

Лютенко Ю.М.

Одеський національний політехнічний університет

Ложечнікова Н.В.

Одеський національний політехнічний університет

УДОСКОНАЛЕНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ТЕПЛОВИМ НАВАНТАЖЕННЯМ БАРАБАННОГО КОТЛА ДЛЯ СПАЛЮВАННЯ ГОРЮЧИХ КИСНЕВМІСНИХ ВУГЛЕВОДНЕВИХ ГАЗІВ

Для сучасної української держави перспективним напрямом модернізації та розвитку енергетичної галузі може стати реалізація заходів, які потребують малих загальних витратних та тих, що швидко окупаються та дають змогу без залучення значних коштів у найкоротші терміни зменшити споживання палива й електроенергії. До таких заходів можна віднести використання на наявних парових котлах, що працюють на органічному паливі, нових структурних схем систем автоматичного управління, які дадуть змогу без суттєвої модернізації обладнання використовувати як паливо горючі кисневмісні вуглеводневі гази. Проведені дослідження показали, що є можливість використання дешевого низькокалорійного кисневмісного вуглеводневого газу як заміну природного газу на енергетичних і теплокомунальних підприємствах України. Чисельні розрахунки показали, що одним з основних обмежуючих факторів з використання дешевого палива без істотної модернізації енергетичного обладнання є пропускна здатність регулюючого органу.

Ключові слова: автоматизована система регулювання, паровий котел, автоматизація, математична модель, передавальна функція.

Постановка проблеми. Згідно з експертним прогнозом зростання світової економіки попит на енергетичні ресурси може вирости на 36% з 2011 по 2030 рік. Ключовими факторами зростання енергоспоживання будуть зростання чисельності населення планети (до 8,3 млрд до 2030 року) і зростання глобального ВВП (в два рази порівняно з 2011 роком). Швидка індустріалізація й урбанізація країн з низьким і середнім рівнем доходу становитиме 70% від світового зростання ВВП і понад 90% зростання світового попиту на енергетичні ресурси. Логічне, пропорційне зростанню ВВП, збільшення попиту на енергію буде обмежене безперервним поліпшенням енергоефективності її використання. Зниження енергоемності виробництва буде забезпечене використанням відновлюваних енергоресурсів, сланцевих енергоносіїв і нових, більш досконалих технологій виробництва промислових товарів і переробки сировини в біоенергетичних системах [1, с. 109].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. О.В. Авдєєвою було проведено дослідження та опублікована стаття на тему: «Система екстремального регулювання горінням палива в котельній установці» [4, с. 167–174]. У результаті проведеного дослідження експериментально встановлено, що

зміна витрати палива від витрати повітря носить екстремальний характер та для забезпечення найбільш ефективного процесу горіння параметри палива та повітря мають відповідати точці екстремуму (мінімуму для витрати палива). Також проведені досліді на моделях показали, що комплексне введення алгоритму екстремального регулювання процесів горіння та налаштування функціональних підсистем теплоенергетичних АСУ ТП може значно підвищити енергоефективність цих об'єктів [4, с. 173]. Також натепер такий учений, як А.В. Бондаренко, має дисертацію на тему: «Підвищення ефективності горіння вуглеводневих газів в парогенеруючих установках за рахунок зміни відношення паливо-повітря», де результатом дослідження стали модель та метод регулювання потужністю, який є основою алгоритму управління будь-яким барабанним котлом з природною циркуляцією, характеризується використанням несертифікованих вуглеводневих видів палива, максимальною температурою горіння палива і мінімальними викидами продуктів горіння у зовнішнє середовище.

Проте нині залишається невирішеним питання експериментів таких систем та теорій на реальних об'єктах. Відсутні адекватні методи визначення максимальної ефективності методик та їх оцінки.

Постановка завдання. Для сучасної української держави перспективним напрямом модернізації та розвитку енергетичної галузі може стати реалізація заходів, які потребують малих загальних витратних та тих, що швидко окупаються та дають змогу без залучення значних коштів у найкоротші терміни зменшити споживання палива й електроенергії. До таких заходів можна віднести використання на наявних парових котлах, що працюють на органічному паливі, нових структурних схем систем автоматичного управління, які дають змогу без суттєвої модернізації обладнання використовувати як паливо горючі кисневмісні вуглеводневі гази.

