

Міністерство освіти і науки України
Національна металургійна академія України

Міністерство освіти і науки України
Національна металургійна академія України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

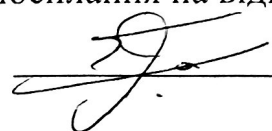
Муман Мохаммед

УДК 662.612 : 536.1

ДИСЕРТАЦІЯ
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СПАЛЮВАННЯ
ВОДОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА ШЛЯХОМ ДОДАВАННЯ ВІДХОДІВ
ВИРОБНИЦТВА БІОДИЗЕЛЯ

144 - Теплоенергетика
14 – Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 М. Муман

Науковий керівник:

Пінчук Валерія Олександрівна,
доктор технічних наук, професор

Дніпро – 2021

АНОТАЦІЯ

Муман М. Підвищення ефективності спалювання водовугільного палива шляхом додавання відходів виробництва біодизеля. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 144 – «Теплоенергетика». – Національна металургійна академія України, Дніпро, 2021.

Національна металургійна академія України, Дніпро, 2021.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню закономірностей процесу займання та горіння водовугільного палива з додаванням відходів біодизелю, а саме гліцерину, теплофізичних властивостей та особливостей теплообміну такого палива.

У дисертаційній роботі отримані нові науково обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати, що у сукупності є суттєвими для вирішення актуальної науково-технічної задачі, яка полягає у підвищенні енергоефективності спалювання водовугільного палива шляхом додавання відходів виробництва біодизеля з урахуванням експериментально визначених теплофізичних властивостей палива, закономірностей і доцільних умов займання та горіння палива із забезпеченням максимальної реалізації його енергетичного потенціалу та мінімізацією негативного впливу на довкілля.

Вперше за умов додавання до водовугільного палива гліцерину як відходу виробництва біопалива у кількості 5...20 % мас. експериментально визначено вплив останнього на теплоємність та коефіцієнт теплопровідності палива, що дозволило встановити відповідні емпіричні залежності.

Отримали подальший розвиток відомості про закономірності впливу вмісту гліцерину в діапазоні 5...20 % мас. у водовугільному паливі на тривалість і температуру кожної стадії горіння, що дозволило визначити

раціональні умови, що забезпечують підвищення ефективності спалювання палива.

Набуло подальшого розвитку уявлення про закономірності теплообміну при примусовому русі водовугільного палива як неньютонівської рідини з урахуванням отриманих теплофізичних властивостей та вперше встановлено критеріальне рівняння подоби виду $Nu=f(Gz)$ для діапазону числа подоби Пекле $137...15 \cdot 10^5$.

Отримали подальший розвиток відомості про закономірності утворення азото- та сірковмісних сполук у продуктах згоряння водовугільного палива в залежності від вмісту гліцерину у ньому та температури процесу, що дозволило визначити умови спалювання, які дозволяють зменшити негативний вплив на довкілля.

Запропоновано раціональні параметри ефективного спалювання водовугільного палива з додаванням гліцерину, які забезпечують максимальну реалізацію енергетичного потенціалу даного палива зі зменшенням негативного впливу на довкілля

Отримано вихідні дані та практичні рекомендації для проєктування теплообмінних апаратів для термічної активації водовугільного палива при температурі 150-200 °C (витрата, швидкість, температура теплоносіїв, площа теплообміннику тощо).

Розроблені режимні параметри роботи випалювальних печей при використанні для їх опалення водовугільного палива з додаванням гліцерину передані для впровадження на ділянці виробництва вапна ТОВ «МЗ «Дніпросталь».

Матеріали дисертаційної роботи використовується у навчальному процесі кафедри енергетичних систем та енергоменеджменту Національної металургійної академії України у курсах лекцій, при виконанні випускних робіт бакалаврів та магістрів зі спеціальністю 144 – Теплоенергетика.

Ключові слова: водовугільне паливо, гліцерин, закономірності горіння, стадії спалювання, температурно-часові характеристики горіння, ступінь вигорання, коефіцієнт теплопровідності, теплоємність, теплообмін, екологія

Список публікацій здобувача

Публікації, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

- включених до наукометричної бази Scopus або Web of Science:

1. Pinchuk V.A., Sharabura T.A., Moumane M., Kuzmin A.V. Experimental research into the influence of temperature, coal metamorphic stage and the size of coal-water fuel drop on the fuel drop combustion process. *International Journal of Energy for a Clean Environment*. 2019. Vol. 20. P. 43–62. DOI: 10.1615/InterJEnerCleanEnv.2019030065.
2. Pinchuk V.A., Moumane M., Sharabura T.A., Pinchuk S.A. Investigations on environmental indicators of thermal processing of coal-water fuel. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*. 2019. Vol. 6. No. 3. P. 493-499.
3. Pinchuk V.A., Moumane M., Sharabura T.A., Kuzmin A.V., Pinchuk S.A. Evidence of the illegitimacy of the additive approach to the determination of the thermophysical properties of coal-water fuel with glycerol. *International Journal of Energy Research*. 2020. 44(14), P. 12056–12065. DOI:10.1002/er.5858.
4. Pinchuk V., Moumane M., Sharabura T., Shishko Y., Kuzmin A. Applicability of the Graetz's solution for Newtonian fluids to the calculations of the heat transfer in coal-water fuel at the pre-heating stage. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2021. Vol. 21. P. 100798. DOI: 10.1016/j.tsep.2020.100798.

- які засвідчують апробацію матеріалів дисертації на наукових конференціях та семінарах:

1. Пинчук В.А., Шарабура Т.А., Муман М. Оценка эффективности использования водоугольного топлива в энергетических установках. *Strategy*

of Quality in Industry and Education: Proceedings XIV International Conference, Varna (Bulgaria) 04-07.06.2018. Varna, 2018. Vol. 1. P. 108 - 113.

2. Шарабура Т.А., Пинчук В.А., Муман М. Исследование процесса сжигания водоугольного топлива в циклонном топочном устройстве путем математического моделирования. *New Technologies and Achievements in Metallurgy and Materials Engineering and Production Engineering and Physics: XIX International scientific conference: collective monograph, edited by Marcin Knapieński Częstochowa (Poland), 7-8.06.2018. Częstochowa, 2018. P. 446 – 451.*

3. Муман М., Пинчук В.О. Експериментальне дослідження теплофізичних властивостей водовугільного палива с додаванням гліцерину. *Молода академія 2020: зб. тез доп. всеукр. наук.-техн. конф. студентів і молодих учених, м. Дніпро, 21-22 травня 2020р. Дніпро. Т.1. С. 103.*

4. Pinchuk V. A., Moumane M., Mamuzić I., Starchenko A. V. Experimental research of heat transfer during thermal activation of coal-water fuel. *Materials and metallurgy: 14 th international symposium of Croatian metallurgical society, Šibenik (Croatia), 21 – 26 June 2020. Šibenik, 2020. P.443.*

5. Муман М., Пинчук В.О. Дослідження теплообміну при примусовому русі водовугільного палива. *Молода академія 2021: зб. тез доп. всеукр. наук.-техн. конф. студентів і молодих учених, м. Дніпро, 20-21 травня 2021р. Дніпро. Т.1. С. 73.*

ABSTRACT

Moumane M. Increasing the efficiency of coal-water fuel combustion by adding waste from biodiesel production. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The thesis for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 144 – «Heat and Power Engineering». – National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, 2021.

National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, 2021.

The thesis has solved an urgent scientific and technical issue, which is to increase the energy efficiency of the burning coal-water fuel process by adding biodiesel production waste. The experimentally determined thermophysical properties of fuel have been taken into account alongside with regularities found and determination of appropriate conditions for ignition and combustion of fuel with maximum energy potential and minimizing the negative impact on the environment.

For the first time under the conditions of adding glycerol to coal-water fuel as a waste of biofuel production in the amount of 5... 20% of the mass the influence of the glycerol on the fuel heat capacity and thermal conductivity was experimentally determined, which allowed to establish the corresponding empirical dependencies.

The data about the regularity of the effect of glycerol content in the range of 5 ... 20 % mass in the coal-water fuel on the duration and temperature of each stage of combustion were further developed. This which allowed to determine the rational conditions for increasing the efficiency of fuel combustion.

The ideas about the regularities of heat transfer during forced motion of coal-water fuel as a non-Newtonian fluid have been further developed taking into account the obtained thermophysical properties. Also, the criterial similarity equations of the form $Nu = f(Gz)$ for the range of Péclet number of $137...15 \cdot 10^5$ have been established for the first time. Practical recommendations for designing heat-transfer

apparatuses for thermal activation of coal-water fuel at 150-200 °C have been obtained.

The data on the regularities of formation of nitrogen- and sulfur-containing compounds in the combustion products of coal-water fuel depending on the content of glycerol in it and the process temperature were further developed. This allowed to determine the combustion conditions that reduce the negative impact on the environment.

The rational parameters of efficient combustion of coal-water fuel with the addition of glycerol are proposed. They provide the maximum realization of the fuel energy potential with a reduction of the negative impact on the environment.

The operating parameters of furnaces while using coal-water fuel with the addition of glycerol for their heating have been developed for implementation at the lime production site of Dnipro Steel Ltd.

The data of the thesis are used in the educational process of the Department of Energy Systems and Energy Management of the National Metallurgical Academy of Ukraine in the courses of lectures, while performing graduate works of Bachelors and Masters in the specialty 144 –Heat Power Engineering.

Keywords: coal-water fuel, glycerol, regularities of combustion, stages of combustion, temperature-time characteristics of combustion, burnout degree, coefficient of thermal conductivity, heat capacity, heat exchange, ecology

List of publications of the applicant

Publications, in which are published the main scientific results of thesis:

- indexed by the database Scopus or Web of Science:

1. Pinchuk V.A., Sharabura T.A., Moumane M., Kuzmin A.V. Experimental research into the influence of temperature, coal metamorphic stage and the size of coal-water fuel drop on the fuel drop combustion process. International Journal of Energy for a Clean Environment. 2019. Vol. 20. P. 43–62. DOI: 10.1615/InterJEnerCleanEnv.2019030065.
2. Pinchuk V.A., Moumane M., Sharabura T.A., Pinchuk S.A.

Investigations on environmental indicators of thermal processing of coal-water fuel. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*. 2019. Vol. 6. No. 3. P. 493-499.

3. Pinchuk, V.A., Moumane, M., Sharabura, T.A., Kuzmin, A.V., Pinchuk, S.A. Evidence of the illegitimacy of the additive approach to the determination of the thermophysical properties of coal-water fuel with glycerol. *International Journal of Energy Research*. 2020. 44(14), P. 12056–12065. DOI: 10.1002/er.5858.

4. Pinchuk V., Moumane M., Sharabura T., Shishko Y., Kuzmin A. Applicability of the Graetz's solution for Newtonian fluids to the calculations of the heat transfer in coal-water fuel at the pre-heating stage. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2021. Vol. 21. P. 100798. DOI: 10.1016/j.tsep.2020.100798.

- publications that confirm the approbation materials of thesis:

1. Пинчук В.А., Шарабура Т.А., Муман М. Оценка эффективности использования водоугольного топлива в энергетических установках. *Strategy of Quality in Industry and Education: Proceedings XIV International Conference, Varna (Bulgaria) 04-07.06.2018*. Varna, 2018. Vol. 1. P. 108 - 113.

2. Шарабура Т.А., Пинчук В.А., Муман М. Исследование процесса сжигания водоугольного топлива в циклонном топочном устройстве путем математического моделирования. *New Technologies and Achievements in Metallurgy and Materials Engineering and Production Engineering and Physics: XIX International scientific conference: collective monograph, edited by Marcin Knapiński Częstochowa (Poland), 7-8.06.2018*. Częstochowa, 2018. P. 446 – 451.

3. Муман М., Пінчук В.О. Експериментальне дослідження теплофізичних властивостей водовугільного палива с додаванням гліцерину. *Молода академія 2020: зб. тез доп. всеукр. наук.-техн. конф. студентів і молодих учених, м. Дніпро, 21-22 травня 2020р. Дніпро. Т.1. С. 103*.

4. Pinchuk V. A., Moumane M., Mamuzić I., Starchenko A. V. Experimental research of heat transfer during thermal activation of coal-water fuel.

Materials and metallurgy: 14 th international symposium of Croatian metallurgical society, Šibenik (Croatia), 21 – 26 June 2020. Šibenik, 2020. P.443.

5. Муман М., Пінчук В.О. Дослідження теплообміну при примусовому русі водовугільного палива. *Молода академія 2021*: зб. тез доп. всеукр. наук.-техн. конф. студентів і молодих учених, м. Дніпро, 20-21 травня 2021р. Дніпро. Т.1. С. 73.

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП.....	12
РОЗДІЛ 1 ВИКОРИСТАННЯ ВУГІЛЛЯ В СУЧАСНИЙ ПЕРІОД....	19
1.1 Аналіз світового паливно-енергетичного балансу.....	19
1.2 Сучасні тенденції використання водовугільного палива.....	27
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1.....	38
РОЗДІЛ 2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗАЙМАННЯ І ГОРІННЯ ВОДОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА З ДОДАВАННЯМ ВІДХОДІВ ВИРОБНИЦТВА БІОДИЗЕЛЮ.....	40
2.1 Експериментальна установка для дослідження процесів займання і горіння композиційного водовугільного палива та методика проведення експерименту.....	40
2.2 Основні закономірності займання і горіння водовугільного палива з додаванням відходів біодизелю.....	46
2.3 Вплив добавки відходів виробництва біодизелю на основні параметри процесу займання і горіння водовугільного палива.....	53
2.4. Екологічні показники процесу горіння водовугільного палива з додаванням відходів виробництва біодизелю.....	67
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2.....	73
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА З ДОДАВАННЯМ ВІДХОДІВ ВИРОБНИЦТВА БІОДИЗЕЛЯ.....	76
3.1. Експериментальне дослідження коефіцієнта теплопровідності водовугільного палива з додавання відходів виробництва біодизеля..	76
3.2 Експериментальні дослідження теплоємності водовугільного палива з додаванням відходів виробництва біодизеля.....	88
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3.....	97

РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООБМІНУ ПРИ ВИМУШЕНОМУ РУСІ ВОДОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА.....	99
4.1 Експериментальні дослідження теплообміну при вимушеному русі водовугільного палива в горизонтальній трубі.....	99
4.2 Рекомендації щодо параметрів теплообмінного апарату для термічної активації водовугільного палива.....	111
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4.....	116
ВИСНОВКИ.....	118
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	121
ДОДАТКИ.....	136

ВСТУП

Актуальність теми. Незважаючи на значне використання газу та нафти, а також, поновлюваних джерел енергії, вугілля продовжує відігравати важливу стратегічну роль у розвитку енергетики та економіки різних країн. У даний час Україна також відноситься до країн, енергетика яких базується на викопних паливах, серед яких одне з головних місць належить вугіллю.

Однією серед відомих технологій застосування вугілля в енергетиці є його використання у вигляді водовугільного палива. Досвід різних країн показав, що спалювання водовугільного палива має ряд переваг, найважливішою з яких є можливість застосування низькосортного вугілля і відходів вуглезбагачення, які самі по собі мало придатні для безпосереднього спалювання або використання в інших енергетичних технологіях. У той же час, поряд з перевагами спалювання водовугільного палива спостерігаються деякі складнощі, а саме, низька теплота згоряння палива, його нестабільне займання і нестійке горіння.

Відомим шляхом усунення цих складнощів є додавання до водовугільного палива замість води недорогих органічних відходів промисловості. Такою перспективною добавкою може стати гліцерин, який утворюється в якості відходів виробництва біодизеля. При цьому, за прогнозом до 2024 року світове виробництво останнього досягне близько 39 мільярдів літрів, що одночасно зумовлює необхідність утилізації відходів та захисту довкілля.

Хоча безпосереднє спалювання гліцерину утруднено, можна очікувати, що його використання в якості добавки до водовугільного палива дозволить поліпшити енергетичні та реологічні характеристики палива, мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище і розширити сферу застосування водовугільного палива.

Однак, для ефективного використання гліцерину в якості добавки до водовугільного палива необхідно детально дослідити і експериментально

обґрунтувати закономірності процесу займання і горіння такого палива і виявити основні фактори, що визначають ефективність процесу його спалювання, зокрема, теплофізичні властивості та особливості теплообміну.

Тому робота, спрямована на забезпечення ефективності спалювання водовугільного палива з додаванням гліцерину шляхом визначення закономірностей і доцільних умов займання та горіння палива із забезпеченням максимальної реалізації його енергетичного потенціалу та мінімізації негативного впливу на довкілля, є актуальною.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана відповідно до наукових напрямів кафедри енергетичних систем та енергоменеджменту Національної металургійної академії України і є частиною досліджень, що проводились у рамках держбюджетних тем: «Наукове обґрунтування та розробка ефективних тепломасообмінних процесів в інноваційних металургійних технологіях» № 0115U003176, «Розробка інноваційної «зеленої» технології глибокої переробки вугілля з метою отримання термоантрациту та штучного графіту високої якості» № 0121U109528, в яких здобувач був співвиконавцем.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення енергоефективності спалювання водовугільного палива з додаванням відходів виробництва біодизеля із забезпеченням максимальної реалізації його енергетичного потенціалу та мінімізації негативного впливу на довкілля.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані такі задачі:

- здійснити аналіз сировинної бази для виробництва водовугільного палива, а також, технологічних властивостей відходів виробництва біодизеля для визначення можливостей та ефективності їх використання для покращення властивостей водовугільного палива;
- експериментально дослідити вплив додавання відходів виробництва біодизеля до водовугільного палива на його коефіцієнт

теплопровідності та теплоємність в певному діапазоні температур та встановити відповідні залежності;

- експериментально дослідити процеси займання та горіння крапель водовугільного палива з додаванням відходів виробництва біодизеля і встановити закономірності впливу основних параметрів на процес спалювання такого палива;

- розрахунково-теоретично дослідити закономірності утворення сірко- та азотовмісних сполук при спалюванні водовугільного палива з додаванням відходів виробництва біодизеля в залежності від вмісту гліцерину у ньому та температури процесу та зробити екологічну оцінку;

- експериментально дослідити теплообмін при примусовому русі водовугільного палива з урахуванням отриманих теплофізичних властивостей, встановити узагальнене рівняння подоби та надати рекомендації для проєктування теплообмінних апаратів для термічної активації палива;

- використати результати досліджень у промисловості та навчальному процесі.

Об'єкт дослідження – процеси спалювання водовугільного палива з додаванням відходів виробництва біодизеля.

Предмет дослідження – закономірності та параметри процесів займання та горіння водовугільного палива з додаванням відходів виробництва біодизеля, його теплофізичні властивості та особливості теплообміну.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених у дисертаційній роботі завдань використано комплексний підхід, який включав у себе експериментальні та розрахункові дослідження.

Експериментальні дослідження процесів займання та горіння крапель водовугільного палива, його теплофізичних властивостей та теплообміну при його русі проведено на спеціально розроблених установках кафедри енергетичних систем та енергоменеджменту зі статистичною обробкою

отриманих даних.

Екологічна оцінка здійснена за допомогою ліцензованого програмного комплексу для термодинамічного розрахунку рівноважного складу та властивостей багатокомпонентних гетерогенних систем «Terra».

Достовірність отриманих результатів забезпечена коректною постановкою задачі, застосуванням фундаментальної теорії горіння та газифікації твердих паливних копалин і відомих закономірностей термодинаміки та тепломасообміну, використанням сучасних методів дослідження, повіреного відповідно до вимог вимірювального обладнання; отримані дані узгоджуються з даними інших авторів, які опубліковані в науковій літературі.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше за умов додавання до водовугільного палива гліцерину як відходу виробництва біопалива у кількості 5...20 % мас. експериментально визначено вплив останнього на теплоємність та коефіцієнт теплопровідності палива, що дозволило встановити відповідні емпіричні залежності.

2. Отримали подальший розвиток відомості про закономірності впливу вмісту гліцерину в діапазоні 5...20 % мас у водовугільному паливі на тривалість і температуру кожної стадії горіння, що дозволило визначити раціональні умови, які забезпечують підвищення ефективності спалювання палива.

3. Набуло подальшого розвитку уявлення про закономірності теплообміну при примусовому русі водовугільного палива як неньютонівської рідини з урахуванням отриманих теплофізичних властивостей та вперше встановлено критеріальне рівняння подоби виду $Nu=f(Gz)$ для діапазону числа подоби Пекле $137...15\cdot10^5$.

4. Отримали подальший розвиток відомості про закономірності утворення азото- та сірковмістних сполук у продуктах згоряння водовугільного палива в залежності від вмісту гліцерину у ньому та

температури процесу, що дозволило визначити умови спалювання, які дозволяють зменшити негативний вплив на довкілля.

Практична цінність отриманих результатів:

1. Визначено раціональні параметри ефективного спалювання водовугільного палива з додаванням гліцерину, які забезпечують максимальну реалізацію енергетичного потенціалу даного палива зі зменшенням негативного впливу на довкілля.

2. Отримано вихідні дані та практичні рекомендації для проєктування теплообмінних апаратів для термічної активації водовугільного палива при температурі 150-200 °С (витрата, швидкість, температура теплоносіїв, площа теплообміннику).

3. Розроблені режимні параметри роботи випалювальних печей при використанні для їх опалення водовугільного палива з додаванням гліцерину передані для впровадження на ділянці виробництва вапна ТОВ «МЗ «Дніпросталь» (акт від 17.11.2020 р);

4. Матеріали дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі кафедри енергетичних систем та енергоменеджменту Національної металургійної академії України у курсі дисциплін «Тепломасообмін», «Спеціальні питання тепломасообміну», «Паливо та його спалювання», при виконанні випускних робіт бакалаврів та магістрів зі спеціальністю 144 – Теплоенергетика (довідка про використання від 20.01.2021 р.).

Особистий внесок здобувача. У дисертації не використані ідеї співавторів публікацій. Всі результати, представлені в дисертаційній роботі, базуються на теоретичних і експериментальних дослідженнях, виконаних особисто і при безпосередній участі автора. У наукових працях, які виконані в співавторстві, особистий внесок автора полягає в наступному:

[122, 123] – участь у проведенні експериментальних досліджень впливу додавання відходів виробництва біодизеля у водовугільне паливо на його коефіцієнт теплопровідності та теплоємність, аналіз та узагальнення

отриманих даних; [50] – участь у проведенні експериментальних досліджень процесів займання та горіння водовугільного палива, аналіз та узагальнення отриманих даних; [125-127] – участь у проведенні експериментальних досліджень теплообміну при примусовому русі водовугільного палива, аналіз та узагальнення отриманих даних у вигляді критеріального рівняння; [110] – розрахунково-теоретичні дослідження закономірностей утворення сірко- та азотовмісних сполук при спалюванні водовугільного палива з додаванням відходів виробництва біодизеля, аналіз та узагальнення отриманих даних; [93] – розрахунково-теоретичні дослідження процесу спалювання палива в циклонній топці; [94] – аналіз наукової літератури, що висвітлює методи переробки водовугільного палива та оцінка ефективності його використання.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися на 7 наукових конференціях: International Online Conference «Environmental Innovations: Advances in Engineering, Technology and Management», 23-27.09.2019, University Brussel; International Online Conference «Environmental Innovations: Advances in Engineering, Technology and Management» 19-23.10.2020, University Brussel; 14th International Symposium of Croatian Metallurgical Society «Materials and metallurgy», Šibenik (Croatia), 21-26.07.2020; XIX International Scientific Conference «New Technologies and Achievements in Metallurgy and Materials Engineering and Production Engineering and Physics», Czestochowa (Poland), 07-08.06.2018 p; XIV International Conference «Strategy of Quality in Industry and Education», Varna (Bulgaria) 04-07.06.2018; Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів і молодих учених «Молода академія 2020», (Дніпро, Україна), 21-22.05.2020 p; Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів і молодих учених «Молода академія 2021», (Дніпро, Україна), 20-21.05.2021 p.

Публікації. Матеріали дисертації опубліковані у 9 друкованих роботах, у тому числі 4 - у виданнях, що індексуються у міжнародних науково-метричних базах Scopus або Web of Science, 5 - матеріалів праць і тез науково-технічних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів з висновками по кожному розділу, загальних висновків, списку використаних джерел із 127 найменувань та 3 додатків. Основна частина дисертації викладена на 110 сторінках і містить 57 рисунків та 10 таблиць. Загальний обсяг роботи – 139 сторінок.

РОЗДІЛ 1

ВИКОРИСТАННЯ ВУГІЛЛЯ В СУЧАСНИЙ ПЕРІОД

1.1 Аналіз світового паливно-енергетичного балансу

Споживання енергії в світі неухильно зростає, останнім часом в основному за рахунок збільшення попиту в країнах з економікою, що розвивається (в країнах Азіатсько-Тихоокеанського регіону, Китаї і т. п.). У розвинених країнах обсяг вироблення енергії стабільний, а динаміка споживання схожа з тенденціями загальноекономічних приростів і спадів [1]. На рисунку 1.1. представлено загальне споживання енергії в світі за період 2000-2019 рр.

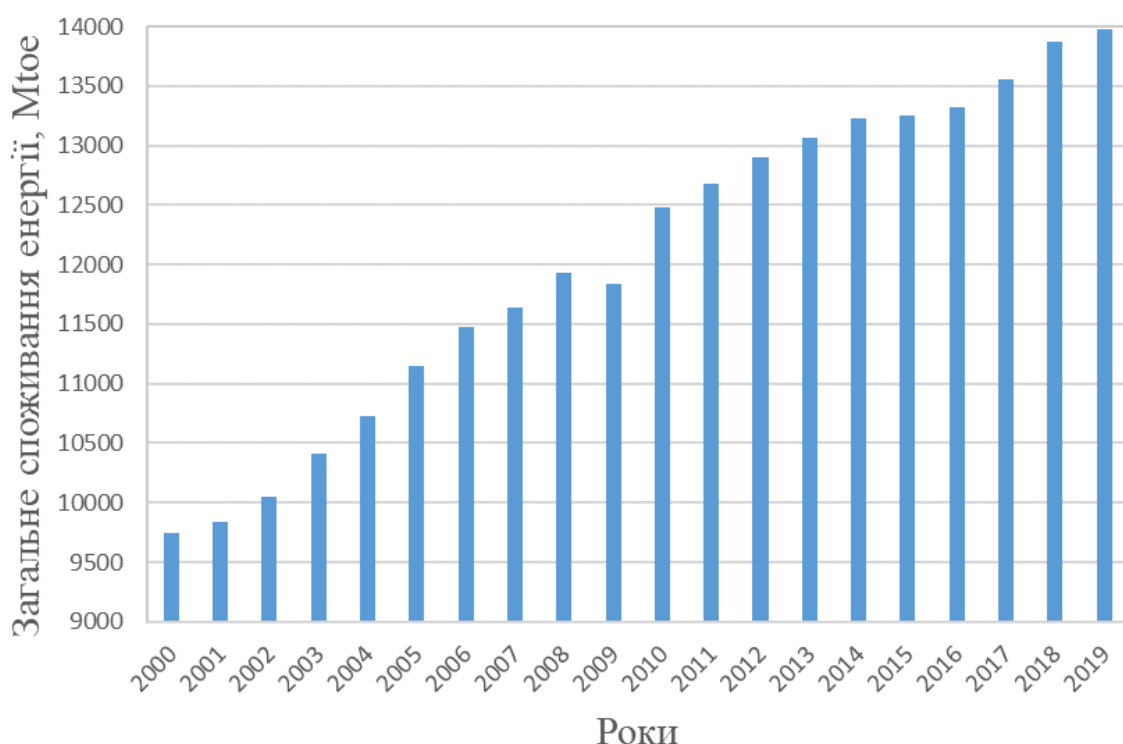


Рисунок 1.1 - Споживання енергії в світі

Як видно, світове споживання енергії зростає, хоча в 2019 році на фоні уповільнення темпів економічного зростання сповільнилося і зростання

енергоспоживання в світі (+0,6%) в порівнянні з середньою динамікою в 2000-2018 рр. (+2%). Найбільшу частку в енергоспоживанні становлять країни Азії (40-43%), країни Північної Америки – 17-20%, країни Європи – 12-15%, країни СНД – 7-10% [2]. У загальному світовому споживанні енергії розбивка за типами енергії виглядає наступним чином (рисунок 1.2).

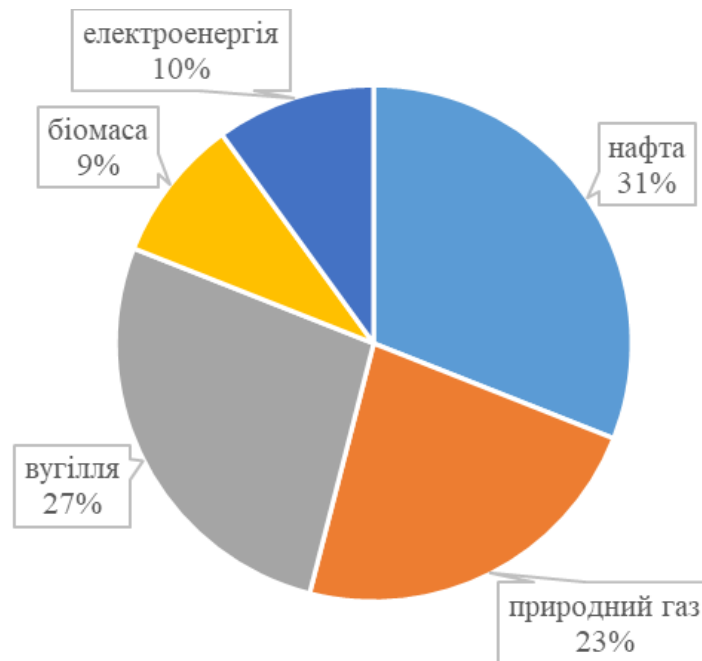


Рисунок 1.2 - Розподіл споживання енергії в світі за видами (2019 р.)

При цьому до 2000 р. вже було витрачено 87% світового запасу нафти, 73% світового запасу природного газу і 2% світового запасу вугілля [2, 3].

Що стосується України, то енергоспоживання неухильно знижується, особливо з 2013 року (з 2013 по 2019 рр. споживання енергії знизилося в 1,4 рази), що обумовлено рядом економічних і політичних чинників [2] (рисунок 1.3). У загальному споживанні енергії в Україні розбивка за типами виглядає наступним чином (рисунок 1.4), що співвідноситься із загальносвітовою ситуацією [2,3].

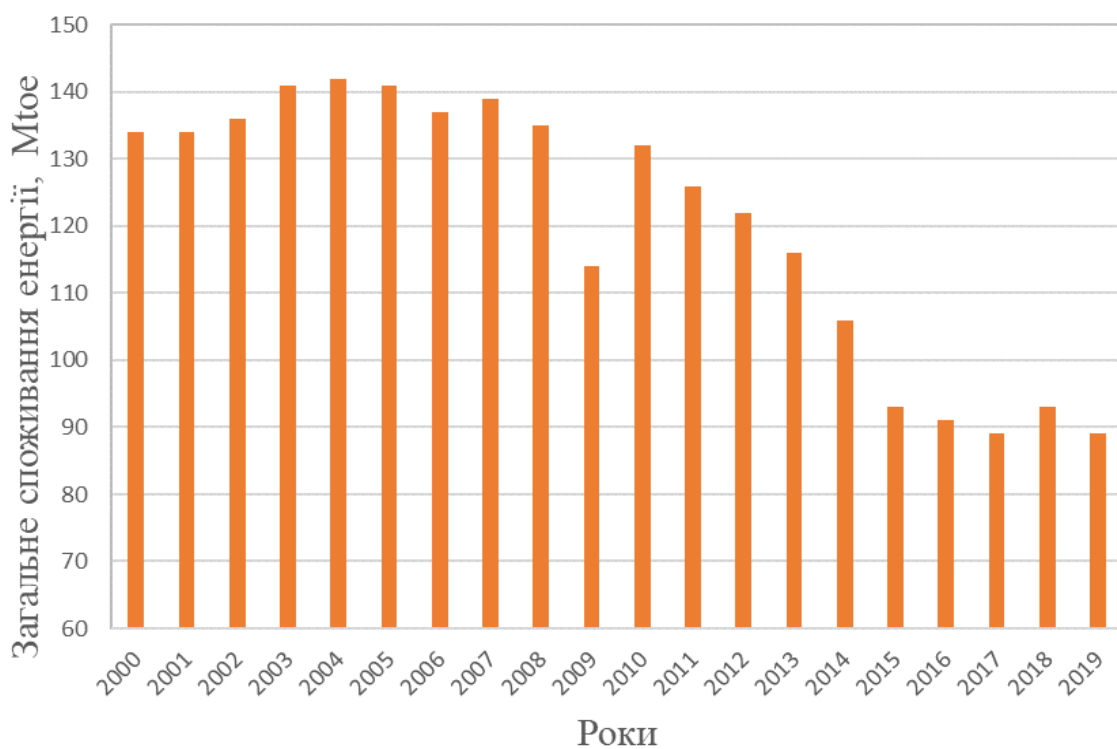


Рисунок 1.3 - Споживання енергії в Україні

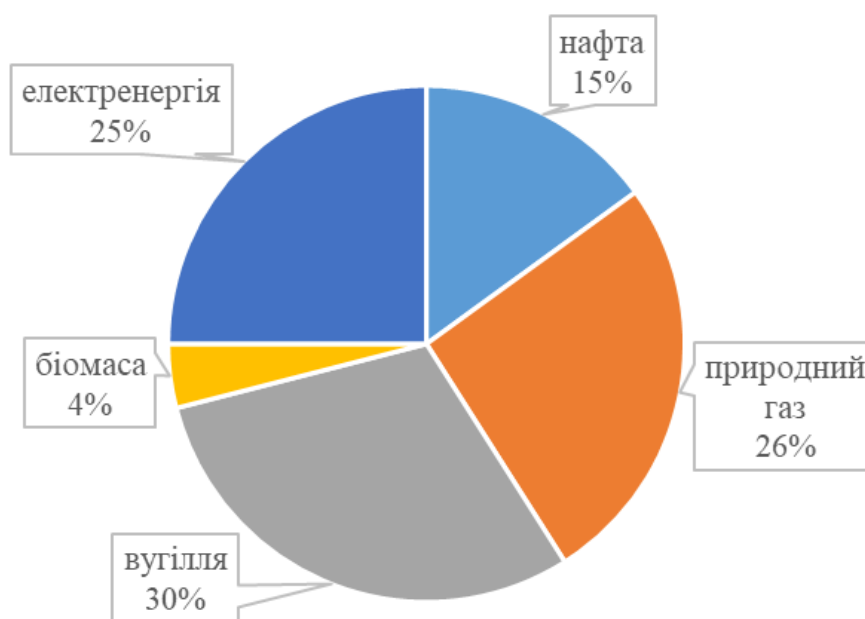


Рисунок 1.4 - Розподіл споживання енергії в Україні за видами (2019 р.)

Широка державна підтримка, висока капіталізація паливно-енергетичного комплексу дозволяє ринку альтернативної енергетики займати

все більш лідируючі позиції в паливно-енергетичному балансі країн. У 2019 році частка поновлюваних джерел енергії, включаючи гідроенергію, в світовому енергетичному балансі зросла майже до 27%, що відповідає висхідній тенденції, що почалася в 2000-х роках [2] (рисунок 1.5).

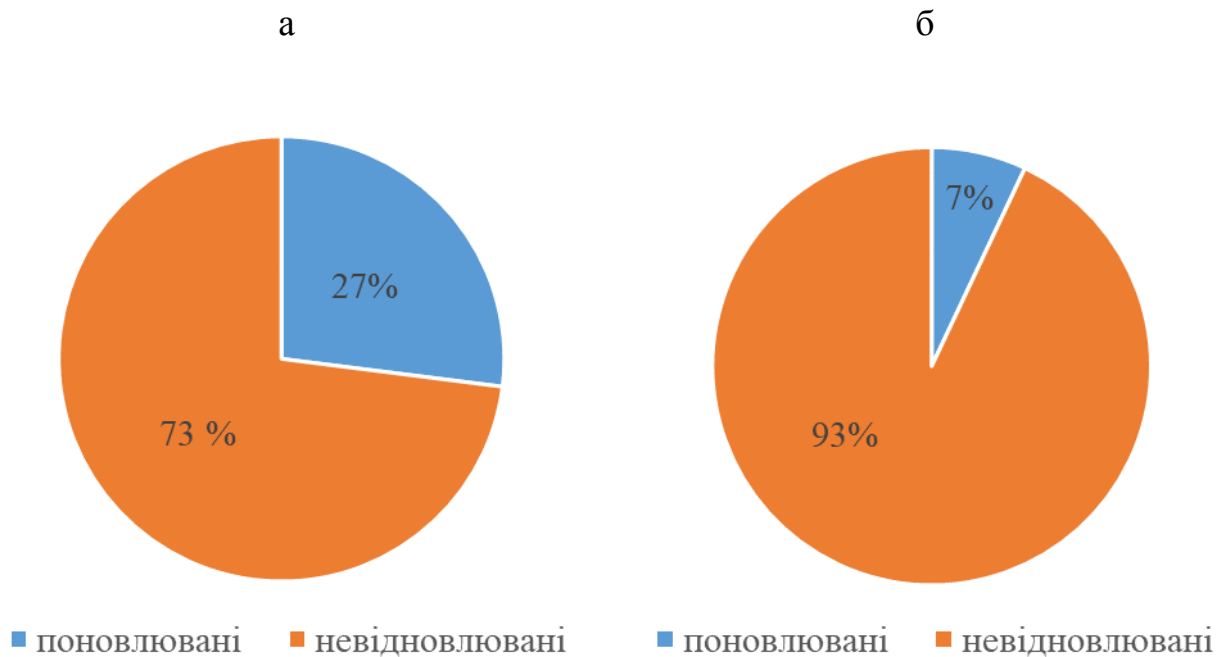


Рисунок 1.5 - Частка відновлюваних джерел у виробництві електроенергії (2019 р.):

а-в світі, б-в Україні

Це зростання, в основному, обумовлене запуском нових вітрових і сонячних електростанцій, так як з 2000 р. частка гідроенергії в світовому енергетичному балансі в цілому залишається на рівні 15%. Падіння вартості технологій в вітровій і сонячній енергетиці і впровадження програм по боротьбі зі змінами клімату в ЄС, США, Китаї, Індії, Японії і Австралії сприяли збільшенню генеруючих потужностей і вироблення електроенергії з відновлюваних джерел [2]. Однак, альтернативні джерела не можуть задовольнити зростаючі потреби людства в енергії, і частка поновлюваних

джерел у виробництві електроенергії як в світі, так і в Україні ще є недостатньою. При цьому в Україні, незважаючи на значний прогрес в цій області, за оцінками експертів на найближчі 30 - 40 років основним енергетичним ресурсом залишається вугілля [4,5].

Таким чином, незважаючи на значне використання газу, нафти і збільшення частки поновлюваних джерел енергії, вугілля відіграє важливу стратегічну роль як у розвитку енергетики та економіки різних країн, так і в світовому паливно-енергетичному балансі.

Глобально, вугільні запаси були оцінені більше ніж 861 млрд. тон [3, 6]. В даний час частка вугілля у світовому виробництві електроенергії становить 35-40 % [2, 3], крім того, вугілля використовується в металургійній і хімічній промисловостях, для виробництва палива [7, 8]. У світі налічують 70 країн, в яких зосереджені основні вугільні родовища, і в 50 з них займаються його промисловим видобутком [2, 6]. На рисунку 1.6 представлено споживання вугілля в світі [2].

