

Управління тепловим навантаженням котла при спалюванні твердих побутових відходів

Т. Д. Марколенко, Д. Г. Проданов, Я. І. Беглов
Національний університет «Одеська політехніка»

Анотація. У статті розглянуто питання управління тепловим навантаженням котла при спалюванні твердих побутових відходів (ТПВ). Визначено основні технологічні особливості процесу, включаючи необхідність підтримки високих температур для мінімізації шкідливих викидів та запобігання шлакуванню. Описано автоматизовану систему керування установкою, що включає регулятори потужності, температури киплячого шару, економічності процесу та рівня викидів шкідливих речовин. Проведено імітаційне моделювання, яке підтвердило ефективність запропонованої системи керування, зокрема її здатність компенсувати зміни складу паливної суміші та забезпечувати стабільну роботу установки.

Ключові слова: тверді побутові відходи, киплячий шар, автоматизована система керування, теплове навантаження, моделювання.

Вступ

Енерготехнологічні установки, основним паливом яких є тверді побутові відходи, є найдоступнішим і економічно доцільним поновлюваним джерелом енергії. Нині тільки в Європі за рахунок термічної утилізації відходів виробляється понад 28 млрд. кВт·год електроенергії і приблизно 70 млрд. кВт·год теплової енергії [1, 2]. При цьому слід зазначити, що крім енергозабезпечення шляхом термічної переробки відходів вирішується важлива соціальна проблема – очищення великих міст від ТПВ.

Основним способом термічної переробки ТПВ на сьогодні є їх пряме спалювання. Специфіка котельних установок, що спалюють тверді побутові відходи, порівняно з традиційними котлами, зумовлена необхідністю спалювати їх з великими надлишками повітря ($\alpha \sim 1,8$) через широкий діапазон зміни теплоти згоряння та елементного складу компонентів ТПВ; обов'язковим витримуванням газоподібних продуктів згоряння за температури понад 850 °C протягом 2 с і більше для деструкції органічних забруднювачів, насамперед полі хлоровані дибензодіоксини і фурані; обмеженням температури димових газів на вході до конвективних поверхонь (не більш як 750 °C) за умовами мінімізації шлакування цих поверхонь; підтримкою оптимальної для роботи системи

газоочищення температури димових газів на виході з котла (зазвичай 180...200 °C); застосуванням багатоступеневої системи газоочищення [3].

Для термічного знешкодження відходів широкого поширення набули печі з псевдозрідженим (киплячим) шаром [4]. У печах з киплячим шаром продукт переходить у завислий стан у камері згоряння потоком повітря, що проходить через шар сипкого (порошкоподібного або подрібненого) матеріалу, не переміщаючись у напрямку цього потоку. Швидкість газового потоку має бути достатньою для того, щоб частинки перебували в підвішеному стані і вихровому турбулентному русі, що нагадує потік киплячої рідини. У нагрітому киплячому шарі відбувається інтенсивний теплообмін між частинками і газом. Теплопередача в киплячому шарі в 4 рази вища, ніж у нерухомому.

Під час спалювання відходів у вихровому киплячому шарі особлива увага приділяється недопущенню таких порушень технологічного процесу:

- у розподілі або витраті первинного (охолоджувального) повітря;
- у роботі контуру зовнішньої циркуляції матеріалу шару;
- пов'язані з відхиленням температури шару за встановлені межі;
- викликані потраплянням і накопиченням великих матеріалів, насамперед металевих фрагментів, у шарі.

© Марколенко Т. Д., Проданов Д. Г.,
Беглов Я. І., 2025

Ця стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk>)

Ці відхилення технологічних режимів можуть викликати шлакування киплячого шару, що призводить до тривалого зупинення всієї енерготехнологічної установки.

Велика увага приділяється визначенню допустимих температур у зоні киплячого шару. Відомо, що за температури понад 700 °С існує велика ймовірність шлакування шару та інтенсивного утворення нашарувань на стінах топки. Спалювання відходів за температури нижче ніж 550 °С відбувається з неповним згорянням окремих компонентів ТПВ, що зрештою спричиняє завал поду топки непрогорілими відходами.

Для регулювання цієї температури застосовують різні способи: шляхом спалювання додаткового палива в пальниках, розміщених у зоні киплячого шару, що призначені для розпалювання, завдяки упорскуванню води, зміною витрати та перерозподілом повітря, що подається під решітку, та інші.

Проблеми оптимального спалювання органічних сполук завжди приділялася велика увага. Система контролю горіння є однією з основних систем управління піччю або котлом. За час експлуатації котельного обладнання розроблено велику кількість схем керування різними видами палива (твердим, рідким і газоподібним), які вже стали стандартними. Однак при розробці обладнання та САК до нього передбачається, що в процесі експлуатації склад палива буде змінюватися в невеликому, заздалегідь заданому діапазоні.

