

Національна академія наук України
Інститут технічної теплофізики

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Новікова Юлія Петрівна

УДК 662.73, 628.336.3

ДИСЕРТАЦІЯ

**ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ЗНЕВОДНЕННЯ ТА ГОРІННЯ
ЗАСТАРІЛИХ МУЛОВИХ ВІДКЛАДЕНЬ**

144 – Теплоенергетика

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Юлія НОВІКОВА

Науковий керівник – Петрова Жанна Олександрівна, доктор технічних наук,
старший науковий співробітник

Київ – 2023

АНОТАЦІЯ

Новікова Ю.П. Інтенсифікація зневоднення та горіння застарілих мулових відкладень. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 144 – Теплоенергетика. – Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, 2023.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню по розробці єдиного підходу для ефективної переробки застарілих мулових відкладень, як палива, із додаванням до них займистих наповнювачів таких як фрезерний торф, лузга гречки, відходи деревини (тирса).

В зв'язку з продовольчою проблемою всьому світі потрібно максимально вивільняти земельні площі та проводити їх рекультивацію, які були під технічним використанням, для сільськогосподарських угідь.

В Україні в наслідок господарсько-побутової та виробничої діяльності людей утворюються велика кількість стічних вод. Під час очищення стічних вод утворюється чиста вода та активний мул, який зневоднюється на мулових майданчиках і його можна використовувати у вигляді палива і добрив. Але більшість мулових майданчиків прервантажуть і заливають на більш застарілий мул активний, створюючи накопичення мулових відкладень, що погіршує екологічну ситуацію в країні.

В Україні, на відміну від інших розвинутих країн світу, залишились у спадок від Радянського Союзу застарілі мулові карти на сотнях гектарів землі, які не придатні для сільського господарства, з муловими відкладеннями після очисних споруд.

Накопичені мулові відкладення є застарілими, через це втратили переважну кількість біогенних речовин, стали занадто мінералізовані і практично непридатні до безпосереднього одержання з них біопалива. Ліквідація накопичених відкладень потрібна для ефективної та безперебійної експлуатації очисних споруд.

В зв'язку з енергетичною кризою у всьому світі можливо їх використання з

створенням палива на основі застарілих мулових відкладень, торфу та біомаси для вирішення цієї проблеми. Тому актуальним є розробка технології переробки застарілих мулових відкладень на паливні гранули з одночасним одержанням теплової та електричної енергії.

Обробка активного мулу здійснюється для мінімізації впливу на навколишнє середовище та отримання кінцевого продукту, придатного для утилізації на виробництві. Технологічний процес очищення осаду стічних вод за типовою схемою має такі основні етапи: ущільнення, стабілізація органічних фракцій, кондиціонування, зневоднення, термообробка або дезінфекція, подальше використання в сільському господарстві або на спалювання.

Так, як застарілі мулові відкладення мають малий вміст органічної складової, то для кращої їх утилізації запропоновано створювати композитні гранули, подальше їх сушіння та спалювання, за якого отримана зола буде використовуватись для виготовлення будівельних матеріалів.

Зміст дисертаційного дослідження викладено у п'яти розділах, у яких представлені та обґрунтовані основні результати роботи.

У вступі обґрунтовується актуальність обраної теми дослідження, формулюються цілі та завдання дослідження, наводяться дані про зв'язок роботи з науковою програмою, пояснюється наукова новизна та практичне значення отриманих результатів. Наводяться дані про результати апробацію результатів дисертаційної роботи та список публікацій.

У першому розділі проведено аналіз літературних джерел сучасних технологій очищення стічних вод, який показує, що в світі немає технології переробки застарілих мулових відкладень, а в Україні ці технології наразі є недосконалими. Тому необхідно розробити комплексну переробку мулових відкладень, що включає в сукупності соціальні, економічні, технологічні, інженерні аспекти і дозволяє забезпечити екологічну безпеку запропонованих рішень на основі світових технологій.

У другому розділі наведено опис експериментальних стендів, прилади, методики, які були підібрані та використанні для проведення та обробки експери-

ментальних досліджень.

У третьому розділі було проведено дослідження тепломасообмінних процесів при сушінні композитної сировини на основі застарілих мулових відкладень, торфу та біомаси. Підготовка сировини, до створення композиту, полягала в попередньому визначенні вологості та зольності. Застарілі мулові відкладення мають перевищену зольність, яку необхідно зменшувати. Для пониження зольності використано торф та біомасу. Підібране співвідношення компонентів для композиту з додаванням торфу дозволить понизити зольність у мулових відкладень на 1,4 рази з подальшим додаванням біомаси на 1,9 рази.

За результатами досліджень кінетики процесу сушіння, виявлено, що на кінетику має вплив температура та швидкість теплоносія, гранулометричний склад та метод гранулювання матеріалу. При дослідженні процесу сушіння композиту спостерігається інтенсифікація процесу у 1,2 рази від мулу та в 3,1 рази від торфу.