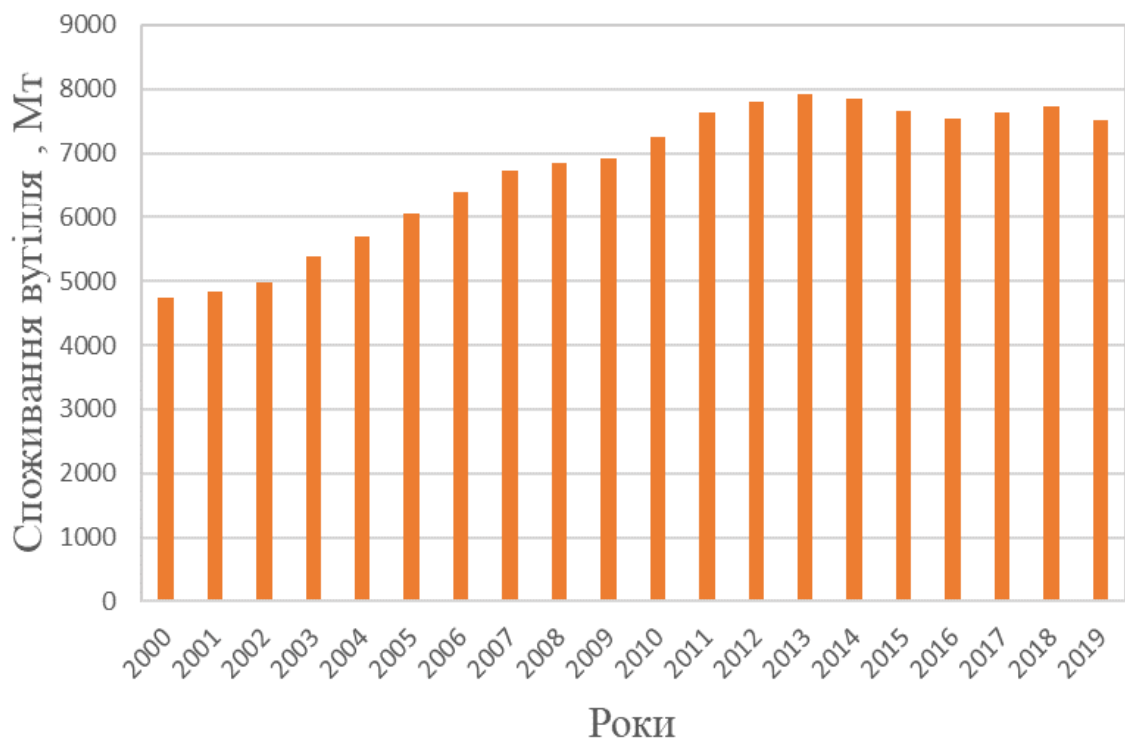


Рисунок 1.6 - Споживання вугілля в світі

У 2019 році, після двох років відновлення, споживання вугілля в світі знову скоротилося (-2,6%). Державні і приватні програми по боротьбі зі зміною клімату в поєднанні з конкуренцією з боку газової та відновлюваної енергетики прискорили закриття багатьох вугільних електростанцій і привели до різкого скорочення споживання вугілля в ЄС (-18%, включаючи істотне падіння в Німеччині, Польщі та Іспанії) і в США (-12%) [2].

Однак, для багатьох країн вугілля є єдиним паливно-енергетичним ресурсом, який вони мають у своєму розпорядженні в достатніх обсягах. Ці країни не можуть обмежити використання вугілля і найближчим часом цей ресурс залишиться ключовим джерелом енергії.

Україна також належить до країн, енергетика яких базується на викопних видах палива, серед яких одне з головних місць належить вугіллю. Видобуток і споживання вугілля в Україні в період 2000-2019 рр. [2, 3] представлені на рисунках 1.7-1.8.

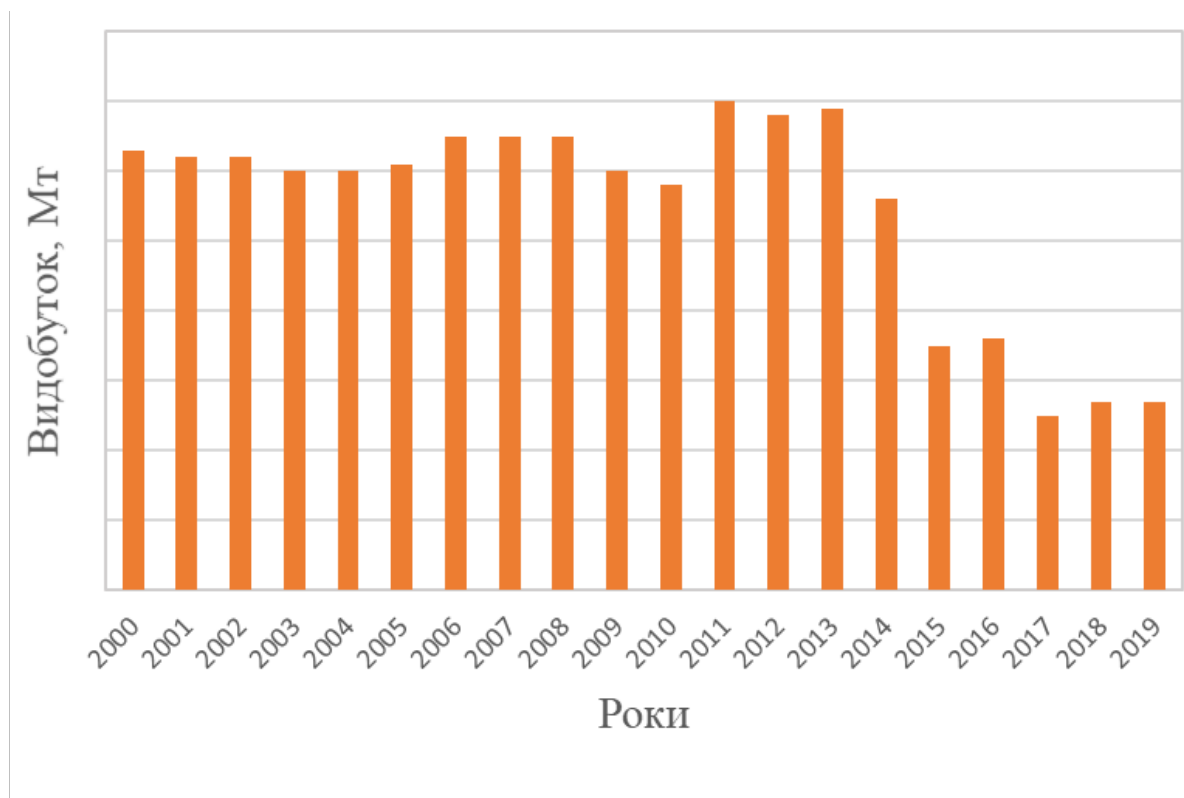


Рисунок 1.7 - Видобуток вугілля в Україні

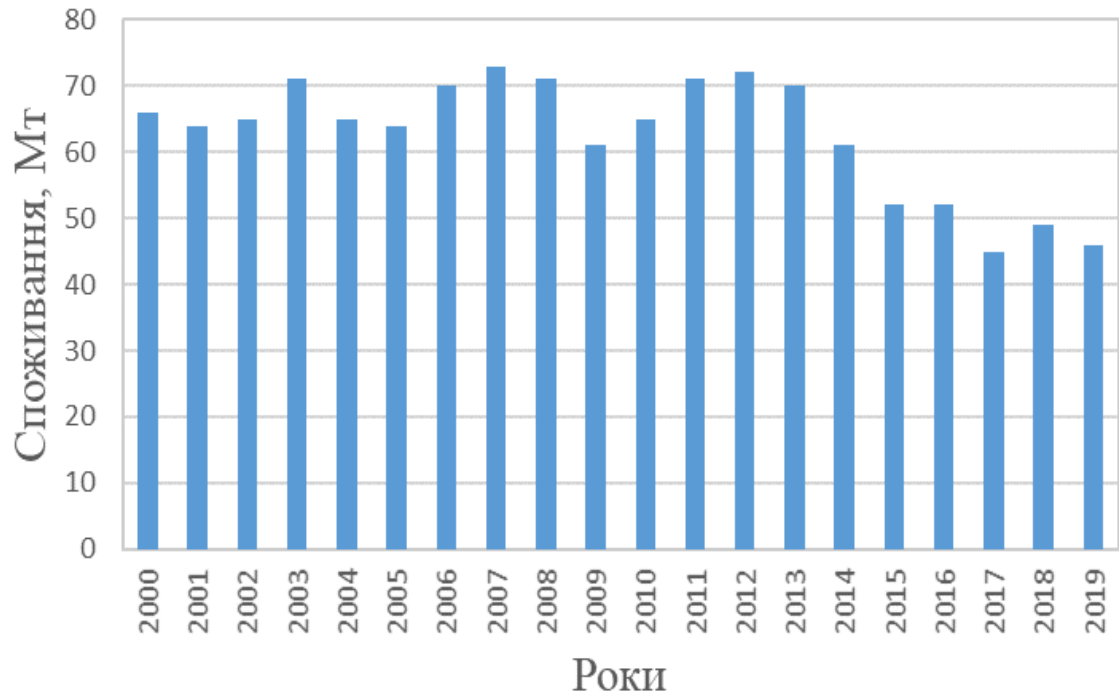


Рисунок 1.8 - Споживання вугілля в Україні

Як видно з рисунку, після 2014 року видобуток вугілля в Україні різко скоротився, більше ніж у 2 рази, що пов'язано з геополітичною ситуацією в Луганській і Донецькій областях України, і виник дефіцит енергетичного та коксівного вугілля. У зв'язку з цим збільшився імпорт вугілля в Україну, наприклад, в 2015 році Україна купила 17 млн. т вугілля, в 2017 році – 20 млн. т вугілля, в 2018 році – вже 22 млн. т вугілля [9, 10].

В Україні залягає і добувається вугілля практично всіх типів і стадій метаморфізму від бурих до антрацитів, чим зумовлена їх придатність для енергетичного, хімічного, побутового використання і інших напрямів переробки [9, 10].

При цьому, експлуатація існуючих вугільних родовищ протягом тривалого часу призводить до збільшення частки низькосортного вугілля в паливно-енергетичному балансі. Останнє зауваження може бути поширене і на інші країни: близько 45 % вугілля в світі – це низькосортне вугілля (з високим вмістом золи, вологи або сірки).

Тому в паливно-енергетичний баланс України доводиться залучати наявне низькосортне вугілля. При безпосередньому спалюванні низькосортного вугілля ускладнюється робота пилоприготувальних установок, топково-пальникових пристроїв та іншого обладнання (димососів, золоуловлювачів, систем гідрозоловидалення), знижується надійність їх роботи, в цілому, знижується економічна і енергетична ефективність котлоагрегату [13].

Перед використанням таких видів вугілля в енергетиці та промисловості проводиться їх збагачення. При збагаченні вугілля можна знизити лише його зольність, тоді як підвищити реакційну здатність такого вугілля неможливо [14, 15]. У світовій практиці найбільш поширені технології мокрого збагачення вугілля, в яких використовується вода. Отже, вугілля і технологічні відходи після процесу збагачення містять значну кількість вологи, яку необхідно видаляти перед спалюванням вугілля в традиційних топках.

Відходи вуглезбагачувальних підприємств займають значні площі і призводять до погіршення екологічної обстановки. Такі відходи містять екологічно небезпечні речовини, які були виділені з вугілля при проведенні збагачення. Зберігання таких шламів у вигляді відстійників не рентабельно з економічної точки зору і створює широкий спектр екологічних проблем [16]. У той же час, у відходах вуглезбагачення міститься горюча маса (в деяких випадках відходи можуть містити до 50% паливної органічної складової), яку можна використовувати в якості палива при раціональному підході [14-16]. Однак, безпосереднє спалювання таких шламів, навіть при наявності на підприємстві ефективного очисного обладнання, супроводжується викидом в атмосферу цілого спектра забруднюючих речовин. Крім того, не досягається повного вигорання паливної складової, що істотно знижує енергетичну цінність відходів вуглезбагачення як енергоносіїв і обумовлює недоцільність їх прямого спалювання.

1.2 Сучасні тенденції використання водовугільного палива

Основним завданням при використанні вугілля в промисловості та енергетиці є ефективне використання його енергетичного ресурсу та мінімізація негативного впливу на навколишнє середовище [17], що призводить до необхідності створення ефективних і екологічно чистих технологій переробки вугілля. До таких технологій належать: різні способи газифікації вугілля з обов'язковим уловлюванням і зберіганням CO_2 , оскільки на цей вид палива припадає 40% загального CO_2 на планеті [6]; хімічна переробка вугілля перед прямим спалюванням, яка дозволяє видалити з нього вологу, мінеральні домішки, шкідливі компоненти, такі як сірка, ртуть і ін. [8, 16], спалювання вугілля в суміші кисню і димових газів [18, 19], спалювання в киплячому шарі [12, 20], вдосконалення існуючих технологій прямого спалювання і т. д.

Серед різноманітних технологій використання вугілля в енергетиці поширені технології використання вугілля в вигляді водовугільного палива, які також можна віднести до чистих вугільних технологій [21-24].

Водовугільне паливо – композиційне паливо, що представляє собою дисперсну систему, що складається з тонкоподрібненого вугілля в кількості 60 ... 70%, води і реагенту-пластифікатора, що забезпечує необхідну плинність і стійкість палива [25-27]. Для виробництва водовугільного палива можливе використання бурого і кам'яного вугілля, а також, низькосортного вугілля і відходів вуглезбагачення, малопридатних для безпосереднього спалювання або використання в інших технологіях [28-30]. Це дозволить істотно розширити масштаби і сфери застосування вугілля і відходів їх вуглевидобутку і вуглепереробки, виключити процеси сушки з технологічної схеми і знизити, таким чином, економічну складову всього циклу паливopідготовки. Крім того, це дозволить утилізувати відходи вуглезбагачення і підвищити екологічну безпеку. В якості рідкого середовища може використовуватися природна, технологічна вода або рідкі

відходи [31, 32]. Пластифікуючими добавками можуть бути відходи виробництв (в тому числі, відходи коксохімічного виробництва, нафтопереробки і ін.), які потребують утилізації [33].

В процесі виробництва водовугільного палива його тверда фаза при необхідності може бути істотно модифікована в напрямку підвищення теплоти згоряння вугільної речовини шляхом видалення з неї кисневмісних сполук, істотного зниження зольності, зменшення вмісту сірки та ін. Також в процесі приготування водовугільного палива в нього можуть вводитися знижувачі в'язкості і стабілізатори, інгібітори корозії та ін. [34-38].

Досвід застосування водовугільного палива в ряді країн досить відомий і показав перспективність технологій газифікації та спалювання такого палива. Умови ефективного горіння водовугільного палива та конструкції топкових пристроїв визначаються технологічними властивостями даного палива [23, 25, 26, 39, 40]:

- вмістом твердої фази (вугілля) і марки вугілля, що використовується при приготуванні водовугільного палива;
- дисперсністю твердої фази (гранулометричний склад і питома поверхня вугілля з мінеральними домішками);
- в'язкістю і стабільністю палива, і його залежністю від швидкості і температури транспортування;
- складом, властивостями і необхідним вмістом хімічних добавок.

Реологічні властивості водовугільного палива визначаються головним чином масовою часткою твердої фази, гранулометричним складом частинок і типом застосовуваної пластифікуючої добавки [41-44]. При цьому, домінуюче значення має гранулометричний склад твердої фази палива. Гранулометричний склад твердої фракції водовугільного палива знаходиться в межах від 10 мкм до 350 мкм [23, 26, 27, 34].

В якості пластифікуючої добавки в водовугільному паливі можуть використовуватися з'єднання чотирьох типів [42, 44, 45]:

- аніонні поверхнево-активні речовини (солі ароматичних поліциклічних сульфокислот, продукти їх конденсації з формальдегідом, сульфоексілат, солі поліциклічних карбонових кислот і ін.);
- неіоногенні поверхнево-активні речовини (оксиетиліровані спирти, алкілфеноли, аміни, блоксополімери оксидів етилену і пропилену);
- високомолекулярні синтетичні і природні сполуки (полімери на основі акрилової кислоти, поліефірні сполуки, лігносульфонати і ін.);
- неорганічні, як правило, лужні добавки (гідроксиди та карбонати металів, фосфати і ін.).

Найчастіше при приготуванні водовугільного палива домінуюче значення мають його реологічні властивості (в'язкість, плинність, стабільність і ін.). При цьому, для забезпечення бажаних реологічних властивостей водовугільного палива, доводиться підвищувати частку водної фази в паливі. У той же час, очевидно, що для енергетичного використання водовугільного палива основним показником є нижча теплота згоряння, яка визначає його споживчі властивості як палива. Підвищити теплоту згоряння водовугільного палива можна шляхом підвищення масової частки його твердої фази в складі. Однак значне підвищення концентрації вугілля в паливі призводить до збільшення його в'язкості, що тягне за собою збільшення витрат енергії при транспортуванні по трубах до топкових пристроїв і створює експлуатаційні труднощі [35, 38, 40, 46]. Таким чином, співвідношення твердої і водної фази в водовугільному паливі впливає, з одного боку, на розподіл концентрації твердої фази по перерізу трубопроводів при транспортуванні, на напірно-витратні характеристики і якість розпилю палива форсунками. З іншого боку, це співвідношення визначає процеси займання і горіння палива в топковому просторі печі і ефективність його спалювання.

В даний час є досліджені способи отримання водовугільного палива, його реологічні властивості, основні закономірності і технології його спалювання [25-27, 40, 47-52]. Процеси спалювання водовугільного палива

по своїй природі багатостадійні і фактично відтворюють аналогічні процеси при спалюванні традиційних рідких палив або частинок вугілля (спалюваних в пиловидному стані). Відомі [53-60] результати теоретичних і експериментальних досліджень процесів займання і горіння водовугільного палива, в результаті яких встановлено, що при горінні можна виділити чотири послідовні стадії: стадія нагрівання і випаровування води до моменту початку термічного розкладання і виходу летких речовин; термічна деструкція з виходом і згорянням летких речовин; прогрів коксового залишку до його займання; вигорання коксового залишку. Разом з тим, є кілька принципових відмінностей. Зокрема, основні відмінності між займанням і горінням краплі водовугільного палива і пилоподібного вугільного палива або рідкого палива: низькотемпературна активація реакційної поверхні на стадії займання; зростання питомої поверхні реакції в основній зоні горіння; посилення горіння за рахунок реакції вуглецю з парою, яка йде паралельно з основною реакцією окислення. Основними відмінностями горіння факела водовугільного палива від пиловугільного і газомазутного є: збільшення часу до займання палива, що викликано випаровуванням зовнішньої води і, як наслідок, збільшення довжини факела; збільшення питомої витрати продуктів згоряння за рахунок внесення водяної пари; зменшення температури факела [61-64].

У той же час, поряд з перевагами спалювання водовугільного палива спостерігаються деякі складнощі, а саме, нестабільне займання і нестійке горіння палива в існуючих енергетичних установках; низька теплота згоряння водовугільного палива, отриманого з високосольного вугілля або відходів вуглезбагачення [21, 25, 47, 51, 58, 59].

Одним з перспективних напрямків усунення цих складнощів і отримання водовугільного палива з необхідними енергетичними та реологічними характеристиками є додавання до водовугільного палива замість води недорогих органічних відходів нафтопереробної та хімічної промисловості, біорідин (біоетанол, скипидар, гліцерин) і т. п. [33, 65-68]. Ці

добавки мають досить високу теплоту згоряння і низьку температуру займання, що дозволить поліпшити енергетичні характеристики водовугільного палива. Залучення до процесу таких добавок розширить сферу застосування водовугільного палива, поліпшить енергетичні та економічні показники використання водовугільного палива, дозволить утилізувати рідкі органічні відходи різних промислових підприємств, зокрема нафтопереробних, полімерних, спиртових, коксохімічних, біопаливних. Використання деяких рідких органічних відходів дозволить знизити навантаження на навколишнє середовище (зменшення викидів оксидів сірки на 40...75% і оксидів азоту на 5...30%), що має велике значення для країн з вугільною енергетикою [68, 69].

Однією з перспективних органічних добавок є гліцерин, який є побічним продуктом деяких виробництв, і одним з основних при виробництві біопалива [65, 68, 70]. Це, так звана, гліцеринова фаза, яка містить гліцерин, метанол, складні ефіри, жирні кислоти, воду і механічні домішки. Інтерес до гліцерину як до самостійного палива або добавки до палива пов'язаний з його низькою вартістю і швидко зростаючим обсягом виробництва (10% від виробництва біодизеля). Прогнозується, що світове виробництво біодизеля досягне близько 39 мільярдів літрів до 2024 року [71, 72], і, відповідно, виникає потреба в утилізації гліцерину. Теплота згоряння гліцерину складає 18,5 МДж/кг...20,5 МДж/кг, що можна порівняти з іншими видами палив [72]. Спалювання безпосередньо гліцерину утруднено через високу в'язкість, високу температуру самозаймання і через проблеми, пов'язані з небезпечними викидами [72]. Однак, якщо гліцерин використовувати в якості добавки до водовугільного палива, можна очікувати істотний вплив на енергетичну цінність, властивості палива і ефективність його спалювання.

В роботі [68] встановлено, що при додаванні гліцерину в водовугільне паливо буде спостерігатися збільшення в'язкості палива (від 0,455 до 1,842 Па·с) і густини (від 1,08 до 1,11 г/см³). Крім того, додавання 20% гліцерину в

паливо зменшить температуру замерзання палива від 0 °С до –5 °С, що важливо для його транспортування і зберігання.

Гранично можливий вміст гліцерину в паливі з точки зору реологічних властивостей складає 21%, при цьому його в'язкість становить до 1,5 Па·с. Оскільки гліцерин має вищу густину і в'язкість, то швидкість осадження вугільних частинок зменшиться, і стабільність палива збільшиться (седиментаційна стійкість складе не менше 20 днів) [73, 74].

Температура займання гліцерину становить 370 °С [72], що, без сумніву, буде впливати на закономірності й особливості займання і горіння водовугільного палива з добавкою гліцерину. Що стосується досліджень впливу добавки гліцерину в водовугільне паливо на його характеристики спалювання, то таких досліджень небагато, але всі вони показують позитивний ефект добавки гліцерину.

Гліцерин успішно використовується як добавка до вугілля і різних композиційних палив. Опубліковані результати досліджень показують, що додавання легкозаймистих речовин є дуже багатообіцяючим способом поліпшення займання і горіння водовугільного палива. Займання паливних сумішей, в яких різні компоненти мають різну температуру займання, являє собою складний процес. У загальному випадку займання компонента з більш низькою температурою займання відбувається раніше. При його горінні споживається окислювач з навколишнього середовища, що може вплинути на займання іншого компонента. Це явище спостерігалось для різних видів палива. Спалювання різних вугільних шихт досліджували в [65, 69]. Було встановлено, що до 35% бітумінозного вугілля можна змішати з антрацитом і значно поліпшити займання та горіння останнього. Однак, подальше збільшення частки кам'яного вугілля в шихті може погіршити весь процес горіння. Виявлено часовий проміжок між загорянням відходів нафтохімії і послідовним горінням твердого залишку в процесі спалювання водовугільної суспензії з нафтохімічними продуктами [70].

Автори статті [66] досліджували процеси займання і горіння крапель водо-біовугільного палива з гліцерином. В результаті досліджень встановлено, що час до займання краплі палива значно зменшився зі збільшенням вмісту гліцерину в паливі до 20%; краплі з більш високим вмістом гліцерину показали більш високі швидкості горіння; теплотворна здатність палива, просоченого гліцерином, збільшилася; при додаванні до 20% гліцерину прискорюється нагрів палива при різних температурах і стабілізується процес горіння.

З експериментальних даних [70] також випливає, що при додаванні до 20% гліцерину покращуються енергетичні характеристики горіння твердого палива, проте, надлишок гліцерину (більше 20%) приводив до дефіциту кисню біля поверхні палива і ускладнював займання, частина не прореагувавших вугільних частинок винеслась з топкового простору [72].

В роботі [75] виконані дослідження процесу горіння низькосортного вугілля, просоченого гліцерином в кількості 10 ... 40%. Зразки вугілля, просочені гліцерином, мали теплоту згоряння в 1,5 рази вище, ніж вугілля спочатку. Результати досліджень показали, що при використанні гліцерину до 20% збільшилася реакційна здатність палива, при подальшому збільшенні вмісту гліцерину спостерігається деяке погіршення реакційної здатності, що свідчить про те, що обмежена кількість гліцерину може проникати в пори вугілля. Результати також показують, що при використанні гліцерину до 20% ступінь вигорання вугілля збільшується, але подальше збільшення гліцерину до 40% призводить, навпаки, до нестабільного горіння і зменшення ступеня вигорання. Таким чином, вміст гліцерину до 20% є оптимальним з точки зору ефективності спалювання вугілля.

В роботі [75] показано, що додавання гліцерину безпосередньо до низькосортного вугілля призводить до поліпшення кінетики горіння, до скорочення викидів незгорілого вуглецю на 35% і збільшення калорійності вугілля до 80%.

Крім того, в роботі [76] встановлено, що гліцерин в вугільних порях випаровується при більш високій температурі, що, безсумнівно, відобразиться на тривалості періоду до займання водовугільного палива з гліцерином.

Додавання гліцерину позитивно позначається і на процесі піролізу паливних пелет з біомаси. Результати роботи [77] показують, що зі збільшенням вмісту гліцерину спостерігається різке збільшення утворення піролізного газу (з 34% до 54% при додаванні 40% гліцерину), вихід рідких продуктів знижується (з 38% до 22% при додаванні 40% гліцерину). Крім того, температура піролізу в даному дослідженні становила 600 °C замість традиційних 800 °C.

Результати досліджень [77] також показали, що оптимальний відсоток вмісту гліцерину в пелетах з біомаси становить 20 мас. % і менше, сама пелета має високу міцність і хороші енергетичні характеристики при піролізі.

Дослідження авторів [65] показало, що доцільним є додавання різних добавок в водовугільне паливо, в тому числі і гліцерину. Згідно з результатами досліджень, при додаванні гліцерину в водовугільне паливо в кількості 20% час до займання скоротився до 30% в досліджуваному температурному діапазоні 700-900 °C, температура займання склала 465 °C, що на 20 °C вище, ніж у зразків палива без гліцерину, температура горіння краплі палива склала 955 °C, що на 65 °C нижче, ніж у зразків палива без гліцерину.

При цьому, в даному дослідженні не наведено температурно-часові характеристики процесу займання і горіння палива, наведені результати досліджень лише при додаванні 20% гліцерину, що унеможливило встановити закономірності впливу різних параметрів (температури процесу, кількості гліцерину і ін.) на процес спалювання водовугільного палива з добавкою гліцерину.

Аналіз проведених досліджень дозволяє зробити висновок, що незважаючи на інтенсивні зусилля по дослідженню використання гліцерину в

якості добавки для поліпшення процесів займання і горіння водовугільного палива, повних даних по цій темі немає. Таким чином, щоб ефективно використовувати гліцерин як добавку в водовугільне паливо, важливо експериментально дослідити і обґрунтувати уявлення про теплові і фізико-хімічні процеси, що протікають при займанні і горінні водовугільного палива з гліцерином, і виявити основні фактори, що визначають ефективність процесу спалювання.

Додавання гліцерину в водовугільне паливо позитивно позначається і на екологічних показниках процесу спалювання палива. У роботах визначено, що при додаванні гліцерину в водовугільне паливо викиди оксидів сірки в продуктах спалювання зменшуються на 63%, а оксиди азоту – майже на 30% [65]. А в порівнянні з безпосереднім спалюванням кам'яного вугілля кількість SO_2 і NO_x при спалюванні водовугільного палива з гліцерином зменшується вдвічі [68]. Але при цьому аналіз наукових публікацій показав відсутність даних про закономірності утворення різноманітних сірко- і азотовмісних сполук, які утворюються при спалюванні водовугільного палива, що містить різну кількість гліцерину, що також є важливим завданням при екологічній оцінці використання даного палива.

Як показав аналіз наукових публікацій, відсутні дані і по теплофізичних властивостях водовугільного палива з гліцерином. У той же час цими властивостями також визначаються енергетична ефективність процесу спалювання палива.

Науковим керівником даної роботи раніше визначені теплофізичні властивості водовугільного палива, отриманого з вугілля різних марок з різними параметрами. Експериментально в температурному діапазоні 40...200 °C встановлені залежності комплексу теплофізичних властивостей водовугільного палива, отриманого з вугілля різної стадії метаморфізму, від співвідношення твердої фази і води, вмісту мінеральних домішок. Визначено, що коефіцієнт теплопровідності водовугільного палива змінюється в межах 0,4...0,8 Вт/(м·К), теплоємність змінюється в межах 3,6...6,5 кДж/(кг·К).

Запропоновано емпіричні залежності, що дозволяють визначити значення теплофізичних властивостей водовугільного палива як дисперсної системи в залежності від його характеристик [59, 78].

Також відомі теплофізичні властивості самого гліцерину. Наприклад, при 25 °С коефіцієнт теплопровідності дорівнює 0,279 Вт/(м·К), що в два рази нижче теплопровідності води. При нагріванні гліцерину його теплопровідність збільшується і досягає значення 0,309 Вт/(м·К) при 190 °С. Питома теплоємність гліцерину при 20 °С дорівнює 2,35 кДж/(кг·К) і при нагріванні збільшується та при 160 °С становить 3,12 кДж/(кг·К) [72, 79].

Незважаючи на значимість інформації про теплофізичні властивості, дослідники використовують узагальнені адитивні рівняння, за якими значення властивостей водовугільного палива знаходять як середньозважене окремих компонентів палива (вугілля, води, добавок), що може призводити до істотних погрешностей. Тому, важливою науковою задачею є визначення впливу вмісту гліцерину в водовугільному паливі на його теплофізичні властивості, а саме: значення коефіцієнта теплопровідності і теплоємність в певному температурному діапазоні.

Для підвищення ефективності спалювання водовугільного палива можливе використання попередньої активації палива перед спалюванням, яка дозволяє забезпечити стійке ефективне горіння [80-82]. Серед різних способів активації термічна активація водовугільного палива перед спалюванням є найбільш технічно і економічно доступною [83].

У роботах [59,82,84] встановлено, що при попередній термічній активації водовугільного палива при температурах 150-200 °С підвищується реакційна активність палива і утворюється значна кількість газоподібних компонентів, тому при горінні виділення і взаємодія газоподібних продуктів відбувається більш інтенсивно і займання летких речовин відбувається на 15% раніше в порівнянні з неактивованим водовугільним паливом [59]. Крім того, попередня термічна активація водовугільного палива дозволить знизити енерговитрати на випаровування водної фази безпосередньо в робочому

просторі енергетичного агрегату, що дозволить стабілізувати процес горіння і температурний рівень в топці.

Для проектування ефективних пристроїв для термічної активації водовугільного палива необхідно знати параметри процесу теплообміну при нагріванні і русі палива. На даний момент єдиний аналітичний підхід до визначення процесів теплообміну водовугільного палива полягає в використанні рівнянь для ньютонівських рідин [85]. Аналіз публікацій [86-88] показав, що отримані результати значно відрізняються від [85] і вказують на значну залежність теплопередачі від вмісту твердої фракції в паливі. В роботі [86] автори досліджували водовугільний шлам з низьким вмістом твердої фази (27% і 49%). У той же час вміст твердої фази в водовугільному паливі значно вищий – близько 55-65%, що робить отримані дані погано застосовними. Також властивості кам'яного вугілля різних родовищ істотно відрізняються, що впливає не тільки на параметри горіння [89], але і на реологічні і теплофізичні властивості водовугільного палива і, як наслідок, на особливості процесу теплообміну. Крім того, водовугільне паливо являє собою неньютонівську рідину [90, 91] при високих значеннях концентрації твердої фази. Таким чином, рішення для ньютонівських рідин не може до нього застосовуватися і необхідні додаткові дослідження процесів теплообміну при русі і нагріванні водовугільного палива.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. Не дивлячись на значне використання газу і нафти та збільшення частки поновлюваних джерел енергії, вугілля відіграє важливу стратегічну роль у розвитку енергетики та економіки різних країн в світовому паливно-енергетичному балансі. Для багатьох країн вугілля є єдиним паливно-енергетичним ресурсом, який вони мають у своєму розпорядженні в достатніх обсягах. Україна також належить до країн, енергетика якої в даний

час базується на викопних видах палива, серед яких одне з головних місць належить вугіллю.

2. Серед різноманітних технологій використання вугілля в енергетиці поширені технології використання вугілля в вигляді водовугільного палива в різних енергетичних і паливноспоживаючих агрегатах. Одним з перспективних напрямків отримання водовугільного палива з необхідними властивостями і підвищенням ефективності його спалювання є додавання до водовугільного палива органічних відходів різних галузей промисловості, зокрема, відходів виробництва біодизеля – гліцерину.

3. Аналіз проведених досліджень дозволяє зробити висновок, що, незважаючи на наявність досліджень використання гліцерину в якості добавки для поліпшення процесів займання і горіння водовугільного палива, повних даних по цій темі немає. Але, для ефективного спалювання водовугільного палива з додаванням гліцерину важливо експериментально дослідити і обґрунтувати уявлення про теплові і фізико-хімічні процеси, що протікають при займанні та горінні такого палива, і виявити основні фактори, що визначають ефективність процесу спалювання.

Також аналіз наукових публікацій показав відсутність даних про закономірності утворення різноманітних сірко- і азотовмісних сполук, які утворюються при спалюванні водовугільного палива, що містять різну кількість гліцерину, що також є важливим завданням при екологічній оцінці використання даного палива.

4. Ефективне використання водовугільного палива з додаванням гліцерину можливе на основі детального знання всього комплексу його властивостей. Однак, якщо дані по реологічних властивостях такого палива представлені в різних публікаціях, то даних по теплофізичних властивостях практично немає. Тому важливою науковою задачею є визначення впливу вмісту гліцерину в водовугільному паливі на його теплофізичні властивості, а саме, значення коефіцієнта теплопровідності і теплоємність в певному

температурному діапазоні, а також, визначення особливостей теплообміну при русі і нагріванні водовугільного палива.

У зв'язку з цим, в роботі були поставлені наступні завдання:

- здійснити аналіз сировинної бази для виробництва водовугільного палива, а також, технологічних властивостей відходів виробництва біодизеля для визначення можливостей та ефективності їх використання для покращення властивостей водовугільного палива;
- експериментально дослідити вплив додавання відходів виробництва біодизеля до водовугільного палива на його коефіцієнт теплопровідності та теплоємність в певному діапазоні температур та встановити відповідні залежності;
- експериментально дослідити процеси займання та горіння крапель водовугільного палива з додаванням відходів виробництва біодизеля і встановити закономірності впливу основних параметрів на процес спалювання такого палива;
- розрахунково-теоретично дослідити закономірності утворення сірко- та азотовмісних сполук при спалюванні водовугільного палива з додаванням відходів виробництва біодизеля в залежності від вмісту гліцерину у ньому та температури процесу та зробити екологічну оцінку;
- експериментально дослідити теплообмін при примусовому русі водовугільного палива з урахуванням отриманих теплофізичних властивостей, встановити узагальнене рівняння подоби та надати рекомендації для проєктування теплообмінних апаратів для термічної активації палива;
- використати результати досліджень у промисловості та навчальному процесі.

Основні положення розділу 1 опубліковані в [92, 93].

РОЗДІЛ 2

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗАЙМАННЯ І ГОРІННЯ ВОДОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА З ДОДАВАННЯМ ВІДХОДІВ ВИРОБНИЦТВА БІОДІЗЕЛЮ

2.1 Експериментальна установка для дослідження процесів займання і горіння композиційного водовугільного палива та методика проведення експерименту

Для дослідження процесів займання і горіння композиційного водовугільного палива використовувалося експериментальне обладнання, схема якого наведена на рисунку 2.1.

Установка складається з:

- електропечі типу СНОЛ-2.2.1,5/12 з регулюючим приладом РТЕ-4.1м-10-220, необхідним для автоматичного контролю і підтримки заданої температури робочого простору печі;
- пристрою для введення крапель водовугільного палива з системою хромель-алюмелевих термопар;
- системи реєструючих приладів для безперервної реєстрації зміни температур в режимі реального часу.

Електрична піч має об'єм робочого простору 6000 см^3 , всередині якого створюється рівномірне температурне поле. Відведення продуктів згоряння здійснюється через спеціальні отвори в печі. Введення краплі в камеру здійснювалося за допомогою направляючого штока, на якому закріплена термопара підтримки краплі.

Зразок водовугільного палива розташовувався в рівномірно нагрітому високотемпературному середовищі. Схема розташування термопар для вимірювання температури зразка палива і середовища в безпосередній близькості біля нього наведена на рисунку 2.2. Заміри температур

здійснювалися всередині зразка (поз. 1), на відстані 2 мм від зразка (поз. 2), на відстані 5 мм (поз. 3) від зразка.

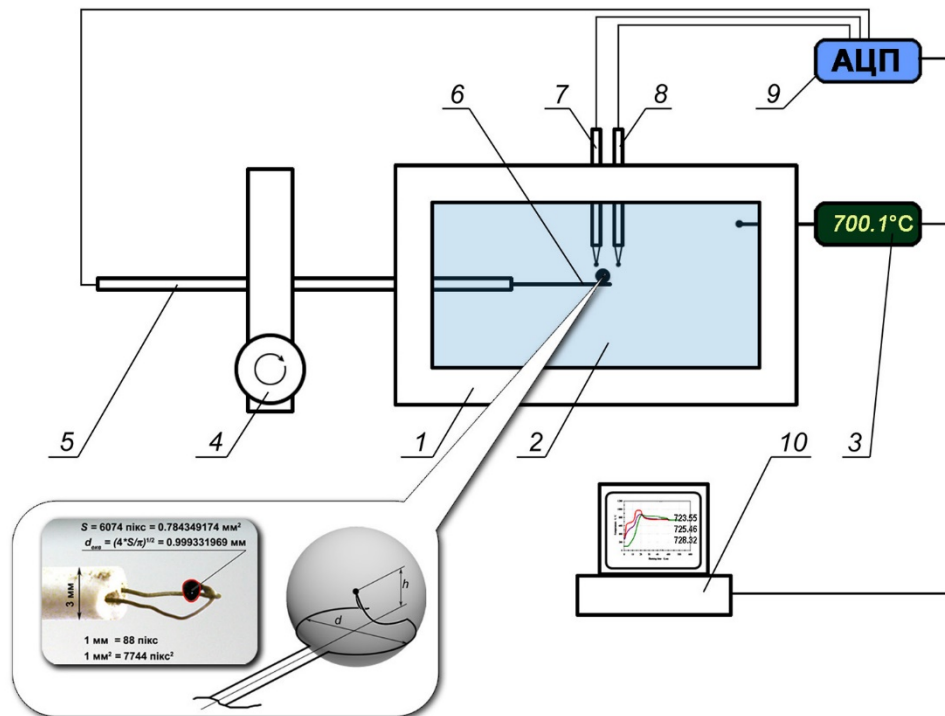


Рисунок 2.1 - Принципова схема експериментальної установки для дослідження процесів займання і горіння водовугільного палива:

1 - електрична піч; 2 - скло кварцове; 3 - блок управління піччю; 4 - пристрій для введення крапель водовугільного палива; 5 - направляючий шток; 6 - термопара підтримки краплі; 7, 8 - термопари; 9 - аналого-цифровий перетворювач EX-9018; 10 - комп'ютерна система реєстрації та контролю

Виміри проводилися з частотою до 10 с^{-1} . Показання термопар передавалися на програмно-апаратний вимірювальний комплекс, який дозволяв контролювати, обробляти і виводити на екран комп'ютера значення параметрів в режимі реального часу.

Загальна похибка вимірювальних приладів склала 2,5...3%. Довірчий інтервал значень часових параметрів становив $\tau \pm 1,6\%$, значень температурних параметрів $t \pm 2,8\%$ з довірчою ймовірністю 95%.

