

## Экспериментальные исследования сжигания твердого топлива в котле малой мощности с топкой высокотемпературного кипящего слоя с рециркуляцией уходящих газов на статических и динамических режимах работы

*А.В. Смирнов, А.В. Бондарев, Э.В. Болбышев*

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

**Аннотация:** В статье представлены экспериментальные исследования котла малой мощности с топкой высокотемпературного кипящего слоя с рециркуляцией уходящих газов на стационарных и переходных режимах работы. Изображена и описана экспериментальная установка котла КВП-1,74 ВТКС с рециркуляцией уходящих газов. По результатам экспериментальных исследований получены зависимости коэффициента избытка кислорода  $\alpha_k$  от объемов рециркуляции уходящих газов котлоагрегата КВП-1,74 ВТКС на номинальных и долевых нагрузках, зависимости процента экономии топлива котла от объема рециркуляции уходящих газов котлоагрегата КВП-1,74 ВТКС на номинальной и долевых нагрузках котла, графики переходных процессов в котле «КВП-1,74-ВТКС» с рециркуляцией уходящих газов при изменении расхода топлива, ГРАФИКИ сравнения переходных процессов в котле «КВП-1,74-ВТКС» с рециркуляцией уходящих газов при изменении расхода топлива.

**Ключевые слова:** высокотемпературный кипящий слой, рециркуляция уходящих газов, экспериментальные исследования, система автоматизации.

Одним из перспективных направлений реконструкции, модернизации и технического перевооружения муниципальных и ведомственных угольных котельных малой мощности для теплоснабжения объектов ЖКХ является применение технологии сжигания топлива в высокотемпературном кипящем слое (ВТКС)[1-3].

В настоящее время известны новые энергоэффективные автоматизированные котлоагрегаты КВП-1,74-ВТКС с высокотемпературным кипящим слоем с узкой наклонной подвижной колосниковой решеткой единичной мощностью 1,5 Гкал/час, разработанные и испытанные при научном сопровождении специалистов ВИ(ИТ) ВА МТО [4,5]. Котлоагрегаты [6-8] сертифицированы и могут серийно применяться к установке при строительстве и реконструкции угольных котельных. Котлоагрегаты устойчиво работают с КПД (80-83) % на каменных и бурых

углях с фракционным составом от 30-40 мм до угольной пыли, зольностью и влажностью до 30-40 %. Применение таких котлоагрегатов позволяет в 1,5 – 2 раза снизить расход топлива по сравнению с существующими угольными котельными [9].

Однако многочисленные экспериментальные исследования [10,11]. опытных образцов котлов малой мощности с топками ВТКС выявили ряд недостатков в конструктивных решениях, которые снижают качество топочных процессов на статических и переходных режимах. К их числу относятся:

- неравномерность (порционность) подачи топлива скребковым питателем, которая нарушает устойчивость горения, температурный режим и устойчивость горения на статических и переходных режимах;

- нарушение режима горения при увеличении коэффициента избытка воздуха и температуры с последующим шлакованием решетки, в особенности на переходных режимах;

- кратерное горение топлива в кипящем слое и неравномерность теплового напряжения объёма топочной камеры из-за одностороннего бокового направления подачи первичного воздуха под колосниковую решетку;

- недостаточно эффективное уменьшение уноса мелких фракций топлива из кипящего слоя в надслоевое пространство из-за круглого сечения сопел вторичного воздуха.

Для устранения указанных недостатков разработаны технические решения, на которые поданы заявки на изобретения и получены патенты на полезную модель [12].

В рамках разработки комплексной системы автоматизации котлов малой мощности с высокотемпературным кипящим слоем в теплоэнергетическом комплексе кафедры «Двигателей и тепловых

---

установок» ВИ(ИТ) ВА МТО в пос. Приветненское Ленинградской области в период с июля по сентябрь 2018 года проведен комплекс экспериментальных исследований сжигания твердого топлива в котле малой мощности КВП-1,74 ВТКС с топкой высокотемпературного кипящего слоя с рециркуляцией уходящих газов на стационарных и переходных режимах работы.

Анализ теоретических исследований по работе котла на статических и динамических режимах с рециркуляцией уходящих газов изложен в литературе [13,14].

Общая схема экспериментальной установки с расположением точек замеров котла ВТКС с рециркуляцией уходящих газов представлена на рис. 1.