Зі збільшенням діаметру збільшується тривалість сушіння та прогрів проходить не так інтенсивно. Гранулювання на гідравлічному пресі дозволяє проводити процес сушіння швидше на 25%, але при цьому пресуються одиночні гранули, що різко збільшує трудомісткість технологічної операції і не може бути рекомендований для виробництва. При отриманні гранул в шнековому пресі при їх сушінні збільшується тривалість, що пов'язано з утворенням більш міцніших гранул і не потребує ручної праці при гранулюванні.

Визначені ефективні режими сушіння. Порівняння утворених трьохкомпонентних гранул з двокомпонентними показало однаковий характер кривих сушіння та тривалість сушіння.

Розраховано та отримано рівняння узагальненої швидкості і тривалості сушіння композиту гранул на основі мулових відкладень, торфу та біомаси. Отримані узагальнені криві сушіння композиту гранул, які були розраховані, співпадають з отриманими експериментальними кривими. Із узагальнених кривих сушіння та швидкості сушіння розраховані відносні коефіцієнти та коефіцієнти сушіння, розраховані формули тривалості сушіння дво- та трьохкомпонентних гранул. Провдене дослідження залежності числа Ребіндера від вологості матеріалу,

що обгрунує ефективність вибраних режимів сушіння.

Виконане чисельне моделювання конвективного сушіння кополімерних гранул показало, що дана модель у цілому задовільно описує характер зміни у часі температури в центрі гранули і її вологості в процесі конвекційного сушіння. У цілому ж можна відзначити, що розглянута модель може застосовуватися для наближеної попередньої оцінки часу сушіння гранули, що виготовлена на шнековому механічному пристрої у пропорції 50% мулу та 50% торфу.

У четвертому розділі наведено дослідження технофізичних характеристик розробленого композиту біопалива. Вперше досліджено адсорбційні властивості дво- та трьохкомпонентних гранул, які показали, що з метою збереження їх технологічних властивостей, рекомендуються підтримувати вологість повітря на рівні 60 -70 %. Отримана рівноважна вологість композиту не перевищує стандартну вологість для паливних гранул, що складає 20%, та становить 6-7 %.

Вперше було проведено дослідження з визначення показника активності води для дво- та трьохкомпонентних гранул, діапазон значень яких становить 0,224-0,231. Отримано кореляційні коефіцієнти, які мають однакове значення для всіх видів гранул. Мікрофотографії подрібнених зразків гранул показали про відсутність складних вуглеводних комплексів і наявність простих сполук, що свідчить про зменшення органічної складової. Також видно значний паровий простір і високу сорбційну площу, яка може адсорбувати сполуки як на поверхні гранул, так і в мікро і мезопорах. Це впливає на умови зберігання гранул та їх обов'язковому дотриманню.

Вперше визначено питому теплоту згорання композитних гранул, яка перевищує торф у 1,2 рази. Енергетичні показники гранул на основі мулових відкладень достатньо високі, тому їх можливо використовувати як альтернативне паливо в побуті та комунальній енергетиці.

Визначено паливні характеристики застарілого мулу, які близькі до торфу та дозволяють створювати композитне паливо. Досліджено що процес горіння часток мулових відкладень у факелі відповідає загально прийнятому процесу горіння

твердого палива у факелі. Але на відміну від твердого палива, в наслідок того, що частки мулових відкладень мали температуру самозаймання, великі частки які залишали факел, виходячи за його межі, згоряли повністю. При цьому механічний недопал був відсутній.

Вперше досліджено процес горіння композитних гранул який показав, що отримані результати можуть бути використанні при спалюванні палива у різний спосіб: в факелі, у шарі та інш., або при створенні нових способів спалювання. Швидкість горіння гранул значно нижча швидкості горіння вихідної біомаси, однак переважає швидкість горіння окремої частки мулових відкладень. Швидкість горіння гранул значно нижча швидкості горіння вихідної біомаси, однак переважає швидкість горіння окремої частки мулових відкладень. Проведені дослідження показали можливість знешкодження мулових відкладень та його утилізації в якості альтернативного палива.

У п'ятому розділі дисертаційної роботи на основі комплексного дослідження тепломасообмінних процесів композитної сировини розроблено інноваційну теплотехнологію отримання переробки мулових відкладень, на яку подано патент України на винахід. За результатами досліджень розроблені композитної суміші у вигляді паливних гранул на основі застарілих мулових відкладень, торфу та органічної сировини відповідають стандартам якісного палива.