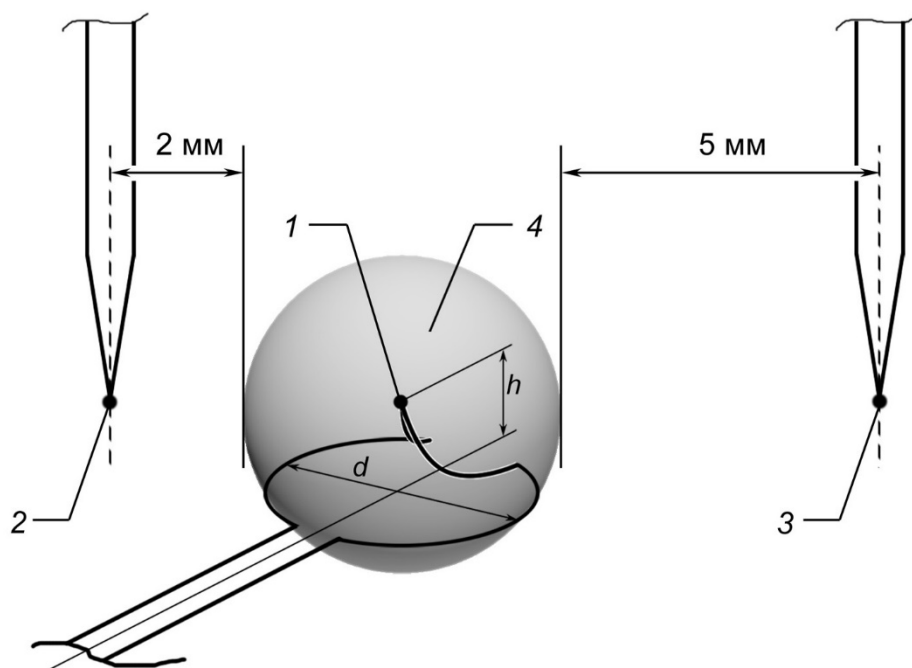


Рисунок 2.2 - Схема розміщення термопар при проведенні експериментальних досліджень:

1 - термопара підтримки краплі водовугільного палива; 2 - термопара для вимірювання температури навколо краплі водовугільного палива на відстані ≈ 2 мм від поверхні краплі; 3 - термопара для вимірювання температури навколо краплі водовугільного палива на відстані ≈ 5 мм від поверхні краплі; 4 - крапля водовугільного палива

Дослідження проводилися в повітряному середовищі при температурах 600 - 800 °С. Досліджуваний температурний діапазон робочого простору печі був обраний з наступних міркувань: нижня межа визначалася температурою, при якій гарантовано відбувається займання та горіння водовугільного палива, а верхня межа забезпечувала наочність протікання процесу горіння палива і встановлення необхідних закономірностей.

Дослідження ступеня вигорання палива виконувалося методом термогравіметричного аналізу.

При дослідженнях розмір крапель водовугільного палива змінювався від 1 мм до 5 мм. В установці також передбачена можливість дослідження

процесу займання і горіння великих наважок водовугільного палива (1...3 г).

Форма краплі палива не є сферичною через взаємодію різних сил (сили тяжіння, поверхневого натягу і т.д.). Однак для порівняння та аналізу зазвичай використовується діаметр краплі. При проведенні досліджень було прийнято використовувати еквівалентний діаметр краплі. Типова форма краплі показана на рисунку 2.3.

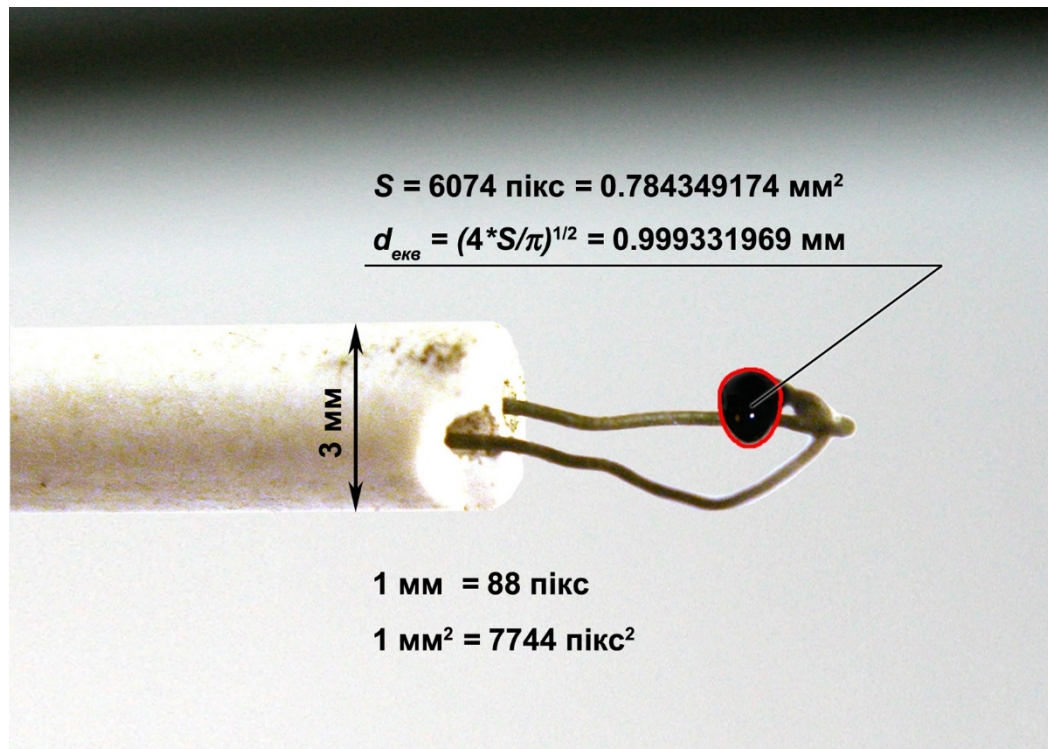


Рисунок 2.3 - Форма краплі і визначення еквівалентного діаметра

Процедура визначення еквівалентного діаметра полягала в наступному:

1. Перед процесом спалювання робиться фотографія краплі водовугільного палива разом з корпусом термопарі підтримки краплі.
2. За допомогою графічних програм (наприклад, Photoshop, ACDSee і ін.) визначається масштабний коефіцієнт зображення (пікселі на міліметр) з урахуванням діаметра корпусу термопарі підтримки краплі - 3 мм. Для зображення на рисунку 2.3 масштабний коефіцієнт становить 88 пікселів на 1 міліметр в лінійному масштабі і $88^2 = 7744$ квадратних пікселя на квадратний міліметр в масштабі площі.
3. Потім за допомогою графічного програмного забезпечення

розраховується кількість пікселів в області краплі водовугільного палива (у межах червоного кола на рисунку 2.3).

4. Ця кількість пікселів відповідає площі поперечного перерізу краплі S і перераховується в мм^2 з використанням коефіцієнта масштабування площі.

5. Нарешті, якщо припустити, що краплина має форму циліндричної симетрії (симетрія відносно вертикальної осі на рисунку 2.3), діаметр еквівалентної сфери можна розрахувати за формулою:

$$d_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}}. \quad (2.1)$$

Такий підхід дослідження процесів займання та горіння палив добре перевірений і використовується в науковому співтоваристві [21, 25, 32, 49], в тому числі і науковим керівником [59], для вивчення горіння крапель різного палива.

Експериментальні дослідження проводилися для водовугільного палива, отриманого з вугілля марки Д. Характеристика вихідного вугілля представлена в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Характеристика вихідного вугілля

Зольність $A^c, \%$	Вологість $W^p, \%$	Вихід летких $V^{\text{daf}}, \%$	Елементний склад, %				
			C^{daf}	H^{daf}	S^{daf}	O^{daf}	N^{daf}
9,3	8	23	75	5,6	5,5	12,4	1,5

Характеристики основних досліджуваних зразків палива отримані в результаті технічного аналізу, проведеного відповідно до [94-96]. Технологія приготування водовугільного палива включала стадію мокрого подрібнення в кульовому млині і кавітаційну обробку. При цьому забезпечувався максимально можливий вміст твердої фази, мінімальна в'язкість і необхідна

седиментаційна стійкість. В якості пластифікатора використовувався лігносульфонат натрію в кількості 1%.

Відповідно до [97] у таблиці 2.2 наведено хімічний склад золи вугілля, що використовується для приготування водовугільного палива.

Таблиця 2.2 - Хімічний склад золи вихідного вугілля, %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂
52	24	14	2,8	1,6	4	0,8	0,8

Наведені зразки водовугільного палива мають гранулометричний склад твердої фази, близький до бімодального, за рахунок чого досягається щільна упаковка твердих частинок полідисперсної системи. Гранулометричний склад зразків палива визначено відповідно до [98] та результати наведено на рисунку 2.4.

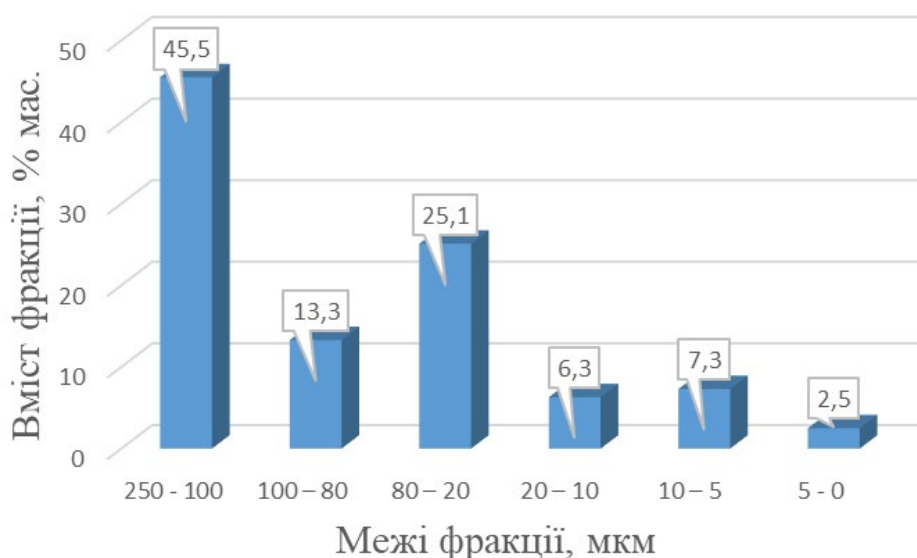


Рисунок 2.4 - Гранулометричний склад водовугільного палива

При проведенні експериментальних досліджень вміст гліцерину в водовугільному паливі варіюється від 0 до 20%, оскільки, як показано раніше, це є оптимальним з точки зору реологічних властивостей, енергетичних і екологічних показників горіння. Характеристики

використовуваного в експериментальних дослідженнях гліцерину наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 - Характеристика гліцерину

В'язкість, Па·с	Густина, кг/м ³	Теплота згоряння, МДж/м ³	Зольність А ^c , %	Елементний склад, %				
				C ^{daf}	H ^{daf}	S ^{daf}	O ^{daf}	N ^{daf}
1,49	1253	16,6	3	38,5	9,4	0,05	52	0,05

Зразки водовугільного палива виготовлені в Інституті колоїдної хімії та хімії води НАН України ім. А. В. Думанського (в відділі фізико-хімічної механіки дисперсних систем, зав. відділом, д.т.н., проф. Макаров А. С.). Технологія отримання зразків водовугільного палива детально описана в [74]. Вміст твердої фази (вугілля) у всіх зразках становить 63%, в'язкість до 1,5 Па·с, седиментаційна стійкість до 20 діб.

2.2 Основні закономірності займання і горіння водовугільного палива з додаванням відходів біодизелю

Експериментальні дослідження основних закономірностей займання і горіння водовугільного палива з додаванням гліцерину проводилися для великих крапель палива розміром 5 мм. Даний розмір крапель забезпечував наочність протікання процесів і дозволив детально зафіксувати всі стадії процесів займання і горіння, їх специфічні особливості. На рисунках 2.5-2.9 представлені результати експериментальних досліджень займання і горіння водовугільного палива з різним вмістом гліцерину при температурі робочого простору печі 700 °С. На всіх рисунках зелена лінія – температура в паливі, фіолетова лінія – температура на відстані 2 мм, червона лінія – температура на відстані 5 мм.

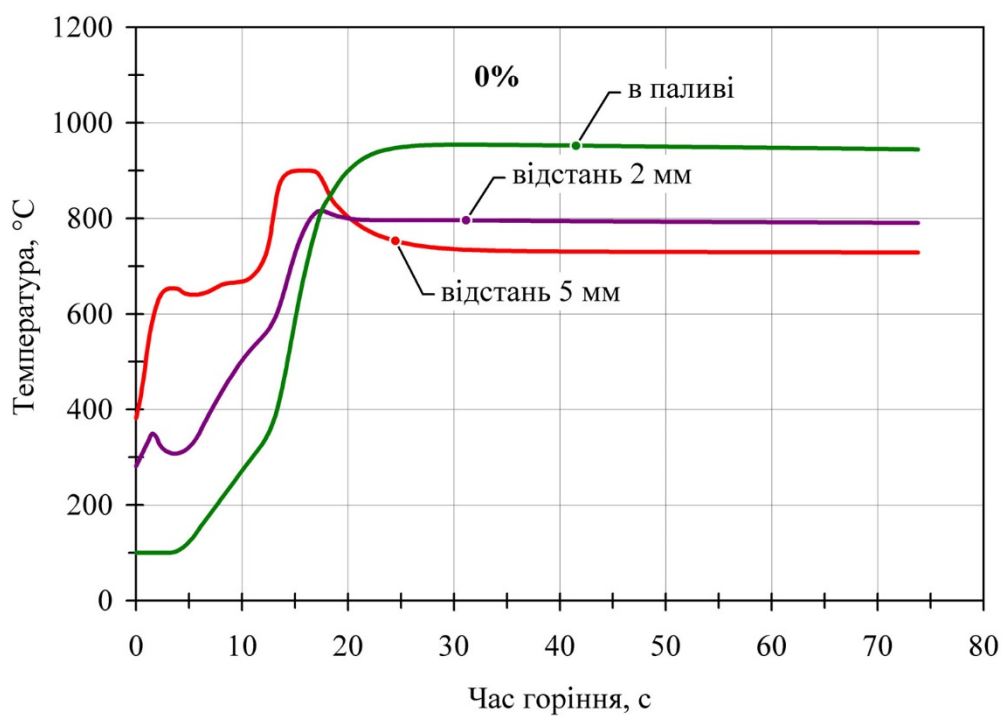


Рисунок 2.5 - Температурно-часові характеристики горіння зразка водовугільного палива без додавання гліцерину

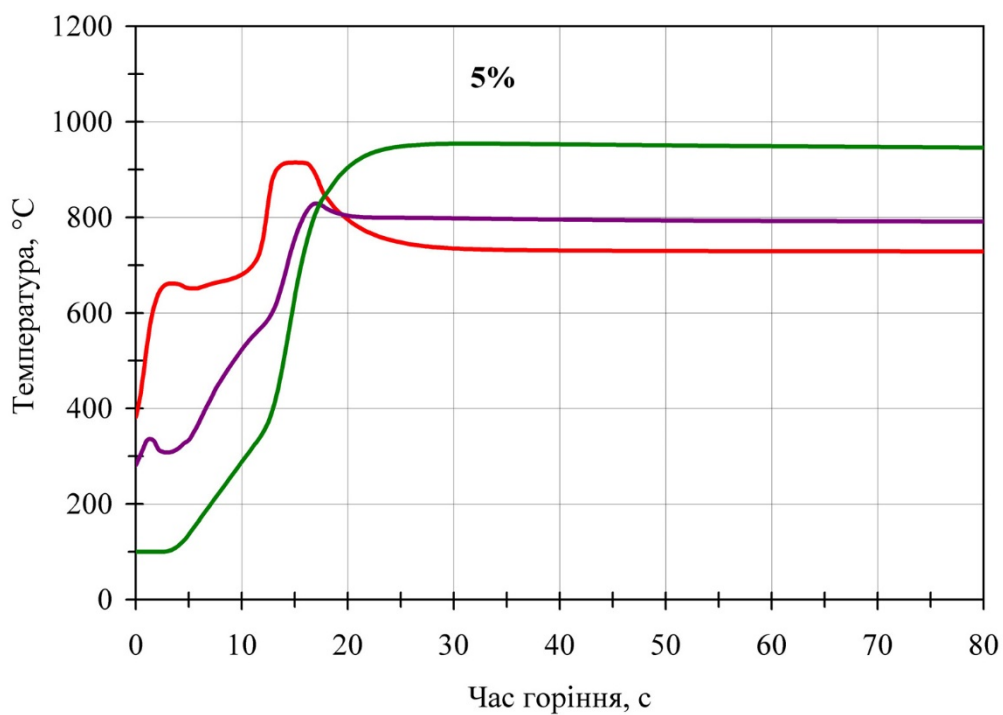


Рисунок 2.6 - Температурно-часові характеристики горіння зразка водовугільного палива з 5% гліцерину

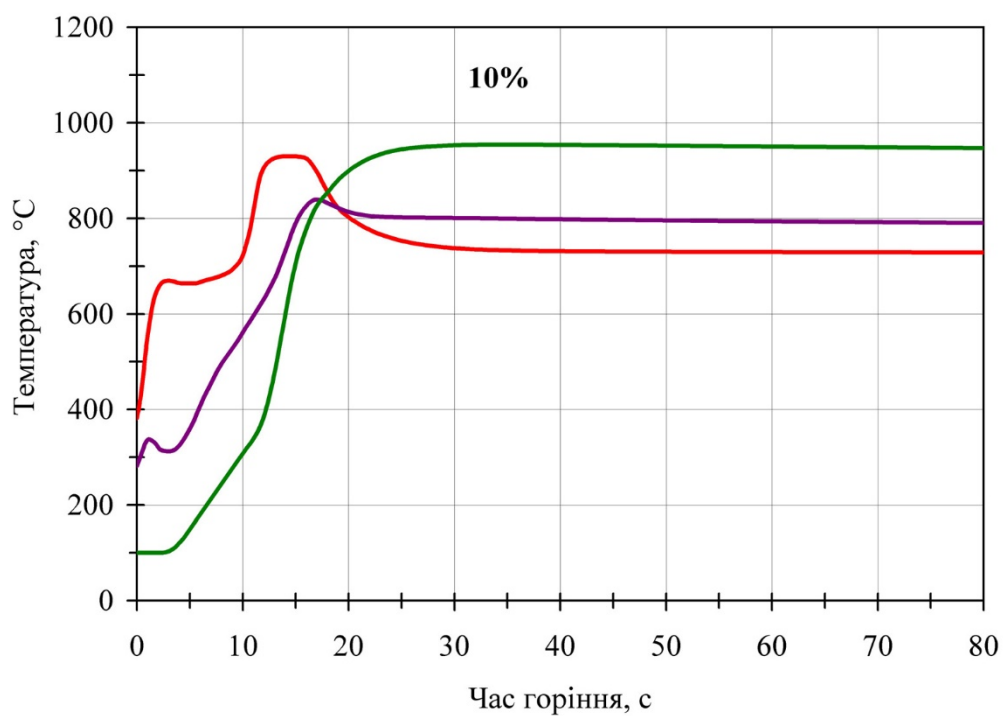


Рисунок 2.7 - Температурно-часові характеристики горіння зразка водовугільного палива з 10% гліцерину

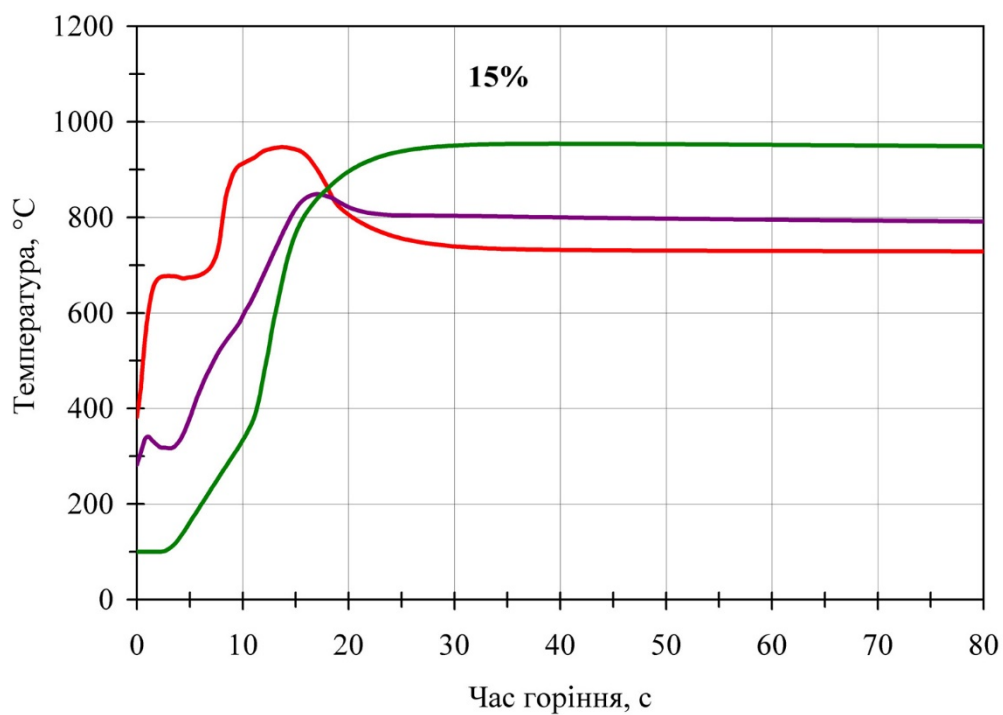


Рисунок 2.8 - Температурно-часові характеристики горіння зразка водовугільного палива з 15% гліцерину

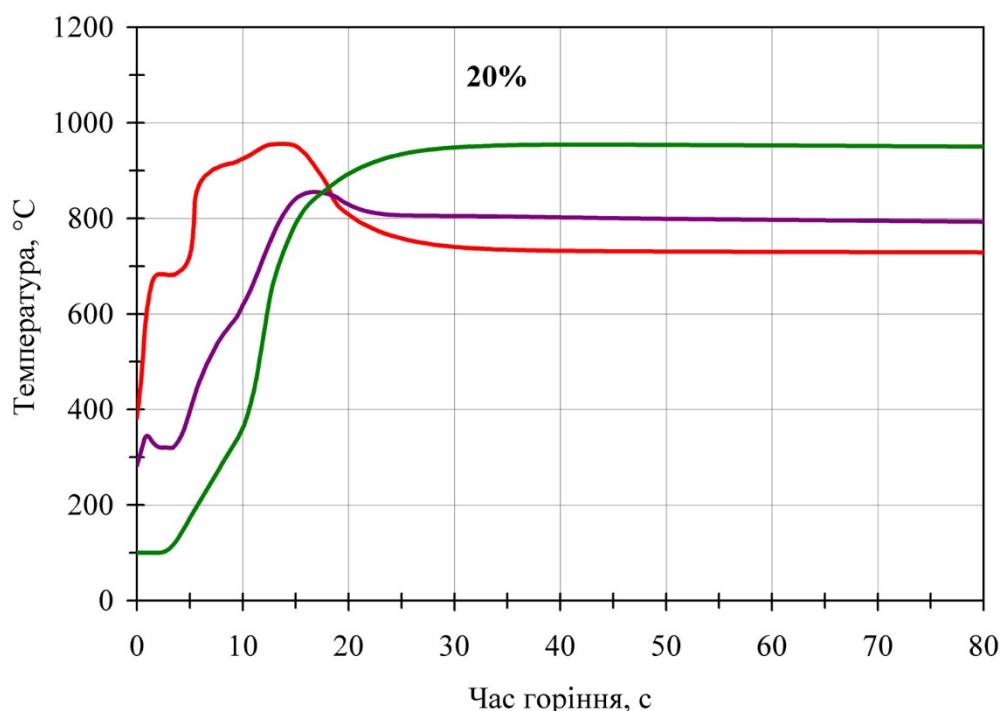


Рисунок 2.9 - Температурно-часові характеристики горіння зразка водовугільного палива з 20% гліцерину

Як видно з отриманих даних, процес горіння водовугільного палива з гліцерином також можна розділити на 4 стадії, як і для палива без додавання гліцерину [59].

На першій стадії відбувається прогрів палива, що супроводжується інтенсивним випаровуванням вологи палива. Слід зазначити, що при додаванні гліцерину до палива період прогріву і випаровування скорочується на 12,5...29%, також зменшуються витрати на випаровування водної фази, і, як наслідок, зменшується нерівномірність температури навколо зразка палива.

На другій стадії відбувається виділення і взаємодія газоподібних продуктів, що супроводжується значним зростанням температури палива. Зі збільшенням кількості гліцерину в паливі швидкість підвищення температури пропорційно збільшується. Леткі речовини виділяються як з гліцерину, так і з вугілля. Леткі речовини утворюють суміш з повітрям і легко спалахують. Друга стадія завершується займанням газоподібних горючих продуктів.

Температура займання визначалася згідно з [99]. При цьому слід зазначити, що спочатку відбувається займання летких речовин гліцерину. Потім, у міру зростання температури, відбувається займання летких речовин вугільної складової водовугільного палива. Особливо гостро це спостерігається при вмісті гліцерину 15-20%.

На третій стадії відбувається горіння летких речовин в газовій фазі, що характеризується подальшим збільшенням температури самого палива і температури середовища навколо зразка палива (максимальна температура при горінні летких речовин становить 900...960 °C). Зі збільшенням вмісту гліцерину в водовугільному паливі температура і тривалість стадії горіння летких речовин збільшуються відповідно на 1,7...6,3% и 2...30%. Навколо зразка палива відбувається утворення прикордонного палаючого шару і газової оболонки.

На четвертій стадії відбувається горіння коксового залишку, яке починається, коли до кінця підходить горіння летких речовин. Аналіз експериментальних даних показує, що додавання гліцерину в кількості 5% призводить до зменшення часу до займання коксового залишку. Однак, подальше збільшення вмісту гліцерину в паливі в досліджуваному діапазоні призводить до незначного збільшення часу до займання коксового залишку. Горіння коксового залишку водовугільного палива протікає при температурах 700...950 °C. Після завершення четвертої стадії температура зразка падає до температури середовища робочого простору. Цю частину на рисунках не відображено. Аналогічні залежності отримані при дослідженні займання і горіння водовугільного палива з різним вмістом гліцерину при температурі робочого простору печі 600 і 800 °C.

Проведено детальний порівняльний аналіз температурно-часових характеристик під час займання і горіння композиційного водовугільного палива при різному вмісті гліцерину. На рисунках 2.10 - 2.11 наведено зміну температури всередині краплі водовугільного палива з різним вмістом гліцерину при її вигорянні при температурі робочого простору печі 700 °C,

на рисунку 2.12 - зміну температури на відстані 2 мм від краплі, на рисунку 2.13 - зміну температури на відстані 5 мм від краплі.

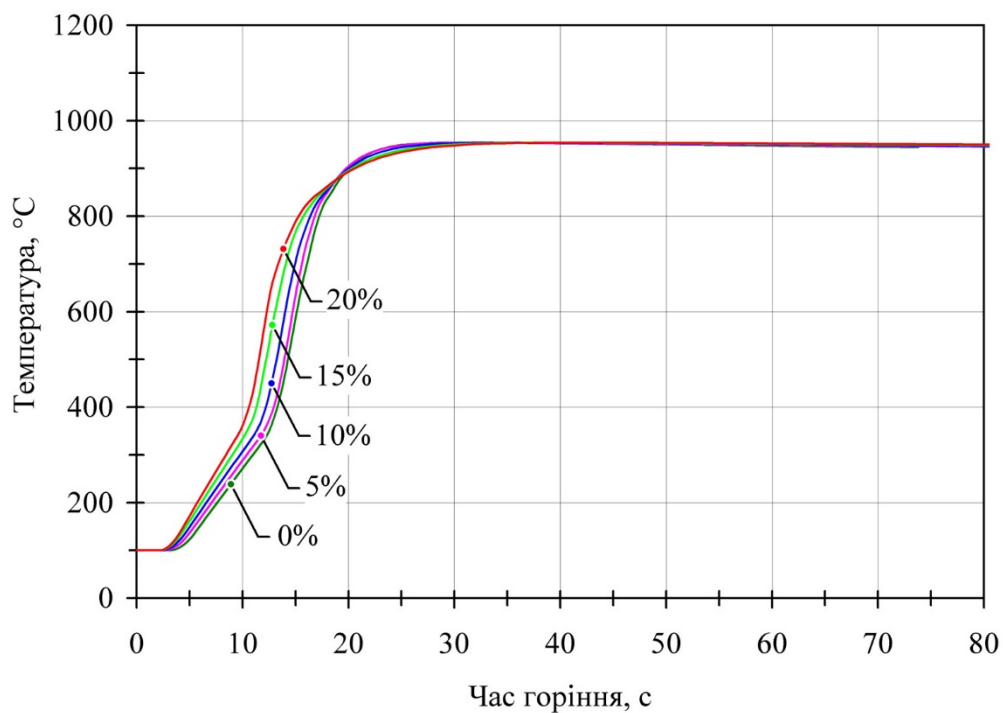


Рисунок 2.10 - Зміна температури всередині краплі водовугільного палива з різним вмістом гліцерину

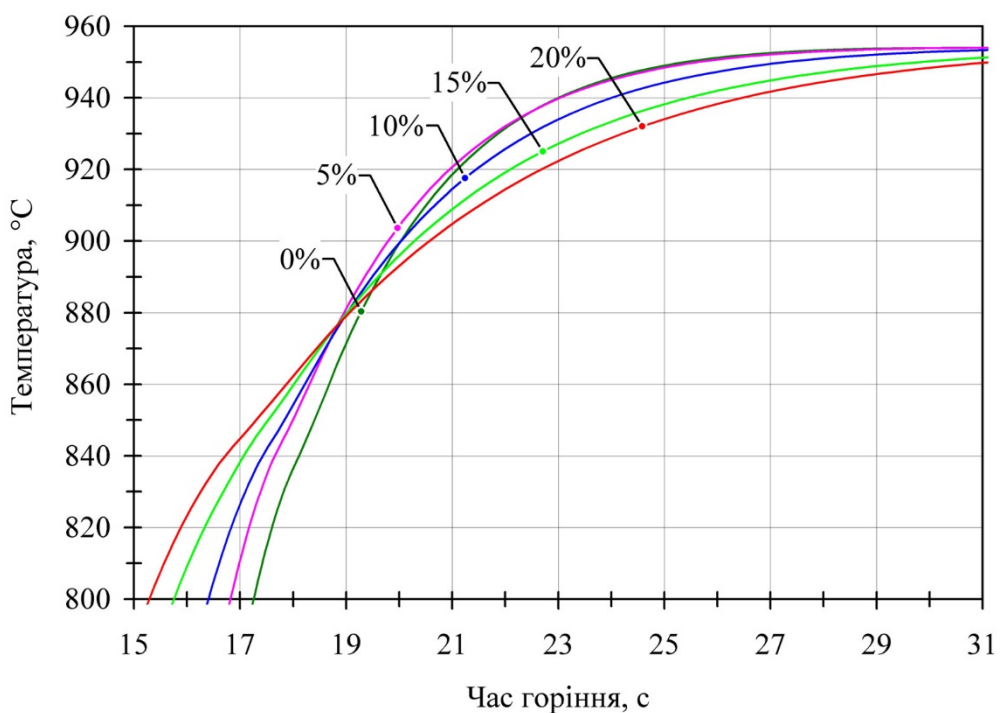


Рисунок 2.11 - Зміна температури всередині краплі водовугільного палива з різним вмістом гліцерину (детальний фрагмент)

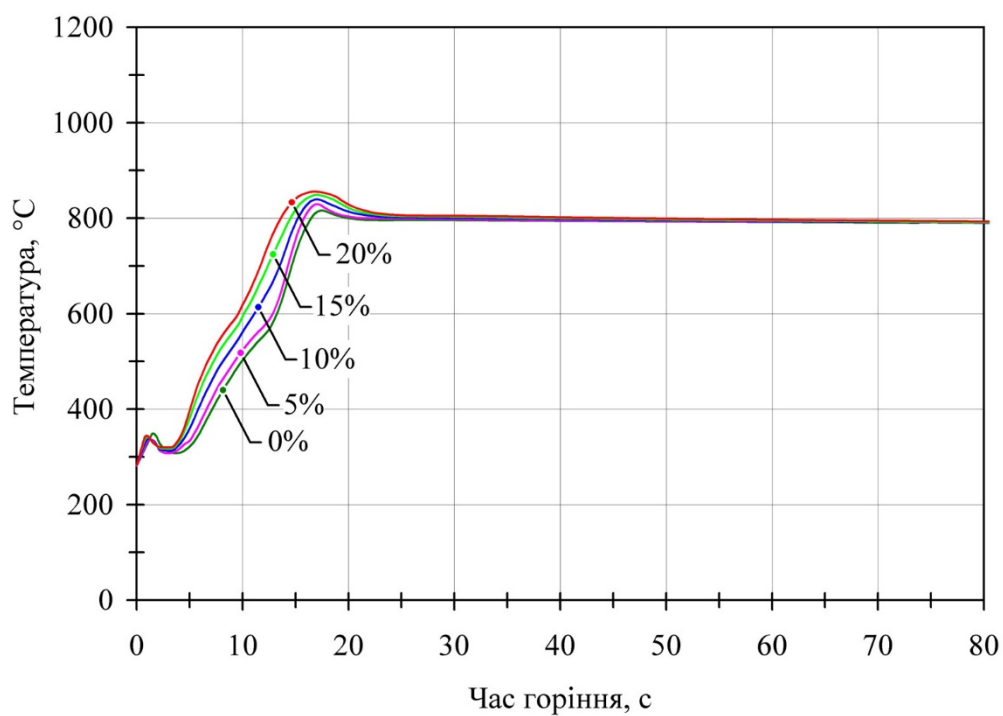


Рисунок 2.12 - Зміна температури на відстані 2 мм над краплею водовугільного палива з різним вмістом гліцерину

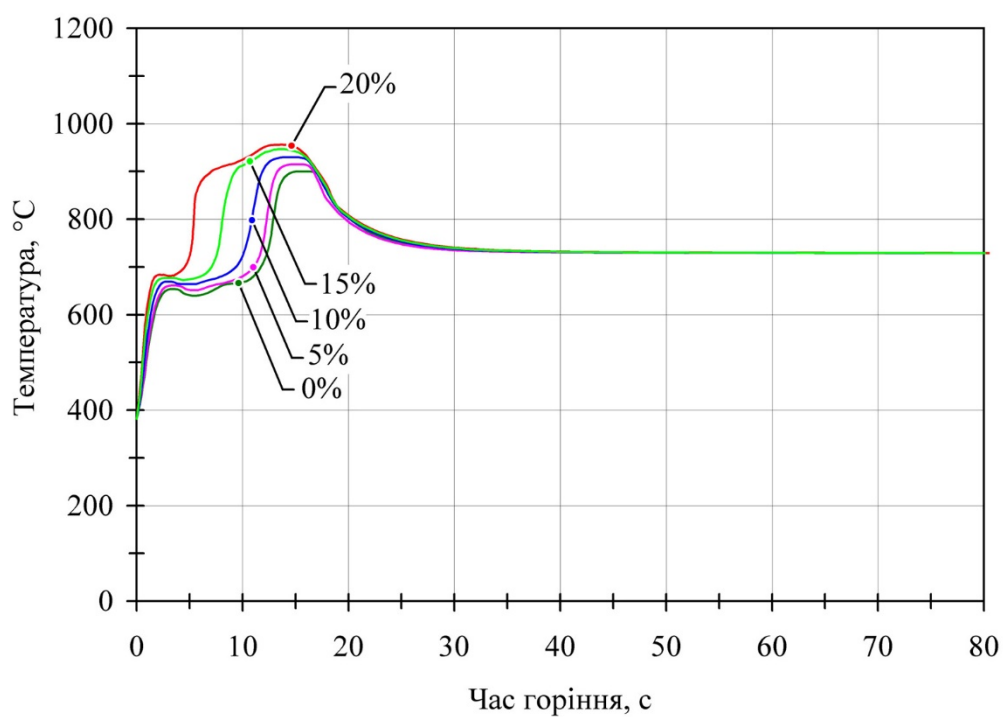


Рисунок 2.13 - Зміна температури на відстані 5 мм над краплею водовугільного палива з різним вмістом гліцерину

Аналіз отриманих залежностей на рисунках 2.10-2.13 показує, що, загалом, додавання гліцерину до водовугільного палива позитивно впливає на процеси займання й горіння палива, а саме:

- збільшується швидкість нагріву краплі палива;
- зменшується час і витрати на випаровування водної фази палива;
- спостерігається менша нерівномірність температури навколо зразка палива, яка може призводити до загасання процесу горіння;
- скорочується час до займання палива і займання настає при більш низьких температурах;
- збільшується максимальна температура горіння.

При цьому слід звернути увагу, що, починаючи з 15% гліцерину в водовугільному паливі, виявляється деяка стадійність займання (спочатку гліцерину, а потім летких речовини вугілля), що призводить до нерівномірності температури горіння. І чим більший вміст гліцерину в паливі, тим більша ця нерівномірність.

Крім того, значна кількість гліцерину призводить до нестачі окислювача, який необхідний для горіння вугільної складової водовугільного палива, і займання коксового залишку починається пізніше. Так, на рисунку 2.11 видно, що при збільшенні вмісту гліцерину в паливі температура коксового залишку зменшується, що характеризує погіршення умов горіння коксового залишку через нестачу окислювача. Проте, після повного вигорання гліцерину всі криві знову поєднуються практично в одну лінію.

2.3 Вплив добавки відходів виробництва біодизелю на основні параметри процесу займання і горіння водовугільного палива

Перед розглядом та аналізом результатів експериментальних досліджень необхідно відзначити наступне. Математична апроксимація результатів досліджень дуже важлива частина, але без урахування фізичної природи виявлених явищ може давати некоректний результат. В роботі [100]

розглянуті різні типи апроксимаційних функцій і запропоновано використовувати модифіковану степеневу функцію для апроксимації результатів експериментальних досліджень. Крім цього, було запропоновано для деяких параметрів використовувати не модифіковану степеневу функцію, а сигмовидні функції.

Як згадувалося раніше, температура займання композиційного водовугільного палива визначалася відповідно до [99]. Залежність температури займання від вмісту гліцерину в водовугільному паливі, представлена на рис. 2.14.

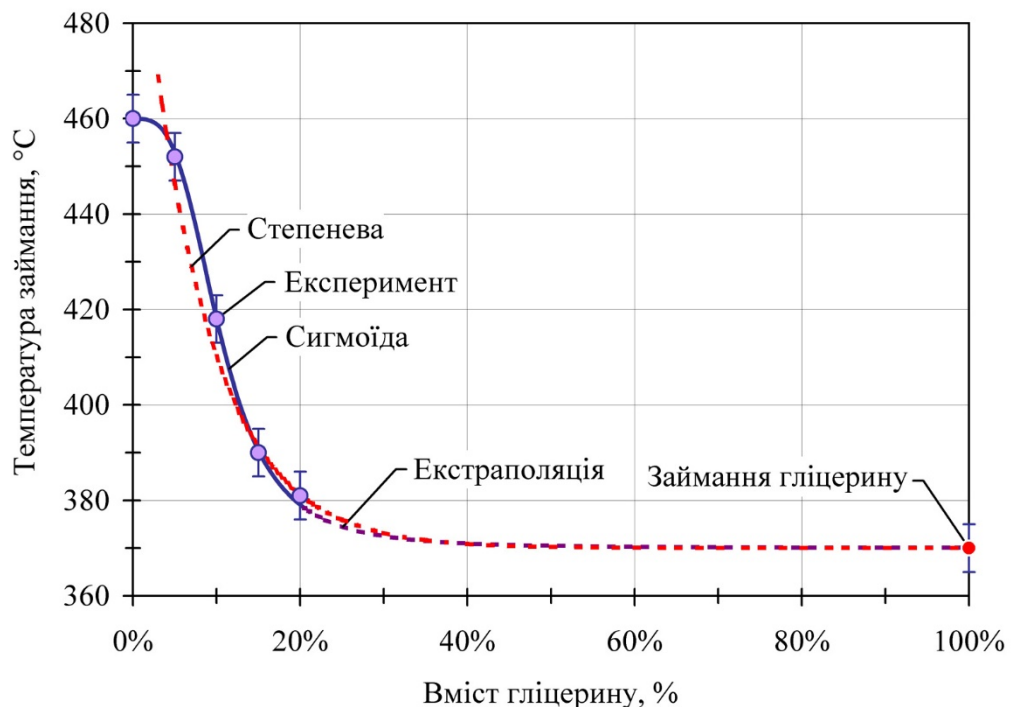


Рисунок 2.14 - Температура займання водовугільного палива з різним вмістом гліцерину:

точки - експериментальні дані; пунктирна лінія (червона) - апроксимація загальноприйнятою функцією; суцільна лінія (синя) - апроксимація сигмовидною функцією

З рисунку 2.14 видно, що зі збільшенням вмісту гліцерину температура займання водовугільного палива з додаванням гліцерину знижується на 1,7...17%. Це очікуваний результат, що підтверджує результати попередніх

досліджень [65, 66]. Видно, що загальноприйняте наближення [100] (пунктирна червона лінія на рисунку 2.14) не є достовірним з точки зору відображення фізичної природи. У той час як апроксимація асиметричною сигмовидної функцією (суцільна синя лінія) забезпечує відмінний збіг з експериментальними даними. Формула асиметричної сигмовидної функції, використовуваної для апроксимації температури займання композиційного водовугільного палива з додаванням гліцерину, наступна (коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,999$):

$$t_{\text{займ}} = 370 + \frac{460 - 370}{1 + 1951,98 \cdot Gl^{3,35}}, \quad (2.2)$$

де $t_{\text{займ}}$ - температура займання паливної суміші, °C;

Gl - вміст гліцерину в паливній суміші, мас. %;

значення 1951,98 і 3,35 є емпіричними параметрами, які визначаються експериментальним шляхом.

