочного топлива, поступающего в топку) и $V_{\text{пр}}$ (количество воздуха, необходимого для сжигания растопочного топлива).

Система уравнений решается как задача Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений с использованием формул Рунге–Кутты. Если топочный объем разделяется на N блоков, то при последовательном режиме блок-модель будет использоваться N раз в течение процесса вычисления.

Расчеты по разработанной модели выполнялись для двух видов растопочного топлива: древесное топливо (ручная растопка) и дизельное топливо (растопочная горелка).

На рис. 10 представлены графические зависимости от времени растопки следующих пара-

метров: температуры сетевой воды, коэффициента избытка воздуха, температуры уходящих газов, расхода топлива, расхода воздуха, нагрузки.

Анализ графиков на рис. 10 позволяет сделать следующие выводы:

1. Применение пусковой горелки в котле КВП-1.74 ВТКС сокращает время нагревания сетевой воды до номинального значения за счет увеличения скорости воспламенения угля от факела горелки и дополнительной доли тепловой энергии, образующейся при сгорании жидкого топлива.

2. Более высокие показатели температуры уходящих газов с котла, оборудованного пусковой горелкой по сравнению с розжигом на древесном топливе обусловлены повышением температуры среды в топочном пространстве в момент образования факела от сгорания жидкого топлива при пуске котла и ее дальнейшем увеличении (до номинального значения) по мере воспламенения угля.

3. В момент пуска более высокое значение коэффициента избытка воздуха в топке котла, оборудованного пусковой горелкой, вызвано нагнетанием воздуха вентилятором горелки и изменением параметров регулирования для обеспечения эффективного сгорания жидкого топлива. С повышением температуры среды в топочном пространстве происходит отключение пусковой горелки, включение вентилятора котла и повторное изменение параметров регулирования коэффициента избытка воздуха для эффективного сжигания угля.

4. Задержка времени начала подачи угля в топку обоих котлов обусловлена тем, что включение питателя топлива и подвижной решетки для удаления шлака и золы происходит при достижении заданного значения температуры среды в топочном пространстве. Объем подаваемого угля регулируется каналами управления системы автоматизации котла для обеспечения его эффективного сжигания.

Для проверки адекватности разработанной математической модели и подтверждения работоспособности котла ВТКС на пусковых режимах были выполнены экспериментальные исследования на экспериментальной базе кафедры на учебном полигоне ВИ(ИТ) ВА МТО.

На рис. 11 приведены фотографии котла ВТКС с пусковой горелкой на дизельном топливе со стороны боковой стенки и внутри топки котла. Из фотографий растопочной горелки внутри топки котла видно, что сопло горелки направлено так, чтобы факел попадал в первую дутьевую зону над колосниковой решеткой и под угольной течкой.