У загальних висновках авторкою представлені наукові та практичні результати дисертаційного дослідження.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- визначено технологічні властивості застарілих мулових відкладень, торфу, лузги гречки, відходів деревини (тирси) та отримано оптимальне співвідношення компонентів з метою якісного гранулювання;
- визначено та узагальнено кінетичні закономірності конвективного сушіння композитних, які дозволяють інтенсифікувати процес порівняно з монокомпонентами;
- розраховані відносні коефіцієнти та коефіцієнти сушіння, отримані фор-

мули тривалості сушіння дво- та трьохкомпонентних гранул, які обґрунтовують обрані режими;

- виконано чисельне моделювання тепломасопереносу при конвективному сушінні композитних гранул та отримано графіки залежностей;

- вперше проведено дослідження адсорбційних властивостей композиційних гранул, дозволили визначити рівноважні вологості матеріалу, не персушувати матеріал та зменшувати енергетичні витрати;

- вперше проведені мікроскопічні дослідження сорбційної ємності, які показали незначну кількість органіки та наявність в гранулах поліетилену;

- вперше визначено теплоту згоряння композитних гранул, яка обґрунтовує їх достатньо високі енергетичні показники;

- вперше вивчено ефективність спалювання композитних гранул за якої визначено можливість знешкодження мулових відкладень та його утилізації в якості альтернативного палива.

Практичне значення одержаних результатів:

Розроблена інноваційна теплотехнологія отримання композитних гранул.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи підтверджується поданим патентом України на винахід «Спосіб одержання паливних гранул із застарілих мулових відкладень» та отриманим патентом України на винахід «Лінія для сушіння термолабільних матеріалів».

Ключові слова: *сушіння, спалювання, енергоефективність, мулові відкладення, торф, біомаса.*

ANNOTATION

Novikova Yu.P. Intensification of dehydration and burning of old sludge. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 144 – Thermal Power Engineering. – Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2023.

The dissertation is devoted to research on the development of a unified approach for the effective processing of sludge deposits as fuel, with the addition of combustible fillers such as milled peat, buckwheat husk, wood waste (sawdust).

In connection with the food problem, the whole world needs to release as much as possible land areas and carry out their reclamation, which were under technical use, for agricultural lands.

In Ukraine, a large amount of wastewater is generated as a result of people's economic, household and industrial activities. During wastewater treatment, clean water and activated sludge are produced, which are dewatered on sludge sites and can be used as fuel and fertilizers. But most of the sludge sites are overloaded and filled with more outdated active sludge, creating an accumulation of sludge deposits, which worsens the ecological situation in the country.

Ukraine, unlike other developed countries of the world, inherited from the Soviet Union outdated sludge maps on hundreds of hectares of land that are not suitable for agriculture, with sludge after sewage treatment plants.

Accumulated sludge is outdated, because of this they lost the majority of biogenic substances, became too mineralized and practically unsuitable for direct production of biofuel from them. The disposal of accumulated sediments is necessary for efficient and uninterrupted operation of treatment facilities.

Due to the worldwide energy crisis, it is possible to use them to create fuel based on aged sludge deposits, peat and biomass to solve this problem. Therefore, the development of a technology for processing old sludge deposits into fuel pellets with the simultaneous production of thermal and electrical energy is urgent.

Processing of activated sludge is carried out to minimize the impact on the environment and to obtain a final product suitable for industrial disposal. The technological process of cleaning sewage sludge according to a typical scheme has the following main stages: compaction, stabilization of organic fractions, conditioning, dehydration, heat treatment or disinfection, further use in agriculture or incineration.

Since the old sludge have a small content of organic components, for their better utilization it is proposed to create composite granules, their subsequent drying and burning, during which the resulting ash will be used for the production of building materials.

The content of the dissertation research is presented in five chapters, in which the main results of the work are presented and substantiated.

The introduction substantiates the relevance of the selected research topic, formulates the goals and tasks of the research, provides data on the connection of the work with the scientific program, explains the scientific novelty and practical significance of the obtained results. Data on the results of the approval of the results of the dissertation and a list of publications are given.

In the first chapter, an analysis of literary sources of modern wastewater treatment technologies is carried out, which shows that there is no technology for processing outdated sludge deposits in the world, and in Ukraine these technologies are currently imperfect. Therefore, it is necessary to develop a comprehensive processing of sludge deposits, which includes social, economic, technological, engineering aspects and allows to ensure the environmental safety of the proposed solutions based on world technologies.

The second chapter provides a description of experimental stands, devices, and methods that were selected and used for conducting and processing experimental research.

In the third chapter, a study of heat and mass exchange processes during drying of composite raw materials based on old sludge, peat and biomass was carried out. The preparation of raw materials, prior to the creation of compositions, consisted in the preliminary determination of moisture content and ash content. Aged sludge has excessive ash content, which must be reduced. Peat and biomass were used to reduce ash

content. The selected ratio of components for compositions with the addition of peat will reduce the ash content of sludge by 1.4 times with the subsequent addition of biomass by 1.9 times.

