

## Концептуальные основы создания систем автоматизации котлов малой мощности с кипящим слоем при строительстве и реконструкции угольных котельных

*А.В. Бондарев*

*Военная академия материально-технического обеспечения, Санкт-Петербург*

**Аннотация:** В статье представлена концепция создания систем автоматизации применительно к трем типам энергоустановок малой мощности с кипящим слоем. Выполнен обзор технологий сжигания угля в высокотемпературном и низкотемпературном кипящем слое. Дана характеристика функциональных и технологических особенностей рабочих процессов котлов малой мощности с топками высокотемпературного кипящего слоя, с формулировкой основных концептуальных положений, определяющих основные принципы построения систем автоматизации.

**Ключевые слова:** высокотемпературный кипящий слой, низкотемпературный кипящий слой, активный котел утилизатор, концептуальное положение, автоматизация.

Систему комплексной автоматизации для котлов малой мощности с кипящим слоем необходимо рассматривать применительно к объектам исследования, которыми являются котлоагрегаты высокотемпературного и низкотемпературного кипящего слоя. Для выявления особенностей работы этих систем необходимо охарактеризовать сами объекты исследования, которые можно разбить на 3 группы:

- котлоагрегаты малой мощности (КММ) с топками высокотемпературного кипящего слоя (ВТКС);
- котлоагрегаты малой мощности (КММ) с топками низкотемпературного кипящего слоя (НТКС);
- комбинированные силовые установки совместной выработки тепловой и электрической энергии с активными котлами утилизаторами кипящего слоя.

Технология сжигания углей в кипящем слое на узкой наклонной подвижной колосниковой решетке имеет достаточно широкое

распространение в нашей стране и более всего известна под названием ВТКС.

Суть этого метода (Godelphenomenon) заключается в том, что в турбулентном кипящем слое горящего в газификационном режиме твердого топлива, частицы золы, достигшие большей или меньшей степени плавкости, вступают в контакт друг с другом с образованием агломератов, отторгая при этом угольные частицы. Эти практически не содержащие углерода агломераты при достижении определенного размера опускаются на дно слоя и выводятся решеткой в шлаковый бункер. Первичный воздух подается под решетку, вторичный вдувается в надслоевое пространство, где в условиях гомогенных реакций осуществляется дожигание продуктов газификации угля. [1,2].

Особенностью котлов сжигающих топливо по технологии ВТКС, является отсутствие подвижных частей в топке котла, что естественно упрощает конструкцию подобных котлов, но с другой стороны, повышает требовательность к поддержанию температуры горения, которая лежит в диапазоне на 50-100<sup>o</sup>C ниже точки плавления золы, отсюда и название. При этом из-за активного перемешивания частиц топлива и приобретению свойств жидкости, быстрому удалению из зоны горения газообразных продуктов сгорания, возможно успешное сжигание топлива с содержанием золы до 80% и обеспечение выжига горючей массы на 98-99%. Как показывают исследования и опыт эксплуатации подобных котлов значение коэффициента полезного действия достигает 80-85%. Температура горения слоя поддерживается в пределах 800-900 <sup>o</sup>C, что предотвращает расплавление золы, и, следовательно, шлакования, кроме того, из-за такой температуры горения достигается уменьшение концентрации в продуктах сгорания окислов азота, а наличие оксидов Са и Mg в золе топлива позволяет связывать образующийся при сгорании топлива SO<sub>2</sub> уже в зоне горения. И,

---

наконец, по данной технологии возможно достижение высокой степени автоматизации режима горения твердотопливного котла и всей установки в целом.

Для установок комбинированной выработки тепловой и электрической энергии принимают схему совместной выработки тепловой и электрической энергии, в которой уходящие газы дизель-генератора нагревают воду в рекуперативном теплообменном аппарате на обратной линии тепловой сети перед подачей на котельную, что позволяет вырабатывать тепловую энергию в объеме примерно равной выработанной электрической энергии, и, соответственно, снизить тепловую нагрузку на котельную на эту величину. Данное техническое решение принято называть ДТЭС с пассивными котлами утилизаторами.