Виклад основного матеріалу дослідження. Натепер в Україні на теплових електростанціях, оснащених барабанними котлами, промислових і теплофікаційних котельнь використовується типова автоматична система управління (АСУ) теплового навантаження (рис. 1). Завдання АСУ теплового навантаження полягає в підтримці заданого тиску перегрітої пари, коли барабанний котел працює в регулюючому режимі або заданої витрати перегрітої пари, коли котел працює в базовому режимі. Така АСУ, як правило, реалізується в двох модифікаціях – з сигналом щодо витрати палива, коли на пальникові пристрої подається рідке або газоподібне паливо з постійною теплотворною здатністю, і з сигналом щодо тепловиділення в котельній камері, коли використовується тверде паливо, або якісний склад рідкого або газоподібного палива не є постійним [3, с. 352].

Таблиця 1

Густина і теплотворна здатність штучних газів

Газ	Густина, кг/м ³	Теплотворна здатність, МДж/м ³
Коксовий	0,342	17,58
Сланцевий	1,040	13,85
Генераторний мішаний	1,141	5,15
Генераторний, отриманий за паро-кисневого дуття під тиском	0,576	15,70
Доменний	1,283	4,10
Газ, отриманий шляхом низькотемпературного коксування з бітумінозних вугілля	0,620	31,90
Газ анаеробного походження	1,16	20,86

Можливість АСУ теплового навантаження з сигналом щодо тепловиділення компенсувати внутрішні топкові збурення питомою теплотою згоряння палива обмежена пропускною здатністю регулюючого органу, яка не перевищує 20% від номінальної витрати природного газу. Також необхідно враховувати густину і теплотворну здатність штучних газів, які можуть відрізнятися від аналогічних властивостей природного газу ($\rho_{пг} = 0,68...0,85 \text{ кг/м}^3$, $Q_H^{пг} = 28...46 \text{ МДж/м}^3$) як у більший, так і в менший бік (табл. 1).

Максимальна об'ємна витрата газу, приведена до нормальних умов ($P = 1,033 \text{ кгс/см}^2$, $\theta = 0^\circ \text{C}$), через регулюючий орган (РО) визначається рівнянням:

$$Q_{\max} = 535 K_g^{\max} \sqrt{\frac{\Delta P_{PO} P_2}{\rho T_1 k'}}, \quad (1)$$

де K_g^{\max} – максимальна пропускна здатність РО, м³/год., ΔP_{PO} – перепад тиску на РО, кгс/см², P_2 – тиск середовища після РО, кгс/см², ρ – густина газу, кг/м³, T_1 – температура газу перед РО, К, k' – коефіцієнт стисливості.

Оскільки K_g^{\max} , P_2 , T_1 , k' у процесі роботи котельного обладнання практично не змінюються, то рівняння (1) можна записати у вигляді:

$$Q_{\max} = K_{PO} \sqrt{\frac{\Delta P_{PO}}{\rho}}, \quad (2)$$

де K_{PO} – постійний коефіцієнт, що визначає максимальне споживання газу на пальникові пристрої залежно від перепаду тиску на РО і густини газу, м³/год. З урахуванням теплотворної здатності газу Q_H^p тепловиділення в котельній камері буде визначатися рівнянням:

$$Q_T = Q_H^p Q_{\max} = Q_H^p K_{PO} \sqrt{\frac{\Delta P_{PO}}{\rho}}. \quad (3)$$

Якщо прийняти, що тиск газу в газопроводі підтримується постійним, то тепловиділення у котельній камері у разі повністю відкритого РО буде залежати тільки від густини газу і його теплотворної здатності. Відношення тепловиділення природного газу $Q_T^{пг}$ до тепловиділення штучного газу $Q_T^{штг}$ дає змогу визначити потенційну можливість використання наявного котельного обладнання для спалювання альтернативного газоподібного палива:

$$\frac{Q_T^{пг}}{Q_T^{штг}} = \frac{Q_H^p^{пг}}{Q_H^p^{штг}} \sqrt{\frac{\rho_{штг}}{\rho_{пг}}}. \quad (4)$$

У таблиці 2 представлені результати розрахунку відношення (4) для середньої густини ($\rho_{пг} = 0,765 \text{ кг/м}^3$) та середнього тепловиділення природного газу ($Q_H^p^{пг} = 37 \text{ МДж/м}^3$).