Based on the results of research into the kinetics of the drying process, it was found that the kinetics is influenced by the temperature and speed of the heat carrier, the particle size composition and the method of granulating the material. When the drying process of the compositions was studied, the intensification of the process was observed by 1.2 times compared to sludge and 3.1 times compared to peat.

With an increase in diameter, the duration of drying increases and the heating is not so intense. Granulation on a hydraulic press allows the drying process to be carried out 25% faster, but at the same time single granules are pressed, which dramatically increases the labor intensity of the technological operation and cannot be recommended for production. When obtaining granules in a screw press, their drying time increases, which is associated with the formation of stronger granules and does not require manual labor during granulation.

Effective drying modes are defined. A comparison of the former three-component granules with two-component ones showed the same nature of the drying curves and duration of drying.

The equation of the generalized speed and duration of drying of composite granules based on sludge deposits, peat and biomass was calculated and obtained. The obtained generalized drying curves of the composite granules, which were calculated, coincide with the obtained experimental curves. From the generalized drying curves and drying speed, the relative coefficients and drying coefficients were calculated, and the formulas for the duration of drying of two- and three-component granules were calculated. A study of the dependence of the Rebinder number on the moisture content of the material was carried out, which underlines the effectiveness of the selected drying modes.

The performed numerical modeling of the convective drying of composite granules showed that this model satisfactorily describes the nature of the change in time of the temperature in the center of the granule and its moisture in the process of convective drying. In general, it can be noted that the considered model can be used for an

approximate preliminary assessment of the drying time of the granule produced on a screw mechanical device in the proportion of 50% silt and 50% peat.

The fourth chapter provides a study of the technological and physical characteristics of the developed composite biofuel. For the first time, the adsorption properties of two- and three-component granules were investigated, which showed that in order to preserve their technological properties, it is recommended to maintain air moisture at the level of 60-70%. The obtained equilibrium moisture of the compositions does not exceed the standard moisture for fuel pellets, which is 20%, and is 6-7%.

For the first time, a study was conducted to determine the water activity index for two- and three-component granules, the range of values of which is 0.224-0.231. Correlation coefficients were obtained, which have the same value for all types of granules. Photomicrographs of crushed samples of granules showed the absence of complex carbohydrate complexes and the presence of simple compounds, which indicates a decrease in the organic component. A significant vapor space and a high sorption area are also visible, which can adsorb compounds both on the surface of the granules and in micro- and mesopores. This affects the storage conditions of the granules and their mandatory compliance.

For the first time, the specific heat of combustion of composite granules, which exceeds peat by 1.2 times, was determined. The energy indicators of pellets based on sludge deposits are high enough, so it is possible to use them as an alternative fuel in household and communal energy.

The fuel characteristics of the old sludge were determined, which are close to peat and allow the creation of composite fuel. It has been investigated that the process of combustion of particles of sludge deposits in a flare corresponds to the generally accepted process of burning solid fuel in a flare. But unlike solid fuel, as a result of the fact that the particles of sludge deposits had a spontaneous ignition temperature, the large particles that left the torch, going beyond its limits, burned completely. At the same time, there was no mechanical underfire.

For the first time, the process of burning composite pellets was investigated, which showed that the obtained results can be used when burning fuel in different ways: in a

torch, in a layer, etc., or when creating new ways of burning. The burning rate of pellets is much lower than the burning rate of the original biomass, but the burning rate of a separate part of sludge deposits prevails. The burning rate of pellets is much lower than the burning rate of the original biomass, but the burning rate of a separate part of sludge deposits prevails. The conducted experiments showed the possibility of decontamination of sludge deposits and its disposal as an alternative fuel.

In the fifth chapter of the dissertation, based on a comprehensive study of heat and mass exchange processes of composite raw materials, an innovative thermal technology for the processing of sludge deposits was developed, for which a Ukrainian patent for the invention was applied for. According to the results of the research, the developed composite mixtures in the form of fuel granules based on old sludge sediments, peat and organic raw materials meet the standards of high-quality fuel.

In the general conclusions, the author presents the scientific and practical results of the dissertation research.

The scientific novelty of the obtained results is as follows:

- the technological properties of old silt deposits, peat, buckwheat husk, wood waste (sawdust) were determined and the optimal ratio of components was obtained for the purpose of high-quality granulation;

- the kinetic regularities of convective drying of composites, which allow intensifying the process compared to monocomponents, are determined and summarized;

- calculated relative coefficients and coefficients of drying, received formulas for the duration of drying of two- and three-component granules, which justify the selected regimes;

- numerical modeling of heat and mass transfer during convective drying of composite granules was performed and dependence graphs were obtained;

- for the first time, a study of the adsorption properties of composite granules was conducted, which made it possible to determine the equilibrium moisture content of the material, not to overdry the material and reduce energy costs;

- microscopic studies of the sorption capacity were conducted for the first time, which showed a small amount of organic matter and the presence of polyethylene gra-

nules;

- the heat of combustion of composite granules was determined for the first time, which justifies their sufficiently high energy indicators;

- for the first time, the effectiveness of burning composite pellets was studied, which recognized the possibility of neutralization of sludge deposits and its disposal as an alternative fuel.