З проведеного огляду джерел інформації можна зробити наступні висновки:

- спалення твердих побутових відходів у сміття-спалювальних установках практикується доволі активно та достатньо довго;
- одним з способів спалення є використання топок киплячого шару;
- керування котлами, які спалюють сміття, виконується за традиційними схемами керування яка використовується для спалення твердого палива (вугілля);
- коливання складу паливної суміші, які викликають зміну теплотворної здатності та кількості повітря, що подається на спалювання, не компенсуються. Процес проводиться з великим надлишком повітря для запобігання утворенню шкідливих викидів;
- існують системи керування які здатні компенсувати коливання складу паливної суміші, але вони використовуються при спаленні газоподібних сумішей.

1. Постановка задачі керування навантаженням паро генеруючого устаткування

Об'єктом керування є установка спалення твердих побутових відходів (ТПВ) з метою отримання теплової енергії у вигляді перегрітої пари або гарячої води.

Технологічний процес полягає у наступному. Подрібнені ТПВ (паливна суміш) подається в топку. У топці розташований киплячий шар, який складається з паливної суміші, інерту (піску, вапняку, тощо). Завдяки робочій температурі шару паливна суміш осушується, підігрівається та спалюється. Також у топці розташовані радіаційні поверхні нагріву, які сприймають випромінювання від матеріалів, що спалюється. Після топки встановлений циклон, що уловлює та повертає назад частинки шару. Через подову частину топки відводиться частина шихти, яка або видаляється на золівдвал, або направляється у винесений теплообмінник. В ньому шихта охолоджується до необхідної температури і знов подається до топки. Для зв'язування сполук сірки (оксидів та діоксидів) та хлору (зазвичай випарів соляної кислоти) у топку додаються вапно та сода. Для створення киплячого шару у нижню частину топки, під розподільчу решітку, підводиться повітря. Це повітря називається первинним. Частина повітря підводиться над шаром і служить для повного окиснення горючих сполук паливної суміші. Це повітря називається вторинним.

Особливістю роботи сміттєспалювальних установок є різко змінний склад побутових відходів, що подаються на переробку. Також особливою відмінністю спалювання сміття є ризик утворення шкідливих сполук, таких як діоксиди сірки, оксиди азоту, сполуки хлору, діоксини і фурані. Для запобігання утворення таких сполук дуже важливо підтримувати температуру киплячого шару.

Для підвищення точності підтримання технологічних параметрів пропонується доповнити штатні системи регулювання пристроєм визначення бруто-формули паливної суміші.

Таким чином метою роботи є розробка та дослідження системи автоматизованого керування тепловою потужністю сміттєспалювальної установки з компенсацією збурень навантаження та зміни складу палива шляхом визначення складу паливної суміші методом визначення її бруто-формули для забезпечення необхідних параметрів технологічного процесу.

2. Імітаційна модель САК тепловою потужністю сміттєспалювальної установки

Імітаційна модель складається з чотирьох ділянок:

- моделі топки низько температурного киплячого шару «Low Temp Fluorized Bed»;
- моделі теплообмінних поверхонь «heat transfer surface model»;
- моделі теплообміннику для охолодження шихти «Inert Cooler»;
- моделі зв'язування сполук сірки «sulphur absorption model».

Кожна з моделей була отримана у результаті попередніх досліджень [5, 6, 7, 8, 9, 10].

Таким чином в об'єкті регульованими параметрами є:

- навантаження (вимірюваним параметром може бути тиск пари після котла);
- температура киплячого шару;
- концентрація діоксиду сірки в димових газах;
- економічність процесу спалення (вимірюваним параметром є склад димових).

Керуючими впливами є:

- витрата паливної суміші (ТПВ);
- витрата води на охолодження шихти;
- витрата вапняку;
- витрата вторинного повітря.

Зовнішніми збуреннями на об'єкт є:

– задане навантаження (потужність) установки;

– склад паливної суміші (ТПВ).

Схему імітаційної моделі АСК установки для спалення ТПВ показано на рисунку 1.

На рисунку застосовано такі позначення:

Boiler – об'єкт керування;

Power Contr – регулятор потужності установки;

Air Contr – регулятор економічності (витрати повітря);

Fl Bed Temp Contr – регулятор температури киплячого шару;

Lime Flow Contr – регулятор витрати вапна;

Waste Composition Disturb – пристрій моделювання складу паливної суміші;

Load, Flows, Bed Temp, Sulfur – блоки виведення графіків (Scope);

Setpoint – блок сигналу завдання потужності.

Пропонована система керування має наступні особливості.