У рівнянні (2.2) значення 370 і 460 є температури займання безпосередньо гліцерину і даного водовугільного палива без додавання гліцерину відповідно.

У загальному вигляді рівняння для розрахунку температури займання композиційного водовугільного палива з додаванням гліцерину в залежності від вмісту гліцерину можна представити у вигляді виразу:

$$t_{\text{займ}} = t_{\text{займ гліц}} + \frac{t_{\text{займ пал}} - t_{\text{займ гліц}}}{1 + k \cdot Gl^n} \quad (2.3)$$

де $t_{\text{займ гліц}}$ - температура займання гліцерину, °C;

$t_{\text{займ пал}}$ - температура займання водовугільного палива без додавання гліцерину, °C;

k, n - емпіричні коефіцієнти.

Рівняння (2.3) можна використовувати для композиційного водовугільного палива з вмістом гліцерину в діапазоні 0-20%. Передбачається, що це рівняння можна застосовувати для будь-якого композиційного палива, що складається з двох палив, які не реагують і не розчиняються, однак це вимагає уточнення.

На рисунку 2.15 представлено зміну температури палаючої краплі водовугільного палива з різним вмістом гліцерину розміром 1 мм при її вигорянні в повітряному середовищі при температурі робочого простору печі 600 °С.

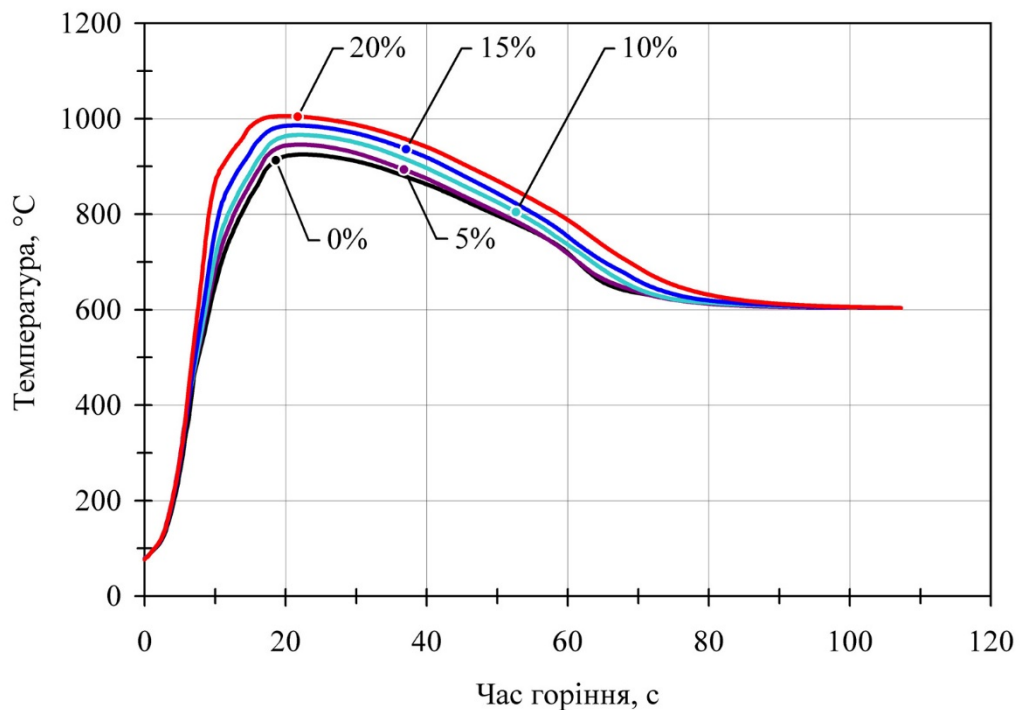


Рисунок 2.15 - Зміна температури краплі водовугільного палива в залежності від вмісту гліцерину при її вигорянні в повітряному середовищі

Як видно з отриманих результатів, збільшення вмісту гліцерину в паливі призводить до збільшенню максимальної температури згорання. При проведенні досліджень спалювання водовугільного палива з гліцерином частка твердої (вугільної) частини палива залишалася постійною, змінювалося співвідношення вода/гліцерин. Збільшення вмісту гліцерину в

водовугільному паливі призводило до збільшення загальної частки горючої складової в паливі та зменшення кількості води, що викликало підвищення максимальної температури горіння. На відміну, наприклад, від досліджень [65], де автори проводять заміну твердої складової водовугільного палива гліцерином, що призводило до зниження максимальної температури горіння на 65 °C в порівнянні з водовугільним паливом без гліцерину.

Як видно з отриманих експериментальних даних, збільшення вмісту гліцерину в паливі призводить до збільшення загального часу вигорання краплі палива. Для досліджуваного водовугільного палива без гліцерину температура займання становить 460 °C, а температура займання безпосередньо гліцерину набагато менше – 370 °C. Таким чином, займання гліцерину відбувається раніше, ніж займання компонентів вугілля. Це призводить до дефіциту окислювача, аналогічно описаному в [51], і затримки процесу горіння краплі палива навіть для невеликої кількості гліцерину у складі.

На рисунках 2.16-2.17 представлено зміну температури краплі водовугільного палива з різним вмістом гліцерину розміром 1 мм при її вигоранні в повітряному середовищі при температурі робочого простору печі 700 °C і 800 °C.

Як видно, при всіх розглянутих температурах робочого простору печі спостерігається збереження загальної форми кривих і їх поведінки, при цьому з підвищенням температури робочого простору печі відбувається зменшення часу повного горіння краплі палива і збільшується максимальна температура палаючої краплі.

Обробка отриманих експериментальних даних дозволила отримати залежність часу до займання від вмісту гліцерину в водовугільному паливі (на рисунку 2.18 представлені результати для краплі палива розміром 1 мм при її вигоранні в повітряному середовищі при температурі робочого простору печі 600 °C).

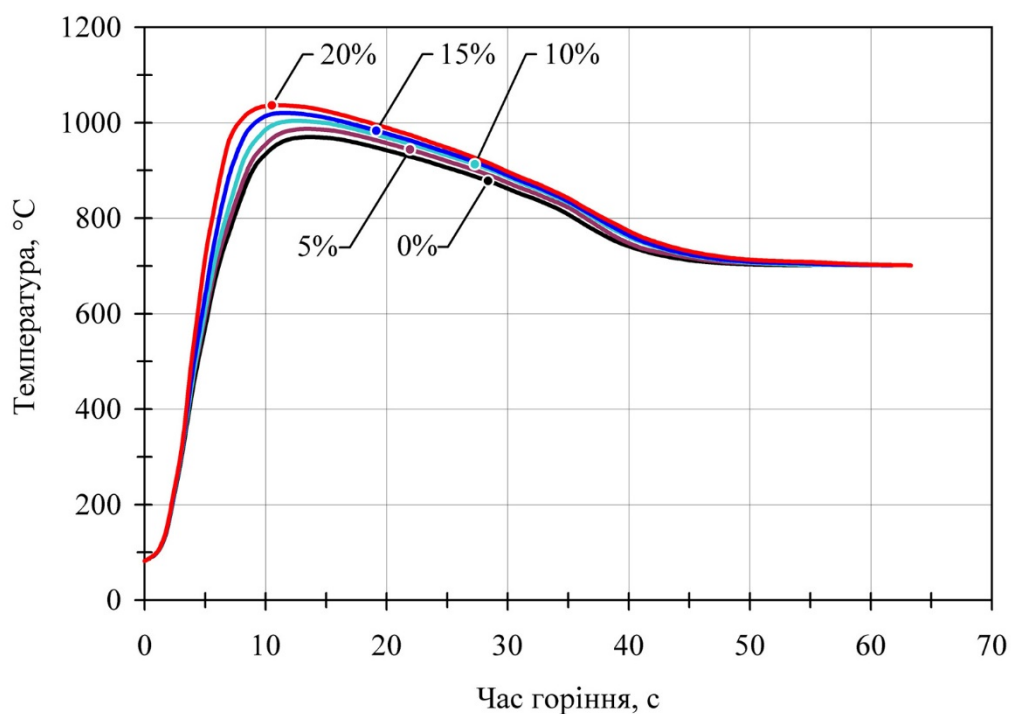


Рисунок 2.16 - Зміна температури краплі водовугільного палива в залежності від вмісту гліцерину при її вигорянні при температурі 700 °С

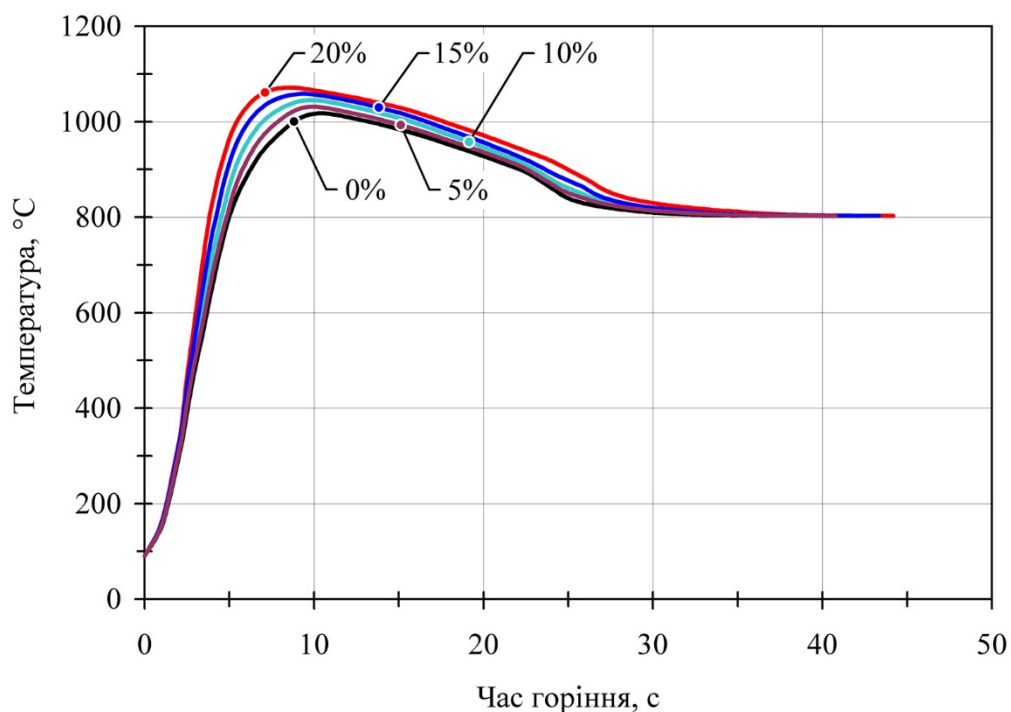


Рисунок 2.17 - Зміна температури краплі водовугільного палива в залежності від вмісту гліцерину при її вигорянні при температурі 800 °С

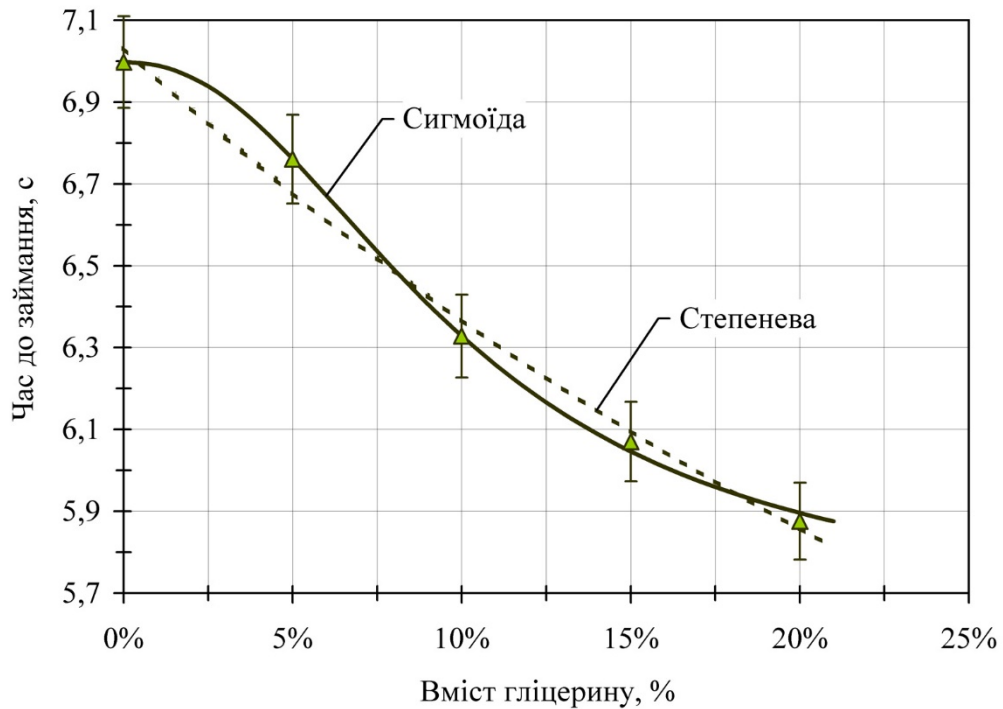


Рисунок 2.18 - Залежність часу до займання від вмісту гліцерину в водовугільному паливі:

точки-трикутники - експериментальні результати; криві - апроксимація різними функціями

Як видно з отриманих даних, час до займання краплі водовугільного палива зменшується зі збільшенням вмісту гліцерину в паливі на 3...21%, що кореспондується з результатами досліджень [65, 66, 70]. Вочевидь, що загальноприйнята степенева функція (пунктирна лінія на рисунку 2.18) лежить в межах діапазону похибок і має досить високий коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,987$.

Однак, цей підхід не описує фізичних особливостей процесу горіння, про що говорилося раніше. Рисунок 2.18 показує, що, як і у випадку з температурою займання, реальна поведінка експериментально отриманих даних за часом до займання відрізняється від степеневої залежності. Реальна форма залежності часу до займання від вмісту гліцерину в водовугільному паливі також є дзеркальною S-подібною (сигмоподібною) кривою. Використання зворотної сигмовидної функції дозволяє відобразити фізичну

природу процесу горіння. З рисунку 2.18 видно, що запропонована апроксимуюча крива набагато краще збігається з експериментальними даними, ніж загальноприйнята степенева функція.

Формула асиметричної сигмовидної функції, використовуваної для апроксимації часу до займання композиційного водовугільного палива з додаванням гліцерину, наступна ($R^2 = 0,998$) має наступний вигляд:

$$\tau_{\text{займ}} = 5,66 + \frac{6,99 - 5,66}{1 + (10 \cdot Gl)^{2,22}}, \quad (2.4)$$

де $\tau_{\text{займ}}$ - час до займання водовугільного палива, с;

Gl - вміст гліцерину в водовугільного палива, мас. %;

константи 6,99; 5,66; 10 і 2,22 представляють собою емпіричні значення, визначені з використанням експериментальних даних.

Однак, константи 6,99; 5,66, так само як і у випадку з температурою займання, мають точний фізичний зміст:

6,99 - час до займання водовугільного палива без гліцерину. Для його визначення можна використовувати формулу (3) з [101];

5,66 - час до займання краплі гліцерину без домішки водовугільного палива розміром 1 мм. У літературних джерелах відсутні дані по часу займання для краплі гліцерину розміром 1 мм, тому це значення було визначено з умови найкращого узгодження з експериментальними даними.

Виходячи з вищевикладеного, в загальному випадку формулу (2.4) можна записати в наступному вигляді:

$$\tau_{\text{займ}} = \tau_{\text{займ гліц}} + \frac{\tau_{\text{займ пал}} - \tau_{\text{займ гліц}}}{1 + k \cdot Gl^n} \quad (2.5)$$

де $\tau_{\text{займ гліц}}$ - час до займання гліцерину, с;

$\tau_{\text{займ пал}}$ - час до займання водовугільного палива без гліцерину, с;

k, n - емпіричні коефіцієнти.

Детальна обробка експериментальних температурно-часових залежностей дозволила отримати дані про час до займання, загальний час горіння, максимальну температуру і час досягнення максимальної температури в залежності від вмісту гліцерину в водовугільному паливі.

На рисунку 2.19 представлена залежність часу до займання $\tau_{займ}$ і часу повного горіння $\tau_{гор}$ краплі водовугільного палива розміром 1 мм від вмісту гліцерину при її вигорянні в повітряному середовищі при температурі робочого простору печі 600 °С (на рисунках 2.19-2.21 точки – експериментальні дані; криві – апроксимація).

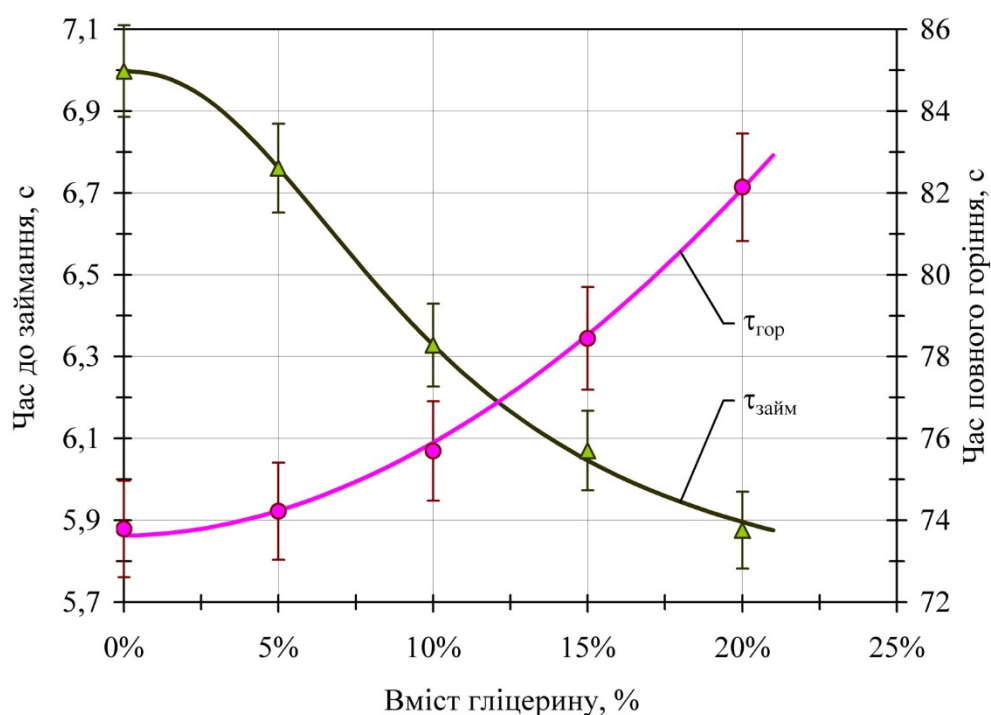


Рисунок 2.19 - Залежність часу до займання $\tau_{займ}$ і часу повного горіння $\tau_{гор}$ краплі водовугільного палива від вмісту гліцерину при температурі 600 °С

Як зазначалося раніше, час повного горіння композиційного водовугільного палива збільшується зі збільшенням частки гліцерину в паливі на 3...21%, а час до займання - зменшується. Для опису залежності часу повного горіння композиційного водовугільного палива від вмісту

гліцерину застосована традиційна апроксимація степеневою функцією. Для отримання кращих результатів використовується модифікована степенева функція, для якої значення коефіцієнта детермінації $R^2 = 0,998$.

Час повного горіння композиційного водовугільного палива визначається не тільки співвідношенням водовугільної і гліцеринової фази в паливі, але і дефіцитом окислювача при горінні крапель [51]. Крім того, як показали дослідження, загальний час горіння водовугільного палива не є простою сумою тривалостей різних стадій горіння [55, 54, 101].

Аналогічні залежності отримані при горінні краплі композиційного палива при температурі робочого простору печі 700 °C і 800 °C (рисунки 2.20-2.21).

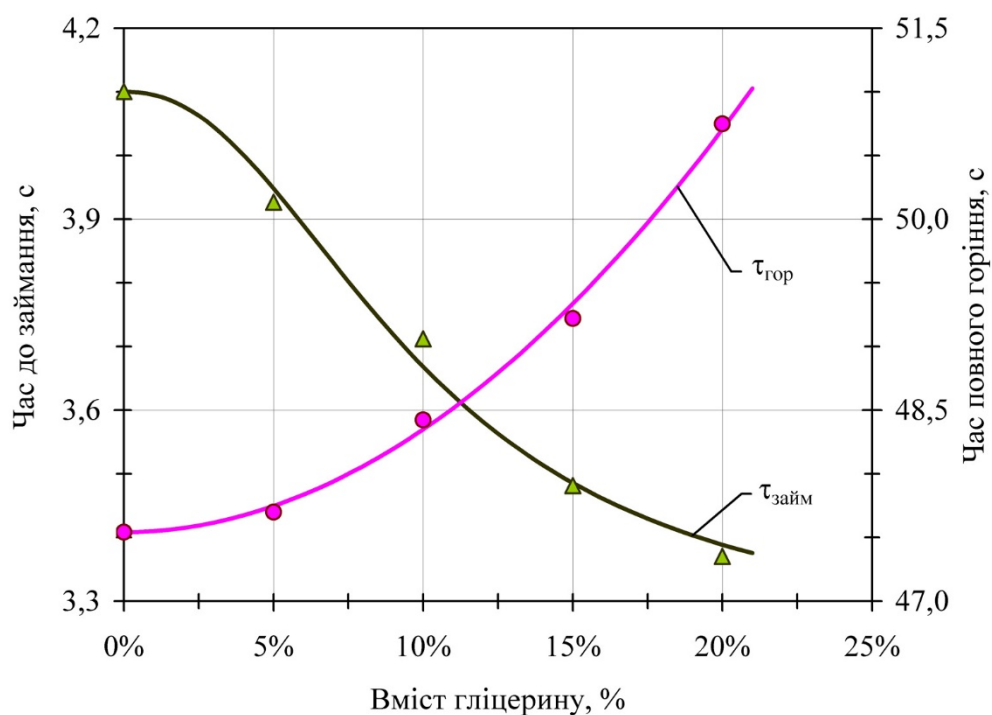


Рисунок 2.20 - Залежність часу до займання $\tau_{\text{займ}}$ і часу повного горіння $\tau_{\text{гор}}$ краплі водовугільного палива від вмісту гліцерину при температурі 700 °C

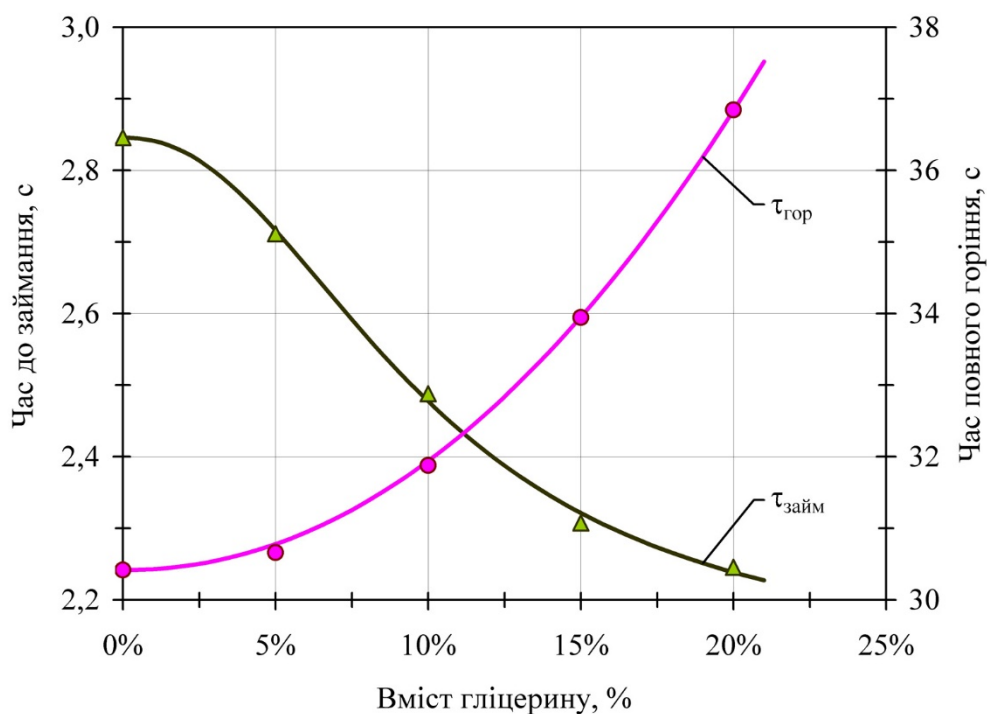


Рисунок 2.21 - Залежність часу до займання $\tau_{\text{займ}}$ і часу повного горіння краплі $\tau_{\text{гор}}$ водовугільного палива від вмісту гліцерину при температурі 800°C

На рисунку 2.22 представлена залежність максимальної температури t_{max} палаючої краплі водовугільного палива розміром 1 мм і час досягнення цієї температури $\tau_{t \text{ max}}$ від вмісту гліцерину в паливі при її вигорянні в повітряному середовищі при температурі робочого простору печі 600 °C (на рисунках 2.22-2.24 точки – експериментальні дані; криві – апроксимація)

Залежність максимальної температури палаючої краплі водовугільного палива від вмісту гліцерину лінійна і температура збільшується зі збільшенням вмісту гліцерину. Таку поведінку можна пояснити, розглядаючи матеріальний і тепловий баланси. Дійсно, в експериментальних дослідженнях збільшення вмісту гліцерину було вироблено за рахунок заміщення частини води в водовугільному паливі. Таким чином, горюча частка водовугільного палива (вугільна частина) лишалася незмінною. Відповідно, кількість теплової енергії, виробленої при спалюванні безпосередньо водовугільного палива, залишається постійною. У той же час додавання гліцерину дає додаткову теплоту під час горіння гліцерину. Сума цих теплових енергій

призводить до підвищення температури. Чим більше гліцерину додано в паливо, чим більше теплоти виділяється від його згоряння, тим вище температура. Час досягнення максимальної температури горіння скорочується зі збільшенням вмісту гліцерину (рисунок 2.22). Цей факт можна пояснити зменшенням часу до займання зі збільшенням вмісту гліцерину.

Аналогічні залежності отримані при горінні краплі композиційного палива в повітряному середовищі при температурах робочого простору печі 700 °C і 800 °C, які наведені на рисунках 2.23-2.24.

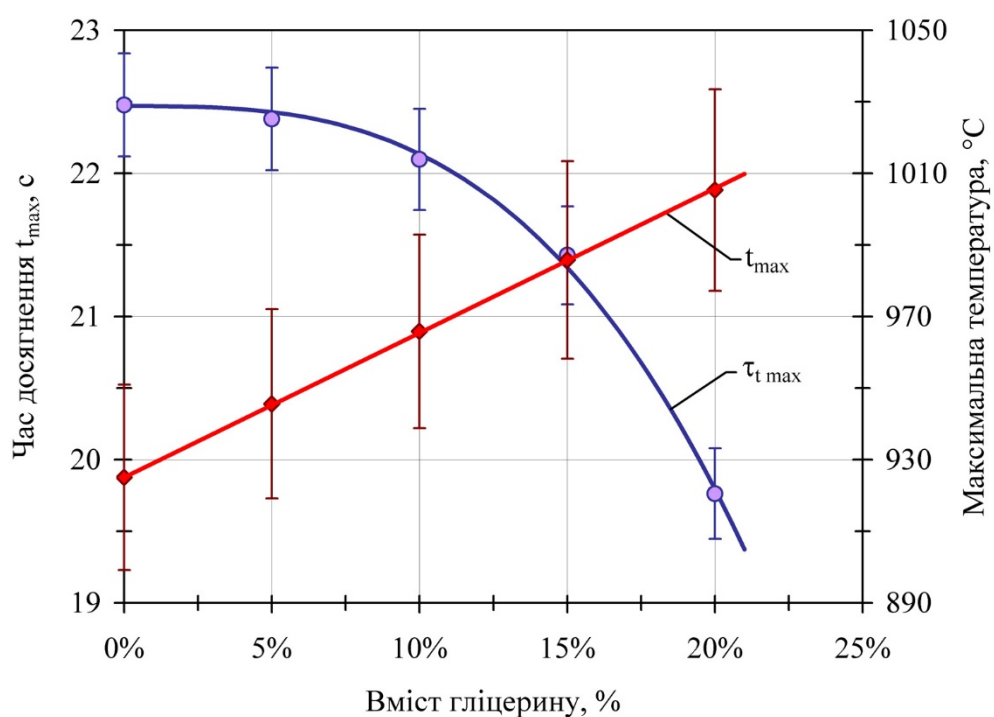


Рисунок 2.22 - Залежність максимальної температури палаючої краплі t_{max} водовугільного палива і часу досягнення цієї температури $\tau_{t max}$ від вмісту гліцерину в паливі

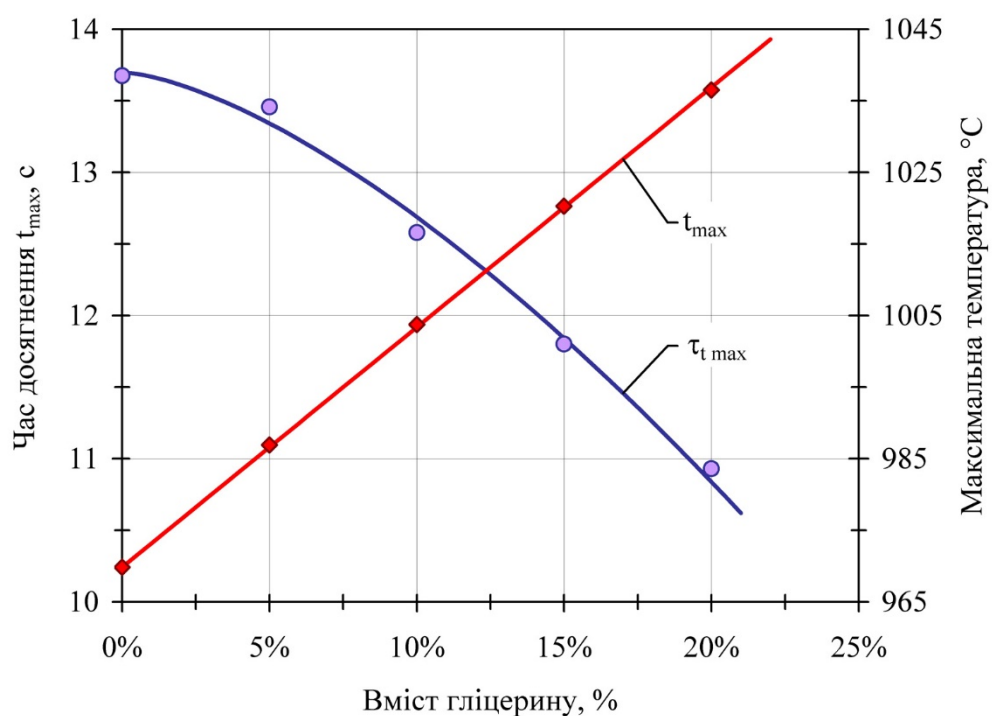


Рисунок 2.23 - Залежність температури краплі палива t_{max} і часу досягнення цієї температури $\tau_{t\ max}$ від вмісту гліцерину в паливі при температурі 700 °C

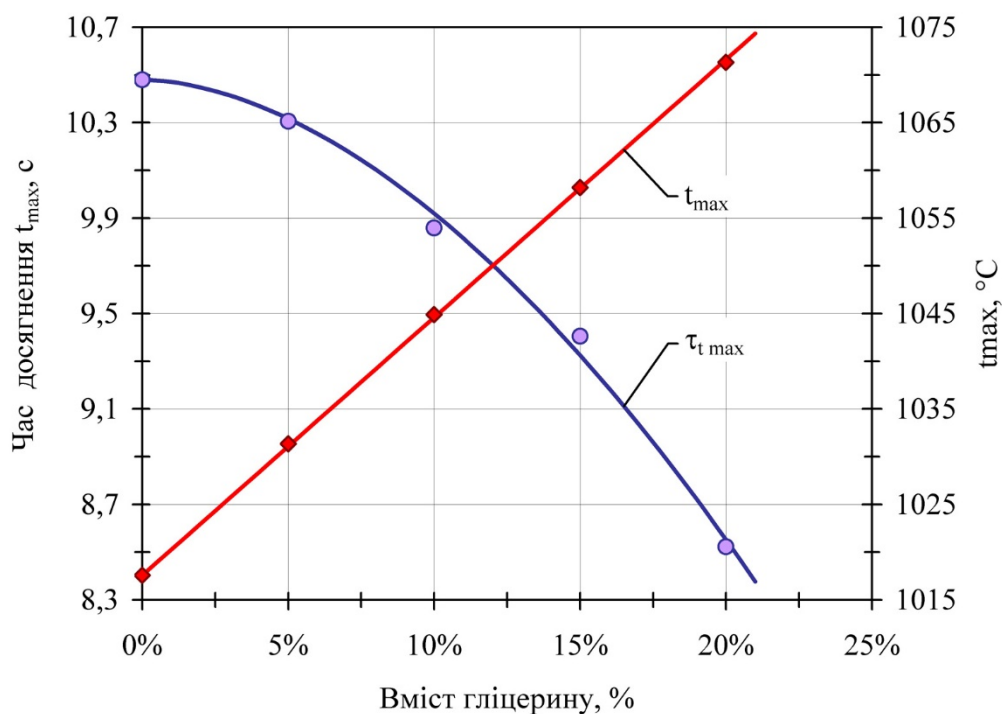


Рисунок 2.24 - Залежність температури краплі палива t_{max} і часу досягнення цієї температури $\tau_{t\ max}$ від вмісту гліцерину в паливі при температурі 800 °C

Таким чином, підвищення температури робочого простору печі призводить до зменшення всіх розглянутих характерних часів: часу до займання, часу повного горіння краплі, часу досягнення максимальної температури, але до збільшення максимальної температури горіння краплі палива.

На рисунку 2.25 представлена залежність ступеня вигорання горючої маси χ водовугільного палива з різним вмістом гліцерину від відносного часу перебування палива в печі $\tau_{\text{пот}}/\tau_{\text{заг}}$, де $\tau_{\text{пот}}$ – поточний час перебування водовугільного палива в печі, $\tau_{\text{заг}}$ – загальний час перебування водовугільного палива в печі.

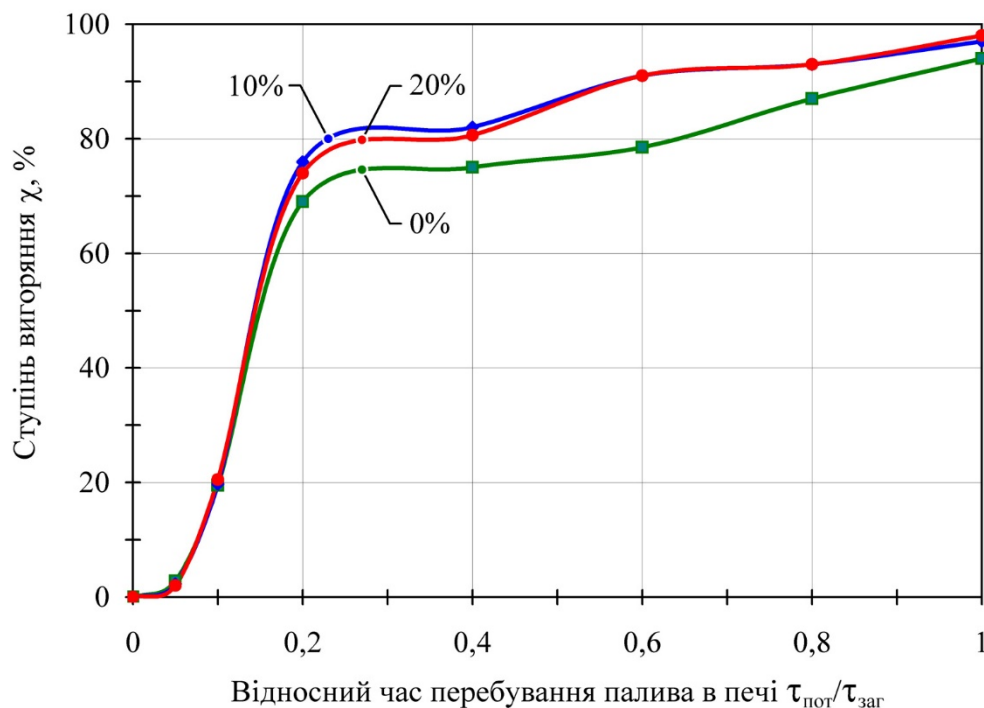


Рисунок 2.25 - Залежність ступеня вигорання горючої маси водовугільного палива від вмісту гліцерину в паливі:

1 - 0%, 2 - 10%, 3 - 20%

Як видно з отриманих даних, при додаванні гліцерину в водовугільне паливо відбувається підвищення ступеня вигорання горючої маси палива. Додавання 10% гліцерину призводить до підвищення ступеня вигорання на 5

... 7% в порівнянні з водовугільним паливом без гліцерину. При додаванні 20% гліцерину на початкових етапах горіння спостерігається зменшення ступеня вигорання, що свідчить про нестачу окислювача, про що зазначалося раніше. Потім ступінь вигорання стає однаковим, що при 10% гліцерину, що при 20%. І тільки на кінцевому етапі процесу горіння ступінь вигорання при 20% гліцерину незначно вищий, ніж при 10%.

2.4. Екологічні показники процесу горіння водовугільного палива з додаванням відходів виробництва біодизелю

Для оцінки перспектив застосування технології приготування та використання водовугільного палива з додаванням відходів виробництва біодизелю важливо знати не тільки енергетичні, а й екологічні показники процесу спалювання. Кількість речовин, які виникають, залежить від температури процесу, і, очевидно, залежить від вмісту гліцерину в водовугільному паливі. У зв'язку з цим проведена екологічна оцінка процесу спалювання композиційного водовугільного палива, що містить гліцерин. Екологічна оцінка проводилася шляхом моделювання з допомогою програмного комплексу для термодинамічного розрахунку рівноважного складу і властивостей багатокомпонентних гетерогенних систем «Terra» [102, 103].

Результати досліджень впливу гліцерину в водовугільному паливі на утворення основних сірковмісних сполук при спалюванні палива (температура процесу 1000 °C) представлені на рисунку 2.26, а азотовмісних з'єднань - на рисунку 2.27.

Як видно з отриманих даних, при спалюванні композиційного водовугільного палива з сірковмісних компонентів, в основному, утворюється H_2S , SO , SO_2 і SO_3 . Зі збільшенням вмісту гліцерину в паливі кількість SO_2 і SO_3 значно знижується, але при цьому спостерігається збільшення SO і H_2S в продуктах згоряння.

