УДК 621.43.068.8:621.182.232
doi: 10.33622/0869-7019.2025.03.24-30

Технология управления процессом эффективного сжигания топлива с помощью искусственного интеллекта

Виктор Александрович ЯКОВЛЕВ[1], кандидат технических наук, доцент, yakovlevspb@rambler.ru
Игорь Викторович АНАНЧЕНКО[2], кандидат технических наук, доцент, anantchenko@yandex.ru
Олег Николаевич НОВИКОВ[3], кандидат технических наук, генеральный директор, uranspb@uranspb.ru
Александр Михайлович ГРИМИТЛИН[1], доктор технических наук, профессор, grimitlin@avoknw.ru

[1] Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ), 190005 Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4

[2] Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), 190013 Санкт-Петербург, Московский просп., 24-26/49, литера А

[3] Научно-производственная фирма «УРАН-СПб», 196128 Санкт-Петербург, ул. Варшавская, 5А, литера Л, оф. 105

Аннотация. *Рассмотрены актуальные вопросы развития технологии сжигания органического газового топлива в топливосжигающих энергоустановках. Эти технологии могут применяться в топливосжигающих установках как промышленного назначения, так и жилищно-коммунального хозяйства. Разобраны технологические сложности организации эффективного сжигания альтернативных невзаимозаменяемых между собой видов газового топлива для выработки тепловой энергии. Теоретические вопросы включают сведения о тепловом балансе котлоагрегатов и роли основных видов потерь. Изучены показатели эффективности работы тепловых энергоустановок и качества сжигания топлива. Проанализированы полученные в ходе многолетних исследований обобщенные зависимости основных параметров регулирования режимов работы котлоагрегатов на примере парового котла ДКВр-6,5-13, представлена система автоматического регулирования «Факел-3» с функцией коррекции и вычислением коэффициента полезного действия. Предложена схема автоматического управления процессами сжигания невзаимозаменяемых видов газового топлива с использованием функции контроля максимально возможной эффективности с применением системы саморегулирования с помощью искусственного интеллекта. Рассмотрен предложенный алгоритм работы блока искусственного интеллекта, заменяющего оператора котельной.*

Ключевые слова: *котельная установка, тепловая энергоустановка, схемы автоматизации горения, повышение энергоэффективности, снижение вредных выбросов, искусственный интеллект*

Для цитирования: *Яковлев В. А., Ананченко И. В., Новиков О. Н., Гримитлин А. М.* Технология управления процессом эффективного сжигания топлива с помощью искусственного интеллекта // Промышленное и гражданское строительство. 2025. № 3. С. 24–30. doi: 10.33622/0869-7019.2025.03.24-30

TECHNOLOGY FOR MANAGING THE PROCESS OF EFFICIENT FUEL COMBUSTION USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Viktor A. YAKOVLEV[1], yakovlevspb@rambler.ru, **Igor V. ANANCHENKO**[2], anantchenko@yandex.ru
Oleg N. NOVIKOV[3], uranspb@uranspb.ru, **Aleksandr M. GRIMITLIN**[1], grimitlin@avoknw.ru

[1] Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2-ya Krasnoarmeyskaya ul., 4, St. Petersburg 190005, Russian Federation

[2] Saint Petersburg State Technological Institute (Technical University), Moskovskiy prospekt, 24-26/49 litera A, St. Petersburg 190013, Russian Federation

[3] Scientific and Production Company “Uran-SPb”, ul. Varshavskaya, 5A, litera L, of.105, St. Petersburg 196128, Russian Federation

Abstract. *The article considers current issues of development of organic gas fuel combustion technology in fuel-burning power plants. The technologies under consideration can be used both in fuel-burning plants of industrial and housing and communal services. The technological complexities of organizing efficient combustion of alternative non-interchangeable types of gas fuel for heat generation are analyzed, where theoretical issues are analyzed with the presentation of the heat balance of boiler units and the role of the main types of losses. The performance indicators of thermal power plants and fuel combustion quality are analyzed. The generalized dependencies of the main parameters for regulating the operating modes of boiler units obtained in the course of many years of research are analyzed using the example of the DKVR-6.5-13 steam boiler, the «Fakel-3» automatic control system with a correction function and an efficiency calculator is presented. A scheme for automatic control of combustion processes of non-interchangeable types of gas fuel using the function of monitoring the maximum possible efficiency using a self-regulation system using artificial intelligence is proposed. The proposed algorithm for the operation of the artificial intelligence block replacing the boiler operator has been analyzed.*

