

**Серт І.В.**

Державний університет «Одеська політехніка»

**Беглов К.В.**

Державний університет «Одеська політехніка»

## ДОСЛІДЖЕННЯ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СПАЛЮВАННЯМ НЕСЕРТИФІКОВАНОГО ПАЛИВА В ВОДОГРІЙНОМУ КОТЛІ

У статті запропоновано синтез екстремального регулятора для керування оптимальною витратою повітря й палива котлу. Так як склад палива змінний, було додано до каскадної АСК (автоматична система керування) нові канали вимірювання в димових газах із хімічним недопалом, що зменшило втрати теплової енергії. За основу її роботи була прийнята нелінійна модель водогрійного котла й алгоритм оптимізації керування з прямим визначенням похідної.

У зв'язку з переходом на альтернативні джерела енергії виникла необхідність у використанні альтернативних палив, до яких відноситься, наприклад, біогаз. Проте хімічний склад таких видів палива не завжди використовується для штатних систем керування водогрійних котлів, які експлуатуються в багатій кількості.

Більшість водогрійних котлів зі штатною системою при швидкій зміні складу палива не здатні економічно підтримувати процес спалювання палива змінного складу. Це пов'язано з тим, що, по-перше, склад несертифікованого палива довше визначається, аніж первинні джерела теплової енергії, по-друге, через постійну зміну складу палива треба кожен раз з'ясовувати хімічний склад і розраховувати нову теоретичну витрату повітря при зміні складу палива, коли для первинних видів ці величини були розраховані й не потребували постійних перерахунків і нових досліджень. Саме тому розробка АСК для спалювання несертифікованого палива змінного складу є актуальним і нерозповсюдженим питанням.

Так, хоча забезпечення максимальної ефективності котла є важливим завданням, використання біогазу шкідливо впливає на його роботу через велику кількість сірководню, який роз'їдає металоконструкції котла, тому й потрібно регулювати коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha$ , який впливає на ефективність котла та викид шкідливих сполучень в атмосферу. Саме тому з'ясування палива змінного складу підвищить ефективність та економічність котла.

Проведено аналіз роботи екстремального регулятора й порівняння зі штатною системою керування. У результаті цього з'ясовано, що при сталому значенні складу палива робота екстремальної та штатної АСК нічим не відрізняється одна від одної. Проте при збуреннях витратою повітря (понад 20%) екстремальна система регулювання, дає змогу знизити втрати теплової енергії при спалюванні й зміні складу палива.

**Ключові слова:** біогаз, котел, екстремальний регулятор, склад палива, склад димових газів.

**Постановка проблеми.** Актуальним питанням сьогодні є те, що в значній кількості почалося використання вторинних енергоресурсів в енергетиці, до яких відноситься несертифіковане палива, отримане в біогазових установках. Тому постає завдання синтезу системи керування паливно-повітряним каналом.

Ще однією проблемою є наявність оксидів азоту, які утворюються під час горіння при досить високій температурі полум'я та наявності кисню в димових газах. Цього можна уникнути, якщо проводити процес горіння при значенні коефіцієнта надлишку повітря, трохи менше одиниці (0,99–0,995).

Традиційні системи керування економічності спалювання, які використовують тільки сигнал про концентрацію кисню, не спроможні підтримувати коефіцієнт надлишку повітря менше ніж одиниця. Тому пропонується доповнити штатну систему керування, по-перше, новими каналами вимірювання складу димових газів, а по-друге, додатковим регулятором, який здатний підтримувати оптимальне співвідношення між витратою палива й витратою повітря при змінній складу палива. Дослідженню такої системи керування й присвячена стаття.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Через те що склад палива може бути змінний, системи з

лінійною моделлю описують об'єкт керування зі значною похибкою. Тому використано нелінійну модель спалювання палива й синтез екстремального регулятора для цього об'єкта. Завдяки цьому система керування більш якісно компенсує зовнішні збурення.

Проаналізовано попередні статтю [1, с. 116–121], у якій розглянуто схоже питання, проте на основі імітаційної моделі трьох котлів КВГМ-50, і ще одну працю [2, с. 115–120], де реалізовано в режимі реального часу процедуру пошуку навантаження між котлами, при змінному складі палива. У роботі [3, с. 90] висунуто пропозицію щодо використання значення ККД котла, коефіцієнта зносу обладнання, які також мають значний вплив на роботу теплообмінника.

