

Дмитришин С.С.

Одеський національний політехнічний університет

Давидов В.О.

Одеський національний політехнічний університет

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГОРІННЯ ВУГЛЕВОДНИХ ГАЗІВ У ПАРОГЕНЕРУЮЧИХ УСТАНОВКАХ ЗА РАХУНОК ЗМІНИ ВІДНОШЕННЯ ПАЛЬНЕ/ПОВІТРЯ

Стаття спрямована на вирішення наукового завдання, що полягає в підтримці оптимального співвідношення під час спалювання в повітрі вуглеводневого газу невідомого складу за рахунок пошуку максимальної температури горіння при забезпеченні заданих характеристик факела полум'я в разі зміни поточної витрати повітря.

Одним із завдань персоналу є підтримка оптимального режиму котла за цих умов його роботи, що відповідає максимально можливому значенню ККД котла нетто. У зв'язку із цим виникає необхідність визначення впливу статичних характеристик котла – навантаження, температури живильної води, повітряного режиму топки й характеристики палива – на показники його роботи в разі зміни значень перерахованих параметрів.

Для вирішення сформульованого завдання необхідно визначити статичні та динамічні характеристики об'єкта керування. Також потрібно розробити математичну модель об'єкта керування, модель визначення умовної формули вуглеводневого палива за вимірними витратами повітря та вуглеводневого газу й температури полум'я та методи реалізації його ефективного спалювання в парогенеруючому обладнанні за рахунок зміни співвідношення паливо-повітря з метою забезпечення максимальної ефективності.

Ключові слова: *теплова електростанція, паровий котел, автоматизація, математична модель, передавальна функція.*

Постановка проблеми. В основі сучасного інноваційного суспільства лежить забезпечення його паливно-енергетичними ресурсами (ПЕР), ефективність отримання й перетворення яких впливає на кінцеву енергоємність національного доходу.

Поточні значення питомих енергетичних показників сукупного національного доходу України в разі перевищують аналогічні показники країн Євросоюзу. Причина такого стану визначається не тільки технологічною відсталістю паливно-енергетичного комплексу та житлово-комунального сектора національної економіки, а й орієнтуванням усієї економіки України на неінноваційні ринки.

Звичайно, низка підприємств нафтопереробної та металургійної промисловості прагне замінити природний газ власними несертифікованими газами, які утворюються під час переробки сировини для власного енергозабезпечення. На цих підприємствах часто утворюються нерегулярні надлишки таких газів, які, як правило, утилізуються неефективно. Доцільно було б такі вторинні енергоресурси використовувати з максимальною ефективністю для вироблення промислового пара

іншими підприємствами або електричної енергії на теплових електростанціях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах [1, с. 17; 2, с. 259] проводиться аналіз впливу викидів заводів, що займаються спалюванням природного газу.

У праці [3, с. 83] розглянута модель спалювання природного газу, мазуту, а також несертифікованого газу, при цьому прийнято реконструювати теплообмінник у вертикальне положення, а також вихідні димові гази розділити на два потоки, один із яких веде назад у паровий котел.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка моделей і методів підвищення ефективності процесів горіння вуглеводневих газів змінного складу в камерах згоряння за рахунок постійної зміни відношення пальне/повітря для отримання максимальної температури факела в камері згоряння парогенеруючих установок.

Досягнення мети здійснюється вирішенням таких дослідницьких завдань:

– аналіз способів отримання вуглеводневих газів змінного складу й особливостей їх спалювання в парогенеруючих установках;

– розробка імітаційної моделі спалювання вуглеводневих газів змінного складу в камерах згоряння, вихідними величинами якої є виміряні технологічні параметри: температура факела й витрати пального та окислювача;

– розробка методу й моделі забезпечення сталості заданих характеристик генерації пари в разі зміни в часі якісного складу вуглеводневого газу;

– упровадження методу й моделей для визначення ефективності реальних енергоустановок.

Виклад основного матеріалу дослідження.

На підприємствах нафтопереробки технологією поділу нагрітої в печах сировини в ректифікаційних колонах передбачено використання пари. Для цих цілей на виробничому майданчику, крім технологічних установок, розміщують парові котли для його генерації. Генерація пари здійснюється при пускових операціях нафтопереробки за рахунок сертифікованого природного газу, теплотворна здатність якого становить 35,83 МДж/кг. Надалі під час пуску всіх технологічних установок у процесі виробництва світлих нафтопродуктів утворюється надлишок вуглеводневих газів. Частково ці гази використовуються в печах установок для розігріву сировини й повною мірою для забезпечення генерації пари.