© ЯКОВЛЕВ В. А., АНАНЧЕНКО И. В., НОВИКОВ О. Н., ГРИМИТЛИН А. М., 2025

Keywords: *boiler plant, thermal power plant, combustion automation schemes, increasing energy efficiency, reducing harmful emissions, artificial intelligence*

For citation: Yakovlev V. A., Ananchenko I. V., Novikov O. N., Grimitlin A. M. Technology for Managing the Process of Efficient Fuel Combustion Using Artificial Intelligence. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2025, no. 3, pp. 24–30. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2025.03.24-30

Введение

В настоящее время активное экономическое соперничество между развитыми странами является следствием борьбы за осуществление контроля над мировыми энергетическими ресурсами. Многие государства обладают крайне ограниченными запасами ископаемого органического топлива, что заставляет их выполнять поиск доступной альтернативы. В связи с активным развитием торгово-экономических отношений между развивающимися странами мира дефицит ресурсов на рубеже XX – XXI вв. способствует развитию научных и инженерно-практических подходов в области энергосбережения. Они направлены на поиск эффективных и доступных технических решений, снижающих затраты невозобновляющихся ископаемых топливно-энергетических ресурсов на выработку единицы полезной энергии.

Однако предложение эффективных решений – достаточно сложная научно-техническая задача, так как успех ее решения зависит от многих факторов, в реальности сочетающихся между собой далеко не всегда предсказуемым образом. Сложности в эксплуатации энергоустановок имеются в тех регионах нашей страны, которые преимущественно пытаются использовать местные газовые энергетические ресурсы: биогаз, шахтные газы, попутные газы и пр. Данные ресурсы являются невзаимозаменяемыми друг относительно друга газами, к тому же состав их, в ряде случаев, может во времени сильно изменяться, что существенно усложняет качественное и эффективное их сжигание с максимальным удельным энерговыделением в реакционной зоне тепловой установки.

Для достижения хороших результатов эффективности сжигания подобных видов топлива с изменяющимся во времени составом следует разработать систему автоматического регулирования, функции которой позволяют не только контролировать в режиме реального времени, получающиеся в процессе работы параметры, но также производить запись важных данных с последующей их обработкой и корректировкой.

Такая система автоматического регулирования технически должна заменять оператора котельной по «полной функции», что позволяет в данном случае отметить внедрение в нее функций искусственного интеллекта (ИИ).

Методы

Энергоэкологическая оптимизация предусматривает меры приборного контроля физико-химических процессов, влияющих на горение топлива, с последующей оценкой их влияния на качество работы энергоустановки, внедрение перспективных технических решений, направленных на снижение как удельного расхода топлива, так и содержания вредных выбросов в окружающую среду с продуктами сгорания топлива [1, 2].

Для выявления энергоэкономической эффективности качества работы тепловых энергоустановок могут использоваться следующие показатели:

- экономические – учитывают при проектировании топливосжигающих тепловых энергоустановок;
- режимные – характеризуют активность эксплуатации топливосжигающего оборудования и условия его работы;
- энергетические – зависят от технологических особенностей сжигания топлива, определяют величину полезно использованной теплоты сгорания топлива от его полного ресурса, содержащегося в топливе.

В основном данные показатели применяются при проектировании, а также при проведении режимно-наладочных испытаний и организации расчетов технико-экономических показателей работы тепловых энергоустановок. Однако часть из них практически может быть использована в электронных системах для контроля параметров и автоматического управления рабочими органами устройств, отвечающих за организацию сжигания топлива с целью повышения эффективности [3–5].

Эффективность сжигания топлива обычно оценивается коэффициентом полезного действия (КПД) брутто $\eta_{бр}$, т. е. величиной отношения количества отпускаемой котлоагрегатами тепловой энергии в систему теплоснабжения к располагаемой (общевырабатываемой) ее величине.