Визначення умовної формули газоподібного вуглеводного палива за допомогою побудування її моделі спалювання газу змінного складу, а також метод забезпечення оптимальної сталості палива/повітря для отримання максимальної температури спалювання в роботі [4, с. 21–27].

**Постановка завдання.** Основна мета полягає в тому, що потрібно синтезувати екстремальну систему керування, яка дає змогу спалювати несертифіковане паливо змінного складу.

У процесі дослідження прийнято рішення залишити основний регулятор, який підтримує витрату повітря відповідно до витрати палива, і додати екстремальний регулятор, який виконує функцію коригувального регулятора та змінює співвідношення між витратою повітря й витратою палива.

Для розв'язання сформульованої мети треба вирішити такі завдання:

- розробити структуру екстремального регулятора, який підтримує мінімальне значення втрат теплової енергії за рахунок збільшення кількості складових димових газів, що аналізуються;
- змоделювати роботу нової системи керування та порівняти її зі старою.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** У попередній роботі [5, с. 142–146] розглянуто питання моделювання спалювання природного газу змінного складу в котлі. Проведено синтез нелінійної та лінійної моделей, у результаті чого при збуренні складом палива понад 50% від номінального значення штатний регулятор не забезпечує необхідної якості якісних перехідного процесу.

Це зумовлено передусім тим, що новому складу палива відповідає нове значення теоретично необхідної кількості повітря. Таким чином, виникає необхідність у процедурі пошуку нового значення оптимального коефіцієнта надлишку повітря, графік якого наведено на рисунку 1.

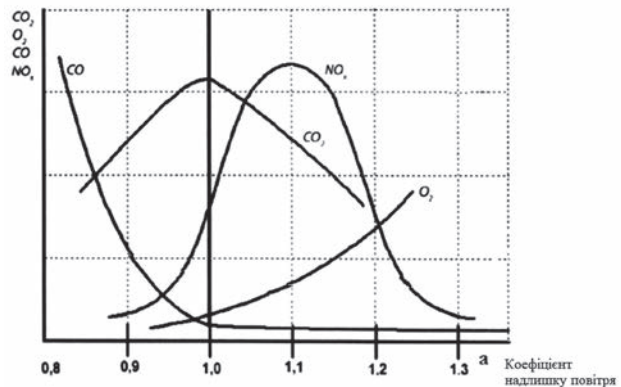


Рис. 1. Залежність складу димових газів від коефіцієнта надлишку повітря [6]

Для цього розглянемо синтез екстремального регулятора, який більш доречніший, тому що через указані раніше нововведення з'явилася можливість ведення процесу спалювання при значеннях коефіцієнта надлишку повітря менш ніж одиниця.

Відомо, що втрати теплової енергії для водогрійних котлів, які працюють газоподібному паливі розраховуються за формулою:

$$q_{\bullet} = q_2 + q_3, \quad (1)$$

де  $q_2$  – утрати з димовими газами,

$$q_2 = \left( \begin{matrix} c_{pH_2} \cdot C_{H_2} + c_{pCO} \cdot C_{CO} + c_{pO_2} \cdot C_{O_2} + \\ + c_{pCO_2} \cdot C_{CO_2} + c_{pH_2O} \cdot C_{H_2O} + c_{pN_2} \cdot C_{N_2} \end{matrix} \right) \cdot t_{d_2} \quad (2)$$

$q_3$  – утрати від хімічного недопалу;

$$q_3 = Q_{H_{H_2}}^p \cdot C_{H_2} + Q_{H_{CO}}^p \cdot C_{CO}. \quad (3)$$

Для знаходження мінімуму теплових утрат система керування повинна аналізувати значення похідної  $\frac{dq_{\bullet}}{d\alpha}$ . Тотожність похідної нульовому значенню свідчить про досягнення екстремуму, а саме мінімуму.

Сутність роботи екстремального регулятора з безпосереднім визначенням похідної полягає в тому, що визначаються дві похідні від часу: похідні  $\frac{d\alpha}{dt}$  та  $\frac{dq_{\bullet}}{dt}$ , а потім знаходиться їх відношення  $\frac{dq_{\bullet}}{d\alpha} / \frac{d\alpha}{dt}$  [7].