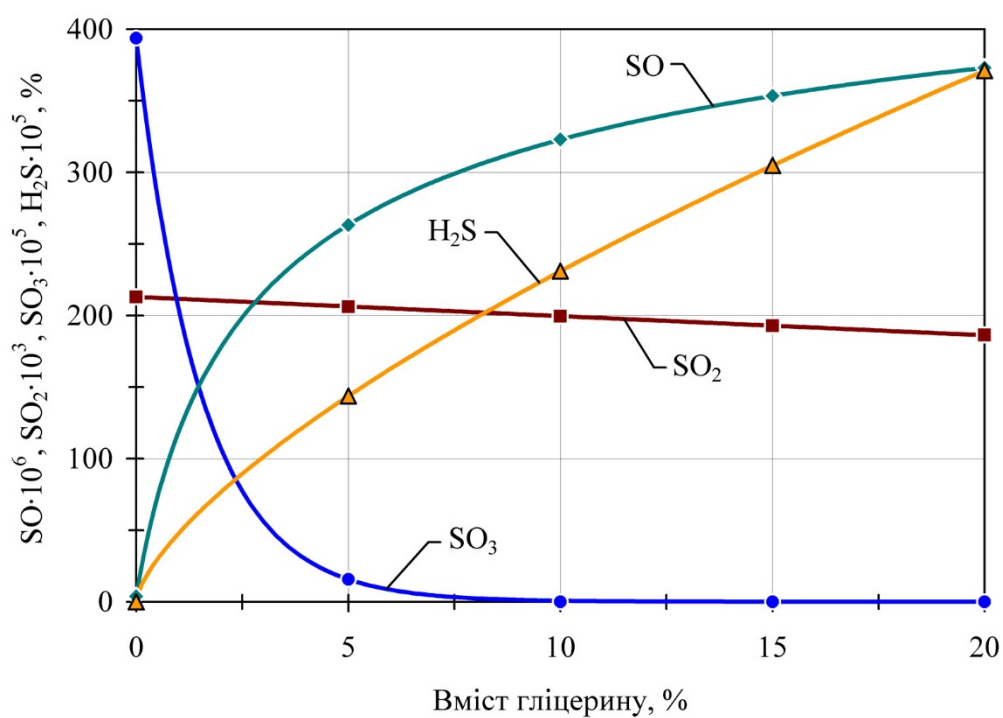


Рисунок 2.26 - Вплив гліцерину в водовугільному паливі на утворення сірковмісних сполук при спалюванні палива

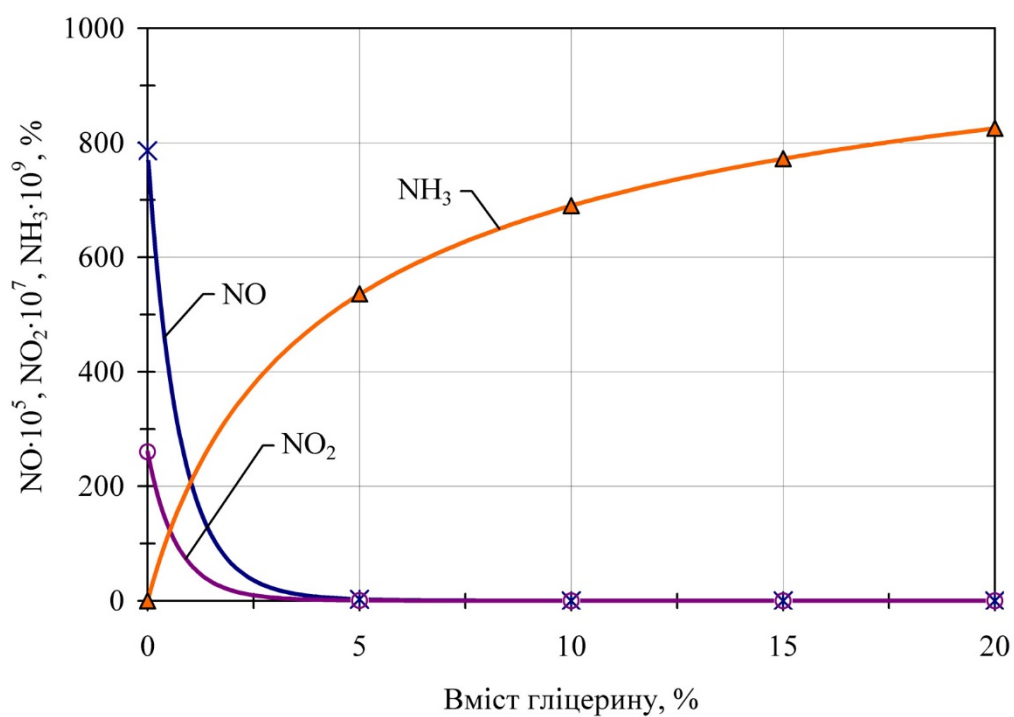


Рисунок 2.27 - Вплив гліцерину в водовугільному паливі на утворення азотовмісних з'єднань при спалюванні палива

З азотовмісних компонентів у великих кількостях утворюється NO і NO₂, вміст яких стрімко зменшується при збільшенні вмісту гліцерину в паливі. У той же час, в продуктах згоряння при додаванні гліцерину в паливі утворюється нітрид водню NH₃, вміст якого зі збільшенням кількості гліцерину в паливі збільшується.

Аналогічні залежності впливу гліцерину в водовугільному паливі на утворення основних сірковмісних сполук отримані при спалюванні палива при інших температурах.

Результати досліджень впливу температури процесу спалювання на утворення сірковмісних і азотовмісних компонентів представлені на рисунку 2.28 на прикладі водовугільного палива з вмістом гліцерину в паливі 10%.

Видно, що вміст SO, SO₃ з ростом температури в досліджуваному діапазоні збільшується, вміст SO₂ після 1100 °C практично не залежить від температури, а вміст H₂S зменшується.

Вміст NO з ростом температури в досліджуваному діапазоні значно збільшується, вміст NO₂ практично не змінюється, при цьому вміст NH₃ зменшується з ростом температури в досліджуваному діапазоні.

Аналогічний вплив температури процесу спалювання водовугільного палива спостерігається і при іншому вмісті гліцерину в ньому. На рисунку 2.29 представлені результати впливу температури процесу спалювання водовугільного палива з вмістом гліцерину в паливі 20% на утворення сірковмісних і азотовмісних компонентів.

Проведена порівняльна оцінка процесу спалювання довгополуменового вугілля, водовугільного палива, отриманого з цього вугілля і водовугільного палива з додаванням гліцерину. Результати досліджень представлені в таблицях 2.4 і 2.5

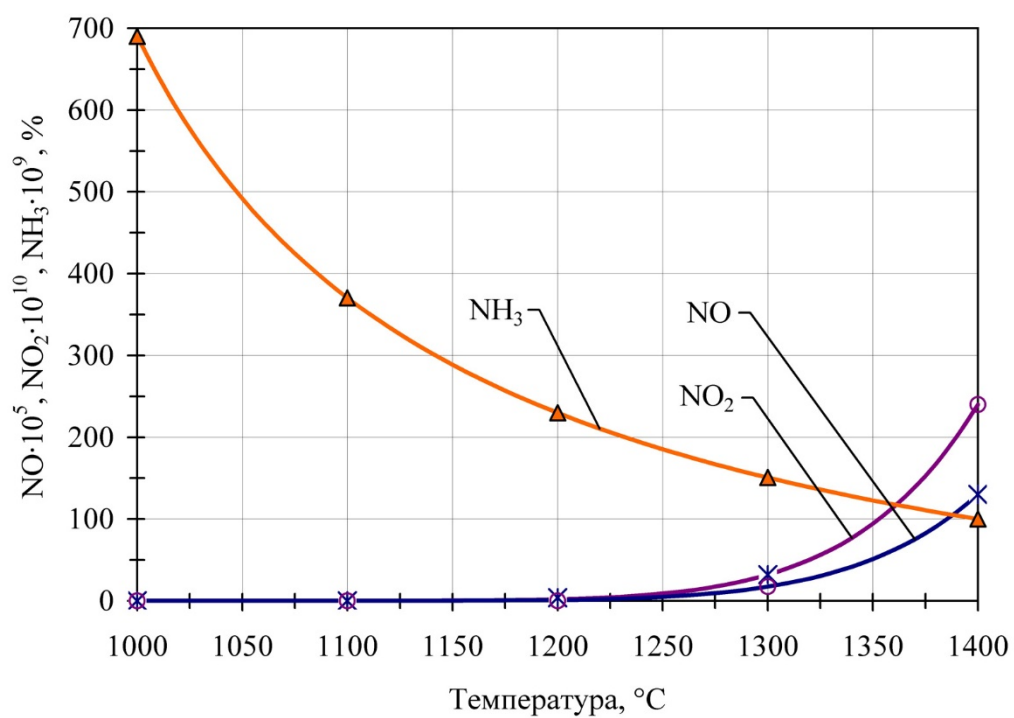
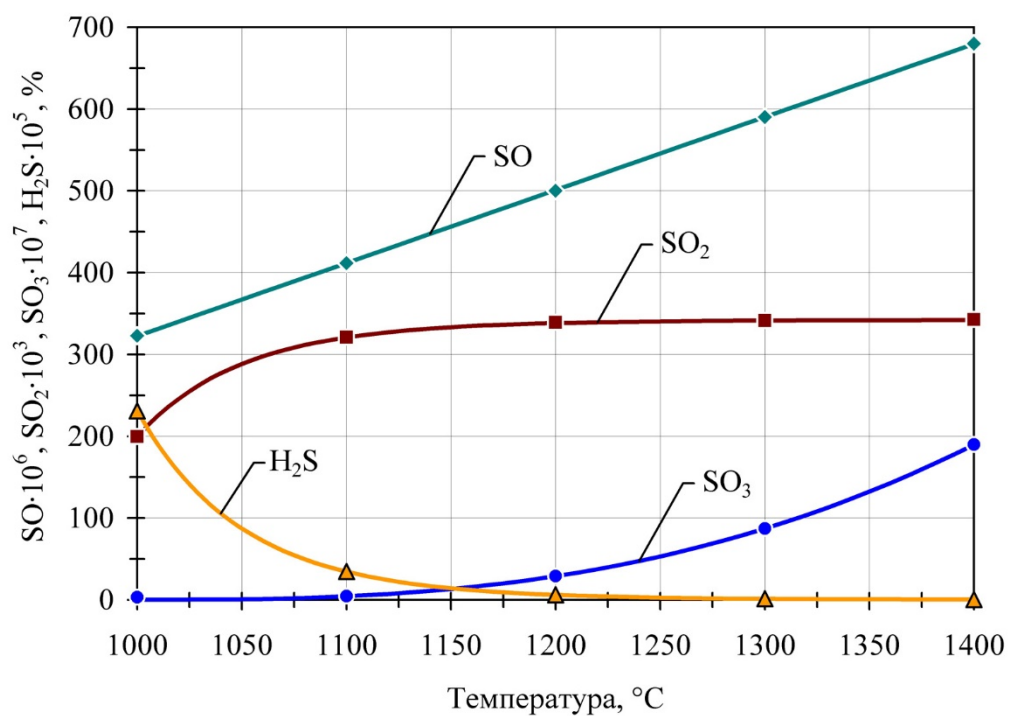


Рисунок 2.28 - Вплив температури процесу спалювання водовугільного палива з гліцерином на утворення сірковмісних (а) і азотовмісних компонентів (б)

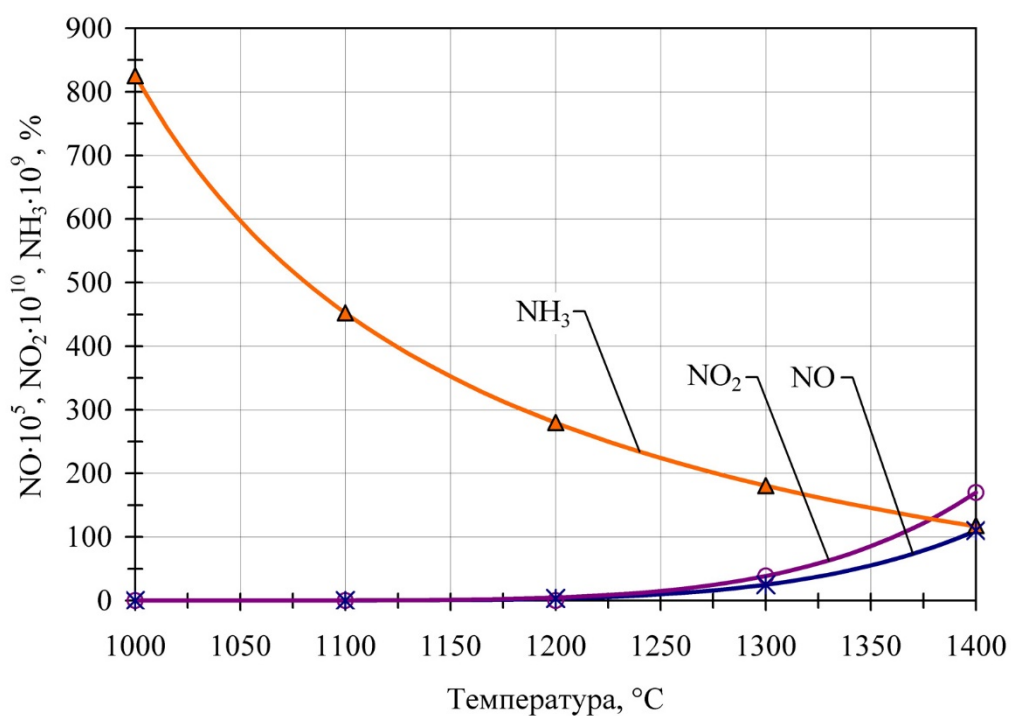
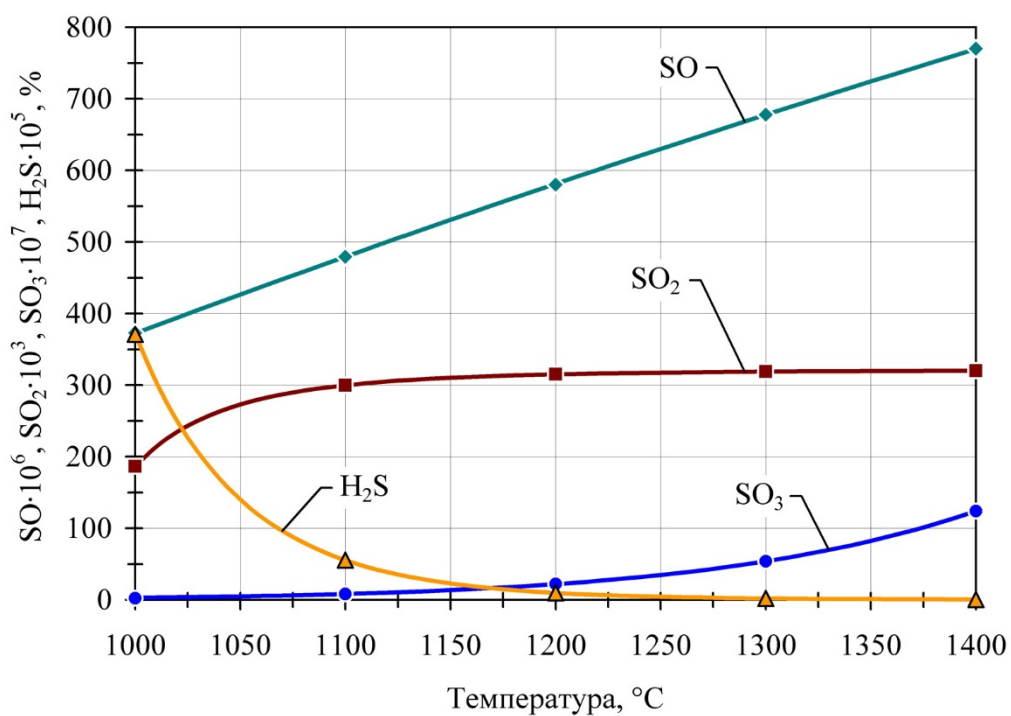


Рисунок 2.29 - Вплив температури процесу спалювання водовугільного палива з гліцерином на утворення сірковмісних (а) і азотовмісних компонентів (б)

Таблиця 2.4 - Кількість сірко і азотовмісних речовин, що утворюються при спалюванні різних видів палива

Утворення	Кількість речовин в продуктах згоряння, мг/м ³		
	вугілля	водовугільного палива	водовугільного палива з гліцерином
S	0,03 – 0,09	$0,99 \cdot 10^{-2} - 0,04$	$0,34 \cdot 10^{-2} - 0,069$
S ₂	$0,11 \cdot 10^{-4} - 0,48 \cdot 10^{-4}$	$0,56 \cdot 10^{-5} - 0,27 \cdot 10^{-4}$	$0,13 \cdot 10^{-4} - 0,79 \cdot 10^{-4}$
SH	$0,69 \cdot 10^{-2} - 0,02$	$0,44 \cdot 10^{-2} - 0,02$	$0,11 \cdot 10^{-2} - 0,33 \cdot 10^{-2}$
H ₂ S	$0,71 \cdot 10^{-3} - 0,21 \cdot 10^{-2}$	$0,78 \cdot 10^{-3} - 0,24 \cdot 10^{-2}$	$0,83 \cdot 10^{-3} - 0,55 \cdot 10^{-2}$
HSO	$0,13 \cdot 10^{-3} - 0,36 \cdot 10^{-3}$	$0,79 \cdot 10^{-4} - 0,24 \cdot 10^{-3}$	$0,41 \cdot 10^{-4} - 0,77 \cdot 10^{-4}$
SOH	$0,14 \cdot 10^{-2} - 0,34 \cdot 10^{-2}$	$0,98 \cdot 10^{-3} - 0,26 \cdot 10^{-2}$	$0,47 \cdot 10^{-4} - 0,67 \cdot 10^{-4}$
COS	$0,61 \cdot 10^{-3} - 0,18 \cdot 10^{-2}$	$0,34 \cdot 10^{-3} - 0,11 \cdot 10^{-2}$	$0,78 \cdot 10^{-3} - 0,45 \cdot 10^{-2}$

Таблиця 2.5 - Кількість SO_x і NO_x в продуктах згоряння різних видів палива

Утворення	Кількість речовин в продуктах згоряння, мг/м ³		
	вугілля	водовугільного палива	водовугільного палива з гліцерином
SO	0,02 – 0,05	0,01 – 0,03	0,038 – 0,058
SO ₂	5,63 – 5,69	5,69 – 5,72	5,01 – 5,33
SO ₃	$0,25 \cdot 10^{-2} - 0,29 \cdot 10^{-2}$	$0,24 \cdot 10^{-2} - 0,28 \cdot 10^{-2}$	$0,19 \cdot 10^{-4} - 0,43 \cdot 10^{-3}$
NO	0,85 – 0,98	0,35 – 0,45	0,0053 – 0,011
NO ₂	$0,45 \cdot 10^{-3} - 0,47 \cdot 10^{-3}$	$0,15 \cdot 10^{-3} - 0,19 \cdot 10^{-3}$	$0,16 \cdot 10^{-4} - 0,28 \cdot 10^{-4}$

Наведені дані показують, що додавання гліцерину до водовугільного палива сприятливо відбивається на екологічних показниках процесу його спалювання.

Однак, кількість сірковмісних компонентів в продуктах згоряння водовугільного палива досить висока, що пов'язано з підвищеним вмістом сірки в українському вугіллі та має бути враховано при очищенні.

Для очищення продуктів згоряння від сполук сірки найбільш перспективними в промисловому відношенні є вапняний, аміачно-циклічний і магнезитовий методи [104-106], при яких ступінь уловлювання сірки становить до 90-95%.

Для очищення газових викидів від оксидів азоту можуть використовуватися абсорбційні процеси очищення з хемосорбцією NO_x і їх перетворенням в інші продукти, адсорбційні методи уловлювання оксидів азоту з одночасним частковим або повним перетворенням в інші продукти, термічні і термokatалітичні методи відновлення оксидів азоту до молекулярного азоту [105-107].

Запилюжені продукти згоряння водовугільного палива пропонується очищати за допомогою електрофільтру. Відомо, що при спалюванні водовугільного палива електрофільтр працює більш ефективно, ніж при спалюванні вугільного пилу [108]. Краща робота електрофільтру пояснюється підвищеною вологістю золи, що покращує її електрофізичні властивості, і більшим гранулометричним складом зольних частинок.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Для визначення основних закономірностей горіння і займання водовугільного палива з додаванням гліцерину в кількості 5...20% проведені експериментальні дослідження спалювання крапель палива розміром 5 мм в повітряному середовищі при температурах 600-800 °C. Даний розмір крапель дозволив детально зафіксувати всі стадії процесів займання і горіння, їх специфічні особливості і наочність протікання процесів.

2. Встановлено, що при додаванні гліцерину до водовугільного палива період прогріву і випаровування скорочується на 12,5...29%, також зменшуються витрати на випаровування водної фази, і як, наслідок спостерігається менша нерівномірність температури навколо зразка палива, яка може призводити до згасання процесу горіння.

3. Встановлено, що спочатку відбувається займання летких речовин гліцерину і, в міру зростання температури, відбувається займання летких речовин вугільної складової водовугільного палива, наочно це спостерігається при вмісті гліцерину 15... 20%. Зі збільшенням вмісту гліцерину в водовугільному паливі температура і тривалість стадії горіння летких речовин збільшується відповідно на 1,7...6,3% и 2...30%.

4. Встановлено, що додавання гліцерину в кількості 5% призводить до зменшення часу до займання коксового залишку, однак подальше збільшення вмісту гліцерину в паливі в досліджуваному діапазоні призводить до незначного збільшення часу до займання коксового залишку.

5. Експериментальними дослідженнями горіння краплі водовугільного палива розміром 1 мм встановлено, що зі збільшенням вмісту гліцерину температура займання палива знижується на 1,7...17%. Для апроксимації використовувалася зворотна асиметрична сигмоподібна функція і запропонована емпірична залежність для визначення температури займання композиційного водовугільного палива з додаванням гліцерину в залежності від вмісту гліцерину.

6. Встановлено, що час до займання краплі водовугільного палива зменшується зі збільшенням вмісту гліцерину в паливі на 3...21%. Для апроксимації використовувалася зворотна асиметрична сигмоподібна функція і запропонована емпірична залежність для визначення часу до займання композиційного водовугільного палива з додаванням гліцерину в залежності від вмісту гліцерину.

7. Встановлено, що максимальна температура палаючої краплі водовугільного палива лінійно збільшується зі збільшенням вмісту

гліцерину, а час досягнення максимальної температури горіння скорочується зі збільшенням вмісту гліцерину.

8. Встановлено, що збільшення вмісту гліцерину в водовугільному паливі призводить до збільшення загального часу вигорання краплі палива на 3...21% і визначається не тільки співвідношенням водовугільної і гліцеринової фази в паливі, але і дефіцитом окислювача при горінні крапель. Для апроксимації використовувалася модифікована степенева функція.

9. Дослідження впливу температури робочого простору печі в діапазоні 600-800 °С показали, що підвищення температури робочого простору печі призводить до зменшення всіх розглянутих характерних часів: часу до займання, часу повного горіння краплі, часу досягнення максимальної температури, але призводить до підвищення максимальної температури горіння краплі палива.

10. Встановлено, що додавання гліцерину до водовугільного палива призводить до підвищення теплоти згорання палива на 25...30% в залежності від вмісту гліцерину в паливі, а також, призводить до збільшення ступеню вигорання горючої маси палива на 5...12% у порівнянні з водовугільним паливом без гліцерину.

11. Шляхом моделювання процесу спалювання водовугільного палива в діапазоні температур 1000...1400 °С встановлені характеристики утворення сірко- і азотовмісних компонентів в залежності від вмісту гліцерину в паливі. Наведені дані показують, що додавання гліцерину до водовугільного палива сприятливо відбивається на екологічних показниках процесу його спалювання.

Основні положення розділу 2 опубліковані в [109, 110].

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА З ДОДАВАННЯМ ВІДХОДІВ ВИРОБНИЦТВА БІОДИЗЕЛЯ

3.1 Експериментальне дослідження коефіцієнта теплопровідності водовугільного палива з додавання відходів виробництва біодизеля

Особливістю експериментальних методів визначення коефіцієнта теплопровідності є їх велика різноманітність. Для дослідження теплопровідності матеріалів використовуються стаціонарні і нестаціонарні групи методів [111-115]. Істотно менш витратними і простими в реалізації є методи визначення теплофізичних властивостей матеріалів за допомогою математичного моделювання. Однак, в ході математичного моделювання доводиться стикатися з браком інформації, що характеризує різні фізичні параметри процесу, значення яких залежать від великої кількості геометричних і режимних параметрів процесу теплообміну. У зв'язку з цим застосовують узагальнені аналітичні вирази та критеріальні залежності, які описують теплові процеси, що призводить до відхилення математичної моделі від реального об'єкта моделювання, і, як наслідок, призводить до істотних погрешностей при визначенні теплофізичних властивостей [111, 113]. Одним з ефективних методів визначення коефіцієнта теплопровідності є використання комбінування фізичного експерименту і чисельного моделювання.

В рамках поставленої задачі по визначенню впливу вмісту гліцерину в водовугільному паливі на коефіцієнт теплопровідності палива використані методика і експериментальна установка, розроблені науковим керівником проф. Пінчук В.О. [59, 78].

При проведенні фізичного експерименту пропонується використовувати метод порівняння, різні варіації якого описані в [116].

В якості методу чисельного моделювання використано рішення зворотної задачі теплопровідності шляхом багаторазового рішення прямої задачі теплопровідності. При цьому відсутня інформація по граничних умовах, фізичних параметрах і умовах протікання реального теплового процесу визначається безпосередньо в ході проведення експериментальних досліджень на еталонній речовині і, в подальшому, використовується при чисельному моделюванні.

Експериментальна установка по визначенню коефіцієнта теплопровідності складається з вимірювальної ділянки, системи керуючих і реєструючих приладів. Схема вимірювальної ділянки експериментальної установки представлена на рисунку 3.1.

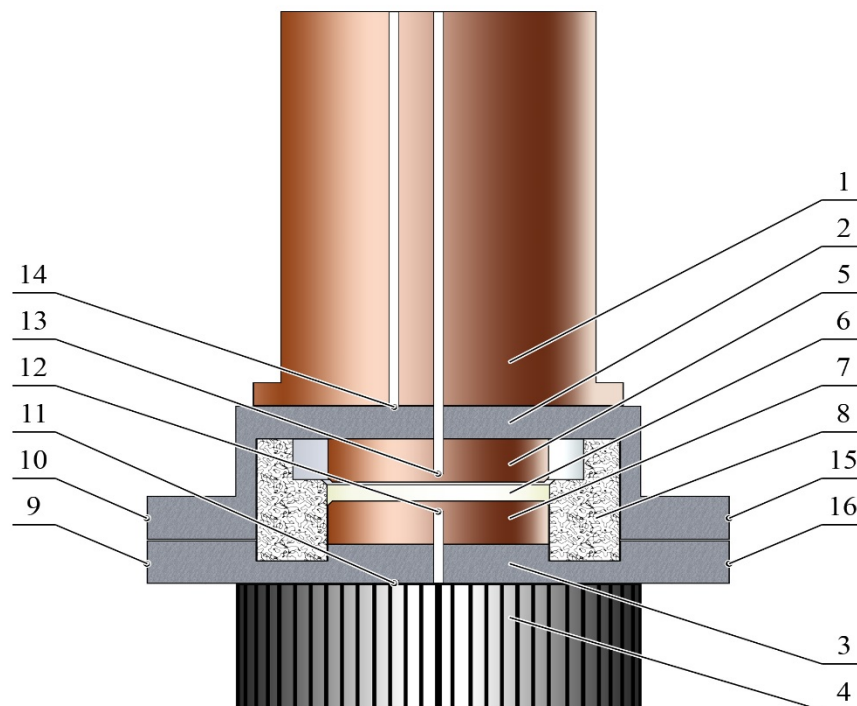


Рисунок 3.1 - Схема вимірювальної ділянки експериментальної установки для визначення коефіцієнта теплопровідності водовугільного палива:

1 - нагрівач; 2 - верхня частина корпусу; 3 - нижня частина корпусу; 4 - охолоджувач; 5 - верхній термодиск; 6 - відсік для водовугільного палива; 7- нижній термодиск; 8 - фторопластова вставка; 9-16 - термопары

Вимірювальна ділянка складається з нагрівача 1, верхньої 2, нижньої 3 частин корпусу, виконаних з нержавіючої сталі, і охолоджувача 4. Нагрівач виконаний з ніхромового дроту, намотаного на масивний мідний циліндр, який теплоізований з усіх боків, крім нижньої частини, яка контактує з верхньою частиною корпусу (теплоізоляція на рисунку 3.1 не показана). Верхня частина корпусу 2 з'єднана з верхнім термодиском 5, виготовленим з міді, і являє собою нерозбірну в процесі експлуатації конструкцію. Нижня частина корпусу з'єднана з нижнім термодиском 7, виконаним з міді. Для зменшення втрат теплоти через корпус відсік для водовугільного палива 6 і прилеглі до нього поверхні ізовані фторопластовою вставкою 8. У верхній і нижній частинах корпусу встановлені термопари 9-16. Вимірювання температур на межі дослідного зразка здійснюється термопарами 12, 13, укладеними через спеціальні отвори в термодисках 5 і 7, які безпосередньо контактують зі зразком водовугільного палива. Термопара 14 встановлена на межі між нагрівачем 1 і верхньою частиною корпусу 2, її покази враховуються при заданій температури на верхній межі розрахункової ділянки. Термопара 11 встановлена на нижній поверхні нижньої частини корпусу 3 (між охолоджувачем 4 і нижнім фланцем) і використовується для контролю температури при на нижній межі розрахункової ділянки. Термопари 9, 10, 15, 16 встановлені діаметрально на зовнішніх бокових поверхнях верхньої 2 і нижньої 3 частин корпусу і призначені для контролю втрат теплоти в радіальному напрямку в навколишнє середовище. Для оцінки можливих теплових втрат через металевий корпус проводяться виміри температур термопарами (позиції 11 і 14) і в шарі нержавіючої сталі. Для досліджень використані хромель-алюмелеві термопари, для яких виконана індивідуальна тарировка, що забезпечує високу точність вимірювання температур ($\pm 0,25$ °C) в діапазоні від 20 °C до 250 °C. У зібраному вигляді конструкція є герметичною і витримує тиск до 3 МПа, що дозволяє проводити дослідження при температурах до 200 °C. Загальна похибка вимірювальних приладів складає 0,8...1%.

Фотографія експериментальної установки для визначення коефіцієнта теплопровідності водовугільного палива представлена на рисунку 3.2.

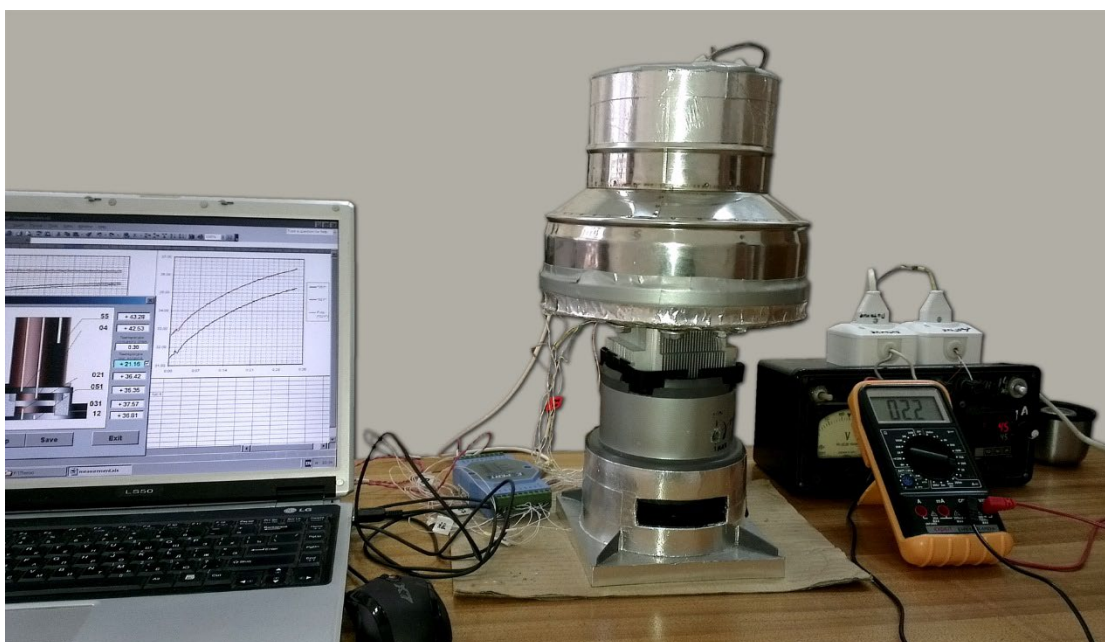


Рисунок 3.2 - Експериментальна установка для визначення коефіцієнта теплопровідності водовугільного палива

Дослідний зразок композиційного водовугільного палива об'ємом 25 мл (висота шару 9 мм) міститься в спеціальний відсік для палива. Тепловий потік, що виділяється нагрівачем, проходить через дослідний зразок палива і приймається охолоджувачем. Потужність нагрівача регулюється за допомогою регулятора (максимальна потужність нагрівача становить 300 Вт). Дослідний зразок водовугільного палива щільно, без повітряних зазорів, прилягає до поверхонь термодисков. Показання термопар передаються на

програмно-апаратний вимірювальний комплекс, який дозволяє контролювати, обробляти і виводити на екран комп'ютера значення параметрів в режимі реального часу.

В результаті проведення фізичного експерименту фіксуються значення температур в місцях установки термопар і температура навколишнього середовища. Для визначення коефіцієнта теплопровідності з отриманого експериментального розподілу температур необхідно вирішити зворотну задачу теплопровідності. В якості методу чисельного розв'язання зворотної задачі теплопровідності був обраний метод багаторазового розв'язання прямої задачі теплопровідності [117] з оптимізацією ітерацій методом золотого перетину [118, 119]. В якості опції, для якої методом золотого перетину знаходився мінімум, використовувалося значення середнього абсолютного відхилення розрахункових і вимірних температур в контрольних точках. Детальна інформації про граничні умови приведена в [59].

При побудові алгоритму використовувалися ортогональна рівномірна розрахункова сітка з кроком 0,5 мм по обох координатах. Геометричні розміри розрахункової схеми відповідали розмірам експериментальної установки. Чисельне інтегрування за часом здійснювалося з кроком $\Delta\tau=3$ с, який визначений в процесі тестових розрахунків.

За результатами фізичного експерименту на еталонній речовині (дистильована вода) і вирішенні зворотної задачі теплопровідності визначалися граничні умови, фізичні параметри і умови протікання реального теплового процесу. Для визначення невідомих параметрів теплообміну, властивих даних експериментальній установці, проведена серія експериментів на еталонній речовині в необхідному діапазоні температур і виконана верифікація розробленої моделі шляхом обробки отриманих експериментальних даних. В результаті верифікації визначені коефіцієнти, необхідні для розрахунку конвективного теплообміну з навколишнім середовищем:

- на правій межі розрахункової області коефіцієнт, що враховує конвективний теплообмін з тілом складної форми;
- на нижній межі розрахункової області коефіцієнт, що враховує посилення тепловіддачі при використанні охолоджувача.

Отримані експериментальні дані на еталонній речовині також використовувалися для перевірки адекватності розробленої математичної моделі за визначенням коефіцієнта теплопровідності. Розбіжність отриманих даних з відомими значеннями коефіцієнта теплопровідності води при різних температурах склала 1...3%.

Наступним етапом проведення досліджень було проведення фізичного експерименту на водовугільному паливі в умовах експерименту, подібних умов експерименту на еталонній речовині. В процесі експерименту фіксувався розподіл температурних полів. В процесі чисельного моделювання відтворювалися умови проведення експерименту на паливі і розподіл нестационарних температурних полів розраховувався багаторазово до моменту досягнення стаціонарного режиму. При цьому попередньо задавалося деяке значення коефіцієнта теплопровідності водовугільного палива.

З отриманого стаціонарного розподілу температур вибиралися значення температур в точках, відповідних точкам установки термопар в експериментальній установці. Розрахункові і експериментальні значення порівнювалися, якщо відмінність між ними перевищувала задану похибку, значення коефіцієнта теплопровідності змінювалося і розрахунок повторювався. Кількість розрахунків прямої задачі для підбору значення коефіцієнта теплопровідності становило від 7 до 14.

Характеристики досліджуваних зразків водовугільного палива з додаванням гліцерину представлені в розділі 2 (таблиці 2.1-2.2, рисунок 2.4). Отримані результати значень коефіцієнтів теплопровідності зразків водовугільного палива в діапазоні зміни температури 50...150 °С, наведені на

рисунках 3.3-3.4. Довірчий інтервал значень коефіцієнта теплопровідності складає $\lambda \pm 1,25\%$ з довірчою ймовірністю 95%.

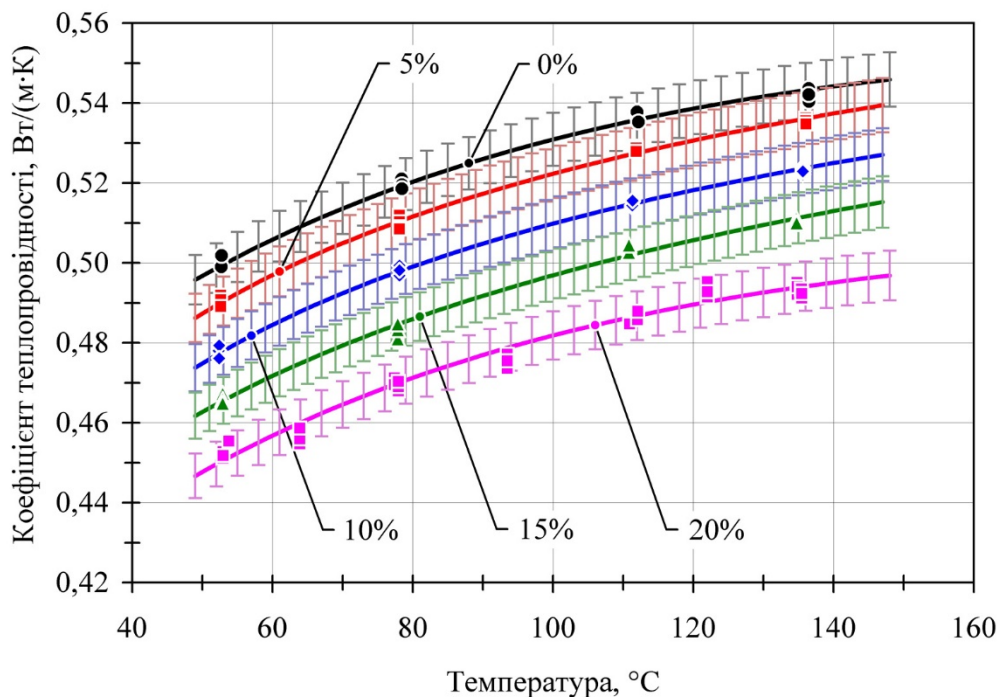


Рисунок 3.3 - Залежність коефіцієнта теплопровідності водовугільного палива від температури при різному вмісті гліцерину:

точки - експериментальні дані, криві - апроксимація результатів

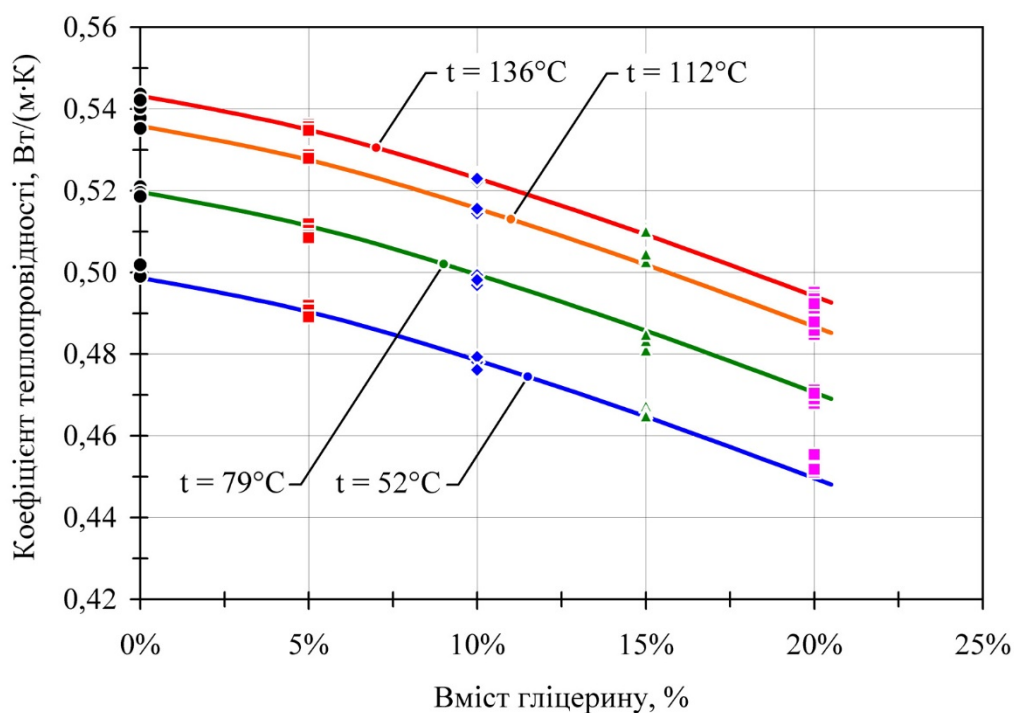


Рисунок 3.4 - Залежність коефіцієнта теплопровідності водовугільного палива від вмісту гліцерину в паливі для різних температур:

точки - експериментальні дані, криві - апроксимація результатів

Як показали експериментальні дослідження, коефіцієнт теплопровідності водовугільного палива з гліцерином зменшується в порівнянні з водовугільним паливом без гліцерину, і змінюється в діапазоні 0,45...0,53 Вт/м·К. Коефіцієнт теплопровідності палива закономірно збільшується зі зростанням температури, оскільки коефіцієнти теплопровідності вихідного вугілля, води і гліцерину збільшуються з ростом температури в досліджуваному діапазоні.