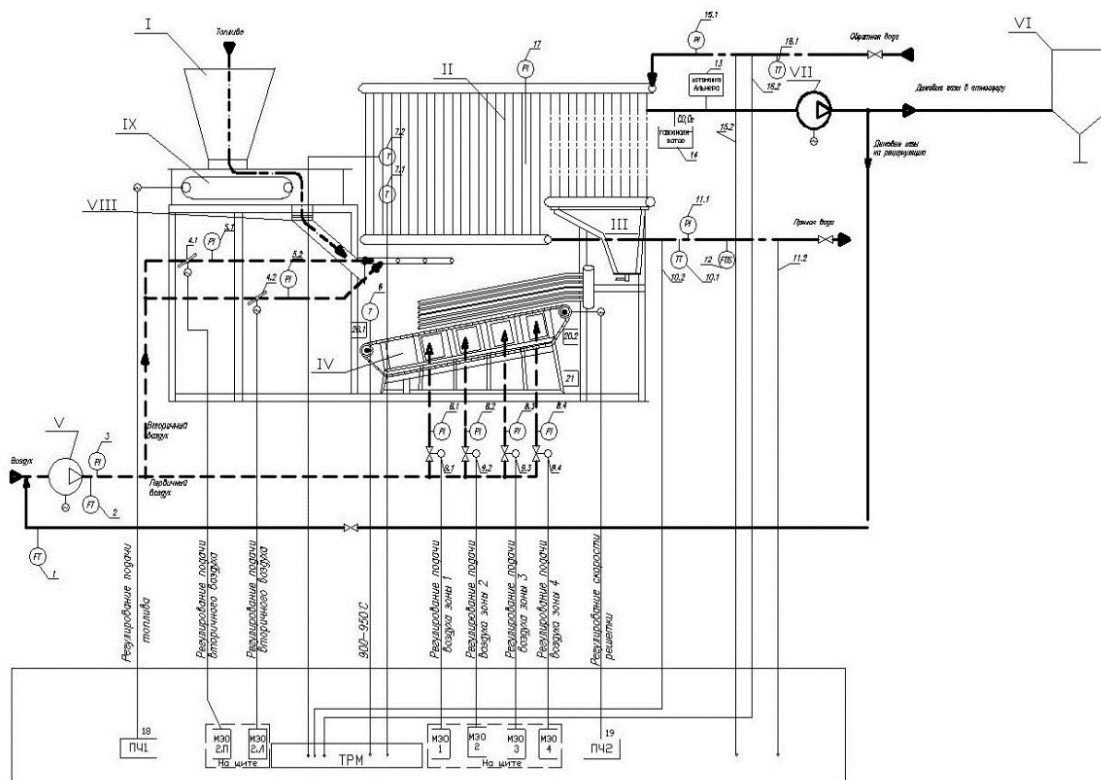


Рис. 1 Схема экспериментальной установки котла КВП-1,74 ВТКС с рециркуляцией уходящих газов

Топливо на решетку подается из бункера I с помощью скребкового питателя IX по наклонной течке. Расход топлива определяется по показаниям преобразователя частоты питателя топлива в т.18.

В котле организована двухступенчатая подача воздуха. Воздух на первичное и вторичное дутье подается от общего вентилятора V. В т.3 измеряется давление воздуха за вентилятором. Расход общей воздушной смеси определяется по показаниям расходомера т.2 или по микроманометру с трубкой Пито-Прандля. В т.8.1-8.4 измеряются давления по дутьевым зонам первичного воздуха с 1-ой по 4-ю соответственно. Вторичный воздух по воздуховодам направляется в коллектор вторичного дутья и затем через сопла подается в надслоевое пространство. В т.5.1-5.2 производятся измерение давления вторичного воздуха.

Расход газов рециркуляции определяется по показаниям расходомера т.1 или микроманометра, регулирование производится с помощью шибера рециркуляции.

В т.17 измеряется разрежение в топке котла, в т.6 определяется температура в кипящем слое, в т.7 – температура в топочной камере. Отбор проб уноса берется в батарейном циклоне т.VI, а в бункере возврата уноса т.III – отбор проб возврата уноса. С помощью установки Альнера измеряется количество унесенных из котла твердых частиц т.13. Состав и температура дымовых газов за котлом определяются по газоанализатору в т.14.

Температура и давление воды на входе в котел измеряется в т.15 и 16, на выходе из котла – в т.10 и 11 соответственно. Расход воды через котлоагрегат определяется в т.12.