Для компенсації впливу складу паливної суміші (ТПВ) використаний засіб визначення бруто формули палива [10]. Визначення бруто формули паливної суміші дає можливість з випередженням визначити теплотворну здатність палива та визначити теоретичну кількість повітря, яке йде на спалення. Ця інформація подається на регулятор навантаження та регулятор економічності, відповідно.

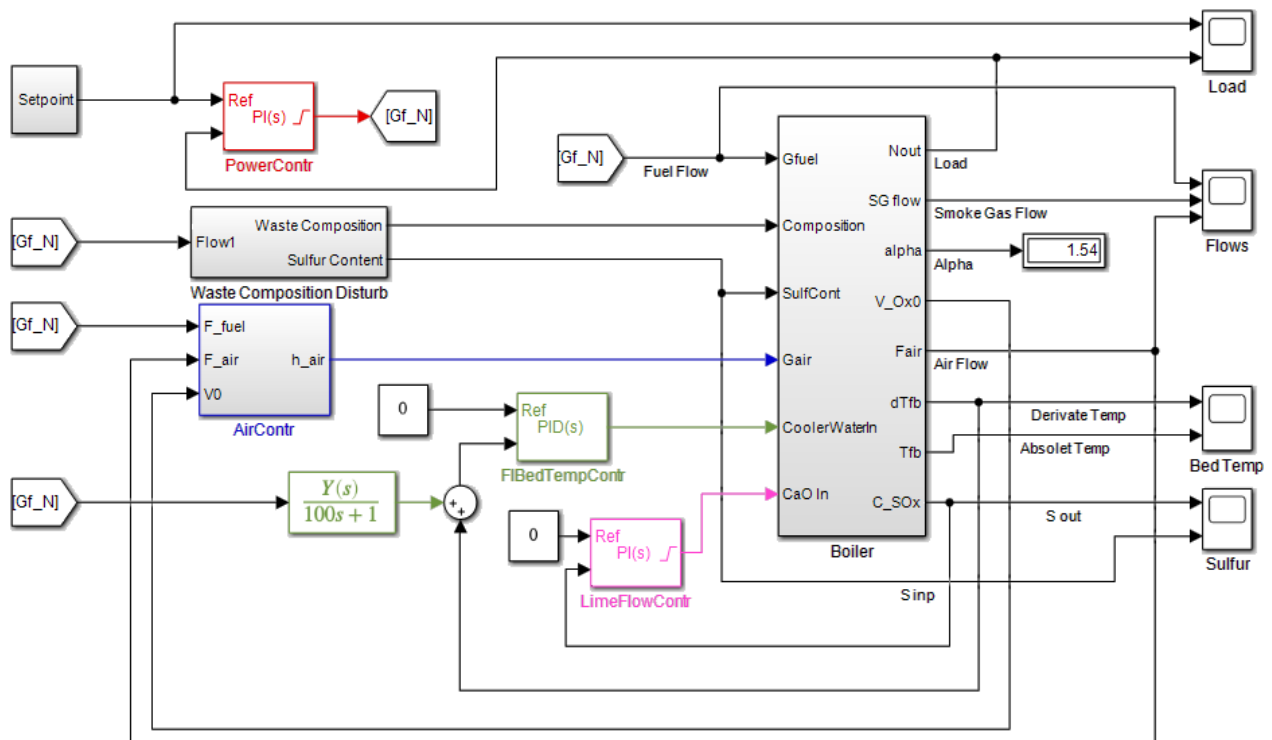


Рис.1. Схема імітаційної моделі САК установки спалювання ТПВ

Однак дослідження показали, що топка з ЦКШ має доволі велику інерційність, як за витратою палива так й витратою повітря, тому різка зміна витрати паливної суміші може призвести до «завалу» топки і виникнення аварійного стану. Тому було прийняте рішення відмовитись від введення в регулятор потужності сигналу про теплотворну здатність палива, залишивши цей сигнал тільки для контролю. Таким чином при спаленні ТПВ динамічні характеристики котла визначаються характеристиками топки.

І навпаки, введення сигналу про теоретичну кількість повітря дозволило збільшити точність підтримання такого складу димових газів, який відповідає мінімальним втратам теплоти від хімічного недопалу та з газами, що відходять. А також за рахунок збільшеної кількості повітря дозволяє зменшити температуру горіння палива в киплячому шарі. Це можна вважати первинним регулюванням температури киплячого шару.

Вторинне регулювання температури шару відбувається за рахунок винесеного трубчастого теплообмінного апарату. Теплообмінні труби занурені у циркулюючу шихту. За рахунок зміни витрати води скрізь цей теплообмінник регулюється температура шихти, що повертається у топку. Така схема регулювання дозволяє підтримувати температуру шихти з більшою точністю у перехідних режимах роботи установки.