Для газовых котлоагрегатов, согласно обратному тепловому балансу, уравнение представляет собой разность между полным количеством выделившейся в результате сгорания топлива теплоты и суммой тепловых потерь [5, 6]:

$$\eta_{бр} = 100 - \Sigma q_{пот} = 100 - (q_2 + q_3 + q_5), \quad (1)$$

где $\eta_{бр}$ – полезно используемая теплота (КПД котлоагрегата), %; q_2 – потери теплоты с уходящими газами, %; q_3 – потери теплоты с химическим недожогом топлива, %; q_5 – потери теплоты через наружные ограждения котлоагрегата, %.

Потери теплоты с уходящими газами в основном зависят только от температуры уходящих газов и коэффициента избытка воздуха α. Таким образом, контролируя датчиком температуру уходящих газов за тепловой установкой, можно в режиме реального времени по данному параметру осуществлять воздействие на рабочие органы, влияющие на значение данной величины в процессе работы установки.

Потери теплоты с химическим недожогом топлива вычисляются по зависимости [3, 7]

$$q_3 = \frac{Q_3}{Q_p^p} 100, \quad (2)$$

где Q_3 — потери теплоты с химическим недожогом топлива, кДж/м^3; Q_p^p — располагаемая теплота, вносимая в топочное пространство котлоагрегата, кДж/м^3.

Концентрация компонентов недожога в продуктах сгорания топлива влияет на Q_3. Однако известно, что в последнюю очередь во всех многостадийных цепочках процессов горения органического топлива выгорает оксид углерода CO. Следовательно, также как и в случае с температурой продуктов сгорания, осуществляя датчиком контроль концентрации CO в продуктах сгорания в режиме реального времени, можно, воздействуя на орган регулирования, выводить работу топливосжигающей установки на наиболее экономичный режим [8—11, 15].

Потери теплоты через наружные ограждения установки зависят от теплозащитных свойств этих ограждений. Согласно существующим нормативам, температура наружной поверхности тепловых энергоустановок не должна превышать 45...50 °С. При эксплуатации установки q_5 будет коррелироваться только тепловой нагрузкой. Таким образом, данная величина закладывается в виде функции, зависящей от тепловой нагрузки.

Расход воздуха, подаваемого на горение (действительный расход влажного воздуха $V_д^{вл}$), вычисляют из выражения [7]

$$V_д^{вл} = (V_т^с + 0{,}00214 d_в V_т^с)\alpha_г, \quad (3)$$

где $V_т^с$ — теоретический расход сухого воздуха, м^3/м^3; $d_в$ — влагосодержание воздуха, г/кг; $\alpha_г$ — коэффициент избытка воздуха.

Как видно из формулы (3), расход воздуха зависит от состава топлива, влажности воздуха и коэффициента избытка воздуха в горелке. На данный коэффициент влияют физические и химические процессы, вызываемые горелкой в топочном пространстве тепловой установки. В большей степени α определяется активностью процессов подготовки газовоздушной смеси. Чем быстрее по времени и равномернее протекает этот процесс, тем меньшее значение будет иметь $\alpha_г$. Газовые кинетические горелки с полным предварительным смешением имеют наименьшие значения $\alpha_г$, диффузионные горелки без предварительного смешения газа с воздухом — наибольшее значение.

В случае организации сжигания жидкого топлива $\alpha_г$ будет зависеть от активности испарения капель и дальнейшего процесса смесеобразования, однако в сравнении с газовыми горелками значения $\alpha_г$ обычно выше. При слоевом сжигании твердых видов топлива на коэффициенты воздуха влияют организация равномерности воздухораспределения по площади колосниковой решетки, а также химический состав, размер кусков и качество сортировки топлива. Чем выше неравномерность воздухораспределения по площади колосниковой решетки и больше процент выхода летучих и размер кусков, тем выше значение коэффициента избытка воздуха $\alpha_г$ [1].

Однако какой бы вид топлива в тепловой установке не использовался и какой бы метод его сжигания не реализовывался, в ряде случаев всегда можно отыскать такое значение коэффициента избытка воздуха, при котором будет наблюдаться максимально возможное значение КПД.