В т.20.1 измеряется температура колосникового полотна на входе, а в т.20.2 на выходе из топки. Скорость движения колосниковой решетки IV определяется по показаниям преобразователя частоты привода колосниковой решетки т.19. Отбор проб шлака производится в т.21

На рис. 2-7 представлен измерительный комплекс экспериментального котла КВП-1,74 ВТКС с рециркуляцией уходящих газов.



Рис.2 Щит КИП с термо регуляторами



Рис.3 Обработка экспериментальных данных на мониторе ПК (ПО Scada)



Рис.4 Расстановка термопар в топке котла



Рис.5 Приборы измерения котла КВП-1,74 ВТКС



Рис.6 Щиты автоматизации и управления с частотными преобразователями



Рис.7 Приборы измерения расхода и давления воздуха и газов рециркуляции

Во время экспериментов сжигался каменный уголь с Моховского угольного разреза, Кемеровской области калорийности 5221 ккал/кг, зольностью  $A_p=11,1\%$ , влажностью  $W_p=14,6\%$  и с фракционностью 10-25 мм.

В рамках исследований проведено 4 серии экспериментов из 3-х серий опытов на статических и динамических режимах при нанесении возмущающих воздействий расходом топлива и воздушной смеси при ступенчатом изменении нагрузки.

Экспериментальные зависимости максимально возможного расхода уходящих газов рециркуляции, вносимых в топку котла ВТКС с определением коэффициента избытка кислорода на каждом режиме представлены на графике 8, из которого видно уменьшение с 1,66 без рециркуляции уходящих газов до 1.25 с рециркуляцией на номинальных и долевых режима с объемом замещения воздуха продуктами сгорания до 25-30% .

График процента экономии топлива, представленный на рис.9 показывает процент экономии топлива составляет порядка 2.8% при максимальном объеме замещения воздуха уходящими газами.

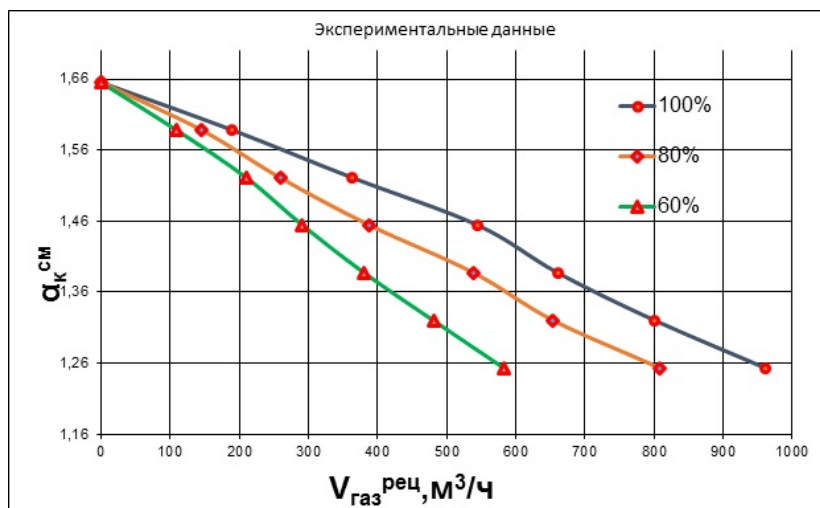


Рис.8 Экспериментальные зависимости коэффициента избытка кислорода  $\alpha_{к}$  от объемов рециркуляции уходящих газов котлоагрегата КВП-1,74 ВТКС на номинальных и долевых нагрузках