Під час режимної наладки парових котлів основною вимогою є популярність і сталість теплотворної здатності. У низці випадків шляхом організації відбору технологічних газів від окремих установок це вдається. У загальному випадку всі технологічні установки скидають отримані гази в різні заводські колектори, звідки споживачі-установки його використовують для теплоенергетичних потреб. Так як технологічні установки, що виробляють нафтопродукти, працюють у різних змінних режимах, у заводських газових колекторах неможливо отримати газ постійного складу, а отже, постійної теплотворної здатності. Особливо це виявляється при появі водневмісних газів при малих щільностях. А це, як наслідок, не дає можливості забезпечити генерацію пари при дотриманні екологічних норм на викиди й погіршує економічну доцільність виробництва пари.

Для моделювання процесу генерації пари розглянемо три парові котли типу ГМ-50 з реальною продуктивністю пара по 50 т/год., що працюють на один паропровід, з використанням вуглеводневого газу (рис. 1). Розробимо модель котлів, що подають пар в один паровий колектор, при їх газопостачанні несертифікованими газами з граничними характеристиками, які можуть випадковим чином змінюватися в часі.

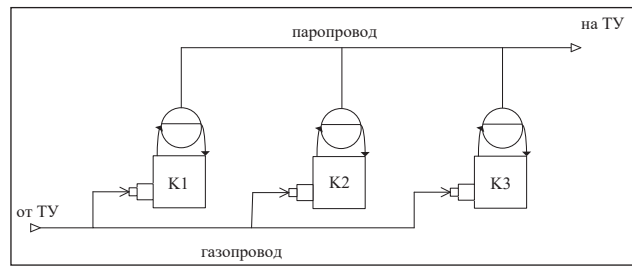


Рис. 1. Схема установки котлів, що працюють на один паропровід

За попередньою оцінкою, під час роботи одного котла тепловиділення Q_f (тут і далі позначення) в топці для двох несертифікованих газів становили:

– для вуглеводневого газу зі щільністю 1,884 кг/м³ і теплотворною здатністю 46,31 МДж/кг паропровід 52 МВт;

– для водневмісного газу зі щільністю 0,718 кг/м³ і теплотворною здатністю 78,27 МДж/кг паропровід 7,96 МВт.

Для метану СН₄, щільність якого 0,7168 кг/м³ і теплотворна здатність 35,83 МДж/кг, тепловиділення в топці становитиме 14,84 МВт. Для отримання моделі об'єкта його розбили на ділянки по каналах «витрата живильної води – рівень», «витрата пари – рівень», а також «температура живильної води – рівень» і «теплосприйняття екранів – рівень» [4, с. 50]. Питання спалювання газів, отриманих від промислових установок, або, як їх можна назвати, несертифікованих газів відкрите не тільки в нафтопереробній промисловості, а й на промислових печах. У роботі показано, що використання такого роду газів дає змогу заощадити витрати на сертифіковане паливо – природний газ – та уникнути його надмірного використання. Також варто зауважити, що спалювання водневмісного газу сприяє зниженню викидів СО₂ в навколишнє середовище. Отже, порушується й екологічний момент. Математична модель розбита на 6 ділянок, показаних на рис. 2, для зручності сприйняття. Кожна ділянка пронумерована. Вихідні дані однієї ділянки є вхідними для іншої. Кожна ділянка описана диференціальним рівнянням. Як буде показано далі, деякі ділянки будуть описані двома диференціальними рівняннями. Ділянки 1 і 2 описують диференціальні рівняння, що належать до радіаційної та конвективної поверхонь нагріву. Ділянки 1' і 2' описують допоміжні диференціальні рівняння, що зв'язують вхідні дані в модель із виділенням тепла шляхом радіації й конвекції. Ділянка 3 описує процеси, що протікають в барабані рівня в котлі. Ділянка 4 описує трубопровід.