Другим вариантом совместной выработки тепловой и электрической энергии является использование комбинированных установок на базе дизель-генератора и активного котла-утилизатора (ДТЭС АКУ). В данной схеме предусмотрена подача выхлопных газов дизеля с температурой около 400 °С и высоким содержанием кислорода в топку котла. При этом в котел с выхлопными газами вносится теплота и кислород для сжигания котельного топлива, что обеспечивает сокращение его расхода при обеспечении той же мощности, что и без утилизации и улучшается качество горения. [3].

Одним из разновидностей ДТЭС АКУ является установка, в которой в качестве активного котла-утилизатора используется угольный котел высокотемпературного кипящего слоя. [4].

При разработке общей концепции создания систем автоматического управления приведенные принципиальные технические решения и основы рабочих процессов рассмотренных трех типов энергоустановок малой мощности с топками кипящего слоя несомненно должны быть учтены.

---

На основании вышеизложенных общих сведений представляется возможным разработать общую концепцию создания систем автоматического управления теплоэнергоустановок малой мощности с топками кипящего слоя. Данная концепция представлена на рис. 1.



Рис. 1. Общая концепция создания систем автоматизации котлов малой мощности с кипящим слоем при строительстве и реконструкции угольных котельных на объектах коммунального хозяйства

Данная концепция предусматривает выявление и анализ функционально-технологических особенностей рассматриваемых энергоустановок, формулировку основных концептуальных положений, определяющих основные принципы построения систем автоматизации и, наконец, разработку комплекса математических моделей топочных процессов энергоустановок на переходных режимах, схемных решений, алгоритмического и программного обеспечения, выбор аппаратных средств и

испытания энергоустановок, оснащенных разработанными системами автоматизации [5].

В качестве примера рассмотрим функциональные и технологические особенности рабочих процессов КММ с топками ВТКС и концептуальные положения создания их систем автоматизации.

***1. Наличие при работе котла основных материальных потоков (топливо, воздух, продукты сгорания, очаговых остатков (шлак и зола).***

Работа котлоагрегата малой мощности ВТКС обеспечивается органами управления, которые получили режимные настройки, указанные в режимной карте котла.

*Концептуальное положение:*

*- необходимость обеспечения автоматического регулирования по каналам подачи топлива, первичного, вторичного дутья, разряжения, удаления шлака и золы.*

Данное положение обеспечивается комплексом технических решений и математических моделей, реализованных в патенте на полезную модель РФ: RU 49603 U1 от 27.11.2005, МПК F23N1/00 «Система автоматического регулирования процессом горения в топке с высокотемпературным кипящим слоем котла малой мощности».

Также в концепции создания систем автоматизации котлов малой мощности с кипящим слоем наряду со всеми ранее рассматриваемыми материальными потоками, учитываются потоки от рециркуляции уходящих газов в топку котла ВТКС [6].

***2. Возможность на некоторых режимах котла повышения температуры горения, и как следствие шлакования решетки.***

Температура в слое должна быть выше температуры начала деформации золы сжигаемого топлива, что поддерживается температурой в топочной камере 1200-1400°C.

---

Одним из самых главных вопросов в управлении горения топлива в ВТКС является обеспечение оптимального соотношения топливо/воздух, чем достигается повышение эффективности сгорания топлива. Для качественного регулирования процесса горения в ВТКС необходимо позонное регулирование первичного воздуха и поддержание оптимального давления воздуха под решеткой.

Первичный воздух образует эффект псевдооживления при некотором недостатке коэффициента избытка воздуха - газификационный режим

Вторичный воздух предотвращает унос мелкой фракции и способствует дожиганию в надслоевом пространстве продуктов газификации. Об эффективности системы вторичного воздуха можно судить по содержанию СО в уходящих газах, а также по содержанию углерода в летучей золе.

Регулирование температуры слоя производится изменением расхода топлива, первичного и вторичного воздуха, при этом расход и давление под зонами первичного воздуха должно быть не ниже установленных параметров:

- поддержания слоя в режиме псевдооживления и работы в газификационном режиме (контролируемый параметр - расход первичного воздуха).