Процеси регулювання при нанесенні збурень значенням необхідної потужності та складом паливної суміші, показані на рисунках 2 – 5.

На рисунку 2 наведено змінення завдання по навантаженню та відповідне змінення значення навантаження установки. Крім того на графіку навантаження у моменти часу 5000 с та 7000 с можна побачити невеликі відхилення, які відповідають нанесенню збурень складом паливної суміші.

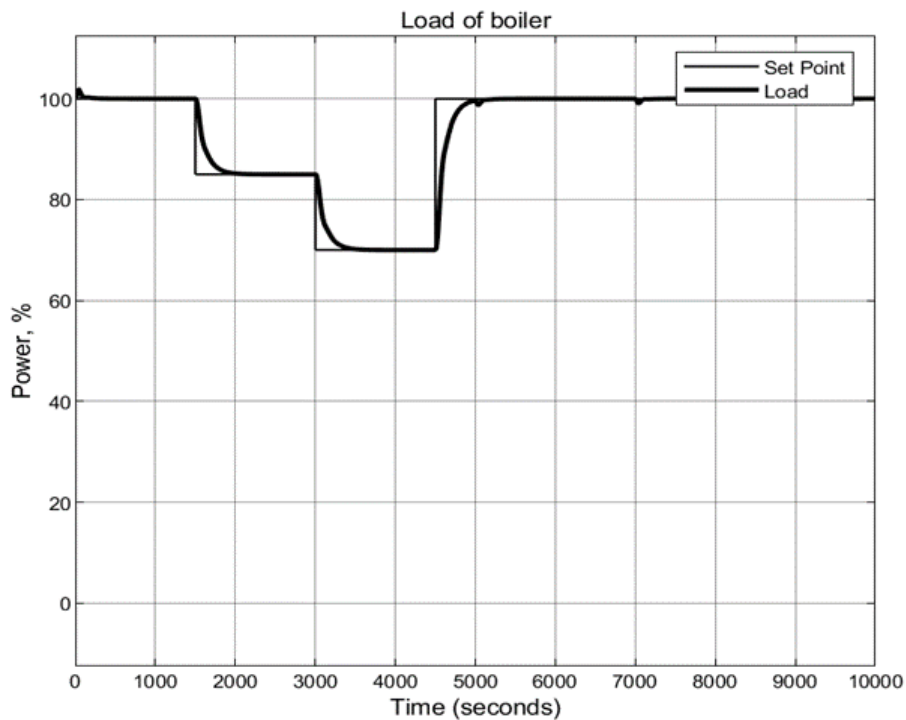


Рис. 2. Графік навантаження установки спалення ТПВ

Виходячи з графіку, можна зробити висновок, що система керування задовольняє вимогам, щодо підтримання заданого теплового навантаження. Збурення складом паливної суміші компенсуються повністю. Спостерігаються незначні, менш 1 %, відхилення потужності, які повністю компенсуються протягом 2-3 хвилин.

На рисунку 3 наведено перехідний процес регулювання температури киплячого шару. Наведено як відхилення від номінального

значення 800 °С. Моменти відхилення температури від номінального значення відповідають моментам змінення потужності (1500 с, 3000 с та 4500 с) та моментам змінення складу паливної суміші (5000 с та 7000 с).

Виходячи з графіку, можна зробити висновок, що система керування задовольняє вимогам щодо підтримання температури киплячого шару. При аналізі графіку перехідного процесу варто відмітити, що при однаковому збуренні потужністю у 15 %, але при різних

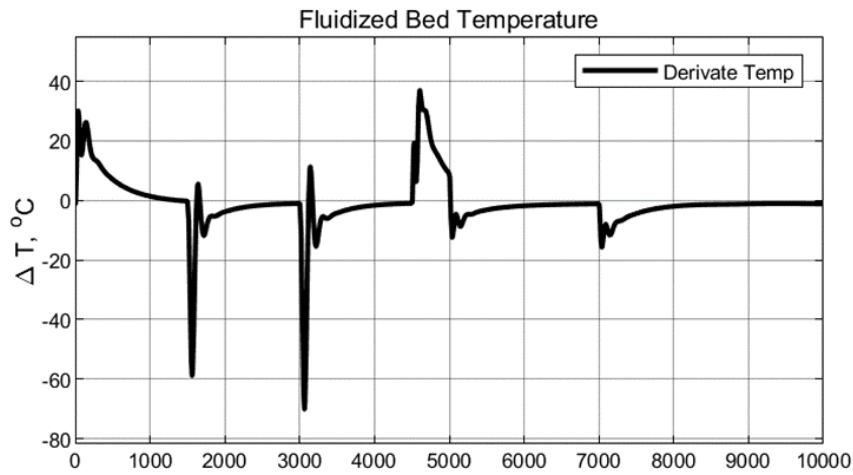


Рис. 3. Перехідний процес регулювання температури киплячого шару

значеннях потужності (див. рис. 2), величина відхилення температури різна. Це пояснюється нелінійними характеристиками об'єкта керування. Також відрізняється як величина так і форма перехідного процесу при збільшенні потужності.