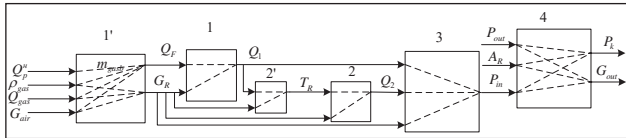


Рис. 2. Схема ділянок парового котла

В основу моделі покладено закони збереження енергії і мас.

$$\sum Q_i = \sum Q_{out_i}, \quad (1)$$

де Q_i , Q_{out_i} – кількість підведеної та відведеної енергії в системі за одиницю часу, Вт.

$$G_{in} = G_{out}, \quad (2)$$

де G_{in} , G_{out} – кількість речовини на вході й виході розглянутої ділянки, кг/с.

Допущення, прийняті для математичної моделі:

– склад, який змінюється, вуглеводневого палива, що призводить до зміни нижчої теплотворної здатності палива Q_p^H , МДж/кг і густини ρ_{gas} , кг/м³, визначає витрату газу щодо співвідношення:

$$G_{gas} = Q_p^H \cdot \rho_{gas}, \quad (3)$$

де G_{gas} – масова витрата палива, кг/с;

– рішення нелінійного рівняння в тимчасовій ділянці здійснюється його лінеаризацією при малих збільшеннях.

Розглянемо ділянку 3 (рис. 2), що описує барабан котла. Аналіз схеми показав, що на вході барабана котла враховуються такі характеристики: витрата пару, теплота, отримана шляхом теплообміну радіаційними й конвективними поверхнями. Виходячи із цього, варто прийняти припущення, а саме: рівень води в барабані котла підтримується за рахунок керування подачею живильної води трьохімпульсним регулятором рівня. Також передбачається, що регулятор рівня компенсує зменшення рівня води в барабані котла за рахунок зміни витрати води з барабана котла з безперервною і періодичною продувкою. Вплив зміни ентальпії живильної води внаслідок зміни її витрати регулятором рівня впливає на величину генерації пари в барабані котла, і, як наслідок, тиск насиченої пари дуже малий порівняно з впливом на генерацію пари тиску в барабані котла й порівняно з тепловідленнями в котельній камері.

Розглянемо парові установки, по якій протікає стисливе середовище – газ (пар). Повна модель процесів, що протікають у стисливій рідині, задіє рівняння термодинаміки, досить складні з математичного погляду. Тому для аналізу паросилової установки прийнято використовувати наближену модель. Уведемо такі припущення: наявні зміни тиску зумовлено тертям у трубопроводах,

дроселюванням у регулюючих клапанах, а також стисненням або розширенням у машинах, що працюють за принципом закінчення. Також варто врахувати, що в разі зміни тиску змінюється щільність середовища, а, отже, і її обсяг.

При постійному входному й вихідному тиску системи їх збільшення дорівнюють нулю.

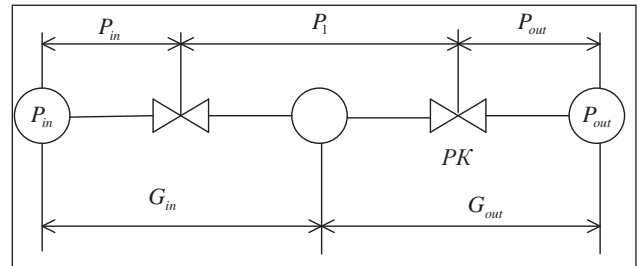


Рис. 3. Графічна ілюстрація зміни тиску в паропроводі, де P_m – тиск у барабані котла, Па; P_1 – тиск на виході з котла, Па; P_{out} – тиск у паропроводі, Па

У процесі роботи котла на загальну парову магістраль істотним є не тиск вологої пари ΔP_1 усередині пароводяного тракту, а тиск перегрітої пари ΔP_M у паропроводі. Вхідними параметрами для моделі ділянки паропроводу є тиск на вході $\varnothing P_{nomp}$, тиск від споживачів і на виході ΔP_p з паропроводу, ступінь відкриття регулюючого клапана $\Delta \phi_D$.

Іншим вихідним параметром, зміну якого в перехідному процесі необхідно знайти, є витрата пари в паропроводі ΔG_p . Визначається сумою витрат пари з кожного котла. $\Delta G_p = \sum G_{ki}$, де G_{ki} – витрата пари на виході з котла.