Але під час експлуатації системи керування виникає ситуація, коли зовнішні збурення відсутні. Тобто ані коефіцієнт надлишку повітря, ані втрати теплоти не змінюються. У такому випадку всі похідні дорівнюють нулю й в обчислювальному пристрої виникає помилка ділення на нуль.

Таким чином, виникає протиріччя, яке полягає в тому, що при змінному складі палива потрібний екстремальний регулятор, з іншого боку, такий

регулятор спотворює роботу АСК, якщо склад палива сталий.

Для вирішення цього протиріччя проаналізовано характер зміни сигналів вимірювальної інформації про склад димових газів. Аналіз показав, що є можливість розрахунок похідної замінити таким виразом:

$$dq = K_1 * q_2 - K_2 * q_3. \quad (4)$$

Тобто знаходити не суму, а різницю між утратами з відхідними газами  $q_2$  та втратами від хімічного недопалу  $q_3$ . Коефіцієнти  $K_1, K_2$  потрібні для нормалізації сигналів від  $q_2$  та  $q_3$ , щоб при  $\alpha = 1$  цей сигнал дорівнював 0.

Графік залежності  $dq = f(\alpha)$  наведено на рисунку 2. Розрахунки показують, що залежність (4) відповідає функції  $\frac{dq}{d\alpha}$ , саме через це необхідність у пошуку самої похідної відповідає.

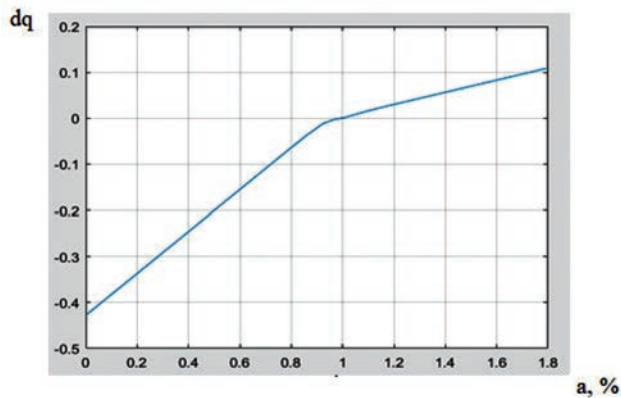


Рис. 2. Графік залежності  $dq = f(\alpha)$

Для порівняння штатної системи регулювання з екстремальною на вході системи проведено імітаційне моделювання. Схему імітаційної моделі наведено на рисунку 3.

На вхід системи подано природний газ, а також біогаз і різні витрати палива.

Розташовані на рисунку блоки 3 мають такі позначення:

- «Склад палива» – моделює склад палива й розраховує значення теоретично необхідного об'єму повітря  $V_0$  залежно від складу палива;
- «Витрата палива» – установлює витрату газоподібного палива;
- «*zadanie*» – задається завдання концентрації кисню;
- «*Ramp*» – вхідне збурення для дослідження статичної характеристики об'єкта;
- «*PID Controller1*» і «*PID Controller*» – блоки коригувального та стабілізуючого регуляторів нової системи відповідно;
- «*PID Controller2*» і «*PID Controller3*» – блоки коригувального та стабілізуючого регуляторів штатної системи відповідно;
- «*Manual Switch*» – перемикач, який потрібен для вибору вхідного збурення або керуючого впливу;
- «*Object\_nonlin*» – об'єкт керування, який має такі входи:
  - « $V_0$ » – теоретично необхідний об'єм повітря,  $m^3 / m^3$ ;
  - « $V_f$ » – витрата палива,  $m^3/c$ ;

