

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИ РАБОТЕ ДИЗЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С АКТИВНЫМ КОТЛОМ-УТИЛИЗАТОРОМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО КИПЯЩЕГО СЛОЯ

С.В. Александров;

Г.В. Макачук, кандидат педагогических наук, доцент.

**Военный институт (инженерно-технический) Военной академии
материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулева
Министерства обороны Российской Федерации.**

**Л.В. Медведева, доктор педагогических наук, профессор,
заслуженный работник высшей школы Российской Федерации.**

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Представлен краткий анализ состояния вопросов математического моделирования при разработке комбинированных дизельных теплоэлектростанций с активными котлами-утилизаторами. Представлена принципиальная схема силовой установки с активным котлом-утилизатором высокотемпературного кипящего слоя и дизель-генератором. Сформулированы задачи для дальнейших исследований.

Ключевые слова: математическое моделирование, дизельные теплоэлектростанции, активные котлы-утилизаторы, высокотемпературный кипящий слой

ECOLOGICAL ASPECTS DURING DIESEL THERMAL POWER PLANTS WITH AN ACTIVE BOILER-UTILIZER OF A HIGH-TEMPERATURE BOILER LAYER

S.V. Aleksandrov; G.V. Makarchuk.

**Military institute (engineering) of Military academy of logistics support them. army general
A.V. Hrulev of the Ministry of defence of the Russian Federation.**

L.V. Medvedeva. Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

A brief analysis of the status of mathematical modeling issues in the development of combined diesel power plants with active waste heat boilers is presented. A schematic diagram of a power plant with an active boiler with a high-temperature fluidized bed utilizer and a diesel generator is presented. Tasks for further research are formulated.

Keywords: mathematical modeling, diesel thermal power plants, active heat recovery boilers, high-temperature fluidized bed

В рамках борьбы с увеличивающимися вредными выбросами в атмосферу в декабре 1997 г. в дополнение к Рамочной конвенции ООН об изменении климата было принято Киотское соглашение (Киотский протокол), обязывающее развитые страны и страны с переходной экономикой сократить или стабилизировать выбросы парниковых газов [1].

По величине оказываемого вредного влияния на тепловой баланс основными парниковыми газами в порядке уменьшения считаются: водяной пар, углекислый газ, метан и озон. Некоторый вклад в создание парникового эффекта вносят оксиды азота. Несмотря на достаточно низкую концентрацию в атмосфере оксидов азота, считается, что их парниковая активность в 298 раз выше, чем у углекислого газа, поэтому сокращению их выбросов также должно уделяться особое внимание [2].

12 декабря 2015 г. в ходе конференции по климату в рамках Рамочной конвенции ООН об изменении климата было подготовлено и принято Парижское соглашение. Данное соглашение было подписано 22 апреля 2016 г. взамен Киотского протокола и было призвано регулировать снижение углекислого газа в атмосфере с 2020 г.

По данным аналитического доклада Института проблем естественных монополий за 2016 г., Россия занимает лидирующие позиции в борьбе за снижение выбросов парниковых газов, добившись с 1990 г. снижения выбросов на 43 %. Такой результат был достигнут благодаря активной работе по модернизации и энергосбережению в электро- и теплоэнергетике, водоснабжении и водоотведении, промышленности, сельском хозяйстве и на транспорте [3–5].

Расчёты, сделанные этим же институтом, показывают, что ввод в России углеродного сбора в рамках Парижского соглашения в размере 15 долл. США за тонну эквивалента CO_2 потребует ежегодных выплат в размере 2,6...3,3 трлн руб. При увеличении ставки сбора на выбросы до 35 долл. США за тонну эквивалента CO_2 объём выплат увеличится до 6,0...7,7 трлн руб.