Наиболее высокие значения КПД фиксируются при организации горения ближе к стехиометрическому соотношению ($\alpha_г = 1$) по уравнениям:

$$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O + Q; \quad (4)$$

$$CH_4 + 2O_2 + 2 \cdot 3{,}76N_2 = CO_2 + 2H_2O + 7{,}52N_2 + Q. \quad (5)$$

В этом случае будут максимальные энерговыделения Q при горении. На практике организовать такой процесс не представляется возможным вследствие сильного влияния физических процессов на химические процессы.

В реальности энергоэффективная работа установок зависит от качества коррекции величины $\alpha_г$ и поддержания ее минимального значения, соответствующего реализуемой технологии сжигания топлива.

Если $\alpha_г$ будет ниже минимального значения, определяемого технологией сжигания топлива $\alpha < \alpha_г$, тогда процесс сжигания пойдет по реакциям:

при $\alpha < \alpha_г$:

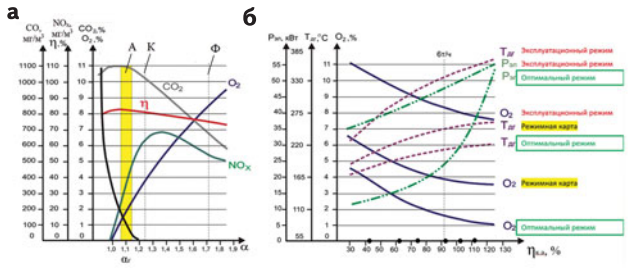
$$CH_4 + O_2 + N_2 \rightarrow CO_2 + CO + H_2O + N_2 + Q\downarrow; \quad (6)$$

при $\alpha << \alpha_г$:

$$CH_4 + 1{,}5O_2 + 1{,}5 \cdot 3{,}76N_2 \rightarrow CO + 2H_2O + 5{,}64N_2 + Q\downarrow\downarrow; \quad (7)$$

при $\alpha <<< \alpha_г$:

$$CH_4 + O_2 + 3{,}76N_2 \rightarrow C + 2H_2O + 3{,}76N_2 + Q\downarrow\downarrow\downarrow. \quad (8)$$



а — зависимости влияния коэффициентов избытка воздуха на качество выгорания газа; б — зависимости температуры уходящих газов $T_{дг}$, °С, потребляемой мощности электродвигателя вентилятора $P_{эл}$, кВт, и концентрации кислорода в уходящих газах O_2, %, от коэффициента нагрузки котлоагрегата $\eta_{к.а.}$, %; А — зона оптимальной работы; К — зона работы котлоагрегата по режимной карте; Ф — зона работы котлоагрегата фактическая

Рис. 1. ***Зависимости регулирования режимов работы парового котла ДКВр-6,5-13***

Реакции показывают, что при снижении фактического значения α ниже $\alpha_г$ будет наблюдаться уменьшение полезного энерговыделения, способствующего сокращению тепловых напряжений топочного объема установки и увеличению концентраций химического недожога q_3. При большом недостатке воздуха начнут активироваться реакции образования частиц сажи, которые, агломерируясь в топочном пространстве, могут быть физически вынесены потоком продуктов сгорания из активных зон реакции топочного пространства. Впоследствии образуется накопление сажистых отложений на хвостовых поверхностях нагрева.

При увеличении $\alpha_г$ химический недожог будет, как правило, отсутствовать, а процесс пойдет по реакциям:

при $\alpha \geqslant \alpha_г$:

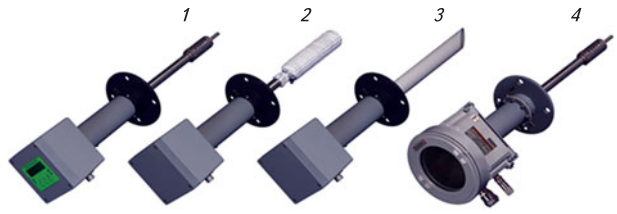
$$CH_4 + 2O_2 + 2 \cdot 3{,}76N_2 \rightarrow \rightarrow CO_2 + O_2 + 2H_2O + NO_x\uparrow + 7{,}52N_2 + Q; \quad (9)$$