Використовуючи [5, с. 57; 6, с. 93], розраховували коефіцієнти при диференціальних рівняннях і промоделивали модель у середовищі MatLab. На рис. 4–6 представлені графіки зміни витрати пари у відхиленнях на виході одного котла при збуренні теплотворною здатністю газу. З графіків видно, що при 10% роботі одного котла паропроодуктивність котлів при різних складах газів значно відрізняється. У процентних співвідношеннях відносно відхилення паропроодуктивності газів для 1 несертифікованого палива становить на 43% менше еталонного, для другого – на 193% більше, сертифікований газ прийнятий як еталонний.

Отже, під час роботи трьох котлів продуктивність пари зростає. Для підтримки заданої продуктивності пари навантаження котлів для газів буде різним. Для отримання продуктивності парт 25 т/год. для сертифікованого палива необхідно задіяти один котел продуктивністю 50 т/год. на потужність в 50%.

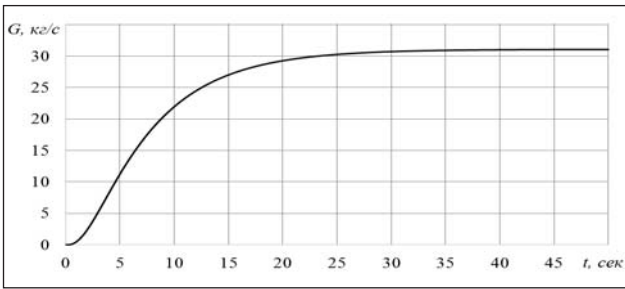


Рис. 4. Графік зміни збільшення витрати пари при збуренні теплотворної здатності газу в 10% (для сертифікованого палива)

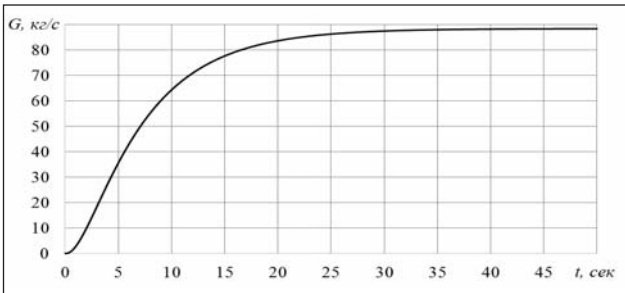


Рис. 5. Графік зміни збільшення витрати пари при збуренні теплотворної здатності газу в 10% (для несертифікованого вуглецевого палива)

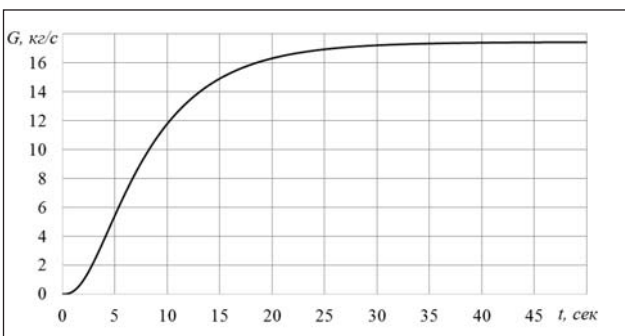


Рис. 6. Графік зміни збільшення витрати пари при збуренні теплотворної здатності газу в 10% (для несертифікованого водневмісного палива)

Для несертифікованого вуглеводневого палива необхідно задіяти два котли продуктивністю 50 т/год. на 20% навантаженні. Для несертифікованого водневмісного газу – два котли продуктивністю 50 т/год. на повну потужність та один котел продуктивністю 50 т/год. на 30% навантаження.

Отже, для вироблення заданої кількості пару необхідно автоматизувати процес перемикання потужності котлів, при цьому аналізувати склад газу.

Для ілюстрації алгоритму визначення оптимального відношення паливе/повітря під час спалювання вуглеводневого газу, склад якого довільно змінюється в часі, необхідно підготувати дані. Ілюстрацію здійсимо на прикладі випад-

кової зміни в часі складу газу, який знаходиться в газовій магістралі й надходить на спалювання в промисловий барабанний котел. Припустимо, що в газовій магістралі випадковим чином може перебувати група вуглеводних газів C_nH_{2n-2} , C_nH_{2n} , C_nH_{2n+2} . На основі моделі прямої задачі розраховані максимальна температура T , парціальні тиски PCO і PNO при спалюванні одного пального в повітрі залежно від χ -мольного коефіцієнта співвідношення компонентів i , як наслідок, коефіцієнт надлишку повітря α .