Наибольшей уязвимостью к введению углеродного сбора характеризуются добыча угля и торфа, электро- и теплоэнергетика. В настоящее время в электроэнергетике в качестве автономных источников электрической энергии на объектах Министерства обороны Российской Федерации (МО РФ), в основном, используются энергоустановки на базе двигателей внутреннего сгорания (ДВС), среди которых преобладают дизельные (ДЭУ). По данным Департамента эксплуатационного содержания и обеспечения коммунальными услугами (ДЭС и ОКУ) МО РФ насчитывается более 1 000 дизельных электростанций. При этом 35 % от общего числа ДЭУ находятся в труднодоступных районах Забайкальского края, Камчатки, Сахалина и Крайнего Севера. В отсутствие развитой автомобильной и железнодорожной инфраструктуры завоз дизельного топлива в эти отдаленные районы не выгоден с экономической точки зрения, а порой и вовсе невозможен в отсутствие навигации.

В качестве автономных источников теплоты в теплоэнергетике применяются котельные. В настоящее время (по данным ДЭС и ОКУ) из 841 действующей котельной 735 котельных работают на твердом топливе (каменные и бурые угли низкого качества) и жидком топливе, используют высоковязкие сернистые обводненные мазуты и дорогостоящее дизельное топливо.

С позиций вышеизложенного чрезвычайную актуальность приобретает не только проблема снижения расходов на доставку топлива на объекты, но и проблема повышения коэффициента его использования, а также улучшения экологической составляющей работы твердотопливных котельных и ДЭУ путем снижения объема вредных выбросов (в том числе парниковых газов) и уменьшения вредного воздействия на окружающую среду.

Для этого при проектировании новых и реконструкции действующих котельных установок должны быть выполнены мероприятия, обеспечивающие очистку дымовых газов от золы с тем, чтобы концентрация ее в приземном слое атмосферного воздуха не выходила за рамки предельно-допустимых концентраций, установленных нормативно-правовыми актами Российской Федерации. Коэффициент очистки дымовых газов от золы при выполнении всех защитных мероприятий не может быть менее 0,9. Для этих целей применяются: электрофильтры, мокрые золоуловители, сухие золоуловители и др.

Для очистки дымовых газов от оксидов серы используют двухциклический щелочной способ с применением слабого раствора солей натрия или аммиака с последующей обработкой известью или известняком. В результате такой очистки образуется шлам, содержащий CaSO_3 и щелочной раствор. Эффективность процесса может достигать 95 %. Недостатком способа является большое количество образующегося шлама [6].

Другим способом очистки от оксидов серы является магнетитовый метод, при котором при поглощении SO_2 образуется сульфит магния MgSO_3 , который после обжига

образует исходные продукты: MgO и снова используется в процессе очистки, а также SO₂, перерабатываемый в твердую серную кислоту [7, 8].

Особенностью образования оксидов азота является малая зависимость от вида и состава топлива, но большая зависимость от режима горения и организации топочного процесса. Существенное влияние на образование оксидов азота оказывает также концентрация кислорода, определяемая избытком воздуха в топке.

В топочной камере образуется преимущественно оксид азота. После выхода дымовых газов из трубы и перемешивания с кислородом воздуха происходит превращение оксида азота в более токсичный диоксид азота.

Снижение выбросов оксидов азота достигается путем внедрения специальных технологических (первичных) мероприятий, направленных на подавление образования оксидов азота в процессе сгорания топлива в топках котлов, а также путем очистки газов за счет разложения образовавшихся оксидов азота в специальных установках, встроенных в тракт котла (вторичные мероприятия).

Перечень технологических мероприятий по подавлению оксидов азота в топках котлов включает в себя:

- 1) уменьшение коэффициента избытка воздуха в топке ($1,02 \leq \alpha \leq 1,03$);
- 2) рециркуляцию дымовых газов (установлено, что подача в топку около 20 % дымовых газов приводит к снижению выбросов азота до 40 %);
- 3) уменьшение температуры подогрева дутьевого воздуха, поступающего в топку;
- 4) многостадийное сжигание топлива: подача части воздуха, необходимого для его сжигания (до 0,8 %) в первую зону. Во вторую/третью зоны подается воздух, необходимый для дожигания продуктов неполного сгорания [2, 9–11].