- поддержание турбулентного режима кипения слоя (контролируемый параметр – давление воздуха под активными зонами решетки)

Регулировка температуры слоя расходом вторичного воздуха, который может достигать до 50% от общего расхода, что приводит к снижению уноса, изменению коэффициента избытка воздуха и содержанию оксида углерода. При температуре горения, отличной от нормальных условий горения, появляется возможность образования спеков шлака с углем, которые могут

перекрыть решетку (образовать над ней свод) в первой дутьевой зоне первичного воздуха.

Применение на линии всасывания дутьевого вентилятора котла соединенного с напорной линией дымососа позволяет осуществить подмес уходящих газов и стабилизировать температуру горения. Данное решение обусловлено тем, что в некоторых случаях, например, при уменьшении расхода топлива резко возрастает коэффициент избытка воздуха, что приводит к возрастанию температуры в топке и зашлаковыванию колосниковой решетки. Для предотвращения увеличения температуры в топке и дальнейшего зашлаковывания осуществляется подмес уходящих газов к воздуху, идущему на горение. Это приводит к уменьшению концентрации кислорода в смеси и установлению оптимальной температуры, при которой не происходит шлакование.

Для поддержания температур горения возникает необходимость своевременное диагностирования и регулирования основных параметров горения (температура горения, газовый состав, коэффициент избытка воздуха, порозность слоя) с помощью рециркуляции уходящих газов.

#### *Концептуальное положение*

*- необходимость обеспечения рециркуляцией уходящих газов в топку котла для снижения температуры.*

Данное положение обеспечивается комплексом математических моделей и технических решений подтвержденным патентом на полезную модель № 170747 «Котлоагрегат для сжигания твердого топлива в кипящем слое» [7].

### ***3. Возможность при отключениях электроэнергии перегрева колосниковой решетки и питателя топлива.***

В аварийных ситуации при выходе из строя основного оборудования необходимого для функционирования режима горения (остановка дутьевого

---

вентилятора, электропривода колосниковой решетки), прекращается подача воздуха под колосниковую решётку и топливо, имеющее температуру 1100-1200 °С, опустится на колосниковую решетку. При этом возникает опасность спекания шлака и выхода котла из строя. В котлах ВТКС малой мощности габариты топочного пространства в нижней части ограничены шириной колосниковой решетки (порядка 400 мм), что намного меньше чем у других видов котлов (ручного обслуживания, переталкивающими планками и т.д.)

Для недопущения зашлаковывания колосникового полотна и длительного выхода котлоагрегата из строя, на колосниковой решетке установлено ручное механическое устройство для удаления шлака из топки котла, установлена расходная емкость воды с насосом для охлаждения удаляемого шлака.

Также на переходных режимах с увеличением температуры слоя нарушается режим горения и создаются условия для шлакования колосниковой решетки. Для предотвращения шлакования применяется телескопическое устройство, расположенное в тыльной стороне котлоагрегата, которое позволяет производить его сбивание над первой дутьевой зоной колосниковой решетки,

*Концептуальное положение:*

*- необходимость обеспечения котла устройствами для аварийного удаления очаговых остатков и охлаждения горячего шлака.*

Данное положение обеспечивается комплексом в технических решениях, подтвержденный патентами на полезную модель «Котлоагрегат для сжигания угля в котле с высокотемпературным кипящим слоем с механическим устройством и расходной емкостью воды для аварийных режимов», «Котлоагрегат для сжигания твёрдого топлива в кипящем слое» [8,9].

#### ***4. Улучшенные пусковые и маневренные характеристики котла.***



Для решения этой задачи становится очевидным оснащение угольных котельных современными энергоэффективными автоматизированными котлами кипящего слоя с возможностью осуществления быстрого автоматического пуска.

На практике розжиг угольного котла малой мощности в основном производится дровами, для решения вопроса комплексной автоматизации необходимо предусмотреть варианты автоматического розжига котла с помощью горелки на жидком топливе, что достигается установкой в программируемом контроллере регулятора управления розжиговой горелки на жидком топливе, соединённого с датчиком температуры в топке котла и пусковыми устройствами горелки, дымососа, вентилятора, питателя топлива, подвижной решетки для удаления шлака и золы.