Таким чином якість керування температурою киплячого шару накладає

обмеження на величину збурення, яку може компенсувати система керування. Виходячи з результатів імітаційного моделювання рекомендовано не перевищувати величину збурення у 15 % потужності.

На рисунку 4 наведені значення витрат паливної суміші, повітря та димових газів.

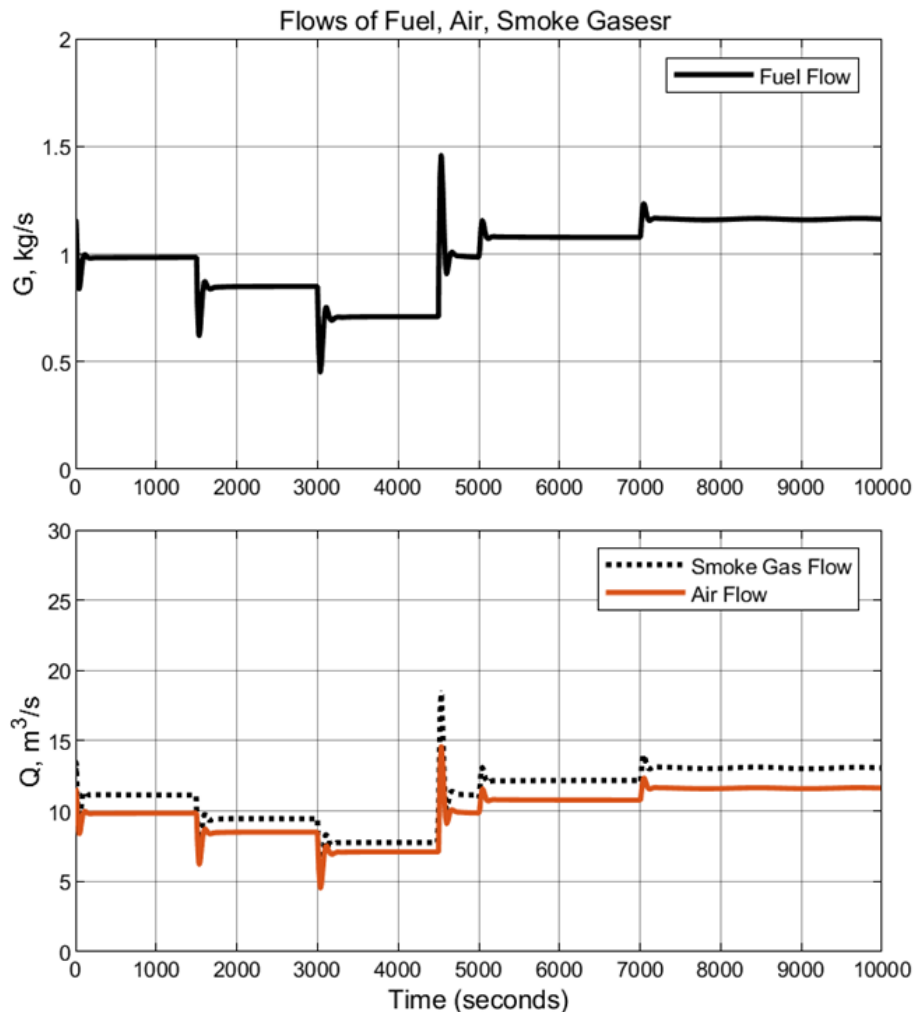


Рис. 4. Графік значень витрат паливної суміші, повітря та димових газів

Аналіз графіків показує що відхилення технологічних параметрів знаходяться у розрахункових межах. Регулюючі органи переміщуються у робочих діапазонах, без виходу на обмеження.

На рисунку 5 наведено графіки перехідного процесу регулювання оксидів сірки. На верхньому графіку наведено відхилення концентрації SOx у димових газах. На нижньому графіку – концентрація сірки у початковій сировині, яка подається на спалювання.

До моменту часу 7000 с моделювалось типове значення концентрації сірки у ТПВ, на рівні 0,5 – 0,8 % до 5000 с та 1 – 1,5 % від 5000 с до 7000 с. Починаючи з 7000 с було змодельоване вміст сірки у складі ТПВ до 10 %. Для типового вмісту сірки концентрація оксиду сірки SOx у димових газах знаходиться у межах допустимих середньодобових значень 0,05 мг/м³, для значно збільшеного значення – у межах допустимого разового викиду у 0,5 мг/м³ [3].