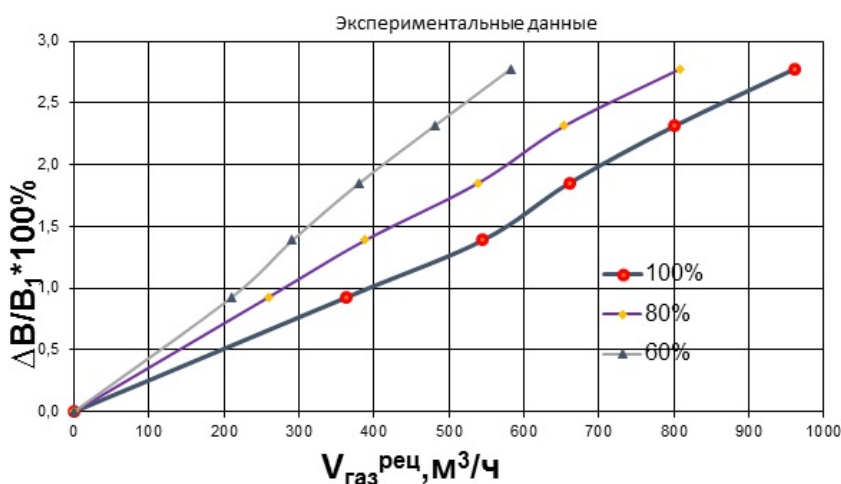
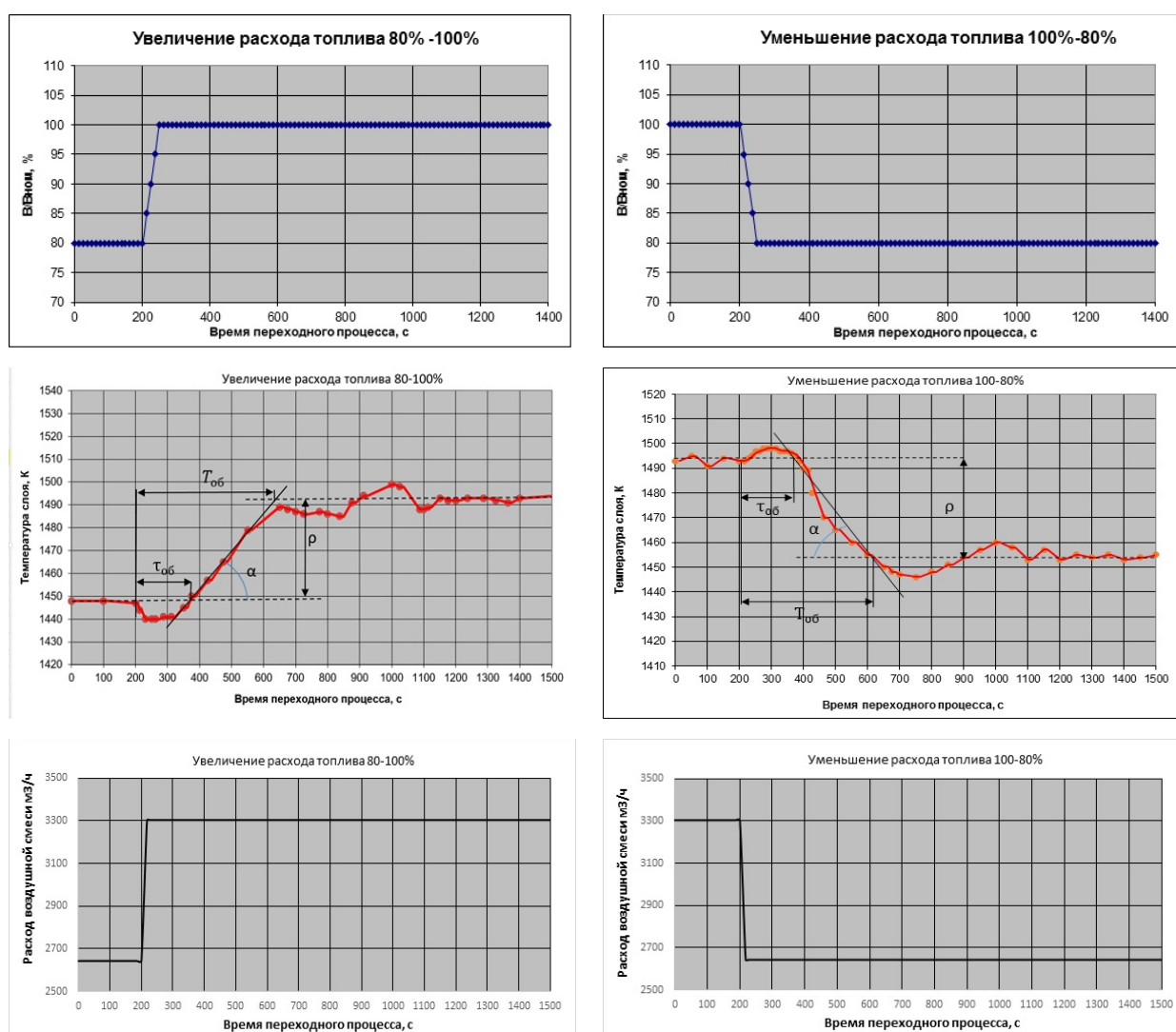