На основі отриманих табличних даних побудовані залежності температури горіння одного моля пального кожного з розглянутих газів від кількості молей повітря, що надходять для його окислення (рис. 7). У кожній залежності однозначно ідентифікується максимум температури полум'я, що повністю відповідає теоретичним і практичним результатам. Максимум температури відповідає відповідному мольному стехіометричному коефіцієнту співвідношення компонентів або коефіцієнту надлишку повітря $\alpha = 1$. Зменшення практично до нуля парціального тиску CO при збільшенні коефіцієнта надлишку повітря відповідає дійсності. Так само адекватно обчислено наявність максимуму парціального тиску NO . Зменшення кількості утворення NO пов'язано зі зменшенням температури горіння.

Позначимо через $\dot{V}_{ок}$, $\dot{V}_Г$ – об'ємні витрати окислювача (повітря) й горючих газів відповідно. Для реалізації запропонованого алгоритму потрібно таке технічне забезпечення. Необхідна можливість вимірювань температури горіння газів, об'ємних витрат повітря й горючих газів. Крім того, необхідна можливість зміни витрат повітря й горючих газів, що надходять у котел. Алгоритм визначення оптимального відношення паливе/повітря при спалюванні вуглеводневого газу, склад якого довільно змінюється в часі.

Крок 1. На інтервалі часу $\Delta\tau$ вимірюється температура T й усереднюється її значення. Вимірювання температури здійснюється за фіксованих поточних i -х значеннях $\dot{V}_{окi}$ і \dot{V}_{Gi} .

Крок 2. При фіксованому значенні \dot{V}_{Gi} відбувається зміна $\dot{V}_{окi}$ на величину $\delta\dot{V}_{ок}$. Вимірюється нове значення температури $T(\dot{V}_{окi} + \delta\dot{V}_{ок})$ і визначається характер монотонності на розглянутому інтервалі зміни об'ємної витрати повітря. Якщо $T(\dot{V}_{окi}) > T(\dot{V}_{окi} + \delta\dot{V}_{ок})$, то температура T убуває на цьому інтервалі, у разі $T(\dot{V}_{окi}) < T(\dot{V}_{окi} + \delta\dot{V}_{ок})$ вона зростає. Крок 2 здійснюється до тих пір, поки подальша $i+1$ зміна $\delta\dot{V}_{ок}$ не призведе до зміни характеру монотонності на протилежний.

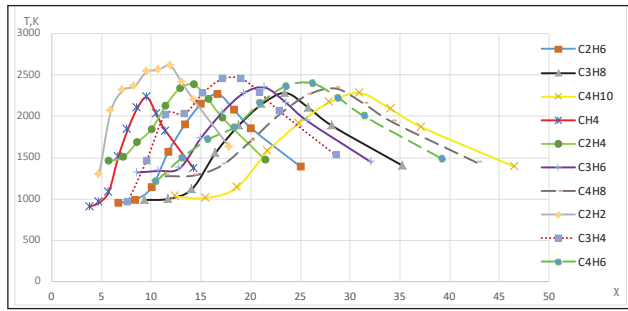


Рис. 7. Залежність зміни температури горіння T від відношення об'ємних витрат повітря/горюче $\dot{V}_{ок} / V_{г}$

Крок 3. Змінюється знак збільшення $\delta \dot{V}_{ок}$ на протилежний і здійснюється перехід на крок 1. У такому пошуковому режимі в нескінченному тимчасовому циклі розглянутий алгоритм визначає ділянку поточного екстремуму. Якісна зміна складу газу в процесі горіння призводить до пошуку ділянки нового екстремуму. По-перше, принципово нова околиця екстремуму значення

температури T може знаходитися як вище, так і нижче за поточну зону, по-друге, за значенням об'ємної витрати повітря $\dot{V}_{ок}$ – як зліва, так і праворуч від неї.

Висновки. Вирішення завдання максимального забезпечення ефективності і неперевиршення екологічних норм в умовах постійної зміни якісного складу палива вимагає впровадження нових розрахункових методів і моделей. Для визначення динамічних характеристик енергетичного парогенеруючого обладнання набула подальшого розвитку математична модель. Модель складається з рівнянь матеріального й теплового балансів, законів конвективного та променистого теплообміну і властивостей стиснутого газоподібного середовища. Для забезпечення заданого парового навантаження запропоновано метод, який базується на математичних моделях обчислення умовної формули газоподібного вуглеводневого палива й визначення динамічних характеристик парогенеруючої установки.