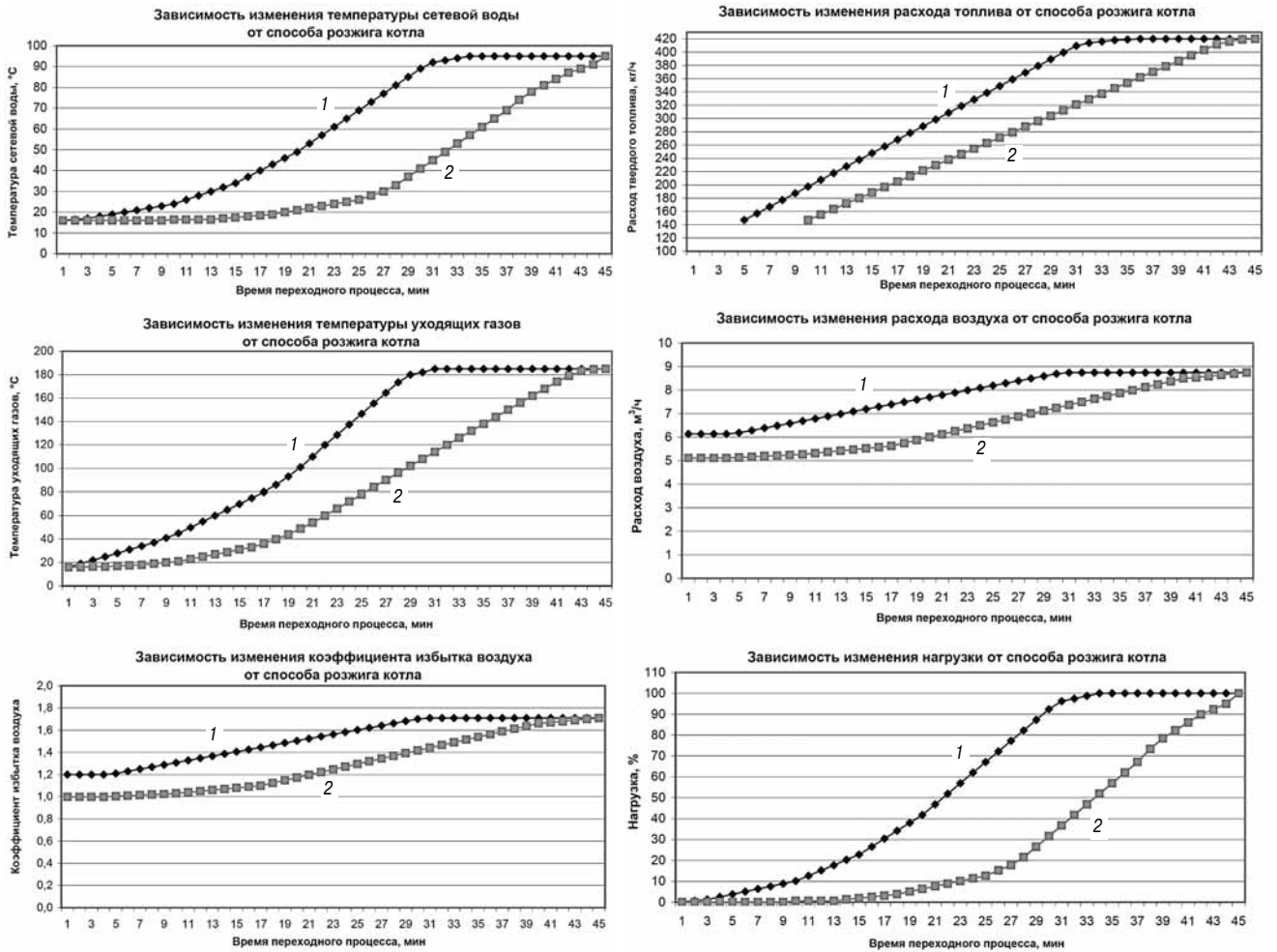


Рис. 10. Расчетные зависимости изменения параметров пускового процесса котла ВТКС при двух видах растопочного топлива:

1 — при розжиге твердого топлива жидкотопливной горелкой; 2 — при розжиге твердого топлива дровами топливными