*Концептуальное положение:*

- необходимость обеспечения розжига котла в автоматическом режиме.

Данное положение обеспечивается комплексом технических решений, подтвержденных патентом на полезную модель № 172520 «Котлоагрегат для сжигания твёрдого топлива в кипящем слое с горелкой для сжигания жидкого топлива» и заявкой на изобретение № 2018121802/06 «Система автоматического регулирования процесса горения котлоагрегата для сжигания твердого топлива в кипящем слое с горелкой жидкого топлива» [10].

***5. Малая инерционность котла и как следствие большие скорости изменения взаимосвязанных параметров (температура, коэффициент избытка воздуха, разрежение, давление)***

Конструктивные элементы котлов малой мощности с топкой ВТКС собираются в виде отдельных блоков, при этом трубная система котла облицована теплоизоляционными съемными панелями, топка котла имеет конусообразную форму, с поясом обмуровки закрывающим только топку

---

котла. Вследствие малого объема топочного пространства и металлоемкости котлоагрегат имеет меньшую инерционность, по сравнению с котлами другого типа, а также хорошие пускоманевренные характеристики, что позволяет проще подобрать и настроить оптимальные регуляторы управления топочными процессами

*Концептуальное положение*

*- необходимость регулирования с оптимальным сочетанием законов П, ПИ, ПД, ПИД регуляторов.*

Хорошая маневренность, малая инерционность в САР обеспечивается простотой выбора и настройкой регуляторов (П, ПИ, ПИД, ПД) управления топочными процессами [11].

Данное положение реализовано в алгоритмах и программном обеспечении работы котла ВТКС.

Совокупность выявленных функциональных и технологических особенностей котлов малой мощности с топками высокотемпературного слоя, сформулированных концептуальных положений и разработанных математических моделей, технических решений, алгоритмов и программ составляет базис концептуальных основ создания систем автоматизации котлов малой мощности с ВТКС при строительстве новых объектов коммунальной инфраструктуры и реконструкции угольных котельных по технологии кипящего слоя.

### **Литература**

1. A.M. Squires. Pulverized-Fuel Combustion in Trouble. American Chemical Society, Division of Fuel Chemistry. 1970, V. 14, №2, pp. 46-88.

2. Joseph Yerushalmi, Morris Kolodney, Robert A. Graff, Arthur M. Squires and Richard D. Harvey. Agglomeration of Ash in Fluidized Beds Gasifying Coal: The Godel Phenomenon. Science, New Series, Vol. 187, No. 4177. 21 Feb. 1975, pp. 646-648.

3. Смирнов А.В., Бондарев А.В., Александров С.В., Болбышев Э.В. Разработка дизельных теплоэлектростанций с активными котлами утилизаторами высокотемпературного кипящего слоя// Двигателестроение. 2018. №3. С. 19-23.

4. Смирнов А.В., Александров С.В., Бондарев А.В. Силовая установка с активным котлом утилизатором высокотемпературного кипящего слоя. Патент на изобретение. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений РФ 06.04.2018 г. №2650018 С1, бюл. № 10.

5. Гаглоева И.Э., Добаев А.З., Дедегкаева А.А. Разработка математической модели комплексной оценки состояния электроэнергетических объектов // Инженерный вестник Дона, 2013, №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1842.

6. Бондарев А.В., Болбышев Э.В., Смирнов А.В. Автоматизация угольных котлов малой мощности с топками высокотемпературного кипящего слоя и рециркуляцией дымовых газов// Двигателестроение. 2018. №3. С. 24-28.

7. Смирнов А.В., Бондарев А.В., Маллаев К.М. и др. Котлоагрегат для сжигания твердого топлива в кипящем слое. Патент на полезную модель. Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей 05.05.2017 г., №170747, бюл. № 13.

8. Смирнов А.В., Бондарев А.В., Александров С.В. и др. Котлоагрегат для сжигания угля в кипящем слое с механическим устройством и расходной емкостью воды для аварийных режимов. Патент на полезную модель. Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей 05.05.2018 г., №179465, бюл. № 14.