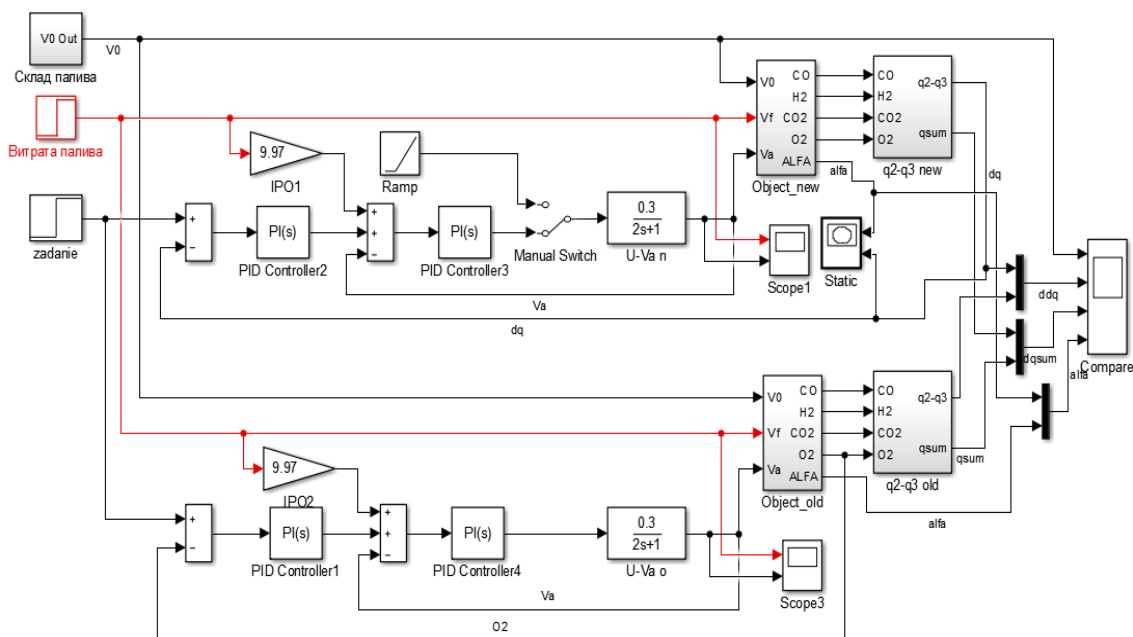


Рис. 3. Модель синтезу екстремального регулятора з нелінійним об'єктом спалювання несертифікованого палива

- « $V_A$ » – витрата повітря,  $m^3 / c$ ;
  - « $U - V_A n$ » і « $U - V_A o$ » – динамічні властивості повітропроводу для штатного й екстремального АСК,  $m^3 / m^3$ ;
  - « $q2 - q3 old$ » і « $q2 - q3 new$ » – блоки, у яких виконуються розрахунки для штатного й екстремального регуляторів за формулами (2)–(4);
  - « $IPO1$ » та « $IPO2$ » – теоретично необхідні витрати повітря при спалюванні розрахункового виду палива для штатного й екстремального регуляторів,  $m^3 / m^3$ .
- Нижче на рисунках 4–7 зображено зміну теоретичну витрату повітря, після чого зроблено

порівняння різниці втрат і сумарних утрат із відповідними димовими газами з хімічним недопалом.

Зміна складу палива моделюється у вигляді зміни теоретично необхідної кількості повітря на 200, 400, 600 секундах. Із графіків видно, що на 200-ій секунді було подано збурення у вигляді збільшення теоретично необхідної витрати повітря, на 400-ій секунді – зменшення, тому що в систему надійшло більш калорійне паливо і штатний регулятор гірше справився із цим, ніж екстремальний.

На проміжку часу від 200 до 400 секунд у штатній системі відбулася втрата сигналу, тому

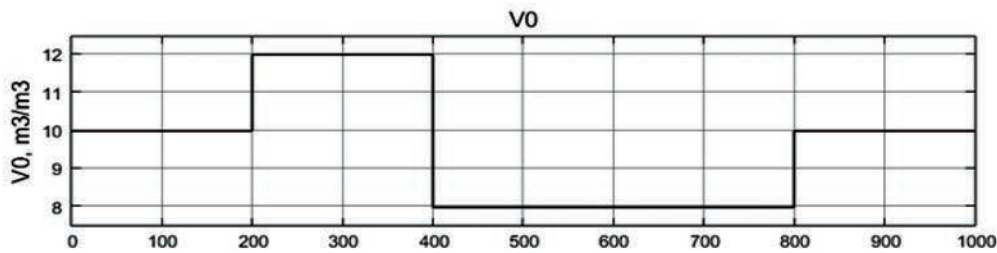


Рис. 4. Зміна теоретично необхідної кількості витрати повітря

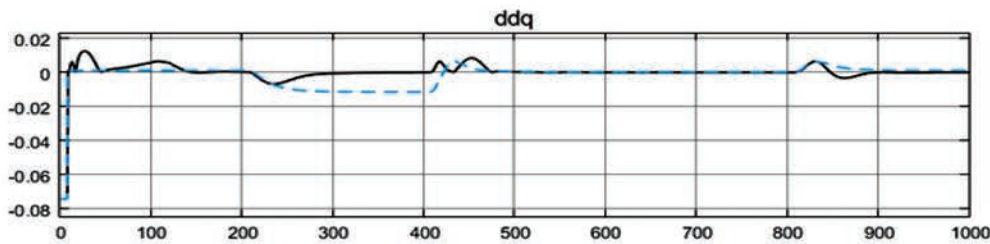


Рис. 5. Порівняння роботи різниці втрат АСК зі штатним (---) та екстремальним (-) регуляторами