Список літератури:

1. Davoudia M. The major sources of gas flaring and air contamination in the natural gas processing plants. Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2013. Vol. 13. P. 7–19.
2. Niels Berghout Machteld van den Broek, André Faaij. Techno-economic performance and challenges of applying CO2 capture in the industry : A case study of five industrial plants. International Journal of Greenhouse Gas Control. 2013. Vol. 17. P. 259–279.
3. Liu Hong, Peiwen Li, Kai Wang. Optimization of PEM fuel cell flow channel dimensions—Mathematic modeling analysis and experimental verification. International Journal of Hydrogen Energy. 2013. Vol. 38 (23). P. 9835–9846.
4. Tucakovica Dragan Possibilities for reconstruction of existing steam boilers for the purpose of using exhaust gases from 14 MW or 17 MW gas turbine. Applied Thermal Engineering. 2013. Vol. 56 (1–2). P. 83–90.
5. Rusinowski Henryk, Wojciech Stanek. Hybrid model of steam boiler. Energy. 2010. Vol. 35 (2). P. 1107–1113.
6. Vujak Janusz. Optimal control of energy losses in multi-boiler steam systems. Energy. 2009. Vol. 34 (9). P. 1260–1270.
7. Новиков О.Н. Энергоэкологическая оптимизация сжигания топлива в котлах и печах регулированием соотношения «топливо-воздух». Промышленная энергетика. 2000. № 5. С. 57–60.
8. Александров В.П. Паровые котлы малой и средней мощности. Москва, 1972. 200 с.
9. Вукалович М.П. Термодинамические свойства воды и водяного пара. Москва, 1955. 93 с.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГОРЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ В ПАРОГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТАНОВКАХ ЗА СЧЁТ ИЗМЕНЕНИЯ ОТНОШЕНИЯ ТОПЛИВО/ВОЗДУХ

Статья направлена на решение научной задачи, которая заключается в поддержании оптимального соотношения при сжигании в воздухе углеводородного газа неизвестного состава за счет поиска максимальной температуры горения при обеспечении заданных характеристик факела пламени при изменении текущего расхода воздуха.

Одной из задач персонала является поддержание оптимального режима котла при данных условиях его работы, соответствующей максимально возможному значению КПД котла нетто. В связи с этим возникает необходимость определения влияния статических характеристик котла – нагрузки, температуры питательной воды, воздушного режима топки и характеристики топлива – на показатели его работы при изменении значений перечисленных параметров.

Для решения сформулированной задачи необходимо определить статические и динамические характеристики объекта управления. Также необходимо разработать математическую модель объекта

управления, модели определения условной формулы углеводородного топлива по измеренным расходам воздуха и углеводородного газа и температуры пламени и методы реализации его эффективного сжигания в парогенерирующем оборудовании за счет изменения соотношения топливо-воздух с целью обеспечения максимальной эффективности.

Ключевые слова: тепловая электростанция, паровой котел, автоматизация, математическая модель, передаточная функция.

ENHANCEMENT OF THE EFFICIENCY OF BURNING CARBOHYDRATED GASES IN POROGENERATOR INSTALLATIONS AT THE RATES OF REFRACTION OF THE FUEL/AIR

This article is aimed at solving a scientific problem, which is to support the optimal ratio when burning in the air of an unknown gas by hydrocarbon gas due to the search for the maximum combustion temperature while providing the given characteristics of the flame when changing the current flow of air.

One of the tasks of the personnel is to support the optimal mode of the boiler under the conditions of its operation, which corresponds to the maximum possible value of the efficiency of the boiler net. In connection with this, it is necessary to determine the influence of the static characteristics of the boiler – load, feed water temperature, air mode of the furnace and fuel characteristics – on its performance indicators when changing the values of the listed parameters.

To solve the formulated problem, it is necessary to determine the static and dynamic characteristics of the object of management. It is also necessary to develop a mathematical model of the control object and a model for determining the conditional formula of hydrocarbon fuel by measured air and hydrocarbon gas and flue temperature and methods for implementing its efficient combustion in steam generating equipment by changing the fuel/air ratio to ensure maximum efficiency.

Key words: thermal power station, steam boiler, automation, mathematical model, transfer function.