Рис. 11. Фото котла ВТКС с пусковой горелкой на дизельном топливе

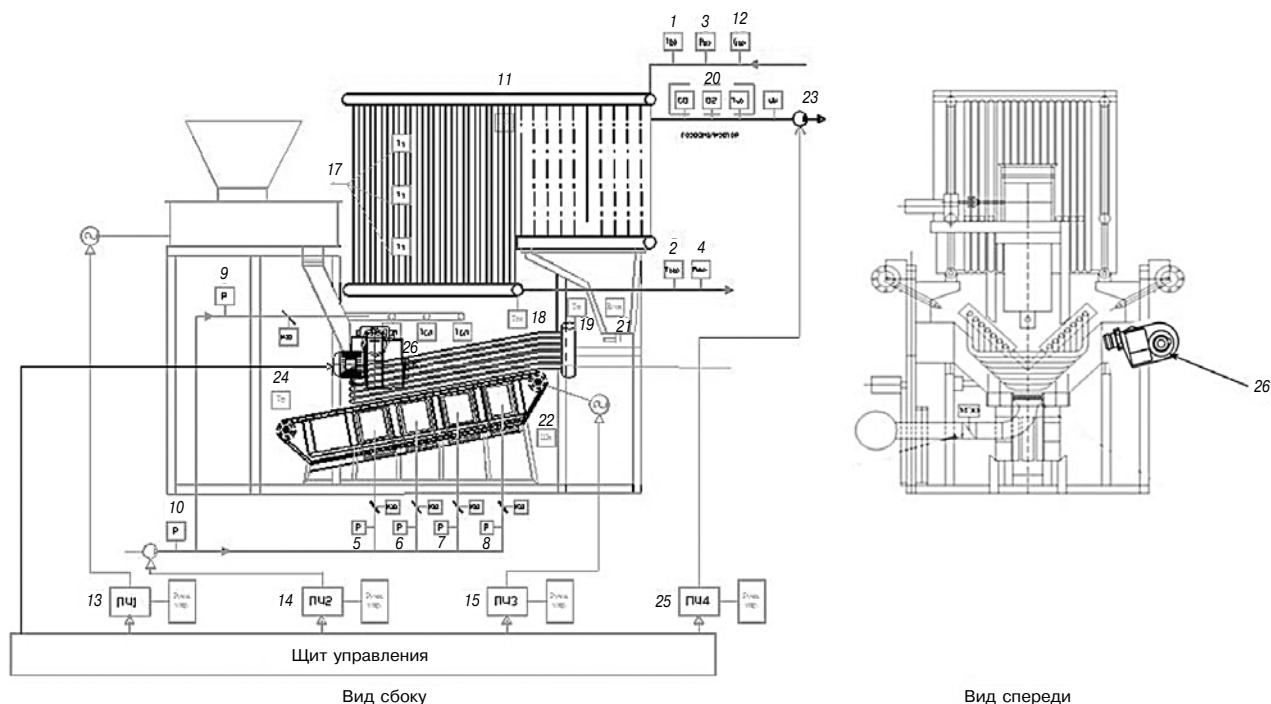


Рис. 12. Схема экспериментальной установки для исследования пусковых режимов работы котла ВТКС с пусковой горелкой на дизельном топливе:

1 — датчик температуры воды на входе в котел; 2 — датчик температуры воды на выходе из котла; 3 — датчик давления воды на входе в котел; 4 — датчик давления воды на выходе из котла; 5 — датчик давления воздуха в 1-й дутьевой зоне; 6 — датчик давления воздуха во 2-й дутьевой зоне; 7 — датчик давления воздуха в 3-й дутьевой зоне; 8 — датчик давления воздуха в 4-й дутьевой зоне; 9 — датчик давления вторичного воздуха; 10 — датчик давления воздуха за дутьевым вентилятором; 11 — датчик разряжения в топке котла; 12 — расходомер сетевой воды; 13 — преобразователь частоты привода питателя топлива; 14 — преобразователь частоты привода дутьевого вентилятора; 15 — преобразователь частоты привода колосниковой решетки; 16 — датчики температуры в кипящем слое; 17 — датчики температуры в топочной камере; 18 — датчики температуры воды на входе в экранную часть трубной системы; 19 — датчики температуры воды на входе и выходе из панели охлаждения; 20 — состав и температура дымовых газов; 21 — отбор пробы возврата уноса; 22 — отбор пробы шлака; 23 — отбор пробы уноса за котлом; 24 — температура колосникового полотна; 25 — преобразователь частоты привода дымососа; 26 — пусковая горелка

На рис. 12 показана схема экспериментальной установки для исследования пусковых режимов работы котла ВТКС с пусковой горелкой на дизельном топливе.

Как видно из рис. 11 и 12 пусковая горелка на дизельном топливе в экспериментальной установке смонтирована не в потолочном экране котла ВТКС (как это предложено на рис. 8), а в штатном боковом лазе. Данное решение обусловлено тем, что установка горелки в потолочном экране котла потребует существенных изменений в конструкции экрана с необходимостью соответствующей корректировки конструкторско-монтажной документации производителя.

Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 13. Анализ результатов подтвердил работоспособность и эффективность работы котла ВТКС с пусковой горелкой на пусковых режимах. Кроме, того испытания по-

казали удовлетворительную сходимость экспериментальных и расчетных данных.

Выводы

1. Пусковые характеристики угольного котла с топкой ВТКС, оснащенного пусковой горелкой на дизельном топливе, существенно улучшены в сравнении с параметрами пуска котла при ручной растопке древесным топливом.

2. Оснащение котла с топкой ВТКС пусковой горелкой на дизельном топливе позволит создать комплектное устройство управления топочными процессами на переходных и пусковых режимах работы.

3. Для определения оптимального выбора места установки в котле ВТКС пусковой горелкой на дизельном топливе необходимо проведение дополнительных исследований с внесением изменений в конструкцию трубной системы котла.