Рис.9 Экспериментальные зависимости процента экономии топлива котла от объема рециркуляции уходящих газов котлоагрегата КВП-1,74 ВТКС на номинальной и долевых нагрузках котлах

Результаты экспериментальных исследований на переходных режимах при изменении нагрузки котла от 80% до 100 % представлены на графиках



рис.10. При этом изменение расхода топлива происходит в течении 15-20 секунд, одновременно изменяется положение задвижек на трубопроводе рециркуляции уходящих газов. Температура слоя в начальный момент имеет явно выраженное время запаздывания, что обуславливается прогревом топлива и удалением из него влаги. Переходный режим изменения температуры носит аperiodический характер, с выходом на новый установившийся режим. далее происходит ступенчатое изменение температуры с выходом на новый установившейся режим.



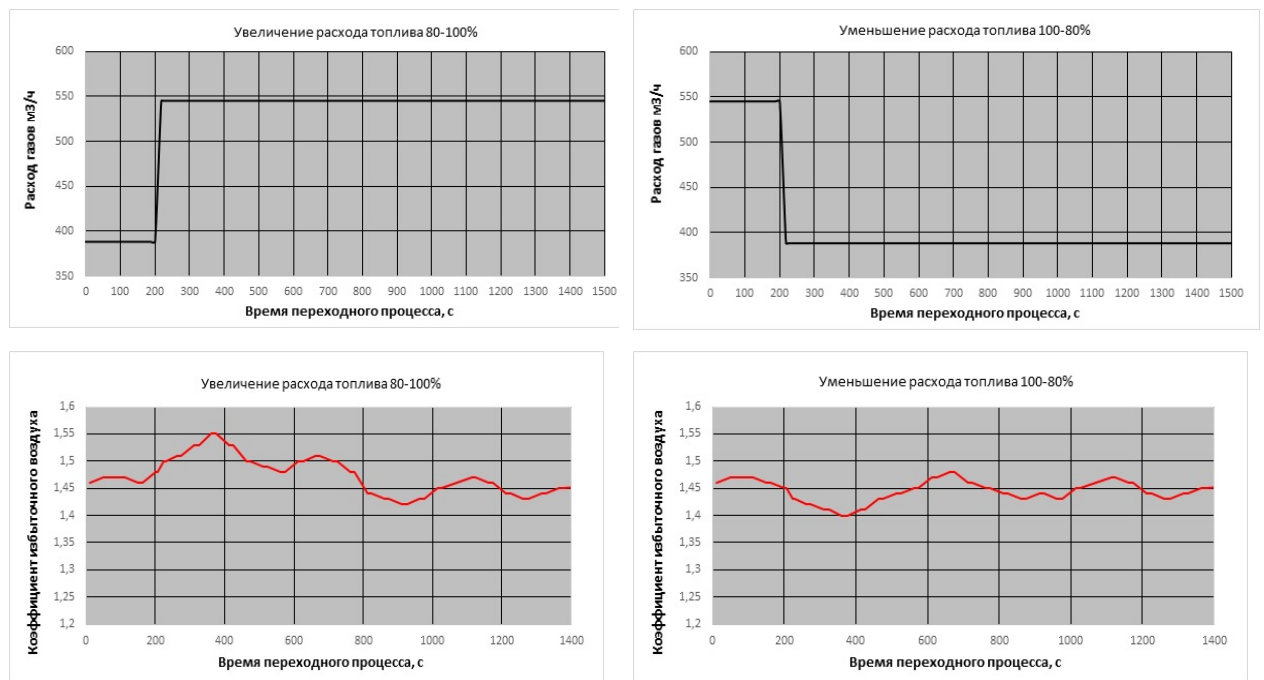


Рис.10 Экспериментальные графики переходных процессов в котле «КВП-1,74-ВТКС» с рециркуляцией уходящих газов при изменении расхода топлива.

При ступенчатом изменении нагрузки котла расходом топлива с изменением расхода воздушной смеси и газов рециркуляции, коэффициент избытка воздуха совершает колебательный процесс, приходя в установившееся значение к концу переходного периода.

На рис.8 показаны графические зависимости сравнения переходных процессов экспериментальных и расчетных данных при изменении возмущающих воздействий расходом топлива, которые показали удовлетворительную сходимость, не превышающую 5%.