Вторичные методы очистки дымовых газов от оксидов азота делятся на каталитический и высокотемпературный гомогенный методы. При высокотемпературном гомогенном методе аммиак вводится в диапазоне 850...1100 °С в тракт дымовых газов, что позволяет получить степень очистки газов от оксидов азота до 70 %.

При температуре дымовых газов 350...450 °С на газоходе котла устанавливается реактор. На участке газохода до реактора организуется ввод аммиачно-воздушной смеси в поток дымовых газов. Такой метод получил название каталитический. Из-за сложности и дороговизны производства катализаторов с малым аэродинамическим сопротивлением и необходимостью периодической длительной регенераций, метод не нашел широкого применения.

Так как технологические методы в пять–шесть раз дешевле устройств очистки газов, и они могут быть учтены непосредственно в конструкции котла и не требуют химических добавок, то вторичные мероприятия должны осуществляться только после выполнения на котле всех технологических мероприятий по подавлению образования оксидов азота.

Для снижения количества выбросов вредных веществ от твердотопливных котельных и уменьшения стоимости данных мероприятий целесообразно совмещать процесс сжигания топлива с процессом улавливания серы и понижения концентрации оксидов азота в одной установке. В качестве такой установки целесообразно использовать комбинированную установку с дизель-генератором и активным котлом-утилизатором с высокотемпературным кипящим слоем.

Авторским коллективом кафедры двигателей и тепловых установок Военного института (инженерно-технического) в составе С.В. Александрова, А.В. Смирнова, А.В. Бондарева разработана и запатентована силовая установка с активным котлом-утилизатором высокотемпературного кипящего слоя и дизель-генератором [12–14] (рис. 1).

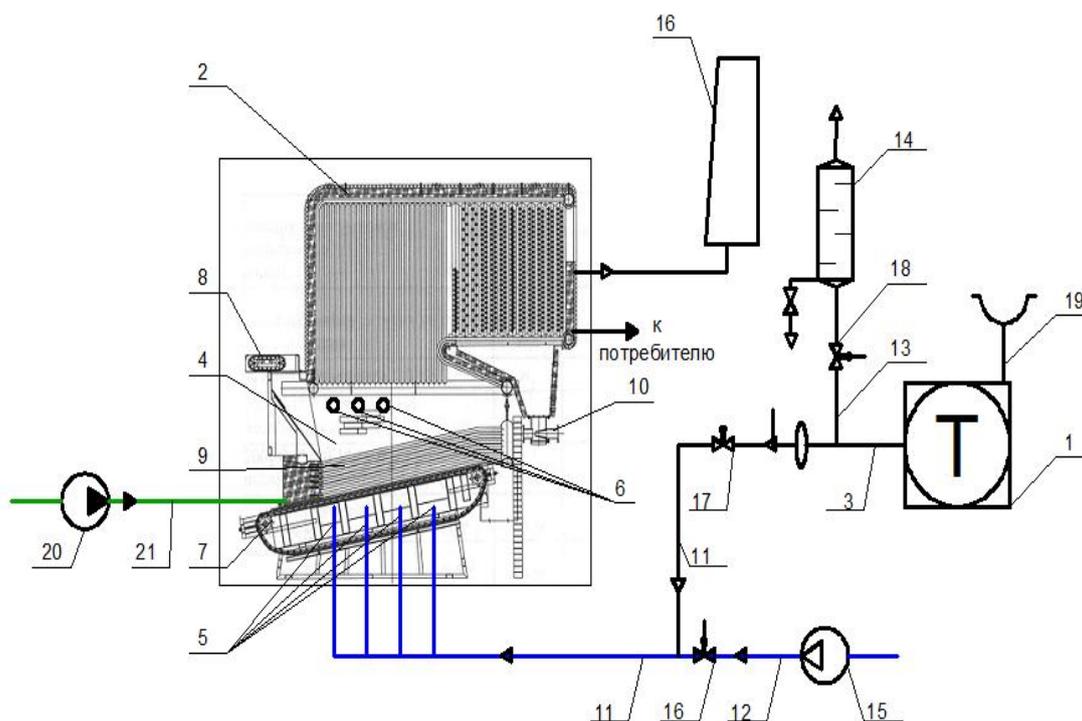


Рис. 1. Силовая установка с активным котлом-утилизатором высокотемпературного кипящего слоя и дизель-генератором