Practical significance of the obtained results:

An innovative thermal technology for obtaining composite granules has been developed.

The practical significance of the results of the dissertation work is confirmed by the submitted patent of Ukraine for the invention "Method of obtaining fuel pellets from old sludge" and the received patent of Ukraine for the invention "Line for drying heat-labile materials".

Key words: *drying, burning, energy efficiency, sludge, peat, biomass.*

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Петрова, Ж.О., & Новікова, Ю.П. (2021, Березень 17). Підготовка сировини, створення композицій та гранулоутворення з застарілих мулових відкладень, торфу та біомаси. *Кераміка: наука і життя*, 1(50), 14-18. <https://doi.org/10.26909/csl.1.2021.2> [Google Scholar] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
2. Petrova, Z., Sniezhkin, Y., Paziuk, V., Novikova, Y., & Petrov, A. (2021). Investigation of the Kinetics of the Drying Process of Composite Pellets on a Convective Drying Stand. *Journal of Ecological Engineering*, 22(6), 159-166. <https://doi.org/10.12911/22998993/137676> [Іноземне видання наукометричної бази SCOPUS, Q3] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних)
3. Снежкін, Ю.Ф., Петрова, Ж.О., Пазюк, В.М., & Новікова, Ю.П. (2021). Стан технологій очищення стічних вод в Україні та світі. *Теплофізика та Теплоенергетика*, 43(1), 5-12. <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2021.1> [Фахове видання, Index Copernicus] (Внесок здобувача: проведення літературного огляду)
4. Петрова, Ж.О., Самойленко, К.М., Новікова, Ю.П., & Вишнівська, Т.А. (2021, Червень 25). Адсорбція застарілих мулових відкладень, торфу, тирси та композицій з них. *Кераміка: наука і життя*, 2(51), 13-18. <https://doi.org/10.26909/csl.2.2021.2> [Google Scholar] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
5. Петрова, Ж.О., Самойленко, К.М., Новікова, Ю.П., & Вишнівська, Т.А. (2021). Адсорбція застарілих мулових відкладень, торфу, лузги гречки та композицій з них. *Теплофізика та Теплоенергетика*, 43(4), 92-97. <https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2021.11> [Фахове видання, Index Copernicus] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
6. Снежкін, Ю.Ф., Петрова, Ж.О., Новікова, Ю.П., & Петров, А.І. (2021).

Шляхи утилізації застарілих мулових відкладень на паливо. *Екологічна безпека та природокористування*, 40(4), 21–31. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.4.21-31> [*Index Copernicus, Google Scholar*] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

7. Петрова, Ж.О., Кузнєцова, І.В., Миринін, А.І., & Новікова, Ю.П. (2022). Дослідження показника активності води для мулоторф'яних гранул. *Теплофізика та Теплоенергетика*, 44(1), 14-19. <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2022.2> [*Фахове видання, Index Copernicus*] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

8. Novikova, Yu., Petrova, Zh., Vorobiov, L., Chme,l V., Skliarenko, Ye., & Novikova, I. (2022). Investigation of the combustion process of the developed composite granules. *Paliva*, 14 (3), 124-130. <https://doi.org/10.35933/paliva.2022.03.03> [*Іноземне видання наукометричної бази SCOPUS, Q4*] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

9. Petrova, Zh.O., Kremnov, V.O., Korbut, N.S., & Novikova, Yu.P. (2020). Granulation of mixtures of obsolete sludge and peat. *Збірник тез доповідей XVIII Міжнародної наукової конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв»* (с. 14–16). Одеса: ОНАХТ. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

10. Новікова, Ю.П., & Петрова, Ж.О. (2020). Формування гранул з застарілих мулових осадів та торфу. *Збірник тез доповідей IV Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Перспективи Розвитку Територій: Теорія і Практика»* (с. 378-379). Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

11. Петрова, Ж.О., & Новікова, Ю.П. (2020). Гранулювання композицій з застарілих мулових осадів та торфу. *Збірник тез доповідей XIX міжнародної*

науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання" (с. 54 – 55). Київ: «КПІ ім. Ігоря Сікорського». (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

12. Petrova, Zh., Pazyuk, V., Novikova, Yu., & Stetsyuk, V. (2020). Granulation of compositions from obsolete sludge and peat. *Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми Сучасної Теплоенергетики»* (с. 109–111). Київ: НУБіП. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