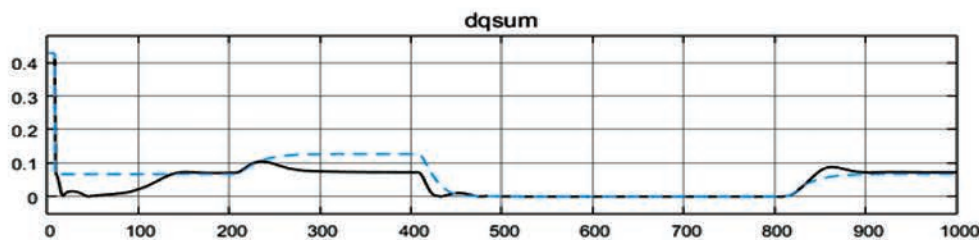


Рис. 6. Порівняння роботи сумарних утрат АСК зі штатним (---) та екстремальним (-) регуляторами

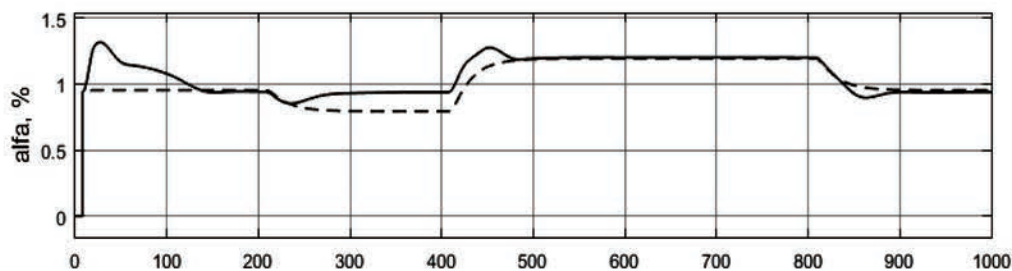


Рис. 7. Зміна коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha$  штатного (---) та екстремального (-) регуляторів залежно від витрати повітря

там з'явився хімічний недопал, на відміну від екстремальної, де не було цього. На 800-ій секунді  $V_0$  повертається в номінальне значення.

**Висновки.** У роботі проведено синтез екстремального регулятора для керування нелінійним об'єктом. При цьому використано три нових сигналу, окрім концентрації кисню, вимірюються концентрації водню, чадного газу та вуглекислого газу. Таким чином, ураховуються втрати з димовими газами й хімічним недопалом, за допомогою чого й визначається оптимальна витрата повітря при зміні складу палива.

У результаті проведеного дослідження системи керування запропоновано використання сигналу різниці між утратою з димовими газами й утратою від хімічного недопалу. Це дало змогу не використовувати похідну при пошуку мінімуму втрат теплової енергії.

З графіків перехідних процесів, які наведені на рисунках 4–7, видно, що при сталих значеннях складу палива робота штатної системи нічим не відрізняється, проте коли відбулася зміна складу палива, екстремальний регулятор краще відпрацював із цим збуренням, аніж штатний. Тому нова система краще справляється зі збуренням складу палива, ніж штатна.