Таблиця 2
Відношення тепловиділення природного газу до тепловиділення штучного газу

Газ	Q_T^{nr} / Q_T^{mr}	Перевищення пропускної здатності, %
Коксовий	1,41	21
Сланцевий	3,11	191
Генераторний мішаний	8,77	757
Генераторний, отриманий за паро-кисневого дуття під тиском	2,04	84
Доменний	11,7	1050
Газ, отриманий шляхом низькотемпературного коксування з бітумінозних вугілляв	1,04	–
Газ анаеробного походження	2,18	98

Результати розрахунку показують, що тільки газ, отриманий шляхом низькотемпературного коксування з бітумінозних вугілляв, може бути використаний замість природного газу (додаткове відкриття регулюючого органу для забезпечення номінальної генерації пари становитиме 4%).

Таким чином, виникає науково-технічна задача з розширення (в бік збільшення) діапазону керуючого впливу автоматичної системи управління тепловим навантаженням з сигналом щодо теплоти з метою використання як палива горючих кисневмісних вуглеводневих газів, коли пропускна здатність регулюючого органу не в змозі забезпечити подачу на пальникові пристрої необхідної кількості такого газу.

Одним із способів збільшення пропускної здатності регулюючого органу є збільшення перепаду тиску на ньому. Технічно цього можна досягти, якщо газ подавати на пальники з допомогою компресора, який за рахунок підвищення тиску газу перед повністю відкритим регулюючим органом, збільшує витрату і таким чином компенсує його низьку теплотворну здатність і (або) велику густину.

Для вирішення поставленого завдання необхідно визначити структуру і параметри пристрою зв'язку (ПЗ) (рис. 1), який має управляти продуктивністю газового компресора таким чином, щоб після вичерпання пропускної спроможності РО компресор збільшив подачу газу в топкову камеру за сигналом від регулятора витрати палива і це не привело б до зниження якості регулювання (збільшення тривалості перехідного процесу і великим динамічним відхиленням тиску P_{III} і витрати D_{III}

перегрітої пари). Передбачається, що завдання з оптимального управління роботою димососа і дуттьового вентилятора вирішуються відповідними типовими АСУ та їх продуктивності щодо нагнітання повітря в топку і видалення димових газів досить для вирішення цих завдань.

Удосконалена АСУ теплового навантаження барабанного котла має забезпечити плавний перехід на подачу горючих кисневмісних вуглеводневих газів за допомогою компресора, коли регулятор палива максимально відкриє регулюючий орган. У цьому разі керуючий сигнал від регулятора палива, відповідно до якого до цього відбувалося переміщення регулюючого органу, має бути так змінений пристрій сполучення (ПЗ), щоб його реалізація за допомогою компресора не привела до істотної зміни властивостей об'єкта по регулюючому каналу. Відношення передавальної функції ділянки по каналу «зміна положення регулюючого клапана – тепловиділення в котельній камері» $W_{\Delta h_{PO} \rightarrow \Delta Q_F}(S)$ до передавальної функції ділянки по каналу «зміна продуктивності компресора – тепловиділення в котельній камері» $W_{\Delta m \rightarrow \Delta Q_F}(S)$ визначає вид ПЗ, коли управління здійснюється тільки одним барабанним котлом (рис. 1):

$$W_{ПЗ}(S) = \frac{Q_T^{nr} K_{PO} (T_{III} S + 1)}{Q_T^{mr} K_K \left(\frac{T_K}{K_K} S + 1 \right)} \quad (5)$$

З урахуванням малої інерційності газових компресорів і розташовуючи компресор якомога ближче до котельного устаткування передавальна функція ПЗ (5) може бути спрощена:

$$W_{ПЗ}(S) \approx \frac{Q_T^{nr} K_{PO}}{Q_T^{mr} K_K} \quad (6)$$

Спрощена передавальна функція ПЗ є пропорційною ланкою, однак наявність у виразі (6) значення теплотворної здатності природного і горючого кисневмісного вуглеводневого газів накладають певні обмеження для використання такої АСУ – паливом має використовуватися один вид горючого кисневмісного вуглеводневого газу або АСУ має бути доповнена пристроєм і методом ідентифікації, який визначає умовну формулу і теплотворну здатність газу, що спалюється [2, с. 85].