Встановлено, що зі збільшенням кількості гліцерину в водовугільному паливі коефіцієнт теплопровідності палива зменшується, що є закономірним, оскільки коефіцієнт теплопровідності гліцерину приблизно в два рази нижче теплопровідності води. Слід зазначити, що значення коефіцієнта теплопровідності водовугільного палива зменшується не прямо-пропорційно вмісту гліцерину в паливі. При додаванні 20% гліцерину відбувається зменшення коефіцієнта теплопровідності на 8,5...10%, а додавання 10% - приводить до зменшення коефіцієнта теплопровідності тільки на 3,5-4,2% в порівнянні з коефіцієнтом теплопровідності палива без додавання гліцерину.

Для оцінки можливості застосування закону адитивності для визначення коефіцієнта теплопровідності водовугільного палива з додаванням гліцерину проведено порівняння (рисунок 3.5) отриманих експериментальних значень коефіцієнта теплопровідності розглянутого палива і значень коефіцієнта теплопровідності палива, розрахованих шляхом використання закону адитивності, якщо розглядати досліджуване паливо як суміш компонентів (органічна частина вугілля, мінеральні домішки, вода, гліцерин).

Рисунок 3.5 показує, що використання закону адитивності призводить до того, що значення теплопровідності водовугільного палива з додаванням

гліцерину на 30-40% менше виміряних. Ця різниця стає тем більшою, чим вища температура.

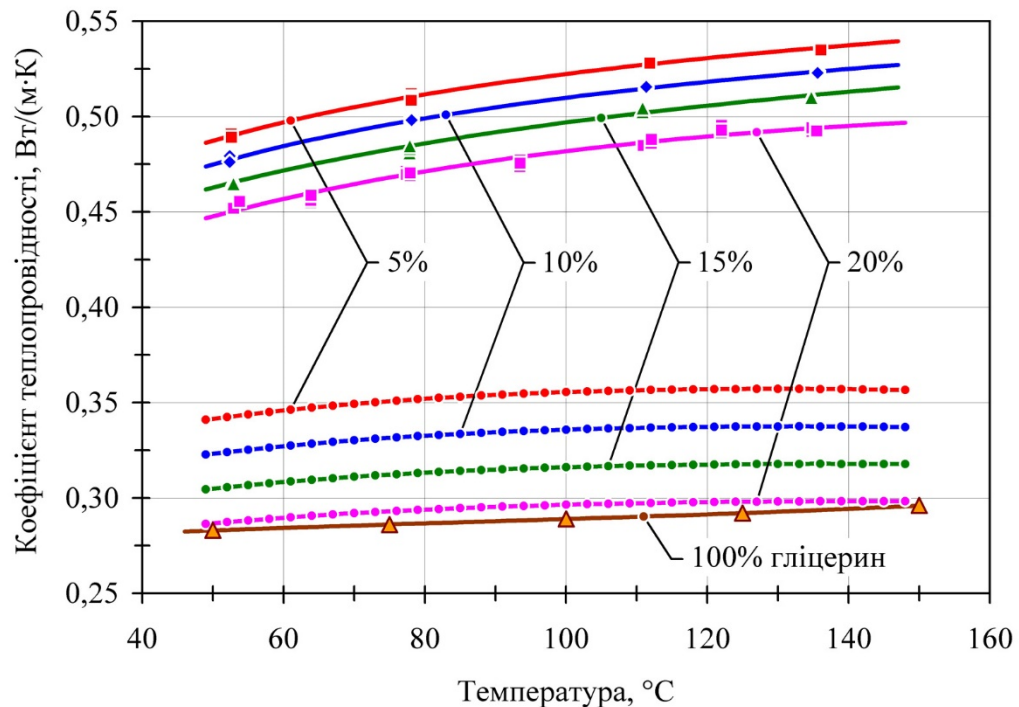


Рисунок 3.5 - Порівняння експериментальних даних значень коефіцієнта теплопровідності водовугільного палива з додаванням гліцерину (верхні криві) з розрахунковими даними за законом адитивності (нижні криві)

Обробка та аналіз експериментальних даних щодо впливу температури і вмісту гліцерину в водовугільному паливі на коефіцієнт теплопровідності палива дозволили отримати залежність наступного виду (коефіцієнт детермінації R^2 складає 0,997):

$$\lambda = \lambda_{\text{ВВП}} - 0,385 \cdot Gl^{1,28}, \quad (3.1)$$

де $\lambda_{\text{ВВП}}$ — коефіцієнт теплопровідності водовугільного палива без гліцерину, Вт/м·К;

Gl - вміст гліцерину в паливі, мас. частка.

Емпірична формула для визначення коефіцієнта теплопровідності водовугільного палива встановлена раніше науковим керівником проф. Пінчук В.О. [59, 78] і має такий вигляд:

$$\lambda_{ВВП} = \lambda_{прив} \cdot f(W) \cdot f(A) \cdot f(M) + \lambda_{\epsilon} \cdot W^P, \quad (3.2)$$

де $\lambda_{прив}$ – приведений коефіцієнт теплопровідності вугільної речовини, Вт/(м·К);

$f(W)$ – функція, що враховує вплив вмісту водної фази в водовугільному паливі;

$f(A)$ – функція, що враховує вплив вмісту мінеральних домішок в водовугільному паливі;

$f(M)$ – функція, що враховує вплив стадії метаморфізму вихідного вугілля в водовугільному паливі;

λ_{ϵ} – коефіцієнт теплопровідності води, значення якого залежить від температури, Вт/(м·К);

W^P – вологість водовугільного палива на робочу масу, мас. частки.

Приведений коефіцієнт теплопровідності вугільної речовини визначається за формулою:

$$\lambda_{прив} = \lambda_{\text{вуг}} \cdot (1 - A^c) + \lambda_{\text{м.д.}} \cdot A^c, \quad (3.3)$$

де $\lambda_{\text{вуг}}$ – коефіцієнт теплопровідності органічної маси вугілля при 20 °С (значення $\lambda_{\text{вуг}}$ наведені в таблиці 3.1 в залежності від марки вугілля), Вт/(м·К);

$\lambda_{\text{м.д.}}$ – коефіцієнт теплопровідності мінеральних домішок при 20 °С (середнє значення для мінеральних домішок у вугіллі України $19,8 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К));

A^c – зольність на суху масу водовугільного палива, мас. частки.

Функція, що враховує вплив вмісту водної фази в водовугільному паливі, визначається за формулою:

$$f(W) = k_w \cdot (1 - W^P)^{1,21}, \quad (3.4)$$

де k_w – коефіцієнт, отриманий з експериментальних даних, що враховує вплив температури t , і визначається за формулою:

$$k_w = 20 - 34 \cdot (t + 150)^{-0,50}. \quad (3.5)$$

Функція, що враховує вплив стадії метаморфізму вихідного вугілля в водовугільному паливі, визначається за формулою:

$$f(M) = k_m \cdot t + b_m, \quad (3.6)$$

де k_m , b_m – коефіцієнти, які визначаються з експериментальних даних, і враховують вплив стадії метаморфізму вихідного вугілля в водовугільному паливі (значення див. таблицю 3.1);
 t – температура, °C.

Таблиця 3.1 - Значення коефіцієнтів для визначення коефіцієнта теплопровідності водовугільного палива

Коефіцієнти	Водовугільне паливо з вугілля					
	марки Б	марки Д	марки Г	марки Ж	марки Т	марки А
$k_m \cdot 10^4$	14,4	6,31	0,91	1,6	9,3	0
b_m	0,27	0,79	0,81	0,66	0,49	1

Подовження табл. 3.1

$\lambda_{\text{вуг}} \cdot 10^2,$ Вт/(м·К)	17,5	11,6	11,4	11,9	13,4	14,9
--	------	------	------	------	------	------

Функція, що враховує вплив вмісту мінеральних домішок в водовугільному паливі, визначається за формулою:

$$f(A) = k_a \cdot A^c + b_a, \quad (3.7)$$

де k_a, k_b – коефіцієнти, які визначаються з експериментальних даних, що враховують вплив температури t , і визначаються за формулами:

$$k_a = 0,67 + 1,66 \cdot 10^{-4} \cdot |t - 225|^{1,4}, \quad (3.8)$$

$$b_a = 0,71 + 7,5 \cdot 10^{-5} \cdot |t - 225|^{1,4}, \quad (3.9)$$

Отримані формули для визначення коефіцієнта теплопровідності водовугільного палива справедливі при $W^p = 25 \dots 50 \%$ и $A^c = 0,5 \dots 60 \%$ в температурному діапазоні $50 \dots 150 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Формула (3.1) отримана на основі результатів експериментальних досліджень впливу добавки гліцерину на значення коефіцієнта теплопровідності водовугільного палива, отриманого з вугілля марки Д з конкретними характеристиками. Можна припустити, що формула (3.1) справедлива і для водовугільного палива, отриманого з інших марок вугілля, оскільки в досліджуваній області температур гліцерин хімічно не взаємодіє з вугільною речовиною. При цьому в розрахунках за формулами (3.2) - (3.9) необхідно використовувати відповідні характеристики конкретного водовугільного палива.

3.2 Експериментальні дослідження теплоємності водовугільного палива з додаванням відходів виробництва біодизеля

Для визначення значень теплоємності водовугільного палива з урахуванням рекомендацій [120, 121] використовувався калориметричний метод.

В рамках поставленої задачі по визначенню впливу вмісту гліцерину в водовугільному паливі на теплоємність палива використана експериментальна установка, розроблена науковим керівником проф. Пінчук В.О. Принципова схема робочої ділянки та фотографія експериментальної установки наведені на рисунках 3.6 та 3.7.

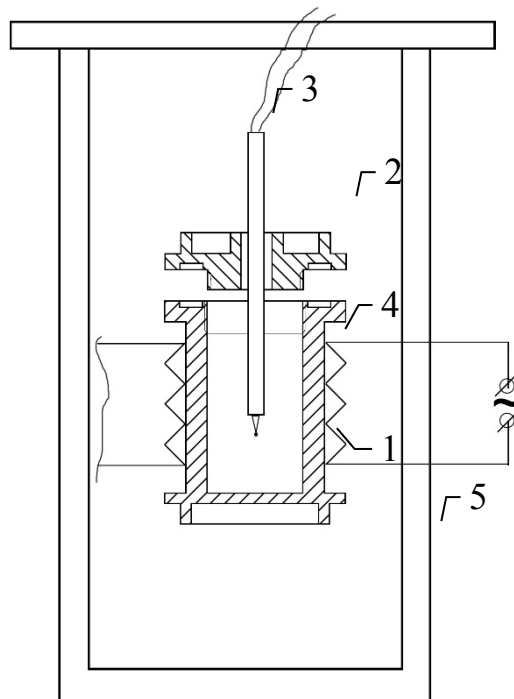


Рисунок 3.6 - Схема робочої ділянки експериментальної установки для визначення теплоємності водовугільного палива:

1 - контейнер; 2 - кришка контейнера; 3 - хромель-алюмелева термопара; 4 - нагрівач; 5 - теплоізолювана оболонка



Рисунок 3.7 - Експериментальна установка для визначення теплоємності водовугільного палива

Робоча ділянка являє собою адіабатичний калориметр. Контейнер калориметру 1 виконаний з латуні, зверху закривається кришкою 2 на різьбовому з'єднанні. У зібраному вигляді конструкція є герметичною і витримує тиск до 3 МПа. У кришці калориметру виконаний отвір, через який всередину латунного контейнера герметично заведена хромель-алюмелева термопара 3.

Для підведення тепла до вмісту контейнера використовується намотаний на зовнішню поверхню контейнера нагрівач 4 з ніхромового дроту діаметром 0,25 мм. Цей же нагрівач використовується для компенсації можливих втрат тепла, при цьому він працює в режимі термостатування. Для контролю теплового стану контейнера на його бічній стінці і на нижньому торці зачеканені термопари (на рис. не показані). В процесі вимірювань контейнер поміщається в теплоізолюючу оболонку 5 і далі - в посудину Дьюара.

Зразок водовугільного палива заданої маси, що досліджувався, поміщається всередину контейнера, герметично закривається, і термопара

(поз. 3 на рисунку 3.6) занурюється в паливо. За допомогою нагрівача вміст контейнера нагрівається до температури, при якій необхідно провести вимірювання. При досягненні заданої температури нагрівач за допомогою програмно-апаратного вимірювального комплексу 3, комп'ютера 4 і блоку управління 5 переходить в режим термостатування. Для забезпечення високої точності термостатування використовуються показники термопар, які розташовані на бічній стінці і на нижньому торці. У такому режимі установка працює до виходу на стаціонарний режим, досягнення якого визначається за показаннями термопар, що знаходиться в паливі. При досягненні стаціонарного режиму відбувається фіксування температури палива t_1 , потім за допомогою блоку управління 5 нагрівач включається на заданий проміжок часу (близько 10 с), протягом якого відбувається нагрівання зразка. При цьому амперметром 6 фіксується значення підведеної сили струму, а вольтметром 7 - значення напруги. Через заданий інтервал часу нагрівач відключається і повертається в режим термостатування для компенсації втрат (якщо це необхідно). Далі установка знову працює до досягнення стаціонарного режиму, після закінчення якого знову відбувається фіксація температури палива t_2 . Експеримент повторюється при наступних необхідних температурах. Загальна похибка вимірювальних приладів складає 0,85 ... 1%.

Отримані експериментальні дані дозволяють розрахувати теплоємність водовугільного палива за виразом:

$$c = \frac{k_c \cdot Q}{m(t_2 - t_1)}, \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)} \quad (3.10)$$

де Q – кількість підведеної енергії (визначається за експериментальними вимірами), кДж;

k_c – константа системи, яка визначається з верифікаційних експериментів;

m – маса водовугільного палива (визначається до експерименту за допомогою електронних ваг ТВЕ-0,21-0,001), кг;

t_1, t_2 – значення температури водовугільного палива відповідно до і після підведення енергії (визначаються в ході експерименту термопарою, розташованою в паливі (поз. 3 рисунку 2.6)), К.

Перед експериментальними дослідженнями на водовугільному паливі для визначення констант системи і похибок вимірювань проводилася серія тестових експериментів на еталонній речовині (вода). Розбіжність отриманих даних з відомими значеннями теплоємності води при різних температурах склало не більше 4%.

Значення теплоємності зразків водовугільного палива, отримані при експериментальних дослідженнях в діапазоні зміни температури 50...150 °С, наведені на рисунках 3.8.-3.9. Довірчий інтервал значень теплоємності становить $\pm 0,93\%$ з довірчою ймовірністю 95%.

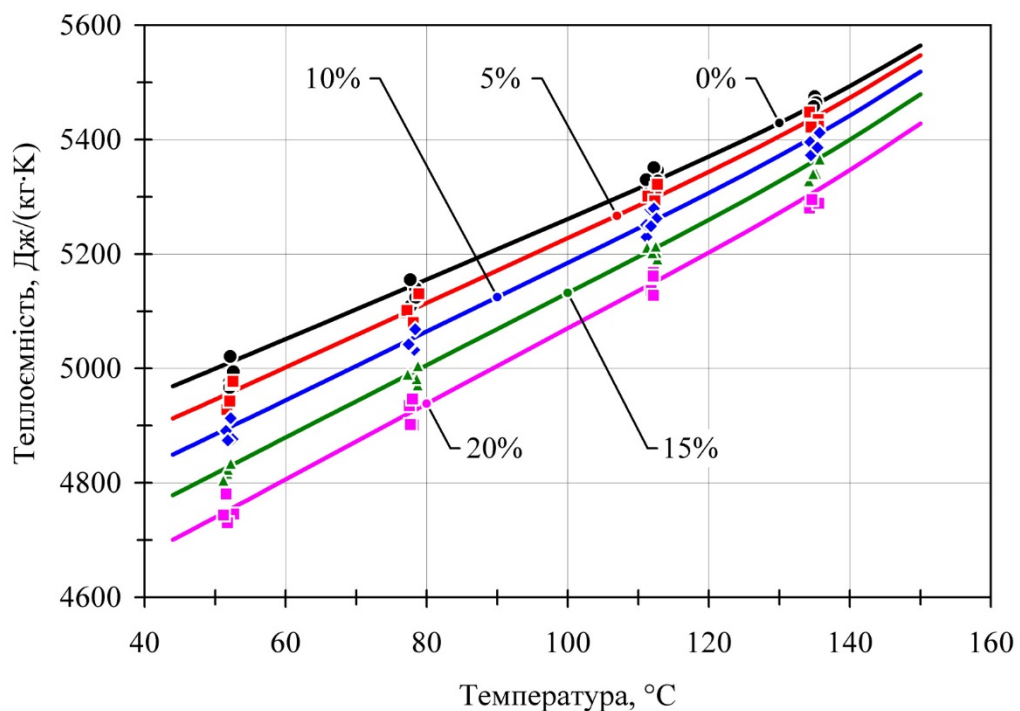


Рисунок 3.8 - Залежність теплоємності водовугільного палива від температури при різному вмісті гліцерину:

точки - експериментальні дані, криві - апроксимація результатів

В результаті досліджень встановлено, що теплоємність водовугільного палива з гліцерином зменшується в порівнянні з паливом без гліцерину і змінюється від 4,7 до 5,5 кДж/кг·К. Теплоємність палива закономірно збільшується зі зростанням температури в досліджуваному діапазоні незалежно від вмісту гліцерину.

Як видно з отриманих даних, значення теплоємності водовугільного палива в досліджуваному діапазоні температур прямо-пропорційно зменшується зі збільшенням вмісту гліцерину. При цьому вплив додавання гліцерину на значення теплоємності водовугільного палива залежить від температури. Додавання 20% гліцерину призводить до зменшення теплоємності в середньому на 5,3% при температурі 50 °С, а при температурі 135 °С додавання 20% гліцерину призводить до зменшення теплоємності всього на 2,6% в порівнянні з теплоємністю водовугільного палива без додавання гліцерину.

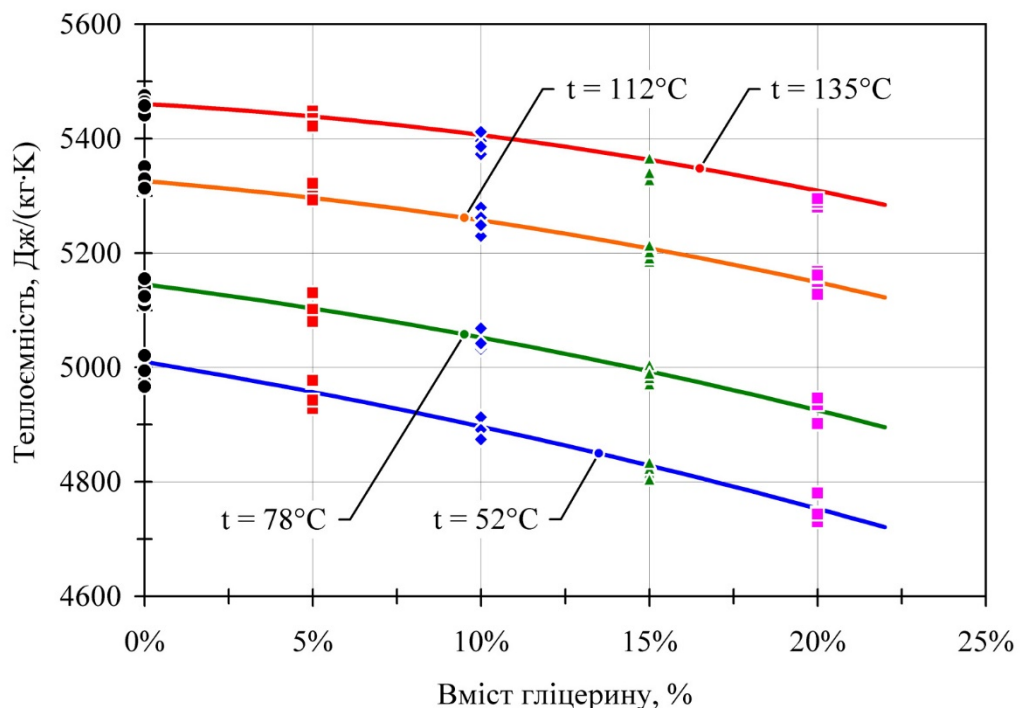


Рисунок 3.9 - Залежність теплоємності водовугільного палива від вмісту гліцерину в паливі для різних температур:

точки - експериментальні дані, криві - апроксимація результатів

Подібно коефіцієнту теплопровідності, теплоємність водовугільного палива з гліцерином не може бути розрахована з використанням закону адитивності. Як видно з рисунку 3.10. отримані експериментальні значення теплоємності і розраховані згідно із законом адитивності відрізняються більш ніж у два рази.

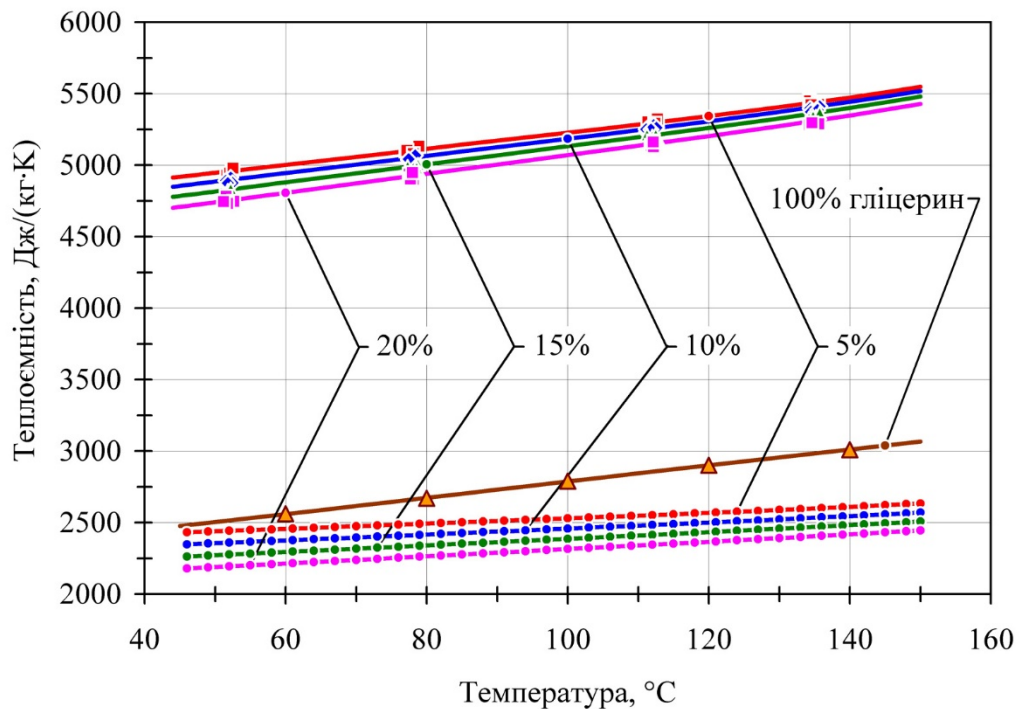


Рисунок 3.10 - Порівняння експериментальних даних значень теплоємності (верхні криві) з розрахунковими даними за законом адитивності (нижні криві)

Як видно, теплоємність водовугільного палива з додаванням гліцерину не відповідає закону адитивності. Однак, для зручності можна застосувати закон адитивності, якщо розглянути паливо як умовну суміш водовугільного палива, що має специфічні особливості і властивості, і гліцерину. При цьому, при розрахунку теплоємності безпосередньо водовугільного палива, необхідно враховувати його властивості як дисперсної системи.

Таким чином, було отримано наступне рівняння для розрахунку теплоємності водовугільного палива з гліцерином за формулою, в якій

теплоємність розглянутого палива визначається як середньозважене значення безпосередньо самого водовугільного палива та гліцерину:

$$c = c_{\text{ввп}} \cdot m_{\text{ввп}} + c_{\text{глиц}} \cdot Gl, \quad (3.11)$$

де $c_{\text{ввп}}$ – теплоємність водовугільного палива, кДж/кг·К;

$m_{\text{ввп}}$ – вміст водовугільного палива, мас. частка;

$c_{\text{глиц}}$ – теплоємність гліцерину, кДж/кг·К;

Gl – вміст гліцерину в паливі, мас. частка.

Емпірична формула для визначення значення теплоємності водовугільного палива встановлена раніше науковим керівником проф. Пінчук В.О. [59, 78] і має такий вигляд:

$$c_{\text{ввп}} = c_{\text{прив}} \cdot f(W) \cdot f(A) \cdot f(M) + c_{\text{в}} \cdot W^P, \quad (3.12)$$

де $c_{\text{прив}}$ – приведена теплоємність вугільної речовини, кДж/(кг·К);

$f(W)$ – функція, що враховує вплив вмісту водної фази в водовугільному паливі;

$f(A)$ – функція, що враховує вплив вмісту мінеральних домішок в водовугільному паливі;

$f(M)$ – функція, що враховує вплив стадії метаморфізму вихідного вугілля в водовугільному паливі;

$c_{\text{в}}$ – теплоємність води, значення якої залежить від температури, кДж/(кг·К);

W^P – вологість водовугільного палива на робочу масу, мас. частки.

Приведена теплоємність вугільної речовини визначається за формулою:

$$c_{\text{прив}} = c_{\text{вуг}} \cdot (1 - A^c) + c_{\text{м.д.}} \cdot A^c, \quad (3.13)$$

де $c_{\text{вуг}}$ – теплоємність органічної маси вугілля (значення в залежності від температури t для основних марок вугілля наведені в таблиці 3.2), кДж/(кг·К);

A^c – зольність на суху масу водовугільного палива, мас. частки;

$c_{\text{м.д.}}$ – теплоємність мінеральних домішок при 20 °С, яка визначається за відомою формулою:

$$c_{\text{м.д.}} = (0,18 + 7 \cdot 10^{-5} \cdot [t + 273]) \cdot 4,19. \quad (3.14)$$

Таблиця 3.2 - Значення теплоємності органічної маси вугілля $c_{\text{вуг}}$, кДж/(кг·К)

Температура, °С	марки Б	марки Д	марки Г	марки Ж	марки Т	марки А
20	1,15	1,12	1,13	1,09	1,00	0,93
100	1,28	1,33	1,31	1,26	1,17	1,06
150	1,45	1,43	1,41	1,37	1,28	1,15
200	1,54	1,56	1,52	1,48	1,39	1,23

Функція, що враховує вплив вмісту водної фази в водовугільного палива, визначається за формулою:

$$f(W) = b_w \cdot (1 - W^p), \quad (3.15)$$

де b_w – коефіцієнт, отриманий з експериментальних даних, що враховує вплив температури t і визначається за формулою:

$$b_w = 3,63 + 5 \cdot 10^{-6} \cdot |t - 60|^{2,2}. \quad (3.16)$$

Функція, що враховує вплив вмісту мінеральних домішок в водовугільному паливі, визначається за формулою:

$$f(A) = k_a \cdot A^c + b_a, \quad (3.17)$$

де k_a, k_b – коефіцієнти, які визначаються з експериментальних даних, що враховують вплив температури t , і визначаються за формулами:

$$k_a = 0,001 \cdot t - 0,41, \quad (3.18)$$

$$b_a = 1,18 - 4 \cdot 10^{-4} \cdot t. \quad (3.19)$$

Функція, що враховує вплив стадії метаморфізму вихідного вугілля в водовугільному паливі, визначається за формулою:

$$f(M) = b_m - k_m \cdot t, \quad (3.20)$$

де k_m, b_m – коефіцієнти, які визначаються з експериментальних даних і враховують вплив стадії метаморфізму вихідного вугілля в водовугільному паливі (значення див. таблицю 3.3);
 t – температура, °C.

Таблиця 3.3 - Значення коефіцієнтів для визначення теплоємності водовугільного палива

Коефіцієнти	Водовугільне паливо із вугілля:					
	марки Б	марки Д	марки Г	марки Ж	марки Т	марки А
$k_m \cdot 10^5$	20,7	12,1	6,5	5,5	5,2	4,4
b_m	1,64	1,3	1,08	1,04	1,03	1

Отримані формули для визначення теплоємності водовугільного палива справедливі при $W^p = 25 \dots 50 \%$ і $A^c = 0,5 \dots 60 \%$ в температурному діапазоні $50 \dots 150$ °C.

Формула (3.11) отримана на основі результатів експериментальних досліджень впливу добавки гліцерину на значення теплоємності водовугільного палива, отриманого з вугілля марки Д з конкретними характеристиками. Можна припустити, що формула (3.11) справедлива і для водовугільного палива, отриманого з інших марок вугілля, оскільки в досліджуваній області температур гліцерин хімічно не взаємодіє з вугільною речовиною. При цьому в розрахунках за формулами (3.12) - (3.20) необхідно використовувати відповідні характеристики водовугільного палива.

Рівняння, отримані для визначення коефіцієнта теплопровідності і теплоємності як функції температури і вмісту гліцерину, будуть корисні при моделюванні процесу теплообміну і проектуванні пальникових та топкових пристроїв для спалювання водовугільного палива.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Вперше експериментально встановлено, що зі збільшенням кількості гліцерину в водовугільному паливі коефіцієнт теплопровідності палива зменшується. Слід зазначити, що значення коефіцієнта теплопровідності водовугільного палива не прямо-пропорційно вмісту гліцерину в паливі. При додаванні 20% гліцерину відбувається зменшення коефіцієнта теплопровідності на 8,5...10%, а додавання 10% приводить до зменшення коефіцієнта теплопровідності тільки на 3,5-4,2% в порівнянні з коефіцієнтом теплопровідності водовугільного палива без додавання гліцерину. Коефіцієнт теплопровідності водовугільного палива закономірно збільшується зі зростанням температури і змінюється в діапазоні 0,45...0,53 Вт/м·К.

2. Вперше експериментально встановлено, що значення теплоємності водовугільного палива в досліджуваному діапазоні температур прямо-пропорційно зменшується зі збільшенням вмісту гліцерину. При цьому вплив додавання гліцерину на значення теплоємності водовугільного

палива залежить від температури. Додавання 20% гліцерину призводить до зменшення теплоємності в середньому на 5,3% при температурі 50 °С, а при температурі 135 °С додавання 20% гліцерину призводить до зменшення теплоємності всього на 2,6% в порівнянні з теплоємністю водовугільного палива без додавання гліцерину. Теплоємність палива закономірно збільшується зі зростанням температури в досліджуваному діапазоні незалежно від вмісту гліцерину і змінюється від 4,7 до 5,5 кДж/кг·К.

3. Результати експериментальних досліджень довели, що закон адитивності не можна використовувати для розрахунку теплофізичних властивостей водовугільного палива з гліцерином. Закон адитивності застосовний тільки до нереагуючих компонентів в сумішах і/або до фізичних властивостей, які можна підсумувати, тобто енергії, щільності і т. д. Тобто, коефіцієнт теплопровідності композитного палива не може бути підсумований по його фізичній природі. Оскільки теплоємність - це міра енергії, він повинен підкорятися закону адитивності. Однак, виходячи з отриманих результатів, у випадку водовугільного палива з гліцерином, закон адитивності для теплоємності не працює. Оскільки само по собі вугілля дуже складна органічна речовина, яка має різну структуру залежно від стадії метаморфізму і може взаємодіяти з водою і гліцерином, утворюючи дисперсну систему. Отримані результати однозначно демонструють, що існує процес взаємодії компонентів в водовугільному паливі як дисперсній системі.

4. За результатами експериментальних досліджень теплофізичних властивостей водовугільного палива вперше отримані емпіричні залежності для визначення коефіцієнтів теплопровідності і теплоємності палива, що враховують вміст гліцерину і температуру.

Основні положення розділу 3 опубліковані в [122, 123].

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООБМІНУ ПРИ ВИМУШЕНОМУ РУСІ ВОДОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА

4.1 Експериментальні дослідження теплообміну при вимушеному русі водовугільного палива в горизонтальній трубі

Основним методом дослідження теплообміну є фізичний експеримент, тому що жодної із підтверджених теорій і/або математичних моделей для розрахунку теплообміну водовугільного палива не існує. Для проведення досліджень теплообміну водовугільного палива розроблена експериментальна установка. Принципова схема експериментальної установки представлена на рисунку 4.1.

Вимірювальна ділянка включає горизонтальну трубу 3 з нержавіючої сталі довжиною 300 мм, діаметром 9,5 мм (товщина стінки $\delta = 0,5$ мм) з системою термопар 6 для контролю температури стінки труби. Вхідні і вихідні кінці труби обладнані ізоляційними втулками з політетрафторетилену (на рисунку 4.1 не показані), де встановлені термопари t_1 і t_8 , які вимірюють температуру водовугільного палива на вході і виході.

Паливо з ємності 1 під дією паливного насоса 2 потрапляє в трубу вимірювальної ділянки 3. Термічна активація і підігрів палива до необхідної температури здійснюється за допомогою нагрівача, який приєднаний до блоку управління 4 (лабораторний автотрансформатор типу LTC-1000, що дозволяє змінювати вихідну напругу від 0 до 220 В). Потім водовугільне паливо виходить в ємність для збору палива 5 після експерименту. В процесі проведення фізичного експерименту фіксували значення температур в місцях установки термопар і температуру навколишнього середовища, показання термопар передавали на програмно-апаратний вимірювальний комплекс 7,8.

Маса водовугільного палива вимірювалася вагами ТВЕ-0,21-0,001 з точністю $\pm 0,1$ г; час проведення експерименту вимірювався за допомогою

таймера на базі ПК, точність вимірювання часу становить $\pm 10^{-3}$ с. Дані термопар передавалися і оброблялися аналого-цифровим перетворювачем EX-9018 з частотою 10 Гц.

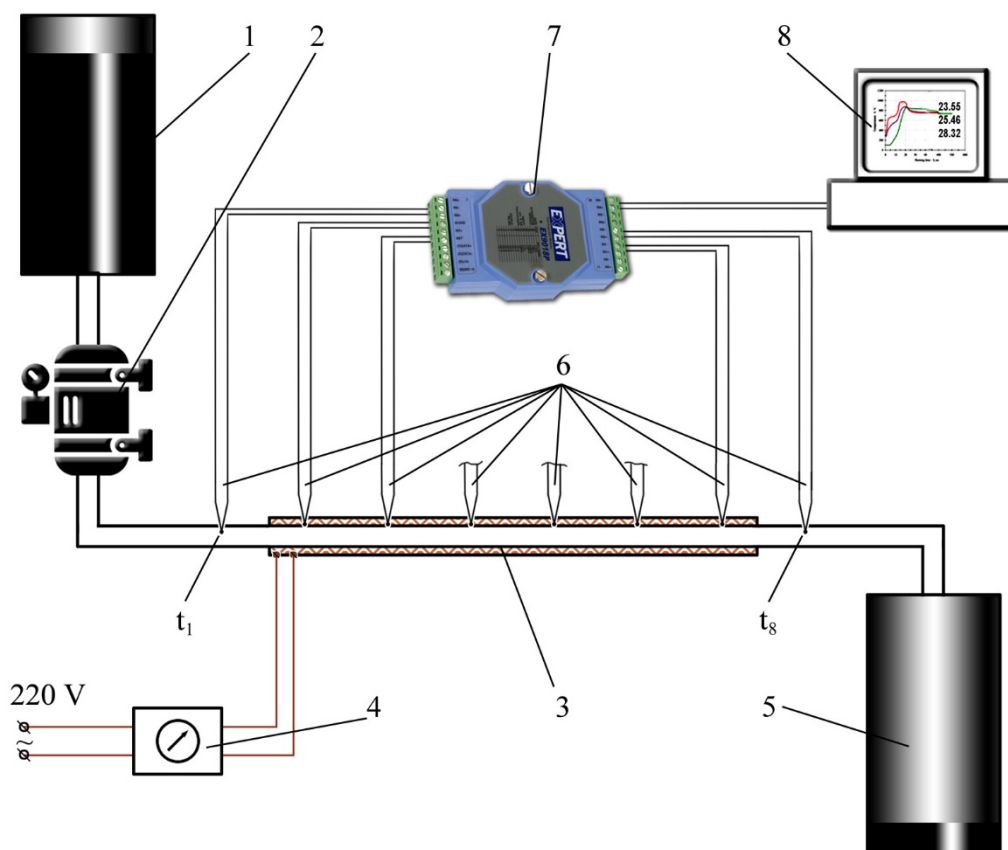


Рисунок 4.1 - Принципова схема експериментальної установки для дослідження теплообміну:

- 1 - ємність з водовугільним паливом; 2 - паливний насос; 3 - вимірювальна ділянка експериментальної установки з нагрівачем; 4 - блок управління нагрівачем; 5 - ємність для збору водовугільного палива після експерименту; 6 - термопари; 7 - аналого-цифровий перетворювач EX9018; 8 - пристрій обробки даних на базі ПК

Всі термопари попередньо калібровані. За результатами калібрування отримані індивідуальні співвідношення для визначення температури. Це дозволяє отримати точність вимірювань $\pm 0,25$ °C. Аналого-цифровий перетворювач EX-9108 має рівень систематичної помилки не більше 0,1%.

Загальна похибка вимірювальних приладів становила 0,85 - 1%.

Як сказано раніше, рекомендованою температурою для термічної активації водовугільного палива є температура 150 - 200 °C [59, 82, 84]. Отже, при проведенні експериментальних досліджень теплообміну має використовуватися надлишковий тиск. Однак, для спрощення, в даних експериментальних дослідженнях не застосовується надлишковий тиск, у зв'язку з чим були використані деякі обмеження:

- верхня межа температури стінки труби не повинна перевищувати 70 °C, так як при цій температурі водовугільне паливо починає висихати на відкритих ділянках;
- в діапазоні 50-70 °C високотемпературний градієнт призводить до стратифікації водовугільного палива; підсихає пристінний шар палива що призводить до погіршення тепловіддачі. Отже, тепловий потік не повинен бути високим. Для цього потужність нагрівача повинна була обмежена;
- швидкість руху водовугільного палива в трубі повинна бути низькою, щоб паливо нагрівалося по всій товщині.