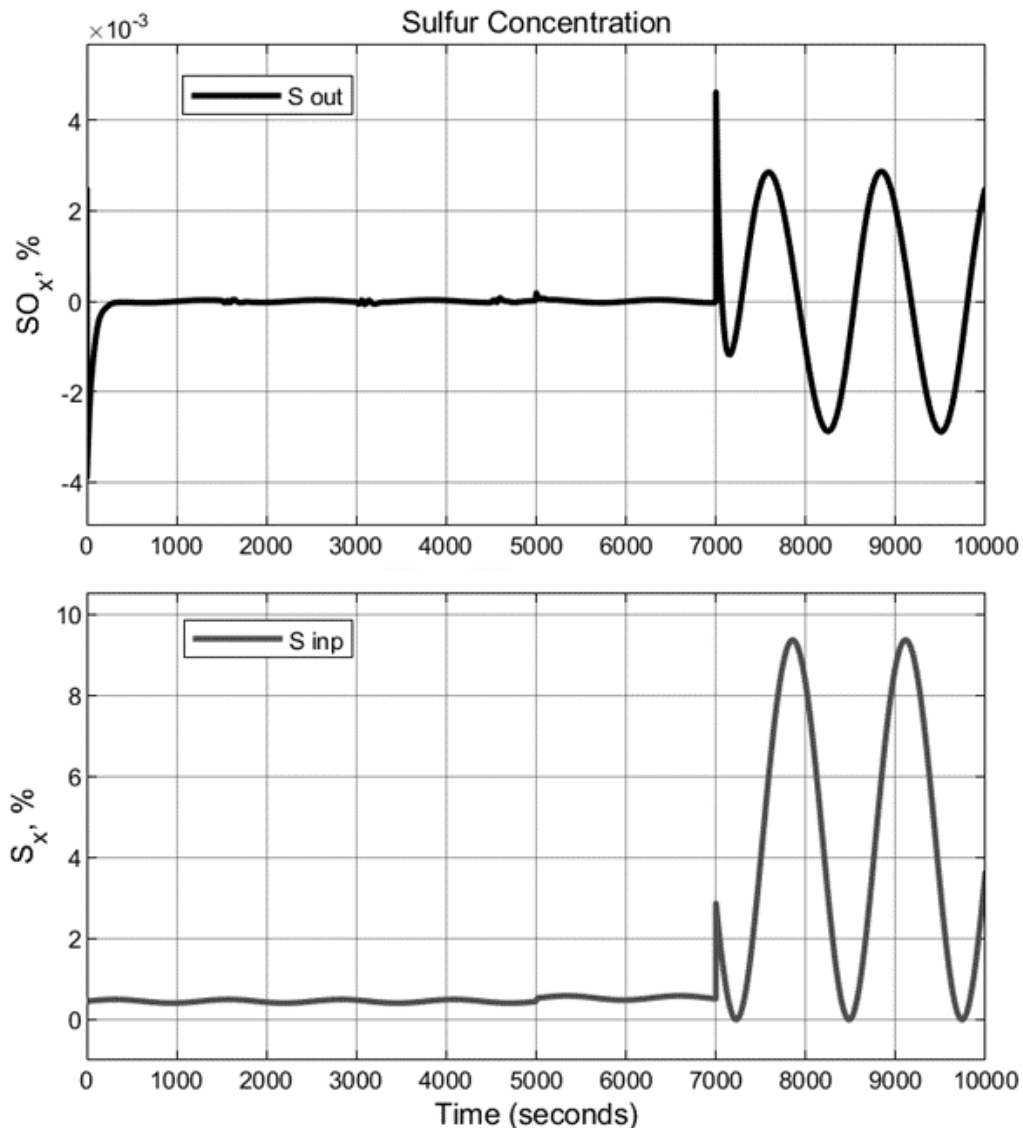


Рис. 5. Графіки перехідного процесу регулювання оксидів сірки

Висновки

У роботі розглянуто проблему керування тепловим навантаженням котла при спалюванні твердих побутових відходів у киплячому шарі. Синтезовано автоматизовану систему керування установкою. При цьому означені регульовані технологічні змінні, керуючі впливи. Виділено чотири основних регулятора, а саме потужності,

температури шару, економічності, та викидів шкідливих речовин. Проведено імітаційне моделювання системи.

Розроблена автоматизована система керування дозволяє стабілізувати процес горіння, мінімізувати викиди шкідливих речовин та підвищити ефективність використання енергії.

Проведене моделювання показало, що запропонована система:

– Забезпечує підтримку стабільної температури киплячого шару, що критично важливо для ефективного спалювання ТПВ та запобігання утворенню шлаку.