при $\alpha >> \alpha_г$:

$$CH_4 + 2O_2 + 2 \cdot 3{,}76N_2 \rightarrow \rightarrow CO_2 + O_2 + 2H_2O + NO_x\uparrow\downarrow + 7{,}52N_2 + Q. \quad (10)$$

Реакции показывают, что при увеличении фактического значения коэффициента избытка воздуха α выше $\alpha_г$, вследствие роста тепловых напряжений топочного объема, наблюдается повышение концентраций в уходящих газах оксидов азота. При дальнейшем увеличении коэффициента избытка воздуха при снижении тепловых напряжений топочного объема, будут снижаться концентрации оксидов азота. При этом выделившаяся тепловая энергия расходуется на повышение энтальпии избыточно подаваемого воздуха.

Отсюда следует, что при эксплуатации топливосжигающих установок наиболее предпочтительный режим, дающий наименьшие значения q_2 и q_3, а при этом КПД стремится к максимальной величине, будет режим, где прохождение химических реакций характеризуется уравнением (7).



1 — «Н» для нормальной среды; 2 — «П» для запыленной среды; 3 — «Т» для высокотемпературной среды; 4 — «Ex» для взрывоопасной среды

Рис. 2. ***Семейство комбинированных анализаторов дымовых газов моделей КАДГ, ИАКГ, КАКГ***

Результаты

При эксплуатации топливосжигающих установок на примере отопительных котлоагрегатов обычно составляются режимные карты, которые выявляют оптимальную настройку оборудования на наиболее энергоэффективный режим работы. Однако такая настройка производится периодически, поэтому на практике с течением времени фактический эксплуатационный режим работы котлов изменяется и становится неэффективным, что следует из графических зависимостей *(рис. 1),* построенных на основании опытных данных и вышепредставленных химических зависимостей (2—8) [6, 12, 13].

Зона, определяемая уравнением (9), находится в области $\alpha \geqslant \alpha_г$ (А — зона оптимальной работы, *рис. 1а*). При этом режиме будут наблюдаться в продуктах сгорания минимальные концентрации O_2 и значения температуры $T_{дг}$ *(рис. 1б)*. Работа тепловой установки в данной области практически может поддерживаться только за счет реализации методов автоматического регулирования (подстройки режимных параметров работы) в режиме реального времени.

Для практической реализации возможности данного регулирования требуется постоянно выполнять автоматической контроль КПД топливосжигающей установки. Такое возможно технически реализовать путем внедрения в систему электронного вычислителя, в работу которого заложены функции, входящие в состав уравнения обратного теплового баланса (1). Вычисление КПД при этом происходит в режиме реального времени по информации, получаемой от датчиков концентрации СО и температуры потока продуктов сгорания $T_{уг}$. Для контроля показателей могут использоваться датчики в составе стационарных комбинированных при-

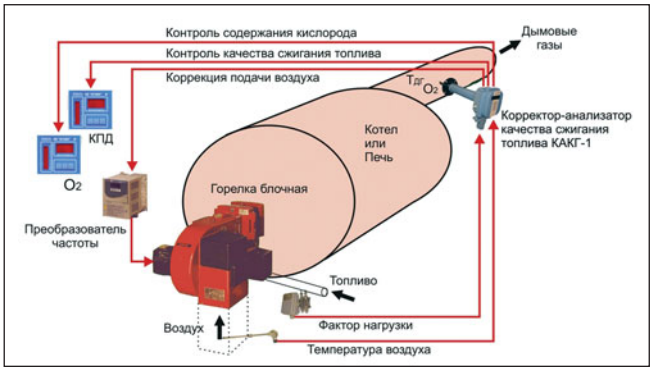


Рис. 3. ***Функциональная схема автоматического управления горелкой с экономичным сжиганием топлива, система «Факел-3»***

боров производства НПФ «Уран-СПб». Они содержат интегрированные системы вычисления КПД с функциями анализа данных: КАДГ — корректор-анализатор дымовых газов; ИАКГ — интеллектуальный анализатор качества горения; КАКГ — корректор-анализатор качества горения *(рис. 2).*

Практическим примером реализации концепции качества сжигания газового топлива в отопительных котлах может служить система «Факел-3», разработанная НПФ «Уран-СПб» [6, 12—14]. Данная система *(рис. 3)* позволяет в режиме реального времени автоматически устойчиво сохранять высокое качество выгорания топлива с максимальным энерговыделением, поддерживая коэффициент избытка воздуха в области А *(см. рис. 1а).*

При работе системы автоматического регулирования режимных параметров работы горелки в продуктах сгорания контролируются следующие параметры концентрации кислорода O_2, CO, NO_x и температура уходящих газов $T_{дг}$.