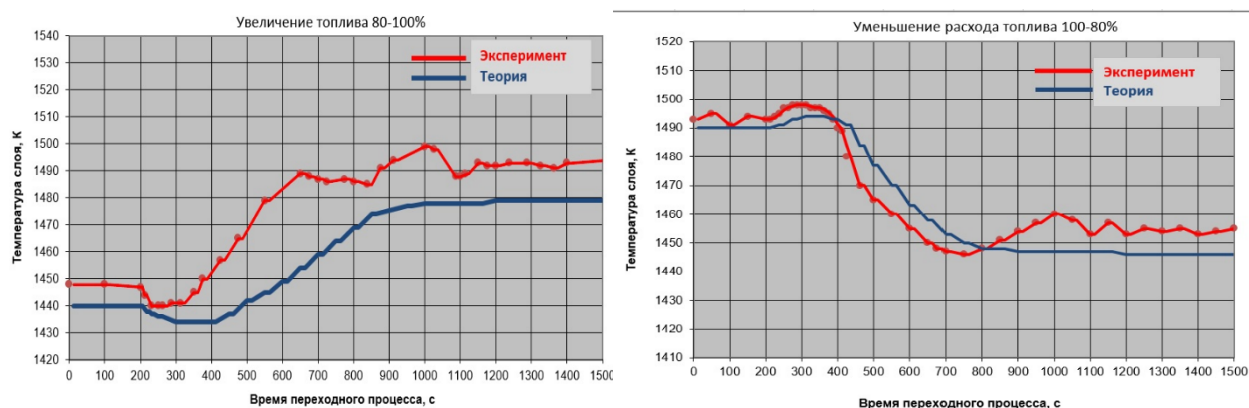


Рис.11 Графики сравнения переходных процессов в котле «КВП-1,74-ВТКС» с рециркуляцией уходящих газов при изменении расхода топлива.

Анализ полученных данных показывает, что коэффициент избытка кислорода по экспериментальным данным незначительно превышает теоретические значения и составляет 1,66 при работе без газов рециркуляции, что обуславливается присосами воздуха в топочное пространство котла.

Динамические параметры объекта, а именно время запаздывания, коэффициент самовыравнивания, время разгона ниже, чем у котла без рециркуляции уходящих газов.

Выводы:

1. В результате проведенных экспериментальных исследований исследования выявлена устойчивая работа котла с газами рециркуляции в широком диапазоне нагрузок от 50 до 120% без шлакования решетки.

2. Коэффициент избытка кислорода с рециркуляцией уходящих газов существенно снизился и составил 1,26 на номинальных и долевых нагрузках при максимально возможном объеме рециркуляции, необходимым для устойчивой безшлаковочной работы котла.

3. Экономия топлива увеличилась до 2,6% на долевых и номинальных режимах работы с максимальным расходом газов рециркуляции.

4. Основные параметры переходных процессов время запаздывания  $\tau_{об}$ , разгона объекта  $T_{об}$ , коэффициента самовыравнивания  $\rho_{об}$  показывают удовлетворительную сходимость с теоретическими данными численные значения которых значительно ниже, чем при работе без газов рециркуляции.

5. Полученные данные будут использованы для разработки алгоритма системы автоматического управления процесса горения в топке ВТКС котла малой мощности и заложены в контроллер комплектного устройства для комплексной автоматизации котельных оснащенных котлом малой мощности высокотемпературного кипящего слоя.

### Литература

1. Бондарев А.В., Болбышев Э.В., Смирнов А.В. Модернизация систем теплоснабжения объектов Министерства обороны Российской Федерации // Сборник докладов круглого стола. 2018. С. 45-54.

2. Бочаров А.А., Вискин Ж.В. Методика реконструкции и эксплуатации топок для сжигания высокозольных углей в кипящем слое. Донецк: Донецк углеавтоматика, 1989, с. 80-91.

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

4. Юферев Ю.В., Воронов В.Ю. Опыт реконструкции и эксплуатации котла «Братск» с топкой ВТКС. // Сборник работ докторантов и адъюнктов. СПб: ВИТУ, 1998, № 2, с. 56-58.

5. Рода И.С., Овчаров И.В., Карпов М.А. Практический опыт проектирования, строительства и реконструкции угольных котельных малой

мощности по технологии высокотемпературного кипящего слоя. Санкт-Петербург, «Инженерные системы». 2006. № 4 (25). С. 26-29.