У зв'язку з цим, діапазони експериментальних параметрів були наступними:

- температура стінки порожньої труби (при відсутності переміщення палива по трубі) перебувала в діапазоні 50-70 °C;
- швидкість палива в трубопроводі перебувала в межах $0,5 \cdot 10^{-2}$ – $1,5 \cdot 10^{-2}$ м/с. Ці значення дозволяли нагрівати паливо по всій товщині і до кінця вимірювальної ділянки;
- значення критерію Re, розраховані на основі діаметра труби, були в діапазоні $0,46 \cdot 10^{-1}$ – $1,4 \cdot 10^{-1}$.

В процесі проведення експериментальних досліджень фіксували масу палива, тривалість витікання палива, значення температур в місцях установки термопар і температуру навколишнього середовища. Для прикладу, деякі значення параметрів при проведенні експерименту наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Деякі значення параметрів при проведенні експериментальних досліджень

№	Маса палива m , кг	Час проведення експерименту τ , с	Температура палива до підігріву t_1 , °C	Середня температура стінки $t_{ст}$, °C	Температура палива після підігріву t_8 , °C
1	0,2472	195,6	41,66	44,82	43,15
2	0,2347	214,5	44,72	46,43	45,58
3	0,2443	207,8	46,00	47,99	46,95
4	0,2539	200,2	47,60	49,84	48,63
5	0,2290	325,2	47,45	49,62	48,77
6	0,2530	244,9	51,90	54,93	53,59
7	0,2586	245,7	54,37	57,04	55,75
8	0,2489	231,1	55,00	57,61	56,35
9	0,2260	267,9	56,50	59,70	58,50
10	0,2322	357,2	60,65	63,88	62,57
11	0,2557	275,7	60,96	66,24	63,74
12	0,2504	278,1	64,20	67,70	66,02
13	0,2298	235,5	65,27	68,44	66,90
14	0,2243	227,0	65,99	69,44	67,78

При обробці і узагальненні експериментальних даних по дослідженню теплообміну використовувалися теплофізичні параметри водовугільного палива, отримані в розділі 3.

Отримані експериментальні дані дозволяють визначити масову витрату водовугільного палива за формулою:

$$M = \frac{m}{\tau}, \quad (4.1)$$

де m – маса водовугільного палива, кг;

τ – тривалість проведення експерименту (витікання палива), с.

Об'ємна витрата водовугільного палива визначається за формулою:

$$V = \frac{M}{\rho}, \quad (4.2)$$

де ρ – густина водовугільного палива, кг/м³.

Середня температура стінки визначається за формулою:

$$t_{cm} = \frac{t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7}{6}, \quad (4.3)$$

де $t_2 - t_7$ – температури стінки труби в місцях установки термопар, °С.

Середня температура палива визначається за формулою:

$$t_{pal} = \frac{t_1 + t_8}{2}, \quad (4.4)$$

де t_1 – температура водовугільного палива до початку експерименту, °С;

t_8 – температура водовугільного палива після експерименту, °С.

Площа теплообміну визначається за формулою:

$$F = \pi \cdot D \cdot L, \quad (4.5)$$

де D – діаметр труби, м;

L – довжина труби, м.

Кількість теплоти, що передається від труби до водовугільного палива, визначається за формулою:

$$Q = M \cdot (c_{вих} \cdot t_8 - c_{вх} \cdot t_1), \quad (4.6)$$

де $c_{вих}$ – теплоємність водовугільного палива при температурі палива після експерименту t_8 , кДж/(кг · К);

$c_{вх}$ – теплоємність водовугільного палива при температурі палива до експерименту t_1 , кДж/(кг · К).

Коефіцієнт тепловіддачі визначається за формулою:

$$\alpha = \frac{Q}{(t_{cm} - t_{нал}) \cdot F}. \quad (4.7)$$

Площа поперечного перерізу труби визначається за формулою:

$$F_{mp} = \frac{\pi \cdot D^2}{4}. \quad (4.8)$$

Швидкість течії водовугільного палива визначається за формулою:

$$\omega = \frac{V}{F_{mp}}. \quad (4.9)$$

Деякі з отриманих результатів розрахунків згідно (4.1-4.9) наведені в таблиці 4.2. Залежність коефіцієнта тепловіддачі від швидкості руху водовугільного палива наведена на рисунку 4.2.

Таблиця 4.2 - Деякі результати обробки експериментальних даних

№	Кількість, переданої теплоти Q , Дж	Масова витрата палива M , кг/с	Об'ємна витрата палива V , м ³ /с	Швидкість потоку ω , м/с	Коефіцієнт тепловіддачі α , Вт/м ² · К
1	1839,5799	$1,26 \cdot 10^{-3}$	$1,02 \cdot 10^{-6}$	$1,43 \cdot 10^{-2}$	435,85

Подовження табл. 4.2

2	1008,3920	$1,09 \cdot 10^{-3}$	$8,85 \cdot 10^{-7}$	$1,25 \cdot 10^{-2}$	410,20
3	1156,6041	$1,18 \cdot 10^{-3}$	$9,54 \cdot 10^{-7}$	$1,35 \cdot 10^{-2}$	408,98
4	1306,9840	$1,27 \cdot 10^{-3}$	$1,03 \cdot 10^{-6}$	$1,46 \cdot 10^{-2}$	421,47
5	1513,1695	$7,04 \cdot 10^{-4}$	$5,74 \cdot 10^{-7}$	$8,09 \cdot 10^{-3}$	344,16
6	2157,1359	$1,03 \cdot 10^{-3}$	$8,52 \cdot 10^{-7}$	$1,20 \cdot 10^{-2}$	451,27
7	1807,1906	$1,05 \cdot 10^{-3}$	$8,75 \cdot 10^{-7}$	$1,23 \cdot 10^{-2}$	414,90
8	1698,5779	$1,08 \cdot 10^{-3}$	$8,98 \cdot 10^{-7}$	$1,27 \cdot 10^{-2}$	423,14
9	2291,9237	$8,44 \cdot 10^{-4}$	$7,08 \cdot 10^{-7}$	$9,99 \cdot 10^{-3}$	434,32
10	2273,9335	$6,50 \cdot 10^{-4}$	$5,56 \cdot 10^{-7}$	$7,84 \cdot 10^{-3}$	313,22
11	3624,2394	$9,27 \cdot 10^{-4}$	$7,95 \cdot 10^{-7}$	$1,12 \cdot 10^{-2}$	377,43
12	2324,7141	$9,00 \cdot 10^{-4}$	$7,84 \cdot 10^{-7}$	$1,11 \cdot 10^{-2}$	360,47
13	1912,8916	$9,76 \cdot 10^{-4}$	$8,54 \cdot 10^{-7}$	$1,20 \cdot 10^{-2}$	384,41
14	2052,3775	$9,88 \cdot 10^{-4}$	$8,69 \cdot 10^{-7}$	$1,23 \cdot 10^{-2}$	394,45

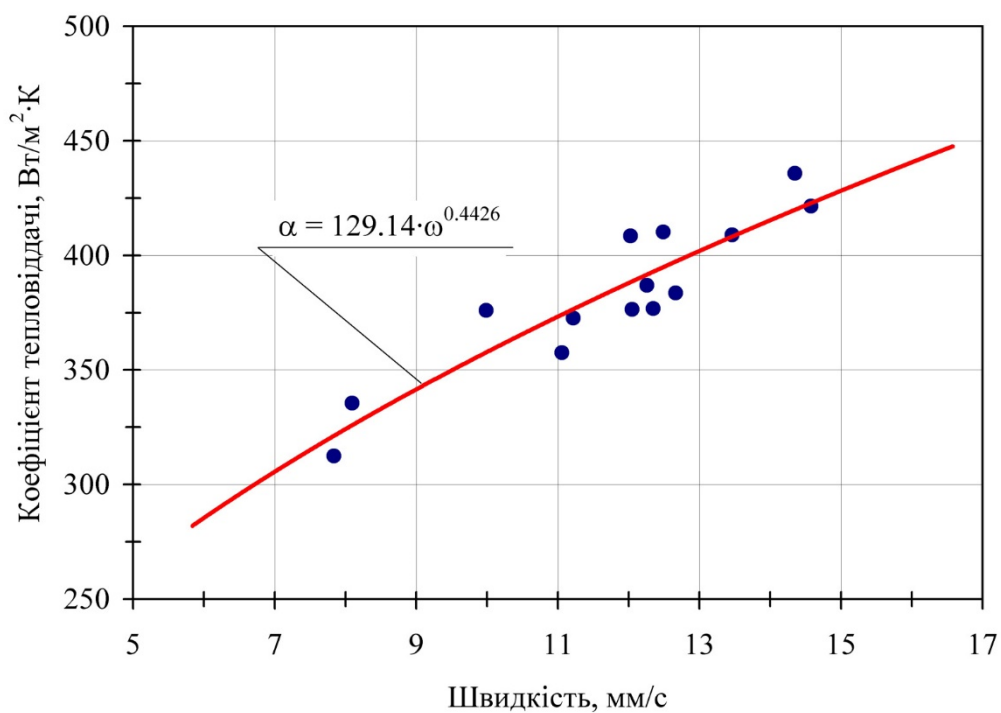


Рисунок 4.2 - Залежність коефіцієнта тепловіддачі від швидкості руху водовугільного палива

Результати експериментальних досліджень оброблені з використанням теорії подоби, підтвердженої для всіх випадків теплообміну. На основі цієї теорії узагальнення результатів експериментальних досліджень виконано у вигляді критеріального рівняння такого вигляду:

$$Nu = f(Re, Pr, D, L) = f(Pe, D, L) = f(Gz), \quad (4.10)$$

де Nu – число подоби Нуссельта;

Re – число подоби Рейнольдса;

Pr – число подоби Прандтля;

Pe – число подоби Пекле;

Gz – число подоби Гретца;

D – діаметр труби, м;

L – довжина труби, м.

Число подоби Рейнольдса визначається за формулою:

$$Re = \frac{\omega \cdot l_{виз}}{\nu}, \quad (4.11)$$

де $l_{виз}$ – визначальний розмір, м;

ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості водовугільного палива [74], м²/с.

Число подоби Прандтля визначається за формулою:

$$Pr = \frac{\nu}{a}, \quad (4.12)$$

де a – коефіцієнт температуропровідності палива, м²/с.

Число подоби Нуссельта визначається за формулою:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l_{виз}}{\lambda}. \quad (4.13)$$

Число подоби Пекле визначається за формулою:

$$Pe = Re \cdot Pr. \quad (4.14)$$

Число подоби Гретца визначається за формулою:

$$Gz = Pe \cdot D/L. \quad (4.15)$$

Результати обробки отриманих експериментальних даних у вигляді залежностей чисел подоби представлені на рисунку 4.3.

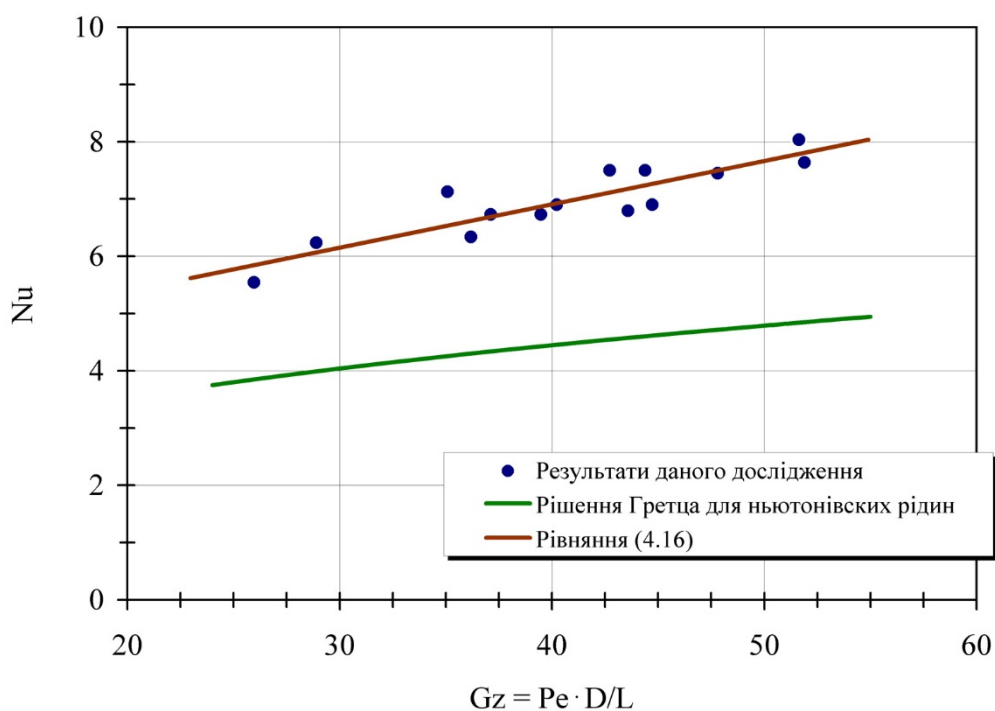


Рисунок 4.3 - Результати експериментального дослідження теплообміну в водовугільного палива

Якісний аналіз результатів на рисунку 4.3 дозволяє зробити висновок, що з підвищенням критерію Гретца число подоби Нуссельта збільшується. Отриману залежність можна апроксимувати простим лінійним рівнянням такого вигляду (коефіцієнт детермінації R^2 складає 0,79):

$$Nu = 0,0756 \cdot Gz + 3,881. \quad (4.16)$$

Кількісне порівняння отриманих експериментальних результатів з рішенням Гретца для ньютонівських рідин ($Nu = 1,30 \cdot Gz^{1/3}$) показує істотну різницю. Число подоби Нуссельта, а отже, і коефіцієнт тепловіддачі, розраховані з використанням рівняння для ньютонівських рідин, на 35%–38% нижче, ніж реальні значення. Отримане рівняння (4.16) можна застосувати в обмеженому діапазоні значень критерію Гретца.

Для перевірки можливості використання отриманого рівняння в більш широкому діапазоні параметрів проведено порівняння з результатами, отриманими в роботі [87]. Порівняння приведено на рисунку 4.4.

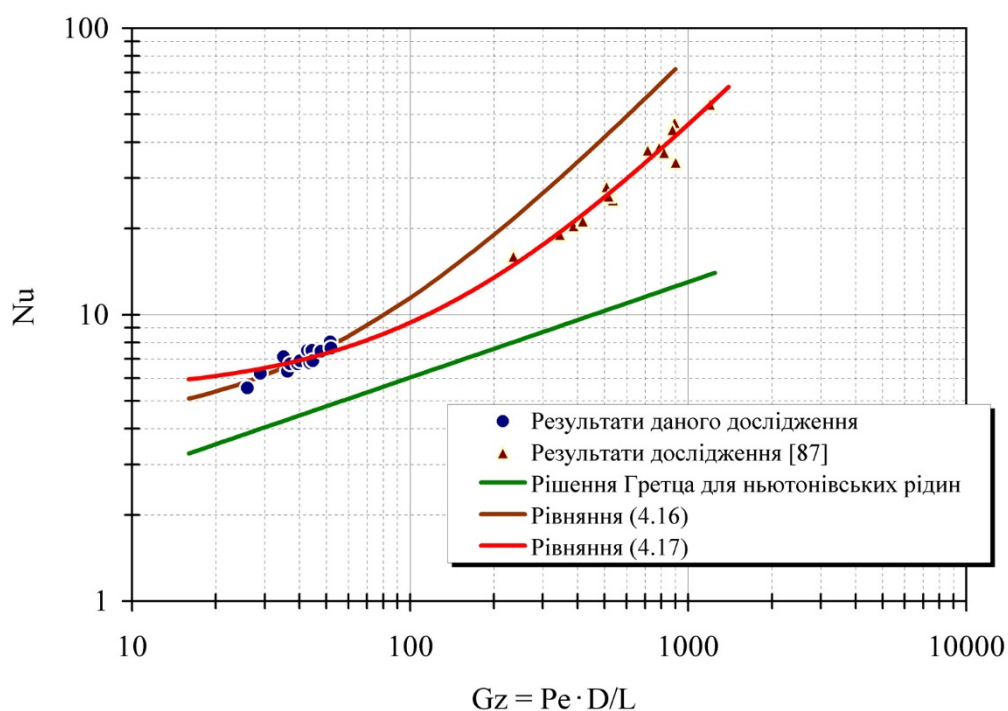


Рисунок 4.4 - Порівняння експериментальних результатів з даними [87].

Видно, що отримані дані добре відповідають загальній поведінці кривої і відображають фізичну природу теплообміну. Проте, запропоноване рівняння (4.16) виявляється неточним в розширеному діапазоні значень

$Gz = Pe \cdot D/L$. Скориговане рівняння в розширеному діапазоні значень $Pe \cdot D/L$ буде мати такий вигляд (коефіцієнт детермінації R^2 становить 0,9792):

$$Nu = 0,41 \cdot Gz + 5,29. \quad (4.17)$$

Оскільки частина існуючих результатів досліджень представлена у вигляді $Nu = f(1/Gz)$, для зручності виконаний перерахунок отриманих даних в подібний вид. Також проаналізовані наявні результати експериментальних досліджень і аналітичних рішень щодо визначення коефіцієнта тепловіддачі для водовугільного палива в різних діапазонах вихідних даних, але для яких не було виконано узагальнення результатів у вигляді критеріальних залежностей (рисунок 4.5).

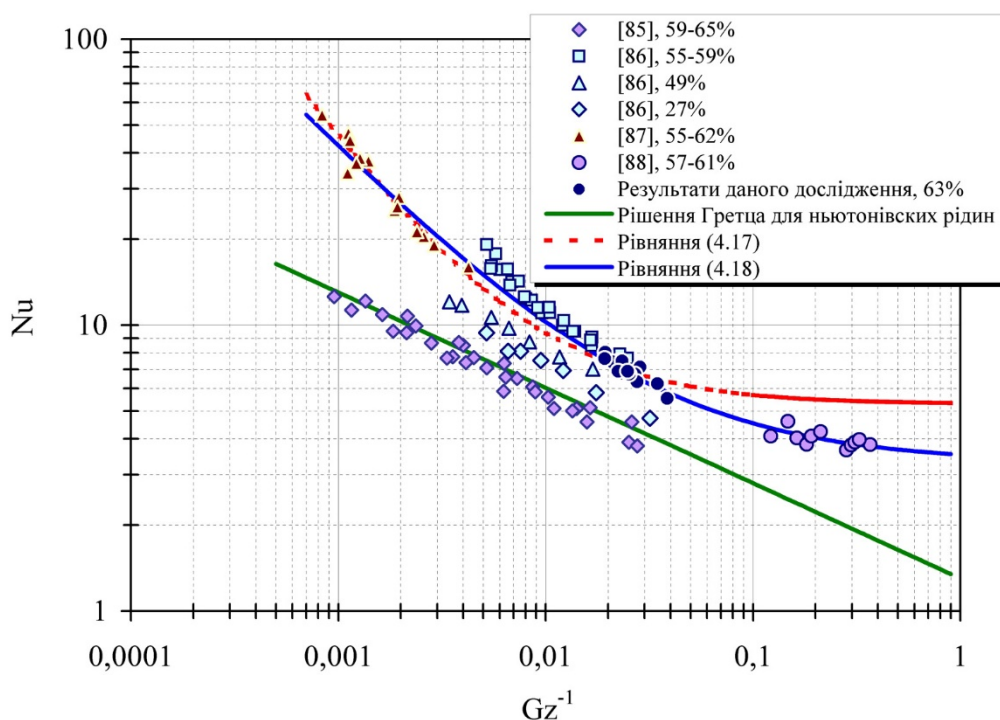


Рисунок 4.5 - Порівняння експериментальних результатів [85-88], власних результатів і різних наближень для теплообміну водовугільного палива

Рисунок 4.5 показує, що рішення Гретца для ньютонівських рідин не застосовується для більшості експериментальних даних. Тільки оригінальні результати дослідження [85] досить добре описуються цим рівнянням, а також дані для водовугільного палива з низьким вмістом твердої фази 27% і 49% з дослідження [86]. У той же час, велика частина експериментальних результатів розташовані вище аналітичного рішення. Різниця між рішенням Гретца і експериментальними даними становить близько 15-30% при значеннях $Gz = 20-50$ (Gz^{-1} в діапазоні 0,05–0,02) і збільшується, як при зменшенні Gz , так і при збільшенні Gz . Різниця може досягати 90% для більш високих значень Gz і навіть 200% у разі малих значень Gz . Таким чином, рішення для ньютонівської рідини не може використовуватися для розрахунку тепловіддачі при потоці водовугільного палива. Як видно з рисунку 4.5, отримане емпіричне рівняння (4.17) (показано червоною пунктирною лінією), погано збігається з експериментальними даними для малих чисел Гретца (високі значення Gz^{-1}). Тому була виконана додаткова апроксимація з урахуванням всіх розглянутих результатів. Для апроксимації використовувалися наступні обмеження:

- вміст твердої фази водовугільного палива знаходиться в межах 55-65%;
- експериментальні дані [85] не були включені до процедури отримання апроксимуючої залежності.

Для апроксимації експериментальних результатів використовувався стандартний інструмент в MS Excel. Однак, модифікована степенева функція, що була запропонована науковим керівником Пінчук В.О., дозволяє отримати більш коректні вирази [100]. Тому вона була застосована для остаточної апроксимації результатів. Отримане емпіричне рівняння має такий вигляд (коефіцієнт детермінації R^2 дорівнює 0,9714):

$$Nu = 3,3 + 0,22 \cdot Gz^{\frac{3}{4}}. \quad (4.18)$$

Як видно з рисунку 4.5, запропоноване рівняння (4.18) (суцільна синя крива), добре співставляється з більшістю експериментальних даних. Отримане рівняння рекомендується використовувати для інженерних розрахунків процесів теплообміну при транспортуванні водовугільного палива і його попередньої термічної активації.

4.2 Рекомендації щодо параметрів теплообмінного апарату для термічної активації водовугільного палива

Отримане рівняння (4.18) використовувалося для розрахунку теплообмінного апарату, призначеного для попередньої термічної активації водовугільного палива.

Термічну активацію водовугільного палива пропонується здійснювати в рекуперативному трубчатому теплообміннику, який працює в умовах стаціонарного теплового стану. У рекуператорі водовугільне паливо рухається всередині труб, а продукти згоряння - ззовні. Рух теплоносіїв в рекуператорі протитечійний, що забезпечує більш рівномірне нагрівання водовугільного палива по всій площі теплообмінника.

Результати розробки теплообмінного апарату для термічної активації водовугільного палива наведені на прикладі теплообмінника, встановленого перед паровим котельним агрегатом потужністю 1,7 МВт. Для забезпечення заданої потужності парогенератора витрата водовугільного палива складає 600 кг/год. Температура водовугільного палива на виході з теплообмінника складає 150 °С. При роботі котельного агрегату на водовугільному паливі без модернізації поверхонь нагріву температура димових газів, що йдуть з котла, становить 290 °С і більше, що становить істотну частину теплових втрат [124]. Для зниження втрат котла і підвищення його ККД рекомендується утилізувати тепло газів, що відходять, для підігріву водовугільного палива. В роботі [84] встановлено, що при спалюванні водовугільного палива

температура точки роси коливається в межах 155-160 °С. Таким чином, при експлуатації енергетичних агрегатів необхідно дотримуватися таких режимів роботи, які забезпечують температуру газів, що відходять, вище температури точки роси для даного виду палива.

Проаналізовано вплив швидкості руху водовугільного палива в трубі ω_2 в діапазоні 0,002...0,02 м/с на коефіцієнт тепловіддачі від стінки до водовугільного палива α_2 і площу поверхні теплообміну F . Результати представлені на рисунку 4.6.

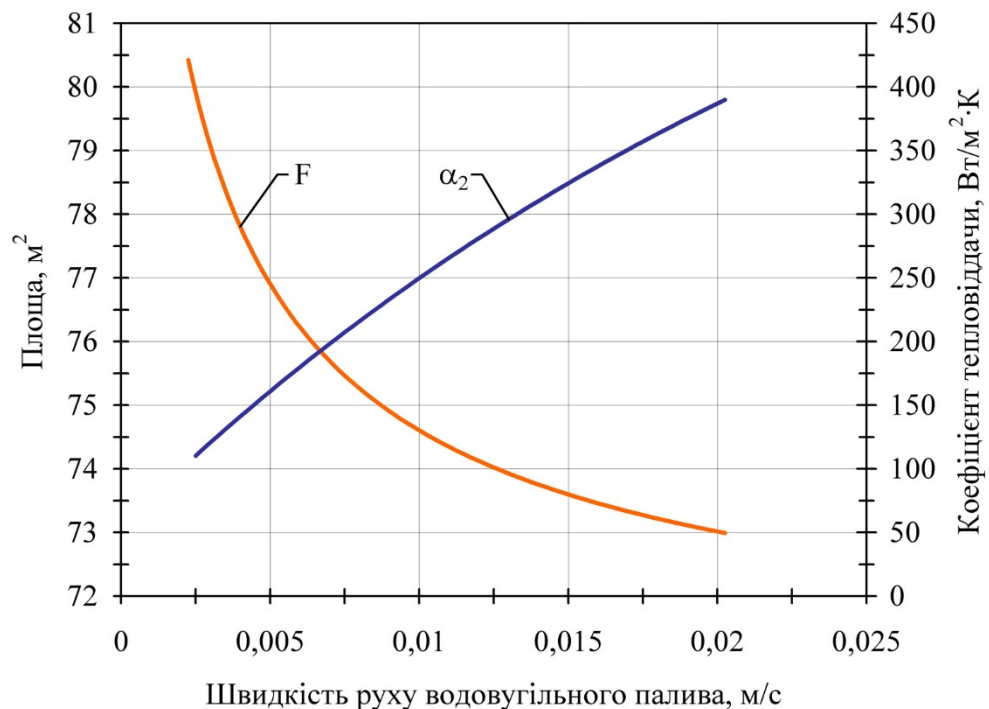


Рисунок 4.6 - Вплив швидкості руху водовугільного палива на коефіцієнт тепловіддачі α_2 і площу поверхні теплообміну F

З рисунку 4.6 видно, що зі збільшенням швидкості руху палива в трубі закономірно збільшується коефіцієнт тепловіддачі від стінки труби до палива і, відповідно, значно зменшується необхідна площа теплообміну для забезпечення заданих температурних умов. При цьому, для забезпечення рівномірного нагріву палива і запобігання його розшаровування швидкість руху водовугільного палива не повинна бути невеликою.

Проведено розрахункове дослідження впливу вихідних параметрів гарячого теплоносія на площу поверхні нагрівання рекуперативного теплообмінника. За розрахунковими даними отримані графічні залежності інтенсивності тепловіддачі з боку гарячого теплоносія і площі поверхні теплообміну від швидкості руху, які наведені на рисунку 4.7.

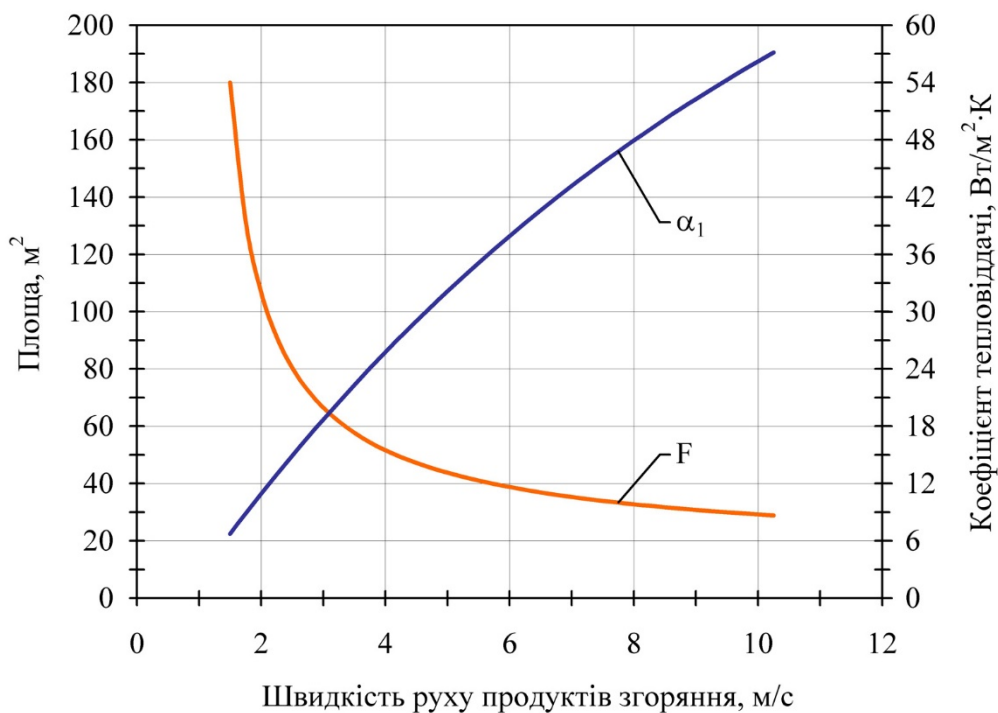


Рисунок 4.7 - Вплив швидкості руху продуктів згоряння на коефіцієнт тепловіддачі α_1 і площу поверхні теплообміну рекуператора F

Очевидно, що швидкість руху гарячого теплоносія робить істотний вплив на коефіцієнт тепловіддачі від гарячого теплоносія до стінки, і, отже, при збільшенні швидкості необхідна площа значно зменшується, особливо в діапазоні до 3,5 м/с, що відповідає ламінарній області. При зміні початкової температури гарячого теплоносія для забезпечення заданих кінцевих температур водовугільного палива і продуктів згоряння, необхідно знизити витрату гарячого теплоносія (рисунки 4.8). На рисунку 4.9 приведена залежність площі теплообміну від параметрів гарячого теплоносія, а саме, швидкості і початкової температури. Як видно, найбільший вплив параметри гарячого теплоносія на площу надають при швидкості до 5 м/с.

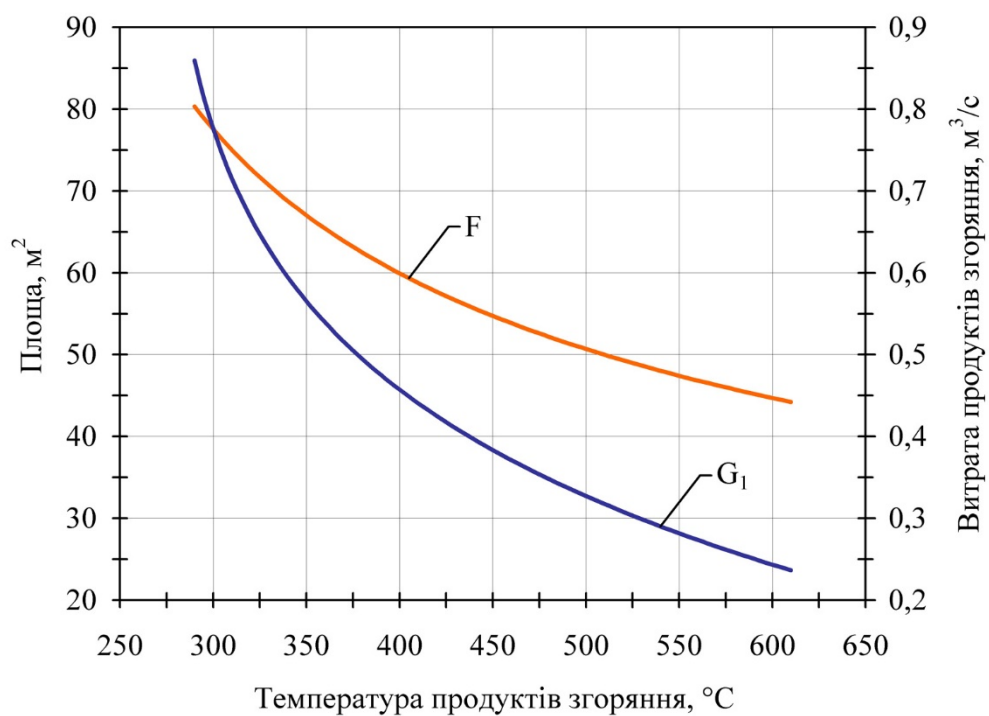


Рисунок 4.8 - Вплив температури гарячого теплоносія на витрату гарячого теплоносія G_1 і площу поверхні теплообміну F

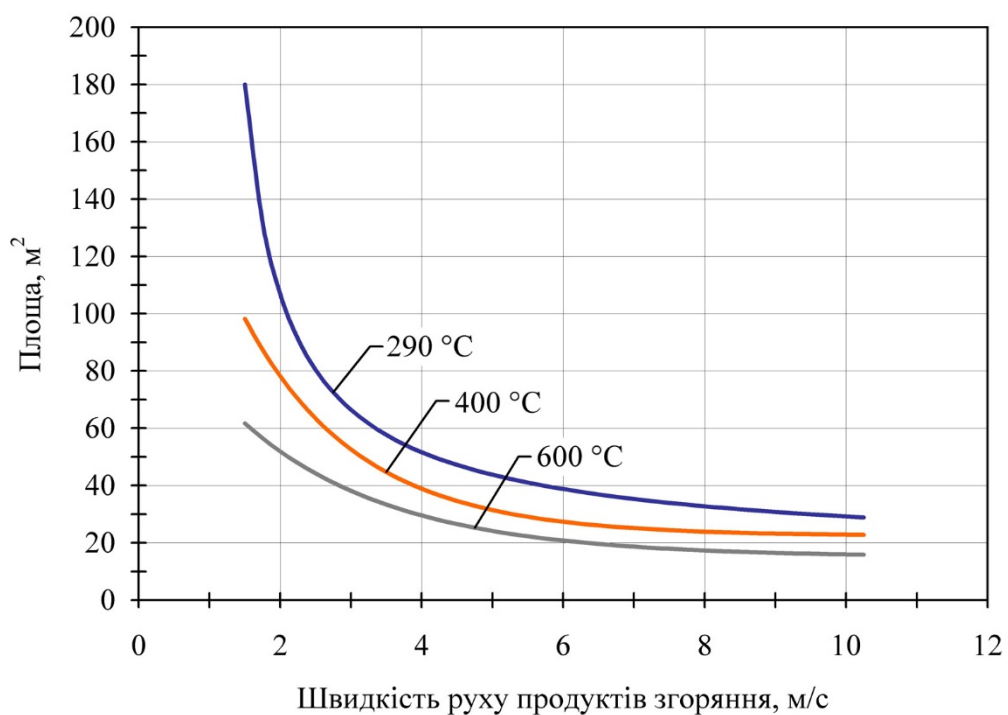


Рисунок 4.9 - Залежність площі теплообміну від параметрів гарячого теплоносія

Оскільки енергетичні агрегати, в яких спалюється водовугільне паливо, можуть бути різної потужності, що вимагає різної величини витрати палива, тому й теплообмінні апарати для термічної активації палива матимуть інші значення площі поверхні теплообміну. Виконано розрахункові дослідження впливу потужності енергетичного агрегату на витрату палива для забезпечення заданої потужності агрегату, і на площу поверхні теплообміну рекуперативного теплообмінника для термічної активації заданої кількості палива.

Розрахунки проводилися для агрегатів з потужністю від 1 МВт до 10 МВт, оскільки водовугільне паливо спалюється в основному в агрегатах малої потужності. Результати досліджень наведені на рисунку 4.10.

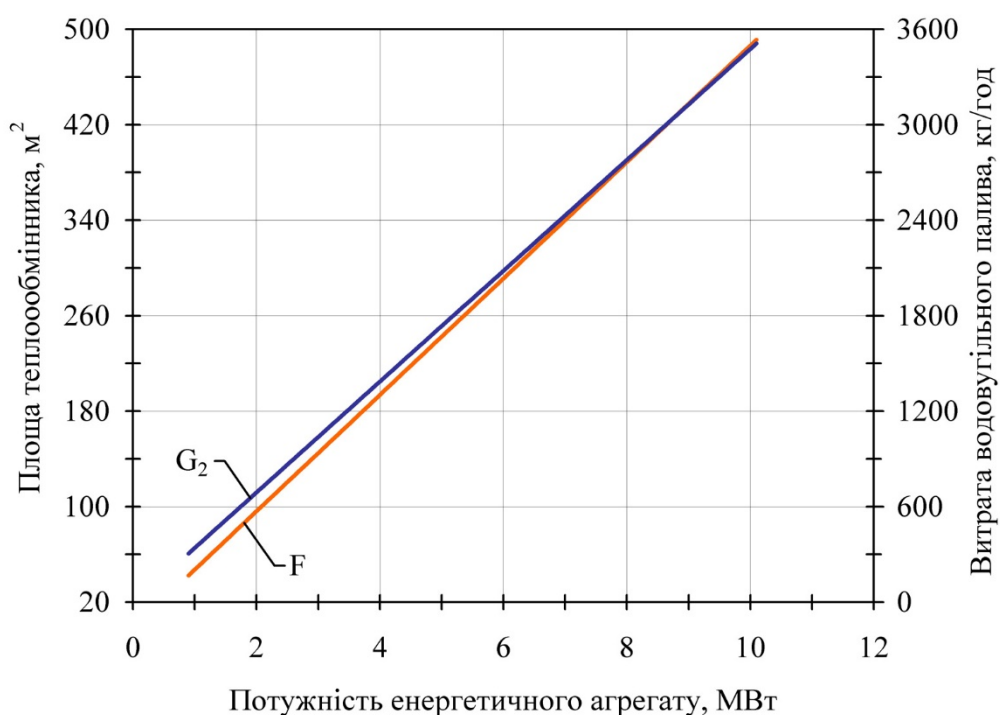


Рисунок 4.10 - Вплив потужності енергетичного агрегату на площу поверхні теплообміну рекуператора F та витрату палива G_2

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

1. Для визначення закономірностей теплообміну водовугільного палива при його вимушеному русі розроблена експериментальна установка. В процесі проведення експериментальних досліджень фіксували масу палива, тривалість витікання палива, значення температур в місцях установки термопар і температуру навколишнього середовища. Перед експериментальними дослідженнями на водовугільному паливі проводилася серія тестових експериментів на еталонній речовині (воді).

2. В результаті проведених експериментальних досліджень встановлено залежність коефіцієнта тепловіддачі від швидкості руху водовугільного палива в діапазоні 5...15 мм/с. Показано, що коефіцієнт тепловіддачі збільшується зі збільшенням швидкості в зазначеному діапазоні по степеневій залежності і змінюється в межах $350...450 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$.

3. Показано, що оскільки водовугільне паливо являє собою неньютонівську рідину, рішення для ньютонівських рідин не є придатним для розрахунку процесів тепловіддачі. Результати експериментальних досліджень оброблені з використанням теорії подоби і виконано узагальнення результатів експериментальних досліджень у вигляді критеріального рівняння наступного виду $Nu = f(Gz)$. Результати дослідження об'єднані з даними інших авторів, що дозволило розширити сферу застосування отриманого рівняння. Отримане емпіричне рівняння має вигляд $Nu = 3,3 + 0,22 \cdot Gz^{3/4}$ і справедливе для діапазону числа подоби Пекле $137...15 \cdot 10^5$.

4. Процес термічної активації водовугільного палива пропонується здійснювати в теплообмінному апараті рекуперативного типу з протитечієм рухом теплоносіїв. Проведено розрахунковий аналіз впливу деяких вихідних параметрів теплоносіїв на площу поверхні нагріву теплообмінника:

- проаналізовано вплив швидкості руху водовугільного палива в трубі на коефіцієнт тепловіддачі від стінки до водовугільного палива і площу поверхні теплообміну та встановлено, що зі збільшенням швидкості руху палива в трубі закономірно збільшується коефіцієнт тепловіддачі від стінки труби до палива і відповідно значно зменшується необхідна площа теплообміну для забезпечення заданих температурних умов;

- встановлено, що швидкість руху гарячого теплоносія впливає на коефіцієнт тепловіддачі від гарячого теплоносія до стінки, і, отже, при збільшенні швидкості необхідна площа значно зменшується, особливо в діапазоні до 3,5 м/с, що відповідає ламінарній області. При зміні початкової температури гарячого теплоносія для забезпечення заданих кінцевих температур водовугільного палива і продуктів згоряння, необхідно знизити витрату гарячого теплоносія;

- визначено вплив потужності котельного агрегату в діапазоні від 1 МВт до 10 МВт на витрату палива для забезпечення цієї потужності і на площу поверхні теплообміну теплообмінника для його термічної активації. Отримано вихідні дані та практичні рекомендації для проектування теплообмінних апаратів для термічної активації водовугільного палива при температурі 150-200 °С.