Система «Факел-3» надежно работает и качественно выводит режим горения в зону оптимального режима при изменении теплового режима установки в случае, если параметры температуры и влажности подаваемого на горение воздуха, состав и теплота сгорания топлива, технические особенности тепловой установки относительно стабильны. Однако, если данные параметры не стабильны, то зависимость концентраций O_2, CO, NO_x в продуктах сгорания от количества подаваемого для горения воздуха приобретает нелинейный вид, что приводит к весьма сложнопрогнозируемым в кинетике химическим реакциям горения, и данная схема уже не позволит вывести процесс горения в зону оптимального режима.

Обсуждение

Для организации процесса горения топлива с максимально возможной эффективностью требуется разработать систему саморегулирования с использованием искусственного интеллекта (ИИ) *(рис. 4).*

В данной системе управляющие воздействия на механизм подачи воздуха будут формироваться на основе текущего анализа параметров продуктов сгорания на выходе топливосжигающей установки и подаваемого воздуха на входе в горелку. Система должна самостоятельно выявить степень влияния расхода подаваемого на горение воздуха от изменения параметров уходящих газов под воздействием возмущающих факторов [16].

Будем считать подаваемый на горение воздух на входе в горелку параметром воздействия на систему управления (управляющим сигналом), а параметры уходящих газов — многомерным результатом управляющего воздействия на систему управления (выходные сигналы).

Такая система станет устойчивой, если при изменении входного сигнала выходные сигналы не будут вне заданного диапазона значений выходного параметра, который задается оператором.

Впоследствии при настройке система должна стать самообучающейся. Управляя входным сигналом, она автоматически запоминает изменения выходных сигналов, по записанным данным анализирует направление и скорость изменения параметров. В процессе обучения (адаптации) система в течение некоторого времени добивается цели регулирования, по которой значения выходных сигналов не будут находиться за пределами допустимых

Рис. 4. ***Схема самообучающейся регулируемой системы с внедрением блока искусственного интеллекта (блок ИИ)***

значений. По завершении этапа адаптации система обеспечивает поддержание параметров уходящих газов в заданных пределах.

В первом приближении алгоритм работы блока искусственного интеллекта (блок ИИ), заменяющего оператора котельной, следующий:

• устанавливаются предварительные диапазоны допустимых значений измеряемых параметров уходящих газов O_2, CO, NO_x (пороговые значения);

• определяется степень влияния изменения входного параметра расхода воздуха на изменение каждого выходного параметра блока измерения параметров уходящих газов (подбирается чувствительность системы на внешнее воздействие);

• производится последовательная автоматическая запись в память выходных параметров блока измерений и их сравнение с установленными ранее пороговыми значениями;

• при выходе любого параметра за пределы принятого диапазона блок ИИ осуществляет коррекцию входного параметра на установленную величину (единицу коррекции) в ту или другую сторону относительно вышедшего за пределы параметра;

• выполняется пошаговая коррекция с целью минимизации одного из параметров (например CO) с одновременным анализом всех остальных параметров. Коррекция продолжается до момента выведения каждого параметра в пределы, не превышающие установленных пороговых значений;

• в случае выхода на очередном шаге коррекции другого параметра за пределы установленного порогового значения система автоматически выполняет операцию регулирования уже этого параметра в пределы, не превышающие установленных пороговых значений;

• после проведения многократных итераций коррекции данных система выявит точку оптимального соотношения параметров и выйдет на стабильный режим, при котором все параметры окажутся в оптимальной зоне А, обеспечивающей наиболее высокий КПД энергоустановки.