– Автоматично адаптується до змінного складу палива, коригуючи подачу повітря та пального з урахуванням динаміки процесу горіння.

– Дозволяє зменшити рівень викидів оксидів сірки та інших шкідливих речовин за рахунок оптимізації режимів горіння.

– Покращує економічні показники установки шляхом зменшення надлишкової витрати палива та підвищення ККД процесу.

Отримані результати можуть бути використані для подальшої оптимізації промислових установок спалювання ТПВ, зокрема в частині розробки інтелектуальних систем керування з використанням машинного навчання та прогнозування параметрів процесу в реальному часі.

Список використаної літератури

1. Yrjö Majanne, Timo Yli-Fossi, Timo Korpela, Maria Nurmoranta, Jukka Kortela, Utilization of Drum Boilers' Storage Capacity for Flexible Operation, IFAC-PapersOnLine, Volume 50, Issue 1, 2017, Pages 2005-2010, ISSN 2405-8963, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.186>.

2. Joris Koornneef, Martin Junginger, André Faaij, Development of fluidized bed combustion—An overview of trends, performance and cost, Progress in Energy and Combustion Science, Volume 33, Issue 1, 2007, Pages 19-55, ISSN 0360-1285, <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2006.07.001>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128506000335>)

3. ЕМЕП/ЕЕА air pollutant emission inventory guidebook 2023: Technical guidance to prepare national emission inventories (ЕМЕП/ЕЕА Guidebook). Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2023. ISBN 978-92-9480-598-0 ISSN 1977-8449. doi: 10.2800/795737

4. Alfe, M. et al. (2010) The effect of temperature on soot properties in premixed methane flames. Combustion and Flame, Vol. 157, pp. 1959-1965. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2010.02.007>

5. Dobrovolskaya, T.S., Maksimov, M.V., Lozhechnikov, V.F., Bondarenko, A.V. The mathematical model of non-certified fuel combustion. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 2, No. 8(68), 2014, 44-51. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.22420>

6. Ткаченко, А.Е. Синтез динамической модели котельного агрегата низкотемпературного кипящего слоя / А.Е. Ткаченко, Б.В. Гавриленко // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых: Сборник научных трудов XV научно-технической конференции аспирантов и студентов в г. Донецке, 20-22 мая 2015. – Донецк: ДонНТУ, 2015. – С. 195-198.

7. Гавриленко, Б.В. Синтез математической модели топки кипящего слоя шахтного воздухоподогревателя при нестационарных условиях для задач автоматического управления / Б.В. Гавриленко, С.В. Неежмаков // Моделирование та інформаційні технології: Зб. наук. пр. – К.: ПІМЕ ім. Г.Є.Пухова НАН України, 2010. – Вип. 57. – С. 164-173.

8. Беглов, К. В., Козлов, О. В., Кондратенко, Ю. П., Марколенко, Т. Д. і Кривда, В. І. (2023) «Автоматичне керування тепловою потужністю котла на основі зміни теплоти згоряння вуглеводневого палива», International Scientific Technical Journal "Problems of Control and Informatics", 68(2), с. 75–92. doi: 10.34229/1028-0979-2023-2-6. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «А»)

9. Вовк І.В., Беглов К.В. Моделирование водогрейных котлов при глубоких 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. Доступно за адресою:

http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2018/6_2018/part_1/22.pdf (Дата звернення: [3 лютого 2025])

10. Патент України на винахід № 120216. Установка для визначення складу горючого газу при його спалюванні / Максимов М.В., Брунеткін О.І., Лисюк О.В., Тарахтій О.С. № а201712785; заявл. 22.12.2017; опубл. 25.10.2019, Бюл. N 20.

References

1. Yrjö Majanne, Timo Yli-Fossi, Timo Korpela, Maria Nurmoranta, Jukka Kortela. (2017). Utilization of Drum Boilers' Storage Capacity for Flexible Operation, IFAC-PapersOnLine, Volume 50, Issue 1, 2017, Pages 2005-2010, ISSN 2405-8963, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.186>.

2. J. Koornneef, M. Junginger, A. Faaij (2007). Development of fluidized bed combustion – An overview of trends, performance and cost, Progress in Energy and Combustion Science, Volume 33, Issue 1, 2007, Pages 19-55, ISSN 0360-1285,

<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2006.07.001>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128506000335>)

3. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023: Technical guidance to prepare national emission inventories (EMEP/EEA Guidebook). Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2023. ISBN 978-92-9480-598-0 ISSN 1977-8449. doi: 10.2800/795737

4. Alfe, M. et al. (2010). The effect of temperature on soot properties in premixed methane flames. *Combustion and Flame*, Vol. 157, 2010, pp. 1959-1965.