13. Petrova, Zh., & Novikova, Yu. (2021). Processing of obsolete sludge. 6-й *Міжнародний молодіжний конгрес "Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування"*: збірник матеріалів (с. 168). Львів: Західно-Український Консалтинг Центр. DOI: 10.23939/book.ecocongress.2021. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

14. Petrova, Zh., Novikova, Y., & Petrov, A. (2021). Technological research of biogranules on the basis of peat and sludge. *Збірник тез доповідей XX міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання"* (с.19 – 21). Київ.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського». (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

15. Новікова, Ю.П., & Петров, А.І. (2021). Енергоефективне сушіння торф'яних гранул. *Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики: матеріали XIX Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених* (с. 86 – 87). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

16. Петрова, Ж.О., & Новікова, Ю.П. (2021). Гранулювання трикомпонентних композицій із застарілих мулових осадів, торфу та біомаси. *Матеріали XXII Міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана*

енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (с. 893 – 896). Київ: Інтерсервіс. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

17. Petrova, Zh., Novikova, Yu., & Petrov, A. (2021). Processing of granules based on peat and sludge. *Materials of the 3rd International Scientific Conference «Chemical Technology and Engineering»* (p. 196-197). Lviv: Lviv Polytechnic National University. <https://doi.org/10.23939/cte2021.01.196> (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

18. Petrova, Zh., Novikova, Yu., & Petrov A. (2021). Investigation of the kinetics of the drying process in different formation of peat- sludge granules. *Збірник тез доповідей VIII Міжнародна наукова конференція «Інноваційні енерготехнології»* (с. 22 – 23). Одеса: ОНАХТ. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

19. Новікова, Ю.П. (2021). Дослідження показника активності води двокомпонентних гранул на основі мулових відкладень та торфу. *Матеріали XII Міжнародної онлайн-конференції: Проблеми теплофізики та теплоенергетики* (с. 53 – 54). Київ : Симоненко О. І.. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

20. Снежкін, Ю.Ф., Петрова, Ж.О., Новікова, Ю.П., & Петров, А.І. (2021). Шляхи утилізації застарілих мулових відкладень на паливо. *Збірник II міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Ресурси. Енергія»* (с. 59-60). Київ. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

21. Novikova, Yu., & Petrov, A. (2021). Investigation of kinetics of drying of biogranules on the basis of peat, sludge and biomass. *Збірник тез доповідей XXI міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання"* (с. 77-79). Київ: «КПІ ім. Ігоря Сікорського». (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

22. Novikova, Yu., & Petrov, A. (2021). Investigation of the influence of temperature on the drying kinetics of composite biogranules. *Збірник тез доповідей ХХІХ всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Обладнання хімічних виробництві підприємств будівельних матеріалів"* (с. 20-23). Київ: «КПІ ім. Ігоря Сікорського». (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

23. Novikova, Yu., & Petrov, A. (2022). Research of kinetics of drying of biogranules at the experimental-industrial installation. *Збірник тез доповідей ХХІІ міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання"* (с. 22-24). Київ: «КПІ ім. Ігоря Сікорського». (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

24. Петрова, Ж. О., Самойленко, К. М., Новікова, Ю. П., & Вишнівська, Т. А. (2022). Адсорбція композицій та гранул на основі мулових відкладень та торфу. *Матеріали ХХІІІ Міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у ХХІ столітті»* (с. 275-277). Київ: Інтерсервіс. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

25. Чмель, В.М., Новікова, І.П., & Новікова, Ю. П. (2022). Технічний аналіз застарілих мулових відкладень. *Матеріали ХХІІІ Міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у ХХІ столітті»* (с. 277-279). Київ: Інтерсервіс. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

26. Petrova, Zh., Novikova, Yu., & Petrov, A. (2022). Study of the drying kinetics of thermolabile composite mixture. *Збірник тез доповідей ХХІІІ міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенерго-зберігаючі технології та обладнання"*, (с. 187 – 189). Київ: «КПІ ім. Ігоря Сікорського». (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

Наукові праці, що додатково відображають наукові результати дисертації:

27. Снежкін, Ю. Ф., Петрова, Ж. О., & Новікова, Ю. П. (2022). Способи переробки мулових відкладень. *Збірник праць «Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики»* (С. 192 -195). Київ : ІВЦ АЛКОН НАН. (Внесок здобувача: проведення досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

28. Снежкін, Ю. Ф., Петрова, Ж. О., & Новікова, Ю. П. (2022). Дослідження кінетики процесу сушіння композиційних гранул на конвективному сушильному стенді. *Збірник праць «Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики»* (С. 196-203). Київ : ІВЦ АЛКОН НАН. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

29. Петрова, Ж.О., Пазюк, В.М., Новікова, Ю.П., & Петров, А.І. (2022). Дослідження з переробки торфу на композиційне паливо. *Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування* : колективна монографія (93 -103). Київ: Яроченко Я. В. *Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних*).