Основні положення розділу 4 опубліковані в [125-127].

ВИСНОВКИ

У дисертації розв'язано актуальну науково-технічну задачу, яка полягає у підвищенні енергоефективності процесу спалювання водовугільного палива шляхом додавання відходів виробництва біодизеля з урахуванням експериментально визначених теплофізичних властивостей палива, знайдених закономірностей і доцільних умов займання та горіння палива із забезпеченням максимальної реалізації його енергетичного потенціалу та мінімізації негативного впливу на довкілля.

За результатами виконаної дисертаційної роботи можна сформулювати наступні висновки:

1. Аналіз сучасного стану використання водовугільного палива показав, що робота, спрямована на визначення теплофізичних властивостей, закономірностей і доцільних умов займання та горіння водовугільного палива з додаванням відходів виробництва біодизеля, а саме гліцерину, для забезпечення ефективності спалювання, є актуальною.

2. Отримали розвиток експериментально обґрунтовані відомості про закономірності впливу додавання гліцерину у кількості 5...20% мас. до водовугільного палива на його займання та горіння в повітряному середовищі із встановленням тривалості та температури кожної стадії горіння (нагрівання та вихід летких речовин, горіння летких речовин, горіння коксового залишку).

3. Виявлено характерні фізико-хімічні відмінності процесу спалювання водовугільного палива з додаванням гліцерину у кількості 5...20% мас. та встановлено, що додавання гліцерину в паливо призводить до підвищення теплоти згоряння палива на 25...30% в залежності від вмісту гліцерину в паливі, а також призводить до збільшення ступеню вигорання горючої маси палива на 5...12% у порівнянні з водовугільним паливом без гліцерину.

4. Шляхом моделювання процесу спалювання водовугільного палива в діапазоні температур 1000...1400 °С встановлені закономірності утворення сірко- та азотовмісних компонентів у залежності від вмісту гліцерину в паливі. Отримані дані показують, що додавання гліцерину у кількості 5...20% мас. до водовугільного палива сприятливо відбивається на екологічних показниках процесу його спалювання.

5. Вперше експериментально в температурному діапазоні 50...150°C встановлені залежності коефіцієнта теплопровідності і теплоємності водовугільного палива від вмісту в діапазоні 5...20% мас. гліцерину у ньому. Виявлено, що використання закону адитивності для розрахунку теплофізичних властивостей водовугільного палива з гліцеином призводить до істотних погрішностей. Запропоновано емпіричні залежності, що дозволяють визначити значення теплофізичних властивостей водовугільного палива як дисперсної системи, та враховують температуру та вміст гліцерину.

6. Експериментально досліджено теплообмін при примусовому русі водовугільного палива та встановлено, що коефіцієнт тепловіддачі збільшується зі збільшенням швидкості в діапазоні 5...15 мм/с за ступеневою залежністю і змінюється в межах 350...450 Вт/м²·К. Показано, що рішення для ньютонівських рідин не є придатним для розрахунку процесів теплообміну водовугільного палива. За результатами проведених досліджень отримано критеріальне рівняння подоби виду $Nu=f(Gz)$ для діапазону числа подоби Пекле 137...15·10⁵.

7. Проведено розрахунковий аналіз впливу основних вихідних параметрів теплоносіїв (витрата, швидкість, температура) на потрібну площу поверхні нагріву теплообмінного апарату для термічної активації водовугільного палива при температурі 150...200 °С; отримано вихідні дані та практичні рекомендації для проєктування відповідного обладнання.

8. Рекомендації дисертаційної роботи передані для впровадження на ділянці виробництва вапна ТОВ «МЗ «Дніпросталь» при переведенні

випалювальних печей на опалення водовугільним паливом, що забезпечить значне зниження енергетичних витрат при виробництві вапна.

9. Матеріали дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі кафедри енергетичних систем та енергоменеджменту Національної металургійної академії України у курсі лекцій, при виконанні випускних робіт бакалаврів та магістрів зі спеціальністю 144 – Теплоенергетика.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Farfan J, Breyer C. Structural changes of global power generation capacity towards sustainability and the risk of stranded investments supported by a sustainability indicator. *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 141. P. 370-384. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.09.068.
2. Мировое производство первичной энергии. Мировое производство. Enerdata. URL: <https://yearbook.enerdata.ru/total-energy/world-energy-production.html> (дата звернення: 15.01.2020).
3. BP statistical review of world energy 2018, British Petroleum (2018). URL: https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy_economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf (дата звернення: 15.01.2019).
4. Майстренко О. Ю., Топал О. І., Гапонич Л. С. Сучасний стан вугільної енергетики України та перспективи її оновлення і розвитку. *Наукові праці НУХТ*. 2010. № 32. С. 43 - 47.
5. Стогній О. В., Макаров В. М., Каплін М. І. Потенціал видобутку вугілля в Україні. *Проблеми загальної енергетики*. 2011. вип. 2 (25). С. 11 - 16.
6. Takeshita T, Yamaji K. Potential contribution of coal to the future global energy system. *Environmental Economics and Policy Studies*. 2006. No.8 (1). P. 55–87. DOI: 10.1007/ BF03353993.
7. Dai S, Finkelman R.B. Coal as a promising source of critical elements: Progress and future prospects. *International Journal of Coal Geology*. 2018. Vol. 186. P. 155-164. DOI: 10.1016/j.coal.2017.06.005.
8. Rahman M., Pudasainee D., Gupta R. Review on chemical upgrading of coal: production processes, potential applications and recent developments. *Fuel Processing Technology*. 2016. No.158 (2). P. 35–56. DOI: 10.1016/j.fuproc.2016.12.010.

9. Уголь аналитика: статистика, прогнозы, цены, экспорт. URL: <https://kosatka.media/category/ugol/analytics> (дата звернення: 21.06.2018).
10. Официальный сайт Министерства энергетики Украины. URL: <http://mpe.kmu.gov.ua/> (дата звернення: 21.06.2018).
11. Чернявский Н. В. О перспективах и особенностях использования угля в промышленности и коммунальной энергетике. Современная наука: идеи, исследования, результаты, технологии. 2012. Вып. 1(9). С. 80 - 88.
12. Перспективи впровадження чистих вугільних технологій в енергетику України / І. А. Вольчин та ін. Київ : ГНОЗІС, 2013. 308 с.
13. Белосельский Б. С., Барышев В. И. Низкосортные энергетические топлива. Особенности подготовки и сжигания. Москва : Энергоатомиздат, 1989. 136 с.
14. Филиппенко Ю. Н., Курченко И. П. Состояние и перспективы развития углеобогащения в Украине. *Збагачення корисних копалин: науково-технічний збірник*. 2008. Вып. 33 (74). С. 26 - 37.
15. Полулях О. Д. Технологічні регламенти вуглезбагачувальних фабрик: Довідково-інформаційний посіб. Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2002. 856 с.
16. Tonini D., Martinez-Sanchez V., Astrup T.F. Material resources, energy, and nutrient recovery from waste: are waste refineries the solution for the future? *Environmental Science & Technology*. 2013. Vol. 47 (15). P. 8962- 8969. DOI: 10.1021/es400998y.
17. Global Energy & CO₂ Status Report. The latest trends in energy and emissions in 2018. URL: <https://webstore.iea.org/globalenergy-co2-status-report-2018> (дата звернення: 06.03.2019).
18. Zheng C., Liu Z. Oxy-fuel combustion: fundamentals, theory and practice. Academic Press. 2018. 384 p. URL: [http:// www.sciencedirect.com/science/book/9780128121450](http://www.sciencedirect.com/science/book/9780128121450) (дата звернення: 07.05.2019).

19. Kneer R. Oxyflame Workshop. *Proceedings of 1st International Workshop Oxy-Fuel Combustion*. 2017. vol. 201. P. 1. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.03.050.
20. Chung C., Pottimurthy Y., Xu M., Hsieh T.-L., Xu D., Zhang Y., Chen Y.-Y., He P., Pickarts M., Fan L.-S., Tong A. Fate of sulfur in coal-direct chemical looping systems. *Applied Energy*. 2017. Vol. 208. P. 678–690. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.09.079.
21. Iegorov R.I., Strizhak P.A., Chernetskiy M.Y. The review of ignition and combustion processes for water-coal fuels. *The European Physical Journal Conferences*. 2016. Vol. 01024. P. 1-13. DOI: 10.1051/epjconf/201611001024.
22. Пинчук В.А., Шарабура Т.А. Перспективы, особенности и технико-экономические показатели использования водоугольного топлива в энергетике и промышленности. *Економічні, управлінські, правові та інформаційно-технічні проблеми діяльності підприємств: колективна монографія* / за заг. ред. Л. М. Савчук, М. Фіц. Дніпро: Герда, 2016. С. 501-519.
23. Круть О. А. Водовугільне паливо. Монографія. Київ : Наук. думка, 2002. 172 с.
24. Долинский А. А., Халатов А. А. Водугольное топливо: перспективы использования в теплоэнергетике и жилищно-коммунальном секторе. *Промышленная теплотехника*. 2007. Т. 29. № 5. С. 70 - 79.
25. Kijo-Kleczkowska A. Combustion of coal-water suspensions. *Fuel*. 2011. Vol. 90 (2). P. 865–877. DOI: 10.1016/j.fuel.2010.10.034.
26. Мурко В. И. Научные основы процессов получения и эффективного применения водугольных суспензий : автореф. дис... д-ра техн. наук : 05.17.07. Москва, 1999. 48 с.
27. Баранова М. П., Кулагин В. А. Физико-химические основы получения топливных водугольных суспензий: монография. Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2011. 160 с.

28. Zhao Z., Wang R., Ge L., Wu J., Yin Q., Wang C. Energy utilization of coal-coking wastes via coal slurry preparation: the characteristics of slurring, combustion, and pollutant emission. *Energy*. 2019. Vol. 168. P. 609–618. DOI: 10.1016/j.energy. 2018.11.141.
29. Wang R., Ma Q., Ye X., Li C., Zhao Z. Preparing coal slurry from coking wastewater to achieve resource utilization: slurring mechanism of coking wastewater–coal slurry. *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 650. P. 1678–1687. DOI: 10.1016/j.scitotenv. 2018.09.329.
30. Usui H. Coal slurry utilization technique. *International Journal of the Society of Materials Engineering for Resources*. 1994. No. 2. P. 110–118. DOI: 10.5188/ijsmr.2.110.
31. Hsu T.C., Yang S.I. Coal-water slurries with different water contents in oxy-fuel combustion. Proceedings of the 9th Asia-Pacific Conference on Combustion. 2013. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0.84905454676&partnerID=40&md5=28ab9d3f25920373482d3306ba61484d> (дата звернення: 09.12.2018).
32. Vershinina K.Y., Strizhak P.A. Ignition of coal suspensions based on water of different quality. *Coke and Chemistry*. 2016. Vol. 59. P. 437–440. DOI: 10.3103/S1068364X16110077.
33. Glushkov D.O., Strizhak P.A., Chernetskii M.Y. Organic coal-water fuel: problems and advances (review). *Thermal Engineering*. 2016. Vol. 63. P. 707–717. DOI: 10.1134/ S0040601516100037.
34. Yuchi W., Li B., Li W., Chen H. Effects of coal characteristics on the properties of coal water slurry. *Coal Preparation*. 2005. Vol. 25. P. 239–249. DOI: 10.1080/07349340500444489.
35. Круть А. А., Папаяни Ф. А. Технология приготовления высококонцентрированной водоугольной суспензии. *Уголь Украины*. 2001. № 2 – 3. С. 58 - 63.

36. Wang H., Guo S., Yang L., Guo Y., Jiang X., Wu S. Surface morphology and porosity evolution of CWS spheres from a bench-scale fluidized bed. *Energy Fuels*. 2015. 29. 3428-3437. DOI: 10.1021/ef502923t.

37. Егурнов А. И., Корнилович Б. Ю., Макаров А. С. Получение водоугольного топлива на основе бурого угля модифицированного органическими веществами. *Збагачення корисних копалин: науково-технічний збірник*. 2007. Вип. 29 (70) – 30 (71). – С. 156 - 166.

38. Макаров А. С., Егурнов А. И., Борук С. Д., Винклер И. А., Сочикан О. М. Высококонцентрированные суспензии на основе отходов углеобогащения. Получение, реологические характеристики и энергетическая ценность. *Хімічна промисловість України*. 2007. № 2 (79). – С. 56 - 60.

39. Серант Ф. А., Цепенюк А. И., Овчинников Ю. В., Луценко С. В., Карпов Е. Г. Приготовление водоугольного топлива и технологии его сжигания. *Современная наука: идеи, исследования, результаты, технологии*. – 2011. Вып. 1(6). – С. 95 - 101.

40. Mishra S.K., Kanungo S.B. Factors affecting the preparation of highly concentrated coal-water slurry (HCCWS). *Journal of Scientific & Industrial Research*. 2000. Vol. 59 (10). P. 765–790.

41. Chen R., Wilson M., Leong Y.K., Bryant P., Yang H., Zhang D.K. Preparation and rheology of biochar, lignite char and coal slurry fuels. *Fuel*. 2011. Vol. 90. P. 1689–1695. DOI: 10.1016/j.fuel.2010.10.041.

42. Мурко В. И. Влияние реагентов-пластификаторов на реологические свойства водоугольного топлива. *Химия твердого топлива*. 2001. № 2. С. 62 - 72.

43. Xie D., Li C. BP neural networks based soft measurement of rheological properties of CWS. *Proceedings of the 6th International Symposium of Neural Networks*. 2009. P. 579-586. DOI: 10.1007/978-3-642-01216-7_61.

44. Loureiro L.M.E.F., Gil P.B.F., Vieira de Campos F.V., Nunes L.J.R., Ferreira J.M.F. Development and rheological characterization of an industrial

liquid fuel consisting of charcoal dispersed in water. *Journal of the Energy Institute*. 2018. Vol. 91. P.519–526. DOI: 10.1016/j.joei.2017.04.005.

45. Баранова М. П. Влияние пластифицирующих добавок на реологические характеристики водоугольных суспензий из углей разной степени метаморфизма. *Труды Красноярского государственного технического университета*. Красноярск, 2006. №2. С. 67-72.

46. Урьев Н. Б. Закономерности структурообразования высококонцентрированных водоугольных суспензий. *Исследование гидромеханики суспензий в трубопроводном транспорте: Сб. науч. тр.* Москва : «ВНИИПИгидротрубопровод», 1985. С. 8 - 27.

47. Liu, G.E., Law, C.K. Combustion of Coal–Water Slurry Droplets. *Fuel*. 1986. Vol. 65(2). P. 171–176. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(86\)90003-7](https://doi.org/10.1016/0016-2361(86)90003-7).

48. Vershinina K.Y., Strizhak P.A. Ignition of coal suspensions based on water of different quality. *Coke and Chemistry*. 2016. Vol. 59. P. 437–440. DOI: 10.3103/ S1068364X16110077.

49. Bhadra T., Annamalai K. Ignition and Combustion of Isolated Coal Water Slurry Droplet. *Proceedings of the ASME Turbo Expo*. 1997. Vol. 78675. P. V001T13A055. DOI: 10.1115/97-AA-079.

50. Бурдуков А. П., Карпенко Е. И., Попов В. И. Экспериментальное исследование динамики горения капель водоугольных суспензий. *Физика горения и взрыва*. 1996. Т. 32. № 4. С. 62 - 66.

51. Egorov R.I., Antonov D.V., Valiullin T.R., Strizhak P.A. The ignition dynamics of the water-filled fuel compositions. *Fuel Processing Technology*. 2018. Vol. 174. P. 26–32. DOI: 10.1016/j.fuproc.2018.02.003.

52. Takeno K., Tokuda K., Ichinose T., Kaneko S. Fundamental experiment on the combustion of coal-water mixture and modeling of the process. *International Symposium on Combustion*. 1996. Vol. 26. P. 3223–3230. DOI: 10.1016/S0082-0784(96)80168-8.

53. Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Simultaneous ignition of several droplets of coal–water slurry containing petrochemicals in oxidizer flow. *Fuel Processing Technology*. 2016. Vol. 152. P. 22–33. DOI: 10.1016/j.fuproc.2016.05.045.
54. Pinchuk V.A. The main regularities of ignition and combustion of coal-water fuels produced from brown, flame and gas coals. *International Journal of Engineering Research in Africa*. 2018. Vol. 37. P. 141–157. DOI: 10.4028/www.scientific.net/JERA.37.141.
55. Pinchuk V.A. The main regularities of ignition and combustion of coal-water fuels produced from fat, non-baking coal and anthracite. *International Journal of Engineering Research in Africa*. 2018. Vol. 38. P. 67–78. DOI: 10.4028/www.scientific.net/JERA.38.67.
56. Bo Y., Huang Z., Huang Q., Zhang Y., Zhou J., Cen, K. Combustion Characteristics of Coal–Water Slurry in a Slag-Tap Vertical Cyclone Furnace through Digital Imaging. *Energy Fuels*. 2013. Vol. 27(6). P. 3427–3437. DOI: 10.1021/ef400112a.
57. Ghamari M., Ratner A. Combustion Characteristics of Colloidal Droplets of Jet Fuel and Carbon Based Nanoparticles. *Fuel*. 2017. Vol. 188. P. 182–189. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.10.040.
58. Glushkov D.O., Lyrshchikov S.Y., Shevyrev S.A., Strizhak, P.A. Burning Properties of Slurry Based on Coal and Oil Processing Waste. *Energy Fuels*. 2016. Vol. 30(4). P. 3441–3450. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.5b02881.
59. Пінчук В.О. Розвиток наукових основ горіння водовугільного палива та розробка методів його активації для підвищення ефективності спалювання : дис. ... д-ра техн. наук : 05.14.06. Дніпропетровськ, 2015. 415 с.
60. Kuznetsov G.V., Salomatov V.V., Syrodoy S.V. Numerical simulation of ignition of particles of a coal water fuel. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2015. Vol. 51. P. 409-415. DOI: 10.1134/S0010508215040024.
61. Jianzhong L., Ruikun W., Jianfei X., Junhu Z., Kefa C. Pilot-scale investigation on slurring, combustion, and slagging characteristics of coal slurry

fuel prepared using industrial waste liquid. *Applied Energy*. 2014. Vol. 115. P. 309–319. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.11.026.

62. Кузнецов А. С., Токарев И. И. Научно-практические разработки и направления реализации технологии ВУТ в условиях возрастания доли угольного продукта в балансе промышленной и коммунальной теплоэнергетики. *Современная наука: идеи, исследования, результаты, технологии*. 2011. Вып. 1(6). С. 21 – 24.

63. Valiullin T.R., Vershinina K.Y., Glushkov D.O., Strizhak P.A. Ignition of a droplet of composite liquid fuel in a vortex combustion chamber. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. Vol. 891 012224. P. 1-6. DOI: 10.1088/1742-6596/891/1/012224.

64. Саломатов В. В., Дорохова У. В., Сыродой С. В. Перевод котлов малой мощности на водоугольное топливо. *Ползуновский вестник*. 2013. № 4 – 3. С. 38 - 46.

65. Vershinina K.Y, Shlegel N.E, Strizhak P.A. Impact of environmentally attractive additives on the ignition delay times of slurry fuels: experimental study. *Fuel*. 2019. Vol. 238. P. 275-288. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.10.132.

66. Zhu M, Zhang Z, Zhang Y, Setyawan H, Liu P, Zhang D. An experimental study of the ignition and combustion characteristics of single droplets of biochar-glycerol-water slurry fuels. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2017. Vol. 36(2). P. 2475-2482. DOI: 10.1016/j.proci.2016.07.070.

67. Glushkov DO, Kuznetsov GV, Strizhak PA, Syrodoy SV. Mathematical model simulating the ignition of a droplet of coal water slurry containing petrochemicals. *Energy*. 2018. Vol. 150. P. 262-275. DOI: 10.1016/j.energy.2018.02.130.

68. Staron A, Kowalski Z, Staron P, Banach M. Studies on CWL with glycerol for combustion process. *Environmental Science and Pollution Research International*. 2019. Vol. 26(3). P. 2835-2844. DOI: 10.1007/s11356-018-3814-0.

69. Chernyavsky M., Provalov O., Kosyachkov O., Bestsennyy I. Scientific bases, experience of production and combustion of coal mixtures at thermal power plants of Ukraine. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*. 2021. Vol. 8. P. 23-31.
70. Lee B-H, Sh L, Bae J-S, Choi Y-C, Jeon C-H. Combustion behavior of low-rank coal impregnated with glycerol. *Biomass Bioenergy*. 2016. Vol. 87. P. 122-130. DOI: j.biombioe. 2016.02.028.
71. Kong P.S, Aroua M.K, Daud W.M.A.W. Conversion of crude and pure glycerol into derivatives: a feasibility evaluation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 63. P. 533-555. DOI: 10.1016/j.rser.2016.05.054.
72. Quispe C.A.G, Coronado C.J.R, Carvalho J.A. Jr. Glycerol: production, consumption, prices, characterization and new trends in combustion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 27. P. 475-493. DOI: 10.1016/j.rser.2013.06.017.
73. Садовский Д.Ю., Макаров А.С., Савицкий Д.П., Масляк Р.Р. Получение композиционного водоугольного топлива с использованием глицерина. *Вопросы химии и химической технологии*. 2017. № 1. С. 59–63.
74. Savitskii D.P. The effect of water–glycerol mixtures on rheological properties of coal slurries. *Colloid Journal*. 2016. Vol. 78. P. 109–114. DOI: 10.1134/S1061933X16010166.
75. Park J-H, Lee D-W, Lee Y-J, et al. Preparation and characterization of the glycerol-embedded hybrid coal. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2019. Vol. 7 (5). P. 4637–4646. DOI: 10.1021/acssuschemeng.8b03818.
76. Bae J-S, Lee D-W, Lee Y-J, et al. An investigation of the evaporation behavior of bioliquid in the pores and its application to hybrid coal combining biomass with coal. *Applied Thermal Engineering*. 2015. Vol. 90. P. 199-206. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015. 03.025.
77. Bartocci P, Bidini G, Asdrubali F, Beatrice C, Frusteri F, Fantozzi F. Batch pyrolysis of pellet made of biomass and crude glycerol: mass and energy

balances. *Renew Energy*. 2018. Vol. 124. P. 172-179. DOI: 10.1016/j.renene.2017.06.049.

78. Pinchuk V.A., Sharabura T.A., Kuzmin A.V. Experimental investigation of thermal conductivity and heat capacity of coal-water fuel. *International Journal of Energy for a Clean Environment*. 2016. Vol. 17 (2-4). P. 165–185. DOI: 10.1615/InterJenerCleanEnv.2016019411.

79. Verevkin S.P, Zaitsau D.H, Emel'yanenko V.N, Zhabina A.A. Thermodynamic properties of glycerol: experimental and theoretical study. *Fluid Phase Equilibria*. 2015. Vol. 397. P. 87-94. DOI: 10.1016/j.fluid.2015.03.038.

80. Pinchuk V.A., Kuzmin A.V. The effect of the addition of TiO_2 nanoparticles to coal-water fuel on its thermophysical properties and combustion parameters. *Fuel*. 2020. Vol. 267. P. 117220. DOI: 10.1016/j.fuel. 2020.117220.

81. Pinchuk, V.A., Sharabura, T.A., Kuzmin, A.V. Improvement of Coal–Water Fuel Combustion Characteristics by Using of Electromagnetic Treatment. *Fuel Processing Technology*. 2017. Vol. 167, P. 61–68. DOI: 10.1016/j.fuproc.2017.06.014.

82. Valeriya Pinchuk. Study of effect of thermal activation of coal-water fuel on processes of its ignition and burning. *Metallurgical and Mining Industry*. 2016. №6. P. 118-122.

83. Pinchuk V.A, Kuznetsov V.I, Yevtushenko H.L., Sharabura T.A, Yehortsev K.S.. Using the analytic hierarchy process for comparative analysis and construction of optimal option sets for activation of coal-water fuel. *International Journal of Energy for a Clean Environment*. 2017. Vol. 18(3). P. 203-222. DOI: 10.1615/InterJenerCleanEnv.2017021129.

84. Шарабура Т.А. Вдосконалення процесів термічної переробки водовугільного палива з низькосортного вугілля та відходів вуглезбагачення. дис. ... канд. техн. наук : 05.14.06. Дніпропетровськ, 2014. 185 с.

85. Usui H., Yamasaki Y., Sano Y. Heat transfer of coal-water mixtures in a round pipe flow. *Journal of Chemical Engineering of Japan*. 1987. Vol. 20 (1). P. 65–70. DOI: 10.1252/jcej.20.65.

86. Ninomiya Y., Hirato M., Mori T. Heat transfer of coal water mixture under laminar pipe flow condition. *Kagaku Kogaku Ronbunshu*. 1987. Vol. 13. P. 741–748. DOI: 10.1252/kakoronbunshu.13.741.
87. Стрелкова К.С., Марушин В.М., Резвов А.В. Теплообмен при течении волоугольной суспензии в трубах. *Теплоэнергетика*. 1991. №12. С. 55-59.
88. Saeki T., Usui H. Heat transfer characteristics of coal-water mixtures. *Canadian Journal of Chemical Engineering*. 1995. Vol. 73. P. 400–404. DOI: 10.1002/cjce:5450730317.
89. Pinchuk V.A., Sharabura T.A., Kuzmin A.V., Pinchuk S.A The peculiar influence of the mineral impurities content in coal-water fuel on the regularities of fuel drop ignition and combustion. *Journal of the Energy Institute*. 2020. Vol. 93 (3). P. 911–921. DOI: 10.1016/j.joei.2019.08.003.
90. Lyczkowski R.W., Wang C.S. Hydrodynamic modeling and analysis of two-phase non-Newtonian coal/water slurries. *Powder Technology*. 1992. Vol. 69 (3). P. 285–294. DOI: 10.1016/0032-5910(92)80019-S.
91. Singh M.K., Ratha D., Kumar S., Kumar D. Influence of particle-size distribution and temperature on rheological behavior of coal slurry. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 2016. Vol. 36 (1). P. 44–54. DOI: 10.1080/19392699.2015.1049265.
92. Пинчук В.А., Шарабура Т.А., Муман М. Оценка эффективности использования водоугольного топлива в энергетических установках. *Strategy of Quality in Industry and Education: Proceedings XIV International Conference, Varna (Bulgaria) 04-07.06.2018*. Varna, 2018. vol. 1. С. 108 - 113.
93. Шарабура Т.А., Пинчук В.А., Муман М. Исследование процесса сжигания водоугольного топлива в циклонном топочном устройстве путем математического моделирования. *New Technologies and Achievements in Metallurgy and Materials Engineering and Production Engineering and Physics: XIX International scientific conference: collective monograph, edited by Marcin Knapieński Częstochowa (Poland), 7-8.06.2018*. Częstochowa, 2018. P. 446 – 451.

94. ДСТУ ISO 589:2015. Вугілля кам'яне. Визначення загальної вологи. [Чинний від 2016-01-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 9 с.
95. ДСТУ ISO 562:2015. Вугілля кам'яне та кокс. Визначення виходу летких речовин. [Чинний від 2016-01-01]. – Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. – 8 с.
96. ДСТУ ISO 602:2015. Вугілля. Визначення мінеральних речовин. [Чинний від 2016-01-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015. - 13 с.
97. ДСТУ 9045:2020. Паливо тверде. Методи визначення хімічного складу золи. [Чинний від 2021-01-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020. - 28 с.
98. ДСТУ 4082–2002. Паливо тверде. Ситовий метод визначення гранулометричного складу. [Чинний від 2003-01-01]. - Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2002. - 26 с.
99. ДСТУ 4333:2018. Нафтопродукти. Методи визначення температур спалаху та займання у відкритому тиглі. [Чинний від 01.10.2018]. - Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. - 20 с.
100. Pinchuk V.A., Kuzmin A.V. Method of approximating experimental data on fuel combustion. *International Journal of Energy for a Clean Environment*. 2019. Vol. 20 (3). P.261-272. DOI: 10.1615/InterJEnerCleanEnv.2019032466.
101. Pinchuk V.A., Sharabura T.A., Kuzmin A.V., Pinchuk S.A. Engineering equations for determining coal-water fuel combustion stages. *Journal of the Energy Institute*. 2020. Vol. 93. P. 1924–1933. DOI: 10.1016/j.joei.2020.04.007.
102. Синярев Г. Б., Ватолин Н. А., Трусков Б. Г., Моисеев Г. К. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов. Москва : Наука, 1982. 263с.
103. Трусков Б. Г. Метод и алгоритм расчета равновесного состава и свойств многокомпонентных гетерогенных систем. – Москва : МГТУ, 2002. 27с.

104. Грес Л. П. Охрана окружающей среды при сжигании топлива : учеб. пособ. Днепропетровск: РИА “Днепр-VAL”, 2002. 104 с.
105. Родионов А. И., Клушин В. Н., Систер В. Г. Технологические проблемы экологической безопасности. Калуга : изд-во Н. Бочкаревой, 2000. 800 с.
106. Сигал И. Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. Ленинград: Недра, 1988. 312 с.
107. Мухутдинов А. А., Сольяшинова О. А. Технология очистки газов : учеб. пособ.– Казань : КГТУ, 2007. 89 с.
108. Зайденварг В. Е., Мурко В. И., Нехороший И. Х. Результаты работ по переводу котлов различной мощности на сжигание водоугольного топлива. *Уголь*. № 5. 1997. С. 13 - 16.
109. Pinchuk V.A., Sharabura T.A., Moumane M., Kuzmin A.V. Experimental research into the influence of temperature, coal metamorphic stage and the size of coal-water fuel drop on the fuel drop combustion process. *International Journal of Energy for a Clean Environment*. 2019. Vol. 20. P. 43–62. DOI: 10.1615/InterJEnerCleanEnv.2019030065.
110. Pinchuk V.A., Moumane M., Sharabura T.A., Pinchuk S.A. Investigations on environmental indicators of thermal processing of coal-water fuel. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*. 2019. Vol. 6. No. 3. P. 493-499.
111. Осипова В. А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена. Москва: Энергия, 1979. 318 с.
112. Платунов Е. С. Теплофизические измерения в монотонном режиме. Ленинград. : Энергия, 1973. 143 с.
113. Пономарев С. В., Мищенко С. В., Дивин А. Г. Теоретические и практические аспекты теплофизических измерений: В 2 кн. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. Кн. 1. 206 с.; Кн. 2. 236 с.

114. Чернышева Т. И., Чернышев В. Н. Методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов. Москва : Машиностроение, 2001. 240 с.
115. Лыков А. В. Теория теплопроводности. Москва: «Высшая школа», 1967. 599 с.
116. Чиркин В. С. Теплопроводность промышленных материалов. Москва : Машиностроение, 1957. 172 с.
117. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача: Учеб. для вузов. Москва: Энергоатомиздат, 1981. 416 с.
118. Моисеев Н. Н., Иванилов Ю. П., Столярова Е. М. Методы оптимизации: Учеб. Пособ. для вузов. – Москва : Наука, 1978. 351 с.
119. Самарский А. А. Теория разностных схем. – Москва : Наука, 1983. 616 с.
120. Преображенский В. П. Теплотехнические измерения и приборы. Москва : Энергия, 1978. 704 с.
121. Геращенко О. А., Гордов А. Н., Лах В. И. Температурные измерения: Справочник. Киев : Наукова думка, 1984. 704 с.
122. Pinchuk V.A., Moumane M., Sharabura T.A., Kuzmin A.V., Pinchuk S.A. Evidence of the illegitimacy of the additive approach to the determination of the thermophysical properties of coal-water fuel with glycerol. *International Journal of Energy Research*. 2020. 44(14), P. 12056–12065. DOI:10.1002/er.5858.
123. Муман М., Пінчук В.О. Експериментальне дослідження теплофізичних властивостей водовугільного палива з додаванням гліцерину. *Молода академія 2020*: зб. тез доп. всеукр. наук.-техн. конф. студентів і молодих учених, м. Дніпро, 21-22 травня 2020р. Дніпро. Т.1. С. 103.
124. Шарабура Т. А. Пинчук В. А., Шевченко Г. Л., Кузьмин А. В. Особенности перевода котлов средней и малой мощности на водоугольное топливо. *Современная наука: идеи, исследования, результаты, технологии*. 2012. Вып. 1(9). С. 97 - 105.

125. Pinchuk V., Moumane M., Sharabura T., Shishko Y., Kuzmin A. Applicability of the Graetz's solution for Newtonian fluids to the calculations of the heat transfer in coal-water fuel at the pre-heating stage. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2021. Vol. 21. P. 100798. DOI: 10.1016/j.tsep.2020.100798.
126. Pinchuk V. A., Moumane M., Mamuzić I., Starchenko A. V. Experimental research of heat transfer during thermal activation of coal-water fuel. *Materials and metallurgy: 14 th international symposium of Croatian metallurgical society, Šibenik (Croatia), 21 – 26 June 2020. Šibenik, 2020. P.443.*
127. Муман М., Пінчук В.О. Дослідження теплообміну при примусовому русі водовугільного палива. *Молода академія 2021*: зб. тез доп. всеукр. наук.-техн. конф. студентів і молодих учених, м. Дніпро, 20-21 травня 2021р. Дніпро. Т.1. С. 73.

ДОДАТОК А



Акт

про використання результатів дисертаційної роботи

Мумана Мохаммеда на тему «Підвищення ефективності спалювання водовугільного палива шляхом додаванням відходів виробництва біодизеля»

Для використання в умовах ТОВ «МЗ«Дніпросталь» передані наступні результати дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора філософії аспіранта Національної металургійної академії України Мумана Мохаммеда:

Розроблені раціональні режими параметри спалювання водовугільного палива, що містить відходи виробництва біодизеля, а саме, гліцерину, для опалення випалювальних печей для випалу вапняку продуктивністю 8,5 т/год. При цьому визначені витратні характеристики палива і окислювача, кількість і склад димових газів, режимні параметри печі - теплова потужність печі, час перебування матеріалу в печі, питома продуктивність печі, ККД печі. Розглянута можливість використання водовугільного палива як самостійно, так і спільно з природним газом.

Запропоновані результати дисертаційного дослідження Мумана М. є актуальними та мають важливе практичне значення для зниження енергетичних витрат при виробництві вапна. Зазначені матеріали становлять інтерес для подальшого використання і впровадження в умовах ТОВ «МЗ«Дніпросталь».

Начальник ділянки виробництва вапна
ТОВ «МЗ«Дніпросталь»



Климчик Ю.В.

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ «МЕТАЛУРГІЙНИЙ ЗАВОД «ДНІПРОСТАЛЬ»

Україна, м. Дніпро, вул. Дніпропетровська, 4, 49051. Тел. / факс +38 (056) 371 50 40

www.interpipe.biz e-mail: info@interpipe.biz

IBAN: UA183057490000002600730290201, в АТ «БАНК КРЕДИТ ДНІПРО», м. Київ, Україна, МФО 305749, ЄДРПОУ 33718431

ДОДАТОК Б



Затверджую

Перший проректор
Національної металургійної
академії України

д.т.н., проф. Іващенко В.П.

“ 20 ” 01 2021р.

ДОВІДКА

про використання результатів дисертаційної роботи Мумана Мохаммеда

Отримані аспірантом кафедри енергетичних систем та енергоменеджмента Мумана Мохаммеда у рамках дисертаційної роботи «Підвищення ефективності спалювання водовугільного палива шляхом додаванням відходів виробництва біодизеля» на здобуття наукового ступеню доктора філософії за спеціальністю 144 – Теплоенергетика про нові експериментальні дані щодо закономірностей спалахування та горіння водовугільного палива з додаванням гліцерину, експериментальні дані щодо теплофізичних властивостей водовугільного палива з гліцерином, а також встановлені закономірності теплообміну при примусовому русі водовугільного палива становлять інтерес для використання в навчальному процесі на кафедрі енергетичних систем та енергоменеджменту.

Вказані вище наукові результати використовуються при викладанні курсів лекцій з дисциплін «Тепломасообмін», «Спеціальні питання тепломасообміну», «Паливо та його спалювання» для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика», а також при виконанні студентами, випускних бакалаврських, магістерських і науково-дослідних робіт.

Заступник завідувач
кафедри енергетичних систем та
енергоменеджменту з навчальної роботи

Світлана ФОРИСЬ

Список публікацій за темою дисертації

Публікації, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

- включених до наукометричної бази Scopus або Web of Science:

1. Pinchuk V.A., Sharabura T.A., Moumane M., Kuzmin A.V. Experimental research into the influence of temperature, coal metamorphic stage and the size of coal-water fuel drop on the fuel drop combustion process. *International Journal of Energy for a Clean Environment*. 2019. Vol. 20. P. 43–62. DOI: 10.1615/InterJEnerCleanEnv.2019030065.
2. Pinchuk V.A., Moumane M., Sharabura T.A., Pinchuk S.A. Investigations on environmental indicators of thermal processing of coal-water fuel. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*. 2019. Vol. 6. No. 3. P. 493-499.
3. Pinchuk, V.A., Moumane, M., Sharabura, T.A., Kuzmin, A.V., Pinchuk, S.A. Evidence of the illegitimacy of the additive approach to the determination of the thermophysical properties of coal-water fuel with glycerol. *International Journal of Energy Research*. 2020. 44(14), P. 12056–12065. DOI: 10.1002/er.5858.
4. Pinchuk V., Moumane M., Sharabura T., Shishko Y., Kuzmin A. Applicability of the Graetz's solution for Newtonian fluids to the calculations of the heat transfer in coal-water fuel at the pre-heating stage. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2021. Vol. 21. P. 100798. DOI: 10.1016/j.tsep.2020.100798.

ПОДОВЖЕННЯ ДОДАТКУ В

- які засвідчують апробацію матеріалів дисертації на наукових конференціях та семінарах:

1. Пинчук В.А., Шарабура Т.А., Муман М. Оценка эффективности использования водоугольного топлива в энергетических установках. *Strategy of Quality in Industry and Education: Proceedings XIV International Conference, Varna (Bulgaria) 04-07.06.2018. Varna, 2018. Vol. 1. P. 108 - 113.*

2. Шарабура Т.А., Пинчук В.А., Муман М. Исследование процесса сжигания водоугольного топлива в циклонном топочном устройстве путем математического моделирования. *New Technologies and Achievements in Metallurgy and Materials Engineering and Production Engineering and Physics: XIX International scientific conference: collective monograph, edited by Marcin Knapieński Częstochowa (Poland), 7-8.06.2018. Częstochowa, 2018. P. 446 – 451.*

3. Муман М., Пінчук В.О. Експериментальне дослідження теплофізичних властивостей водовугільного палива с додаванням гліцерину. *Молода академія 2020: зб. тез доп. всеукр. наук.-техн. конф. студентів і молодих учених, м. Дніпро, 21-22 травня 2020р. Дніпро. Т.1. С. 103.*

4. Pinchuk V. A., Moumane M., Mamuzić I., Starchenko A. V. Experimental research of heat transfer during thermal activation of coal-water fuel. *Materials and metallurgy: 14 th international symposium of Croatian metallurgical society, Šibenik (Croatia), 21 – 26 June 2020. Šibenik, 2020. P.443.*

5. Муман М., Пінчук В.О. Дослідження теплообміну при примусовому русі водовугільного палива. *Молода академія 2021: зб. тез доп. всеукр. наук.-техн. конф. студентів і молодих учених, м. Дніпро, 20-21 травня 2021р. Дніпро. Т.1. С. 73.*