9. Смирнов А.В., Бондарев А.В., Болбышев Э.В. и др. Котлоагрегат для сжигания твердого топлива в кипящем слое Патент на полезную модель.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей 03.08.2018 г., №182137, бюл. № 22.

10. Смирнов А.В., Бондарев А.В., Киревнин А.Г. и др. Котлоагрегат для сжигания твердого топлива в кипящем слое с горелкой для сжигания жидкого топлива. Патент на полезную модель. Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей 11.07.2017 г., №172520, бюл. № 20.

11. Целигорова Е.Н. Современные информационные технологии и их использование для исследования систем автоматического управления // Инженерный вестник Дона, 2010, №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2010/222.

### References

1. A.M.Squires. Pulverized-Fuel Combustion in Trouble. American Chemical Society, Division of Fuel Chemistry. 1970, V. 14, №.2., pp. 46-88.

2. Joseph Yerushalmi, Morris Kolodney, Robert A. Graff, Arthur M. Squires and Richard D. Harvey. Agglomeration of Ash in Fluidized Beds Gasifying Coal: The Godel Phenomenon. Science, New Series, Vol. 187, No. 4177. 21 Feb. 1975, pp. 646-648.

3. Smirnov A.V., Bondarev A.V., Aleksandrov S.V., Bolbyshev E.V. Dvigatelistroyeniye. 2018. №3. pp 19-23.

4. Smirnov A.V., Aleksandrov S.V., Bondarev A.V. Silovaya ustanovka s aktivnym kotlom utilizatorom vysokotemperaturnogo kipyashchego sloya [The power plant with an active boiler utilizing high-temperature fluidized bed]. Patent na izobreteniyе. Zaregistrovano v Gosudarstvennom reyestre izobreteniy RF 06.04.2018 g. №2650018 S1, byul. № 10.

5. Gagloeva I.JE., Dobaev A.Z., Dedegkaeva A.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1842.

6. Bondarev A.V., Bolbyshev E.V., Smirnov A.V. Dvigatolestroyeniye, 2018. №3. pp. 24-28.

7. Smirnov A.V., Bondarev A.V., Mallayev K.M. i dr. Kotloagregat dlya szhiganiya tverdogo topliva v kipyashchem sloye. [Boiler for burning solid fuel in a fluidized bed]. Patent na poleznuyu model'. Zaregistrirovano v Gosudarstvennom reyestre poleznykh modeley 05.05.2017 g., №170747, byul. № 13.

8. Smirnov A.V., Bondarev A.V., Aleksandrov S.V. Kotloagregat dlya szhiganiya uglya v kipyashchem sloye s mekhanicheskim ustroystvom i raskhodnoy yemkost'yu vody dlya avariynykh rezhimov [The boiler unit for burning coal in a fluidized bed with a mechanical device and a supply water capacity for emergency conditions]. Patent na poleznuyu model'. Zaregistrirovano v Gosudarstvennom reyestre poleznykh modeley 05.05.2018, №179465, byul. № 14.

9. Smirnov A.V., Bondarev A.V., Bolbyshev E.V. idr. Kotloagregat dlya szhiganiya tverdogo topliva v kipyashchem sloye [Boiler for burning solid fuel in a fluidized bed]. Patent na poleznuyu model'. Zaregistrirovano v Gosudarstvennom reyestre poleznykh modeley 03.08.2018 g., №182137, byul. № 22.

10. Smirnov A.V., Bondarev A.V., Kirevnin A.G. idr. Kotloagregat dlya szhiganiya tverdogo topliva v kipyashchem sloye s gorelkoy dlya szhiganiya zhidkogo topliva [The boiler for burning solid fuel in a fluidized bed with a burner for burning liquid fuel]. Patent na poleznuyu model'. Zaregistrirovano v Gosudarstvennom reyestre poleznykh modeley 11.07.2017, №172520, byul. № 20.

11. Celigorova E.H. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2010, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2010/222](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2010/222).