30. Петрова, Ж.О., Снежкін, Ю.Ф., Пазюк, В.М., Кремньов, В.О., Новікова, Ю.П., & Петров, А.І. (2021). Спосіб одержання паливних гранул із застарілих мулових відкладень (Заявка №а 2021 04081). Національний Орган Інтелектуальної Власності Державне підприємство «Український інститут інтелектуальної власності». (Внесок здобувача: розробка та створення способу отримання паливних гранул, проведення досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних та патентний пошук).

31. Снежкін, Ю.Ф., Петрова, Ж.О., Новікова, Ю.П., & Петров, А.І. (2022). Лінія для сушіння термолабільних матеріалів (Патент України на винахід № 125421). Національний Орган Інтелектуальної Власності Державне підприємство «Український інститут інтелектуальної власності». (Внесок здобувача: розробка та створення лінії для сушіння термолабільних матеріалів, проведення досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних та патентний пошук)

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	23
ВСТУП.....	24
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНОЛОГІЙ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОТРИМАННЯ БІОПАЛИВА’	30
1.1. Аналіз сучасного стану розвитку технології очищення стічних вод	30
1.2. Огляд сучасного рівня технологій і техніки в галузі очистки стічних вод.....	32
1.3. Технологічні процеси обробки осадів стічних вод.....	37
1.4. Сучасні технології утилізації осадів спалюванням	51
1.5. Виробництво, сушіння та спалювання паливних біобрикетів як засіб ефективного процесу утилізації осаду.....	55
1.6. Висновки до першого розділу та завдання дослідження	58
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	59
2.1. Матеріали досліджень	59
2.2. Експериментальні установки та методики досліджень	60
2.2.1. Гідравлічний прес HLR-12 для формування одиночних гранул з мулових відкладень та гранул на їх основі.....	60
2.2.2. Шнековий механічний пристрій для формування партій гранул з мулових відкладень та гранул на їх основі.....	61
2.2.3. Експериментальний конвективний сушильний стенд	63
2.2.4. Визначення зольності утворених гранул на основі мулу в муфельній лабораторній електропечі	67
2.2.5. Дослідно-промисловий сушильний стенд камерного типу.....	68
2.2.6. Методика визначення рівноважної вологості композитної сировини та її компонентів	69
2.2.7. Методика визначення показника активності води композитної сировини та її компонентів	74

	21
2.2.8. Калорифер для дослідження теплоти згоряння	76
2.2.9. Методика проведення технічного аналізу твердого палива.....	79
2.2.10. Методика спалювання окремої частки мулових відкладень	80
2.2.11. Пальникові пристрої для спалювання композитного палива та його компонентів.....	82
2.2.12. Методика по визначенню хімічного складу золи паливних гранул.....	84
2.4. Висновки до другого розділу.....	85
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОМАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ СУШІННІ КОМПОЗИТНОЇ СИРОВИНИ НА ОСНОВІ ЗАСТАРІЛИХ МУЛОВИХ ВІДКЛАДЕНЬ, ТОРФУ ТА БІОМАСИ	86
3.1. Підготовка сировини, створення композиту та гранулоутворення з застарілих мулових відкладень, торфу та біомаси.....	86
3.2. Дослідження кінетики процесу сушіння композитних гранул на основі застарілих мулових відкладень, торфу та біомаси на конвективному сушильному стенді.....	93
3.2.1. Дослідження кінетики сушіння композитних гранул після гранулювання на гідравлічному пресі (тиск формування 2,118 – 2,197 МПа).....	94
3.2.2. Дослідження кінетики сушіння композитних гранул на конвективному сушильному стенді після гранулювання на шнековому механічному пристрої (тиск формування 7,5 – 8,0 МПа).....	98
3.2.3. Дослідження кінетики сушіння композитних гранул на дослідно-промисловій сушильній установці після гранулювання на шнековому механічному пристрої	103
3.3. Розрахунок тривалості та швидкості процесів сушіння композитних гранул.....	105
3.4. Чисельне моделювання процесу тепломасопереносу в процесі сушіння композитних гранул.....	117