Вывод

Оснащение предлагаемыми системами автоматического регулирования процессов сжигания газового топлива в энергетических установках промышленного назначения и жилищно-коммунального хозяйства обеспечит:

• снижение потребляемой электрической мощности дутьевым оборудованием топливосжигающих тепловых энергоустановок (на практике до 50 %);

• рациональное расходование энергетических ресурсов в процессе эксплуатации энергоустановок, что позволяет сократить расход топлива (на практике до 10 %);

• оптимизировать действия обслуживающего персонала энергетических объектов, уменьшить вероятность возникновения аварий и отказов оборудования;

• снижение выхода NO_x с дымовыми газами (на практике — до 35—45 %).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Shkarovskiy A., Maliszewska A.* Study of air pollution with combustion products of gas stoves in gas-supplied apartments [Исследование загрязнения воздуха продуктами сгорания газовых плит в газифицированных квартирах] // Architecture and Engineering. 2018. No. 3(1). Pp. 38–43.
2. *Shkarovskiy A., Koliienko A., Turchenko V.* Interchangeability and standardization of the parameters of combustible gases when using hydrogen [Взаимозаменяемость и стандартизация параметров горючих газов при использовании водорода] // Architecture and Engineering. 2022. No. 7(1). Pp. 33–45.
3. *Воликов А. Н., Новиков О. Н., Окатьев А. Н.* Повышение эффективности сжигания топлива в котлоагрегатах // Энергонадзор-информ. 2010. № 1(43). С. 54–57.
4. *Воликов А. Н., Новиков О. Н., Окатьев А. Н.* Экологичная экономичность // Энергонадзор-информ. 2010. № 6(15). С. 16–19.
5. *Воликов А. Н., Маслов Ю. В., Новиков О. Н.* Энергоэкологическая реабилитация – экономичный путь повышения энергоэффективности предприятия // Инженерные системы. 2011. № 2. С. 42–49.
6. *Шкаровский А. Л., Новиков О. Н., Новикова А. В.* [и др.]. Разработка нового семейства интеллектуальных систем управления качеством сжигания топлива // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 12. С. 556–561.
7. *Равич М. Б.* Эффективность использования топлива. М. : Наука, 1977. 344 с.
8. *Варданян М. А.* Ресурсосберегающая и природоохранная деятельность теплоэнергетического предприятия // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 6(77). С. 228–234.
9. *Воликов А. Н.* Использование древесных отходов в отопительных и промышленных котельных // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 4(33). С. 192–195.
10. *Власенко С. А., Росляков П. В., Сердюков В. А.* Методические подходы к определению технологических показателей наилучших доступных технологий при актуализации информационно-технического справочника ИТС 38-2017 «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии» // Инновации. Наука. Образование. 2022. № 55. С. 31–39.

11. *Либерман Н. Б.* Справочник по проектированию котельных установок систем централизованного теплоснабжения. Общие вопросы проектирования и основное оборудование. М. : Эколит, 2011. 224 с.
12. *Новиков О. Н., Ананченко И. В., Минчев Н. В.* Контроль эффективности и качества промышленного сжигания топлива // Энергетическая политика. 2024. № 3(194). С. 54–65.
13. *Новиков О. Н., Артамонов Д. Г., Шкаровский А. Л.* [и др.]. Энергоэкологическая оптимизация сжигания топлива в котлах и печах регулированием соотношения «топливо–воздух» // Промышленная энергетика. 2000. № 5. С. 57–60.
14. *Новиков О. Н., Окатьев А. Н., Крыжова Н. С.* Приборы контроля эффективности и качества промышленного сжигания топлива // Юбилейные чтения, посвященные научной школе измерительных информационных технологий : сб. науч. тр. Санкт-Петербург : СПбГПУ, 2020. С. 117–131.
15. *Цыбулин А. Ф., Житников С. В., Осипенко А. А.* [и др.]. Результаты эксплуатации и испытаний паровых котлов БМ-35РФ с горелками различного типа. Проблемы и пути их решения // Энергетик. 2024. № 9. С. 36–39.
16. *Чумаков С. И., Шишкевич М. В., Ананченко И. В.* [и др.]. Построение моделей машинного обучения для повышения эффективности процессов горения // Современные научные исследования : сб. статей XIX Междунар. науч.-практ. конф. «Актуальные вопросы, Достижения и Инновации». Пенза : МЦНС «Наука и просвещение», 2021. С. 52–58.