В данной установке отработавшие газы (ОГ) дизель-генератора подаются в топку котла-утилизатора. В качестве котла-утилизатора планируется применять котлоагрегат КВП-1,74 ВТКС с топкой высокотемпературного кипящего слоя. В топке котла происходит дожигание продуктов неполного сгорания дизельного топлива, содержащихся в ОГ. Кроме того, балластировка топочной камеры ОГ приводит к уменьшению коэффициента избытка воздуха и, как следствие, уменьшению температуры, что, в свою очередь, приводит к уменьшению образования оксидов азота. Отработавшие газы, имеющие температуру 350...400 °С, вносят дополнительную теплоту в топочное пространство.

Поскольку горение котельного топлива в топке происходит в потоке ОГ дизель-генератора, то для оценки эффективности сжигания топлива и снижения вредных выбросов следует разработать методику расчета параметров искусственной газовой смеси (ИГС), подаваемой в топку котла-утилизатора. Так как образование оксидов напрямую зависит от коэффициента избытка воздуха, то необходимо рассчитать его минимальные значения при условии полного сгорания топлива в потоке ОГ.

Для получения численных значений коэффициента избытка воздуха необходимо определить граничные условия, при которых процесс сгорания угля в высокотемпературном кипящем слое будет устойчивым, температура нагреваемой котлом утилизатором сетевой воды будет находиться в установленных пределах, а вредные выбросы не будут превышать предельно допустимых концентраций.

При моделировании топочных процессов необходимо принимать во внимание параметры слоя (высоту слоя, площадь поверхности теплообмена в кипящем слое и надслоевом пространстве), химический состав топлива. Для упрощения моделирования процесса горения угля в ИГС часто принимают ряд допущений, таких как:

- объемный расход ИГС, подаваемой в топку котла, постоянный и равен расходу воздуха для данного нагрузочного режима котла;
- в силу малых значений концентраций таких компонентов ОГ, как альдегиды, оксиды серы SO_2 , SO_3 , предельные углеводороды ими пренебрегают и учитывают только азот, кислород, диоксид углерода;

– при горении не учитывается образование в топке оксидов азота NO_x и оксида углерода CO .

Первое допущение обосновано необходимостью поддержания требуемой скорости псевдоожижения, которая в котле с высокотемпературным кипящим слоем принимается в диапазоне 3...5 м/с. Исходя из этого, объем воздуха, подаваемого в топку вентилятором, уменьшается на величину объема добавленных ОГ дизель-генератора. В противном случае объем ИГС, подаваемой в топочное устройство, резко возрастет, что, в свою очередь, приведет к увеличению скоростей в воздухопроводах свыше предельно допустимых и срыву горения кипящего слоя.

Отказ от учета оксидов серы SO_2 , SO_3 , оксидов азота NO_x и оксида углерода CO в соответствии со вторым допущением существенно влияет не только на составляющие теплового баланса котлоагрегата, но и на экологическую составляющую работы котельной и, по мнению авторов, должен учитываться в расчетах.