У разі, коли в технологічну ділянку входять два і більше барабанних котлів частину з них переводять у базовий режим роботи (котли генерують постійну кількість пари), а інша частина працює в регулюючому режимі, підтримуючи постійним тиск перегрітої пари в загальному паропроводі [3, с. 352]. Застосування в цьому разі для кожного котла окремого газового компресора економічно недоцільно. Рішенням може бути використання

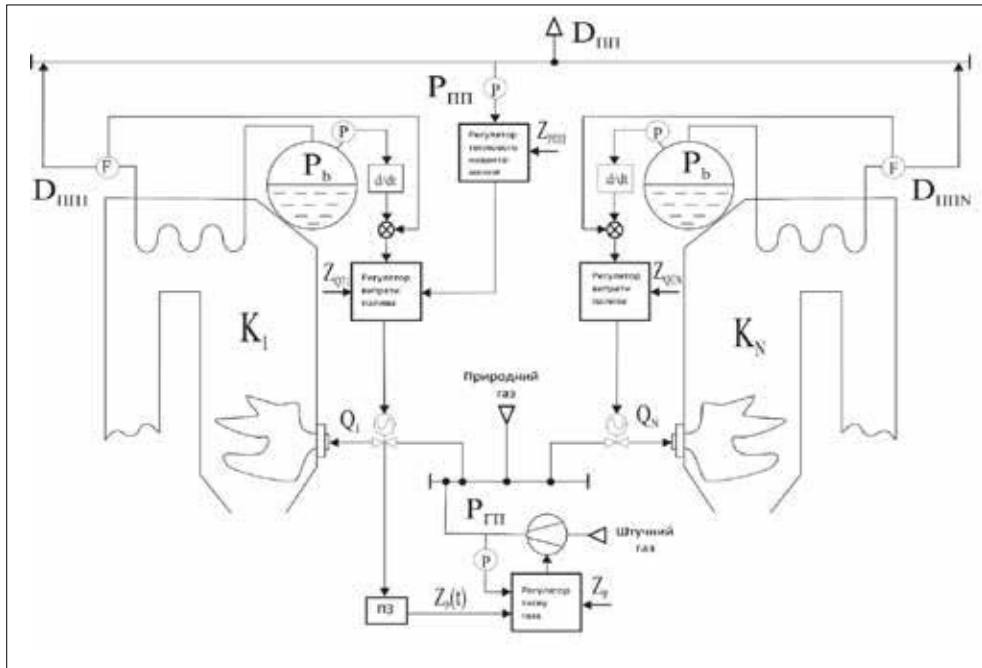


Рис. 1. Принципова схема АСУ групи котлів

одного продуктивного компресора, який має підвищувати тиск кисневмісного вуглеводневого газу в загальному газопроводі (рис. 1). Механізм управління компресором (МУК) відстежує становище РО котла, що працює в регулюючому режимі. У разі повного відкриття РО МУК через відповідне ПЗ змінює завдання регулятора тиску газу в газопроводі для плавного збільшення продуктивності компресора. На підставі (2) можна визначити функціональну залежність зміни завдання регулятора тиску газу:

$$\Delta P_{PO} = \rho \left(\frac{Q}{K_{PO}} \right)^2, \quad (7)$$

де Q – необхідна витрата газу на пальникові пристрої, m^3/c .

Оскільки регулятор розрідження підтримує постійним тиск димових газів у котельній камері, то ΔP_{PO} за повністю відкритого РО буде залежати тільки від тиску газу в газопроводі. Отже, шукана залежність для сигналу завдання регулятора тиску буде:

$$Z_p(t) = kQ^2(t). \quad (8)$$

Збільшення тиску в загальному газопроводі дасть змогу синхронно відновити продуктивність котлів, які працюють у базовому режимі.

Порівняльний аналіз роботи групи барабанних котлів у регулюючому режимі з використанням удосконаленої системи управління тепловим навантаженням

Моделювання перехідних процесів було проведено для двох барабанних котлів, що працю-

ють на загальний паропровід (рис. 2–4). При цьому один котел працював у регулюючому режимі і стабілізував тиск перегрітої пари в паропроводі, другий працював у базовому режимі з постійною продуктивністю пари. Як збурення розглядалося стрибкоподібне збільшення витрат на пальникові пристрої кисневмісного вуглеводневого газу, яке призводить до зменшення тепловиділення в котельній камері і, як наслідок, генерації пари на 25% від номінальної продуктивності.