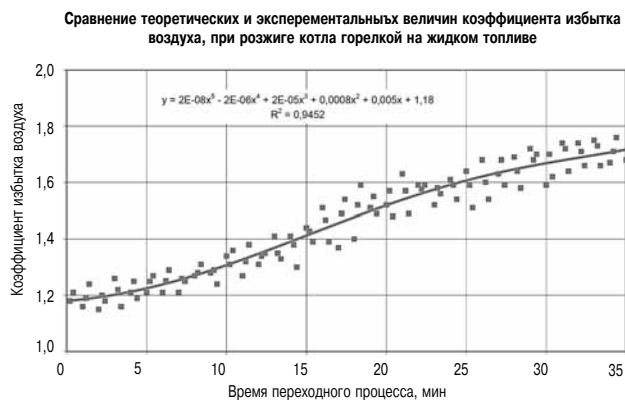
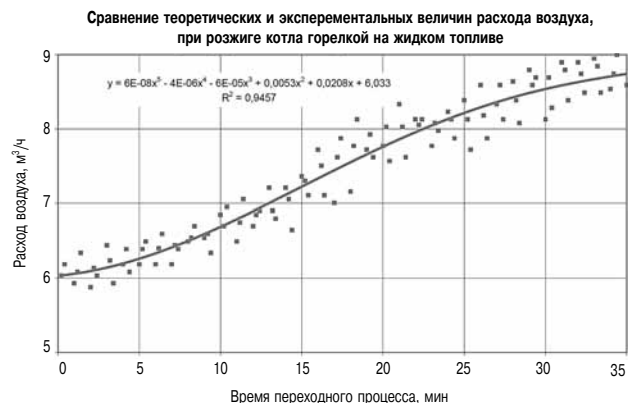
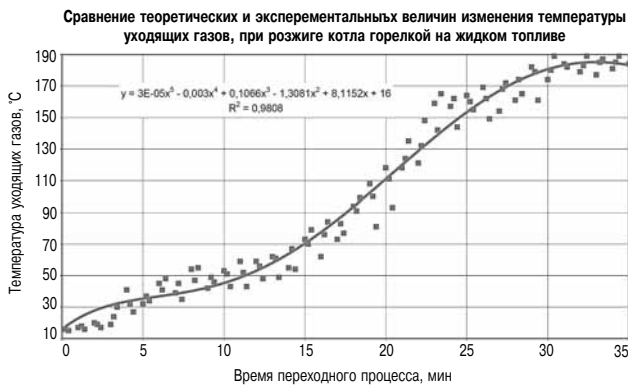
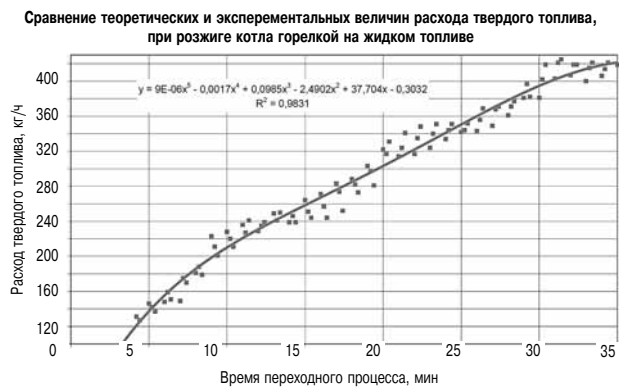


Рис. 13. Результаты экспериментальных исследований котла ВТКС с пусковой горелкой

Литература

1. Карпов М.А., Смирнов А.В., Рода И.С., Овчаров И.В., Бондарев А.В. Практический опыт проектирования, строительства и реконструкции угольных котельных малой мощности по технологии высокотемпературного кипящего слоя // Инженерные системы. — 2006. — № 4 (25).
2. Карпов М.А., Смирнов А.В. и др. Автоматизация котлов малой мощности с топками высокотемпературного кипящего слоя // Стройпрофиль. — 2004. — № 3 (33).
3. Карпов М.А., Смирнов А.В., Юферев Ю.В., Воронов В.Ю., Кныш С.А. Котлоагрегат для сжигания угля в кипящем слое. Патент на полезную модель. Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей РФ 20.05.2004 г. № 38041. Бюл. № 14.
4. Смирнов А.В., Карпов М.А., Малаев К.М. и др.

Котлоагрегат с топкой высокотемпературного кипящего слоя с улучшенными характеристиками. Патент на полезную модель. Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей 05.05.2017 г., № 170747. Бюл. № 13.

5. Карпов М.А., Смирнов А.В., Юферев Ю.В., Бондарев А.В., Кныш С.А., Овчаров И.В. Система автоматического регулирования процесса горения в топке с высокотемпературным кипящим слоем котла малой мощности. Патент на полезную модель. Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей 27.11.2005 г. № 49603. Бюл. № 33.

6. Карпов М.А., Юферев Ю.В. Математическое моделирование переходных процессов в топке высокотемпературного кипящего слоя котла малой мощности // Теплоэнергоэффективные технологии. — 2005. — № 3—4.