6. 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.

7. 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. №182137.бюл. № 22.

8. Баскаков А.П., Мунц В.А., Филипповский Н.Ф. Топка с кипящим слоем как объект регулирования. // Теплоэнергетика, 1998, № 6. С. 15-23.

9. 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, NewSeries, Vol. 187, No. 4177. 21 Feb. 1975, pp. 646-648.

10. Волосатова Т.А. Основные вопросы энергоэффективности тепловых водяных котельных и варианты их решения // Инженерный вестник Дона. 2013. №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1899](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1899).

11. Ощепков А.С., Рыжков А.В. Экспериментальные исследования возможности изменения теплофизических характеристик твердого топлива и экономическое обоснование использования наноматериалов в схеме пылеприготовления // Инженерный вестник Дона. 2019. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2009/126](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2009/126).

12. 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, №170747, бюл. № 13.

---

13. 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.

14. Баскаков А.П., Шихов В.Н., Берг Б.В. и др. Исследование сжигания твердого топлива и улавливание окислов азота в низкотемпературном кипящем слое. // Проблемы тепло- и массообмена в процессах горения, используемых в энергетике. Сб. трудов ИТМО АН БССР, Минск, 1980. С.121-132.

### References

1. Bondarev A.V., Bolbyshev E.V., Smirnov A.V. Sbornik dokladov kruglogo stola. 2018. pp. 45-54.

2. Bocharov A.A., Viskin Zh.V. Metodika rekonstrukcii i e`kspluatacii topok dlya szhiganiya vy`sokozol`ny`x uglej v kipyashhem sloe. [Methods of reconstruction and operation of furnaces for burning high-ash coal in a fluidized bed]. Doneczk: Doneczk ugleavtomatika, 1989, pp. 80-91.

3. A.M. Squires. Pulverized-Fuel Combustionin Trouble. American Chemical Society, Division of Fuel Chemistry. 1970, V. 14, №.2., rr. 46-88.

4. Yuferev Yu.V., Voronov V.Yu. Sbornik rabot doktorantov i ad``yunktov. SPb: VITU, 1998, № 2, pp. 56-58.

5. Roda I.S., Ovcharov I.V., Karpov M.A. Sankt-Peterburg, «Inzhenerny`e sistemy». 2006. № 4 (25). pp. 26-29.

6. Smirnov A.V., Aleksandrov S.V., Bondarev A.V. Silovaya ustanovka s aktivny`m kotlom utilizatorom vy`sokotemperaturnogo kipyashhego sloya. [Patent na izobretenie. The power plant with an active boiler utilizing high-temperature fluidized bed. Patent for invention]. Zaregistrirvano v Gosudarstvennom reestre izobretenij RF 06.04.2018 g. №2650018 S1, byul. № 10.

7. Smirnov A.V., Bondarev A.V., Bolby`shev E`.V. i dr. Kotloagregat dlya szhiganiya tverdogo topliva v kipyashhem sloe. Patent na poleznuyu model`. [Boiler for burning solid fuel in a fluidized bed. Patent for utility model]. Zaregistrirovano v Gosudarstvennom reestre polezny`x modelej 03.08.2018. №182137.byul. № 22.

8. Baskakov A.P., Muncz V.A., Filippovskij N.F. Teploe`nergetika, 1998, № 6. pp. 15-23.

9. 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, NewSeries, Vol. 187, No. 4177. 21 Feb. 1975, pp. 646-648.

10. Volosatova T.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013. №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1899](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1899).

11. Oshhepkov A.S., Ry`zhkov A.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2019. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2009/126](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2009/126).

12. Smirnov A.V., Bondarev A.V., Mallaev K.M. i dr. Kotloagregat dlya szhiganiya tverdogo topliva v kipyashhem sloe. Patent na poleznuyu model`. [Boiler for burning solid fuel in a fluidized bed. Patent for utility model]. Zaregistrirovano v Gosudarstvennom reestre polezny`x modelej 05.05.2017, №170747, byul. № 13.

13. Bondarev A.V., Bolby`shev E.V, Smirnov A.V. Dvigatelestroenie. 2018. № 3. pp. 24-28.

14. Baskakov A.P., Shixov V.N., Berg B.V. i dr. Problemy` teplo- i massoobmena v processax gorenija, ispol`zuemy`x v e`nergetike. Sb. trudov ITMO AN BSSR, Minsk, 1980. pp.121-132.