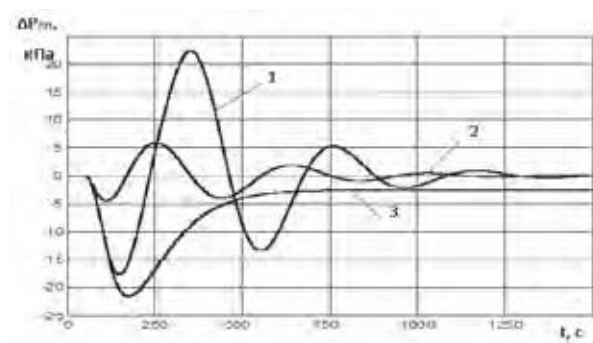


Рис. 2. Стабілізація тиску перегрітої пари у загальному паропроводі

Оскільки запас щодо пропускної здатності регулюючих органів становить 20%, то типова АСУ теплового навантаження не може відновити задане значення тиску перегрітої пари в загальному паропроводі (рис. 2, крива 3) і необхідну витрату пари до споживача (рис. 3, крива 3).

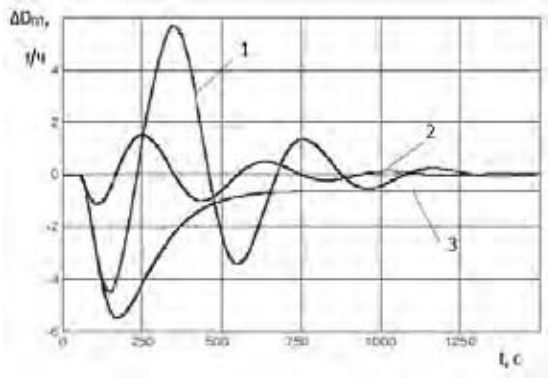


Рис. 3. Стабілізація витрат перегрітої пари у загальному паропроводі

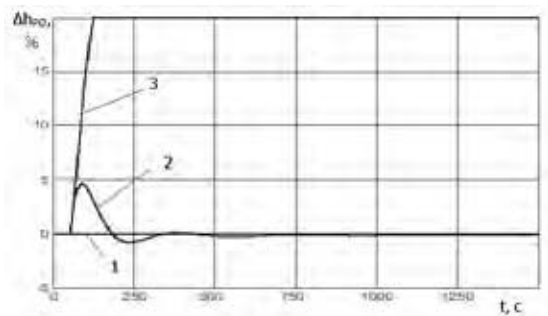


Рис. 4. Зміна положення РО барабанного котла в базовому режимі

У типовій системі управління регулятори витрати палива за сигналом щодо тепловиділення в камері згоряння повністю відкривають регулюючі органи (рис. 5–6, крива 3), але без додаткового підвищення тиску штучного газу в загальному газопроводі. Це не дає змогу повністю компенсувати зниження тепловиділення кожного котла.

Удосконалена АСУ теплового навантаження дає змогу відновити вихідні тиск і генерацію перегрітої пари (рис. 3–4) за рахунок збільшення подачі штучного газу в топку за допомогою газового компресора. У разі, коли продуктивність газового компресора регулюється за допомогою регулятора теплового навантаження через пристрій зв'язку (рис. 1), розраховане по (6), динамічне відхилення витрати пари і тривалість перехідного процесу в два рази більше (рис. 4, крива 1) порівняно зі схемою, в якій газовий компресор має власну систему управління (рис. 1).

Найкращі результати регулювання теплового навантаження забезпечує вдосконалена АСУ, в якій система управління компресором збільшує подачу штучного газу (рис. 6, крива 2), отримуючи сигнал завдання на зміну продуктивності $Z_p(t)$ від системи ідентифікації якісного складу кисневмісного вуглеводневого газу. Така система

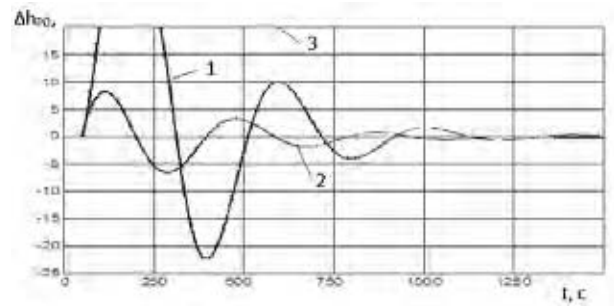


Рис. 5. Зміна положення РО барабанного котла в регулюючому режимі

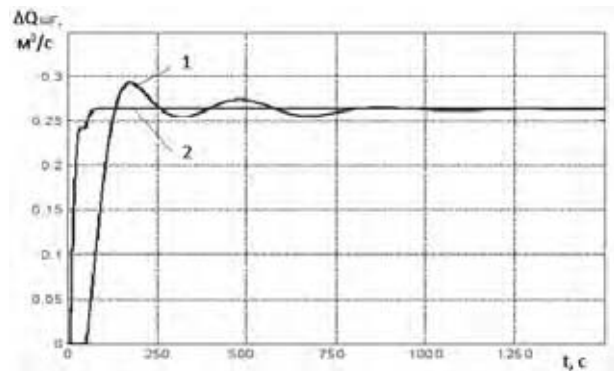


Рис. 6. Зміна витрати штучного газу до пальникових пристроїв

має бути малоінерційною і мати високу точність вимірювання складу штучного газу. Погіршення цих показників позбавить таку схему переваг порівняно зі схемою управління компресором безпосередньо від регулятора витрати палива.