Для точного определения состава ОГ в целях оценки эффективности сжигания топлива и снижения вредных выбросов применяется следующая расчетная методика: определяется молекулярная масса смеси, определяется массовая концентрация i -го компонента смеси:

$$g_{O_2}^{OG} = \frac{G_B \cdot g_{O_2}^e - B_q \cdot 3,33}{G_{OG}} ;$$

$$g_{CO_2}^{OG} = \frac{G_B \cdot g_{CO_2}^e + B_q \cdot 3,19}{G_{OG}} ;$$

$$g_{N_2}^{OG} = \frac{G_B \cdot g_{N_2}^e}{G_{OG}} ;$$

$$g_{H_2O}^{OG} = \frac{G_B \cdot d + B_q \cdot 1,13}{G_{OG}} .$$

После смешения свежего воздуха, подаваемого вентилятором с ОГ дизеля массовые концентрации компонентов в смеси определяются из соотношения:

$$g_i^{ИГС} = \frac{G_B' g_i' + G_{OG}'' g_{OG}''}{G_{ИГС}} .$$

Объемный расход ОГ можно определить по следующим зависимостям:

$$G_{OG} = G_B + N_e \cdot b_e ;$$

$$G_B = 60 \cdot V_{ц} \cdot i \cdot z \cdot n \cdot \eta_n \cdot \varphi_a \cdot \rho_k .$$

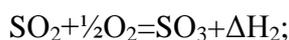
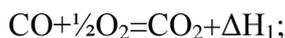
Состав ОГ всецело зависит от качества дизельного топлива, эксплуатационных характеристик и технического состояния дизель-генератора. Расход ОГ дизель-генератора АД-60-Т/400-1Р, входящего в состав экспериментальной установки, на номинальной нагрузке составит 960 кг/ч, а расход воздуха, требуемого для горения угля в котлоагрегате, при коэффициенте избытка воздуха 1,5, составит 4 046 м³/час.

При совместной работе установки на номинальном режиме ОГ дизель-генератора подаются в топку котла в полном объеме. Объем свежего воздуха, подаваемого

вентилятором, уменьшается на объем подаваемых ОГ и составит 3 086 м³/час. При этом ожидается следующая массовая концентрация компонентов ИГС:

- содержание кислорода 20,1 %;
- содержание диоксида углерода 1,92 %;
- содержание монооксида углерода 0,05 %;
- содержание сажи, SO₂–0,28 %.

Коэффициент избытка кислорода в топке котла в этом случае снизится с 1,5 до 1,35–1,36, что неизменно приведет к снижению выбросов оксида азота. Для предварительной оценки изменения коэффициента использования топлива в расчетах учитывалась выделяющаяся при окислении монооксида углерода, диоксида серы и сажи теплота. Для упрощения расчетов допускается, что окисление протекает полностью по следующим реакциям:



Расчет выделившейся теплоты производился по следствию из закона Гесса:

$$\Delta H_1 = \Delta H_{\text{CO}_2} - \Delta H_{\text{CO}} = -393,51 - (-110,52) = -282,99 \text{ кДж/моль};$$

$$\Delta H_2 = \Delta H_{\text{SO}_3} - \Delta H_{\text{SO}_2} = -395 - (-297) = -98 \text{ кДж/моль};$$

$$\Delta H_3 = \Delta H_{\text{CO}_2} = -393,51 \text{ кДж/моль}.$$

Массы монооксида углерода, диоксида серы и сажи соответственно равны:

$$m_{\text{CO}} = 4099,99 \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 2,05 \text{ кг};$$

$$m_{\text{SO}_2} = 4099,99 \cdot 2,8 \cdot 10^{-3} = 11,48 \text{ кг};$$

$$m_{\text{сажи}} = 4099,99 \cdot 2,8 \cdot 10^{-3} = 11,48 \text{ кг}.$$

Соответственно количество выделившейся теплоты будет равно:

$$Q_1 = \frac{2,05 \cdot 10^3 \cdot 282,99}{28} = 20718 \text{ кДж};$$

$$Q_2 = \frac{11,27 \cdot 10^3 \cdot 98}{64} = 17257 \text{ кДж};$$

$$Q_3 = \frac{11,48 \cdot 10^3 \cdot 393,51}{12} = 37457 \text{ кДж}.$$

Таким образом, при полном окислении монооксида углерода, диоксида серы и сажи в топке котла может быть дополнительно получено 75 427 кДж теплоты, а общее количество теплоты, дополнительно вносимое в топку котла ОГ дизель-генератора, составит 41 2563 кДж.