#### Список літератури:

1. Вовк І.В., Беглов К.В. Моделювання водогрійних котлів при глибоких збуреннях за змістом палива. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. 2018. Вип. 29 (68). № 6 (1). С. 116–121. URL: [https://scholar.google.com.ua/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=ru&user=c3oVsmkAAAAJ&citation\\_for\\_view=c3oVsmkAAAAJ:ZeXyd9-uunAC](https://scholar.google.com.ua/citations?view_op=view_citation&hl=ru&user=c3oVsmkAAAAJ&citation_for_view=c3oVsmkAAAAJ:ZeXyd9-uunAC).
2. Концур В.О., Беглов К.В. Оптимізація режиму роботи групи котлів під час спалювання несертифікованого палива. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського*. 2020. Том 31. С. 115–120. URL: [https://scholar.google.com.ua/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=ru&user=c3oVsmkAAAAJ&citation\\_for\\_view=c3oVsmkAAAAJ:j3f4tGmQtD8C](https://scholar.google.com.ua/citations?view_op=view_citation&hl=ru&user=c3oVsmkAAAAJ&citation_for_view=c3oVsmkAAAAJ:j3f4tGmQtD8C).
3. Лисюк А.В., Беглов К.В. Оптимізація роботи групи агрегатів при спаленні несертифікованого палива. *Автоматика-2017*: матеріали XXIV Міжнародної конференції з автоматичного управління (м. Київ, Україна, 13–15 вересня 2017 р.). Київ, 2017. С. 90. URL: <https://er.chdtu.edu.ua/bitstream/ChSTU/2022/1/%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B02017.pdf#page=90>.
4. Модель и метод сжигания в теплоэнергетической установке углеводородного газа переменного состава / А.В. Лысюк, А.В. Бондаренко, М.М. Максимов, А.И. Брунеткин. *Автоматизация технологических и бизнес-процессов*. 2017. № 9. Iss. 2. С. 21–27. URL: [https://scholar.google.com/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=th&user=JbyxTnnc\\_H0C&citation\\_for\\_view=JbyxTnnc\\_H0C:8k81kl-MbHgC](https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=th&user=JbyxTnnc_H0C&citation_for_view=JbyxTnnc_H0C:8k81kl-MbHgC).
5. Серт І.В., Беглов К.В. Модель спалювання природного газу змінного складу в котлі. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. 2021. Том 32 (71). № 3. С. 142–146. URL: [http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2021/3\\_2021/25.pdf](http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2021/3_2021/25.pdf).
6. Организация процесса сгорания и выбросы вредных веществ в бензиновых двигателях. Устройство авто. URL: <https://ustroistvo-avtomobilya.ru/sistemy-snizheniya-toksichnosti/organizatsiya-protsesta-sgoraniya-i-vy-brosy-vredny-h-veshhestv-v-benzinovy-h-dvigatelyah/>.
7. Системи екстремального регулювання (еср). С. 22. URL: <https://studfile.net/preview/10050565/page:22/>.

#### Sert I.V., Beglov K.V. RESEARCH OF COMPUTER-INTEGRATED CONTROL SYSTEM OF NON-CERTIFIED FUEL COMBUSTION IN A HEATING BOILER

*The article proposes the synthesis of an extreme regulator to control the optimal air and fuel consumption of the boiler. As the fuel composition is variable, new measurement channels in flue gases with chemical afterburning were added to the cascade ASC (automatic control system), which reduced heat energy losses. The basis of her work was a nonlinear model of a hot water boiler and an algorithm for control optimization with direct determination of the derivative.*

*Due to the transition to alternative energy sources, there is a need to use alternative fuels, such as biogas. However, the chemical composition of such fuels is not always used for regular control systems for hot water boilers, which are operated in large quantities.*

*Most hot water boilers with a standard system with a rapid change in fuel composition are not able to economically support the process of burning fuel of variable composition. This is due to the fact that, firstly, the composition of uncertified fuel was determined longer than the primary sources of heat, and secondly, due to the constant change in fuel composition, it is necessary to determine the chemical composition and calculate a new theoretical air flow rate, when for primary species these values were calculated and did not require constant recalculations, and new research. That is why the development of ACS for the combustion of uncertified variable fuel is a topical and fairly uncommon issue.*

*Yes, although ensuring the maximum efficiency of the boiler is an important task, the use of biogas has a detrimental effect on its operation, due to the large amount of hydrogen sulfide, which corrodes the metal structures of the boiler. Because of this, it is necessary to regulate the coefficient of excess air  $\alpha$ , which affects the efficiency of the boiler and the release of harmful compounds into the atmosphere. That is why finding out the fuel of variable composition will increase the efficiency and economy of the boiler.*

*The analysis of the operation of the extreme regulator and comparison with the standard control system is carried out. As a result, it was found that with a constant value of fuel composition, the work of extreme and regular ASC is no different from each other. However, in the case of air flow disturbances (more than 20%), the extreme control system reduces heat loss during combustion and changes in fuel composition.*

**Key words:** *biogas, boiler, extreme regulator, fuel composition, flue gas composition.*