<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2010.02.007>

5. Dobrovolskaya, T.S., Maksimov, M.V., Lozhechnikov, V.F., Bondarenko, A.V. (2014). The mathematical model of non-certified fuel combustion. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 2, No. 8(68), 2014, p. 44-51. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.22420>

6. Tkachenko, A.Ye. and Havrylenko, B.V. (2015) 'Synthesis of a dynamic model of a boiler unit with a low-temperature fluidized bed', *Automation of technological objects and processes. Search for the young: Collection of scientific papers of the XV scientific and technical conference of graduate students and students in Donetsk*, May 20–22, 2015, Donetsk: DonNTU, pp. 195–198.

7. Havrylenko, B.V. and Neezhmakov, S.V. (2010) 'Synthesis of a mathematical model of a fluidized bed furnace of a mine air heater under non-

stationary conditions for automatic control tasks', *Modeling and Information Technologies: Collection of Scientific Papers*, Kyiv: H.E. Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering of the NAS of Ukraine, Issue 57, pp. 164–173.

8. Beglov, K., Kozlov, O., Kondratenko, Yu., Markolenko, T. and Krivda, V. (2023) 'Automatic control of the boiler heat power based on changing hydrocarbon fuel's calorific value', *International Scientific Technical Journal "Problems of Control and Informatics"*, 68(2), pp. 75–92. doi: 10.34229/1028-0979-2023-2-6. (Register of Scientific Professional Publications of Ukraine, Category "A").

9. Vovk, I.V. and Beglov, K.V. (2018) 'Modeling of water heating boilers with deep disturbances in fuel content', *Scientific Notes of the Tavriya National University Named After V.I. Vernadsky. Series "Technical Sciences"*, 29(68), 6(1), pp. 116–121. Available at: http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2018/6_2018/part_1/22.pdf (Accessed: [3 February 2025]).

10. Maksimov, M.V., Brunetkin, O.I., Lysyuk, O.V. and Tarakhtiy, O.S. (2019) Patent of Ukraine for the invention No. 120216. Installation for determining the composition of combustible gas during its combustion. Application No. a201712785, filed 22 December 2017, published 25 October 2019, Bulletin No. 20.

Boiler thermal load control during the combustion of solid household waste

T. Markolenko, D. Prodanov, Y. Beglov

¹Odessa National Polytechnic University

Abstract. *In modern conditions of increasing volumes of solid household waste (SHW) and the need for its environmentally safe disposal, particular attention is paid to fluidized bed combustion technologies. This approach significantly reduces waste volume, generates additional thermal energy, and minimizes the negative impact on the environment. However, effective SHW combustion in a fluidized bed requires precise control of combustion parameters, as fuel composition variations and temperature fluctuations can lead to decreased process efficiency, the formation of harmful emissions, and emergency situations.*

This study addresses the issue of automated control of the SHW combustion process in a fluidized bed, aimed at ensuring the stability of the temperature regime and the optimal air-to-fuel ratio. A control system using adaptive regulation algorithms has been proposed and developed to maintain the required process parameters. The primary focus is on developing a mathematical combustion model in a fluidized bed that accounts for dynamic changes in fuel composition, bed temperature, and air supply rate.

The simulation results showed that the proposed control system significantly improves SHW combustion efficiency, reduces SO_x emissions, and minimizes the formation of residual combustion products. The proposed control strategy can be implemented in industrial facilities to enhance the environmental safety and energy efficiency of waste disposal processes.

Keywords: *solid household waste, fluidized bed, automated control system, thermal load, modeling.*

Отримано 18.02.2025

Про авторів



Марколенко Тетяна Дмитрівна, аспірант кафедри програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.

E-mail: tanyadmb@ukr.net; тел.: +38 067 581 3727

Tetiana D. Markolenko, postgraduate student of the Department of Software and Computer-Integrated Technologies, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave, Odesa, 65044, Ukraine. E-mail: tanyadmb@ukr.net; ph.: +38 067 581 3727.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3639-2232>



Проданов Дмитро Геннадійович, магістрант кафедри програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.

E-mail: tkalenkodanilo@stud.op.edu.ua; тел. +38 099 791 8184

Dmitro G. Prodanov, Master's student of the Department of Software and Computer-Integrated Technologies, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave, Odesa, 65044, Ukraine. E-mail: tkalenkodanilo@stud.op.edu.ua; ph.: +38 099 791 8184.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4144-5763>



Беглов Ярослав Ігорович, аспірант кафедри програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна. E-mail: yarikb2394@stud.op.edu.ua; тел. +38 097 426 8651

Yaroslav I. Beglov, postgraduate student of the Department of Software and Computer-Integrated Technologies, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave, Odesa, 65044, Ukraine. E-mail: yarikb2394@stud.op.edu.ua; ph.: +38 097 426 8651

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9864-2711>