Следует отметить, что снижение выбросов азота в данной установке достигается не только балластировкой топочной камеры ОГ, но и использованием принципа многостадийного сжигания.

В конструкции котла КВП-1,74 ВТКС реализован принцип двухстадийного сжигания топлива, при котором часть дутьевого воздуха (примерно 70 %) подается под узкую наклонную колосниковую решетку для организации псевдооживленного слоя, а остальная часть дутьевого воздуха подается в зону вторичного дутья через сопла острого дутья, где происходит дожигание летучих соединений. Кроме снижения выбросов азота, за счет уменьшения коэффициента избытка воздуха в первой зоне такое решение сокращает потери

теплоты с уносом и уменьшает содержание золы в уходящих газах. Схема организации подачи дутьевого воздуха и ОГ в топочное устройство представлена на рис. 2.

В ходе проведенных испытаний котлоагрегата КВП-1,74 ВТКС при помощи газоанализатора Testo-300 был проведен анализ дымовых газов при работе котла на различной нагрузке. Результаты замеров оксидов азота и углекислого газа представлены на рис. 3.

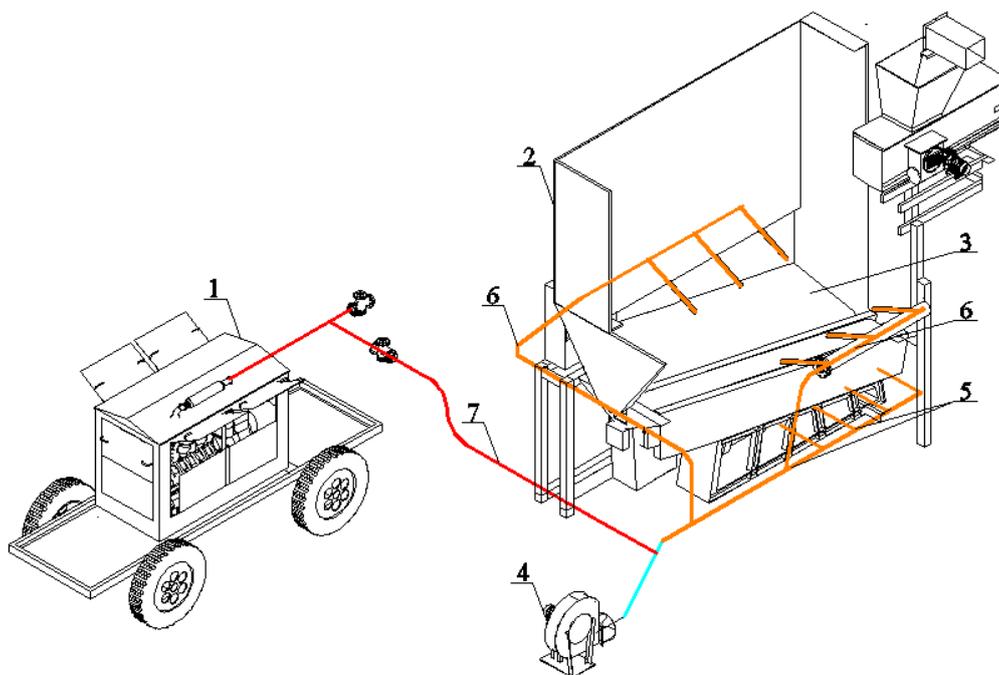


Рис. 2. Схема организации подачи дутьевого воздуха и ОГ:
 1 – дизель-генератор; 2 – котлоагрегат КВП-1,74 ВТКС; 3 – топочное устройство котла;
 4 – дутьевой вентилятор; 5 – зоны первичного дутья; 6 – зоны вторичного (острого) дутья;
 7 – газоход подачи ОГ