R E F E R E N C E S

1. Shkarovskiy A., Maliszewska A. Study of air pollution with combustion products of gas stoves in gas-supplied apartments. *Architecture and Engineering*, 2018, no. 3(1), pp. 38–43.
2. Shkarovskiy A., Koliienko A., Turchenko V. Interchangeability and standardization of the parameters of combustible gases when using hydrogen. *Architecture and Engineering*, 2022, no. 7(1), pp. 33–45.
3. Volikov A. N., Novikov O. N., Okatev A. N. Improving the efficiency of fuel combustion in boilers. *Energonadzor-inform*, 2010, no. 1(43), pp. 54–57. (In Russ.).
4. Volikov A. N., Novikov O. N., Okatev A. N. Eco-friendly economy. *Energonadzor-inform*, 2010, no. 6(15), pp.16–19. (In Russ.).
5. Volikov A. N., Maslov Yu. V., Novikov O. N. Energy-ecological rehabilitation is an economical way to increase the energy efficiency of an enterprise. *Inzhenernye sistemy*, 2011, no. 2, pp. 42–49. (In Russ.).
6. Shkarovskij A. L., Novikov O N., Novikova A. V. et al. Development of a new family of intelligent fuel quality management systems. *Sovremennye naukoemkie texnologii*, 2016, no. 12, pp. 556–561. (In Russ.).
7. Ravich M. B. *Effektivnost ispolzovaniya topliva* [Fuel efficiency]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 344 p. (In Russ.).
8. Vardanyan M. A. Resource-saving and environmental protection activities of a thermal power plant. *Vestnik grazhdanskix inzhenerov*, 2019, no. 6(77), pp. 228–234. (In Russ.).
9. Volikov A. N. The use of wood waste in heating and industrial boilers. *Vestnik grazhdanskix inzhenerov*, 2012, no. 4(33), pp. 192–195. (In Russ.).
10. Vlasenko S. A., Roslyakov P. V., Serdyukov V. A. Methodological approaches to determining the technological indicators of the best available technologies in updating the ITS 38-2017 Information and Technical Handbook "Fuel combustion in large installations for energy production". *Innovacii. Nauka. Obrazovanie*, 2022, no. 55, pp. 31–39. (In Russ.).
11. Liberman N. B. Spravochnik *po proektirovaniyu kotelnyh ustanovok sistem centralizovannogo teplosnabzheniya. Obshhie voprosy` proektirova-niya i osnovnoe oborudovanie* [Handbook on the design of boiler installations of district heating systems. General design issues and basic equipment]. Moscow, Ekolit Publ., 2011. 224 p. (In Russ.).
12. Novikov O. N., Ananchenko I. V., Minchev N. V. Control of efficiency and quality of industrial fuel combustion. *Energeticheskaya politika*, 2024, no. 3(194), pp. 54–65. (In Russ.).
13. Novikov O. N., Artamonov D. G., Shkarovskij A. L. et al. Energy-ecological optimization of fuel combustion in boilers and furnaces by regulating the fuel-air ratio. *Promyshlennaya energetika*, 2000, no. 5, pp. 57–60. (In Russ.).
14. Novikov O. N., Okatev A. N., Kryzhova N. S. Devices for monitoring the efficiency and quality of industrial fuel combustion. *Yubilejnye chteniya, posvyashhennye nauchnoj shkole izmeritelnyx informacionnyx tehnologij* [Anniversary readings dedicated to the scientific school of measuring information technologies]. St. Petersburg, SPbGPU Publ., 2020, pp. 117–131. (In Russ.).
15. Cybulin A. F. Zhitnikov S. V. Osipenko A. A. et al. The results of operation and testing of steam boilers BM-35RF with burners of various types. Problems and ways to solve them. *Energetik*, 2024, no. 9, pp. 36–39. (In Russ.).
16. Chumakov S. I., Shishkevich M. V., Ananchenko I. V. et al. Building machine learning models to improve the efficiency of gorenje processes. *Sovremennye nauchnye issledovaniya. XIX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Aktualnye voprosy, Dostizheniya i Innovacii»*. Penza, Nauka i prosveshhenie Publ., 2021, pp. 52–58. (In Russ.).