Висновки. 1. Проведені дослідження показали, що є можливість використання дешевого низькокалорійного кисневмісного вуглеводневого газу як заміну природного газу на енергетичних і теплокомунальних підприємствах України. Чисельні розрахунки показали, що одним з основних обмежуючих факторів із використання дешевого палива без істотної модернізації енергетичного обладнання є пропускна здатність регулюючого органу.

2. Вирішення проблеми досягається шляхом підвищення тиску газу в газопроводі за допомогою компресора. Введення в технологічну схему газового компресора призводить до необхідності модифікації типової АСУ теплового навантаження.

3. Застосування методики класичної теорії автоматичного управління дало змогу визначити вид передавальної функції пристрою зв'язку між регулятором палива та компресором для одного котла, встановити функціональну залежність для регулятора тиску в газопроводі, коли група котлів працює на загальний паропровід.

Список літератури:

1. Рюль, К. Прогноз развития мировой энергетики до 2030 года. Вопросы экономики. № 5. 2013. С. 109–128.
2. Брунеткин, А.И., Максимов М.В. Метод определения состава горючих газов при их сжигании. Научный вестник Национального горничого университета. № 5. 2015. С. 83–90.
3. Плетнев, Г.П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике. Москва. 2007. 352 с.
4. Авдеева О.В. Система экстремального регулирования горением топлива в котельной установке. Вестник Пензенского государственного университета. №. 3 (11). 2015. С. 167–174.
5. Максимов М.В., Бондаренко А.В., Брунеткин А.И. Модель и метод определения условной формулы углеводородного топлива при сжигании. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. № 6 (8). 2013. С. 20–27.

**УСОВЕРШЕНСТВОВАНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ
ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКОЙ БАРАБАННОГО КОТЛА ДЛЯ СЖИГАНИЯ
ГОРЮЧИХ КИСЛОРОДСОДЕРЖАЩИХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ**

Для современного украинского государства перспективным направлением модернизации и развития энергетической отрасли может стать реализация мероприятий, требующих малых общих расходов и тех быстрокупаемых, что позволяют без привлечения значительных средств в кратчайшие сроки уменьшить потребление топлива и электроэнергии. К таким мерам можно отнести использование в существующих паровых котлах, работающих на органическом топливе, новых структурных схем систем автоматического управления, которые позволят без существенной модернизации оборудования использовать в качестве топлива горючие добавки – углеводородные газы. Проведенные исследования показали, что существует возможность использования дешевого низкокалорийного кислородсодержащего углеводородного газа в качестве замены природного газа на энергетических и теплокоммунальных предприятиях Украины. Цифровые расчеты показали, что одним из основных ограничивающих факторов по использованию дешевого топлива без существенной модернизации энергетического оборудования является пропускная способность регулирующего органа.

Ключевые слова: автоматическая система регулирования, паровой котёл, автоматизация, математическая модель, передаточная функция.

**IMPROVED CONTROL SYSTEM OF THERMAL LOAD OF THE STEAM BOILER
FOR THE COMBUSTION OF COMBUSTIBLE OXYGEN CONTAINING
HYDROCARBON GASES**

For the modern Ukrainian state a promising direction of modernization and development of the energy sector can be the implementation of measures requiring small total expenditure and those that payback for themselves and allow without attracting substantial funds to reduce the consumption of fuel and electricity as soon as possible. Such measures include the use in existing steam boilers operating on organic fuel, new structural diagrams of automatic control systems, which will make it possible to use combustible additives hydrocarbon gases as fuel without significant equipment upgrades. Research have shown that it is possible to use cheap low-calorie oxygen-containing hydrocarbon gas as a substitute for natural gas in the energy and heat-utility enterprises of Ukraine. Numerical calculations showed that one of the main limiting factors for the use of cheap fuel without a significant upgrade of power equipment is the capacity of the regulatory authority.

Key words: automation control system, steam boiler, automation, mathematical model, transfer function.