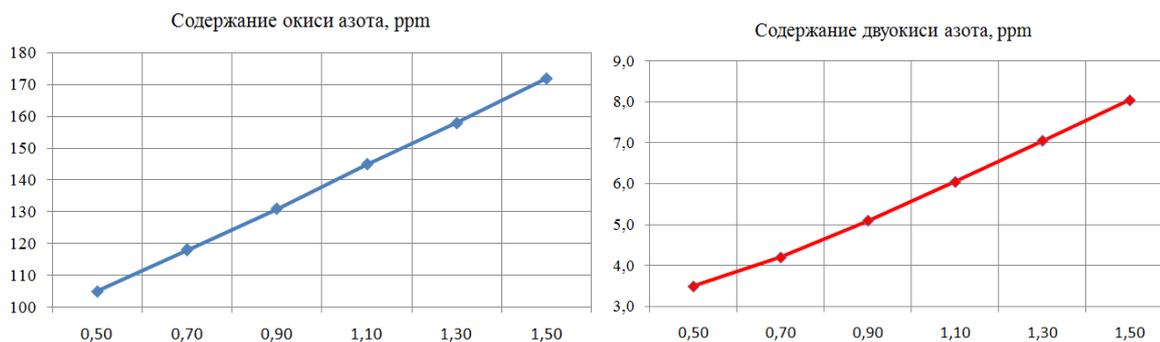


Рис. 3. Содержание NO и NO_x в уходящих газах при автономной работе котла-утилизатора в зависимости от нагрузки (Гкал/ч)

В ближайшее время планируется проведение исследований совместной работы котлоагрегата КВП-1,74 ВТКС и дизель-генератора 6Ч15/18 в составе электростанции АД-60-Т/400-1Р. Для этого на экспериментальной базе Военного института (инженерно-технического) в пос. Приветнинское смонтирована экспериментальная установка. Целью испытаний является достижение устойчивой совместной работы котлоагрегата при балластировке топочного устройства ОГ дизель-генератора, повышение коэффициента

использования топлива установки и снижение выбросов оксидов азота NO_x и оксида углерода CO.

Литература

1. Киотский протокол. URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/8028> (дата обращения: 11.01.2019).
2. Мониторинг химических процессов в верхнем слое подстилающей поверхности и приземном слое атмосферы в регионе Санкт-Петербурга // Ученые записки. № 16. URL: http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/16-5. (дата обращения: 11.01.2019).
3. Риски реализации Парижского климатического соглашения для экономики и национальной безопасности России: Аналитический доклад. URL: http://www.ipem.ru/files/files/other/doklad_riski_realizacii_parizhskogo_klimaticheskogo_soglasheniya_dlya_ekonomiki_i_nacionalnoy_bezопасnosti_rossii.pdf (дата обращения: 11.01.2019).
4. Методика оптимизации систем водоснабжения / С.В. Саркисов [и др.] // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2015. № 649. С. 181–187.
5. Методика оптимизации зональных систем водоснабжения / Ф.В. Кармазинов [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. 2016. № 2. С. 64–70.
6. Азбука горения. URL: <http://rielo.ru/azbuka/142.htm> (дата обращения: 11.01.2019).
7. Электроэнергетика и охрана окружающей среды. Функционирование энергетики в современном мире. Кн. 5. URL: <http://energetika.in.ua/ru/books/book-5/part-3/section-2/2-3> (дата обращения: 11.01.2019).
8. Экология. Справочник. URL: <http://ru-ecology.info/pics/200916700990009/> (дата обращения: 11.01.2019).
9. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. Л.: Недра, 1988.
10. Диоксид азота. Влияние на человека. Класс опасности. URL: <https://www.syl.ru/article/172799/> (дата обращения: 11.01.2019).
11. Система рециркуляции отработавших газов. URL: <http://systemsauto.ru/output/recirculation.html> (дата обращения: 11.01.2019).
12. Смирнов А.В., Александров С.В., Бондарев А.В. Силовая установка с активным котлом-утилизатором высокотемпературного кипящего слоя: пат. № 2650018; опубл. 06.04.18. Доступ из нац.-электронной библиотеки.
13. Александров С.В., Болбышев Э.В., Бондарев А.В. Разработка систем комплексной автоматизации топочных процессов твердотопливных котлоагрегатов с топками кипящего слоя // Военный инженер. 2018. № 2 (8). С. 27–36.
14. Разработка дизельных-теплоэлектростанций с активными котлами утилизаторами высокотемпературного кипящего слоя / А.В. Смирнов [и др.] // Двигателестроение. 2018. № 3 (273) июль-сентябрь. С. 19–23.

References

1. Kiotskij protokol. URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/8028> (data obrashcheniya: 11.01.2019).
2. Monitoring himicheskikh processov v verhnem sloe podstilayushchej poverhnosti i prizemnom sloe atmosfery v regione Sankt-Peterburga // Uchenye zapiski. № 16. URL: http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/16-5. (data obrashcheniya: 11.01.2019).
3. Riski realizacii Parizhskogo klimaticheskogo soglasheniya dlya ehkonomiki i nacional'noj bezопасnosti Rossii: Analiticheskij doklad. URL: http://www.ipem.ru/files/files/other/doklad_riski_realizacii_parizhskogo_klimaticheskogo_soglasheniya_dlya_ekonomiki_i_nacionalnoy_bezопасnosti_rossii.pdf (data obrashcheniya: 11.01.2019).
4. Metodika optimizacii sistem vodosnabzheniya / S.V. Sarkisov [i dr.] // Trudy Voennokosmicheskoy akademii im. A.F. Mozhajskogo. 2015. № 649. S. 181–187.
5. Metodika optimizacii zonal'nyh sistem vodosnabzheniya / F.V. Karmazinov [i dr.] // Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika. 2016. № 2. S. 64–70.

6. Azbuka gorenija. URL: <http://rielo.ru/azbuka/142.htm> (data obrashcheniya: 11.01.2019).
7. Ehlektroehnergetika i ohrana okruzhayushchej sredy. Funkcionirovanie ehnergetiki v sovremennom mire. Kn. 5. URL: <http://energetika.in.ua/ru/books/book-5/part-3/section-2/2-3> (data obrashcheniya: 11.01.2019).
8. Ehkologiya. Spravochnik. URL: <http://ru-ecology.info/pics/200916700990009/> (data obrashcheniya: 11.01.2019).
9. Sigal I.Ya. Zashchita vozdušnogo bassejna pri szhiganii topliva. L.: Nedra, 1988.
10. Dioksid azota. Vliyanie na cheloveka. Klass opasnosti. URL: <https://www.syl.ru/article/172799/> (data obrashcheniya: 11.01.2019).
11. Sistema recirkulyacii otrabotavshih gazov. URL: <http://systemsauto.ru/output/recirculation.html> (data obrashcheniya: 11.01.2019).
12. Smirnov A.V., Aleksandrov S.V., Bondarev A.V. Silovaya ustanovka s aktivnym kotlom-utilizatorom vysokotemperaturnogo kipyashchego sloya: pat. № 2650018; opubl. 06.04.18. Dostup iz nac.-ehlektronnoj biblioteki.
13. Aleksandrov S.V., Bolbyshev Eh.V., Bondarev A.V. Razrabotka sistem kompleksnoj avtomatizacii topochnyh processov tverdoplivnyh kotloagregatov s topkami kipyashchego sloya // Voennyj inzhener. 2018. № 2 (8). S. 27–36.
14. Razrabotka dizel'nyh-teploehlektrostantsij s aktivnymi kotlami utilizatorami vysokotemperaturnogo kipyashchego sloya / A.V. Smirnov [i dr.] // Dvigatelistroenie. 2018. № 3 (273) iyul'-sentyabr'. S. 19–23.