3.5. Висновки до третього розділу	130
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТРИСТИК РОЗРОБЛЕНОГО КОМПОЗИТНОГО БІОПАЛИВА	132
4.1. Дослідження процесів сорбції композитної сировини на основі застарілих мулових відкладень, торфу та біомаси	132
4.2. Дослідження показника активності води для композитної сировини на основі застарілих мулових відкладень, торфу та біомаси	142
4.3. Дослідження теплоти згоряння розробленого композитного палива на основі застарілих мулових відкладень, торфу та біомаси	146
4.4. Дослідження процесу спалювання розробленого композитного палива на основі застарілих мулових відкладень, торфу та біомаси	150
4.4.1. Спалювання мулових відкладень	150
4.4.2. Спалювання композитних гранул на основі застарілих мулових відкладень, торфу та біомаси	159
4.4.3. Визначення хімічного складу золи паливних гранул	163
4.5. Висновки до четвертого розділу.....	168
РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА КОПОЗИТНОГО ПАЛИВА НА ОСНОВІ ТОРФУ, ЗАСТАРІЛИХ МУЛОВИХ ВІДКЛАДЕНЬ ТА БІОМАСИ	170
5.1. Технологія отримання композитного палива на основі мулових відкладень, торфу та біомаси.....	170
5.2. Розробка технологічної лінії виробництва композитного палива на основі мулових відкладень, торфу та біомаси	170
5.3. Висновки до п'ятого розділу.....	176
ВИСНОВКИ.....	178
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	179
ДОДАТОК А.....	192
ДОДАТОК Б.	200

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

W – вологість, %;

m – маса, г;

τ – тривалість, с;

A – зольність, %;

φ – відносна вологість повітря, %;

p – парціальний тиск, мм.рт.ст.;

p_s – тиск насичення водяної пари при тиску 760 мм рт.ст., мм.рт.ст.;

a_w – активність води, %;

t – температура теплоносія, °С;

v – швидкість теплоносія, м/с;

d – діаметр гранул, мм;

χ – відносний коефіцієнт сушіння;

K – кінетичний коефіцієнт сушіння;

Rb – число Ребіндера;

b – температурний коефіцієнт сушіння;

c – питома теплоємність матеріалу, кДж/(кг °С);

r – питома теплота фазового перетворення, кДж/кг;

j_v – густина потоку пари, кг/(м²с);

U_s – відносна вагова концентрація водяної пари на поверхні випаровування, кг/(м²с);

V – леткі речовини, %;

Скорочення

ОСВ – осад стічних вод;

БСА – Бортницька аераційна станція;

М – мулові відкладення;

Т – торф

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Актуальним завданням на сучасному рівні розвитку суспільства – це збереження природних ресурсів та навколишнього середовища від забруднень, що утворюються внаслідок людської дії. Необхідність збереження та збільшення потужності систем зворотного і повторного використання водних та земельних ресурсів, розробка безвідходних та ресурсозберігаючих технологій.

Через високу концентрацію ксенобіотиків і їх високу стійкість до деградації процес самоочищення природи відбувається дуже повільно. Тому актуальним екологічним завданням є відновлення навколишнього середовища, зокрема раціональне поводження з промисловими та сільськогосподарськими відходами, відновлення родючості земель, спричинених отрутохімікатами, очищення осадів стічних вод на очисних спорудах, очищення водних джерел. Перерахованими екологічними проблемами сучасної цивілізації є утилізація відходів виробництва, які пов'язані відходами очисних споруд.

В результаті господарської та промислової діяльності людини рідкі відходи утворюються у вигляді стічних вод і скидаються в каналізацію. У процесі очищення стічних вод на очисних спорудах утворюються мулові відкладення, і осад зневоднюється на місці в природному стані. Цей процес довготривалий і охоплює велику територію. Крім того, зберігання мулових відкладень призводить до поширення несприятливого газоповітряного фону, забруднення токсичними компонентами ґрунту та підземних вод.

Утилізація стічних вод також передбачає утилізацію великих об'ємів мулових відкладень (в Україні понад 1,8 млн. тонн на рік) [1]. Вони накопичуються протягом багатьох років на мулових ділянках і становлять небезпеку для навколишнього середовища в розроблених зонах «мулових картах», розташованих поблизу місць зберігання або населених пунктів. Зберігання мулових відкладень без спеціальних дозволів та умов категорично забороняється та не може захоронюватися на загальних полігонах. Вимоги до мулових майданчиків регла-

ментуються ДСТУ 8727:2017 [2].

Проблема утилізації мулових відкладень повністю не вирішена. Якщо раніше дозволялось використовувати мулові відкладення у якості органічних добрив за рахунок високої концентрації фосфору та азоту. В той же час мулові відкладення є джерелом забруднення, так як містять надвисокий вміст важких металів і не можуть застосовуватись в сільському господарстві.

Тому для вирішення цієї проблеми в останні часи все більше набуває поширення спалювання мулу. Названий процес також дає можливість отримати позитивний баланс енергії і ефективно використовувати теплотворну здатність мулу [3].

Тому, найбільш доцільно вирішувати технологічне завдання переробки мулових відкладень за рахунок спалювання і розробки енергоефективних технологій з одночасним одержанням теплової та електричної енергії.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана згідно плану НДР Інституту технічної теплофізики НАН України у відділі «Тепломасопереносу в теплотехнологіях» за науковою тематикою: 1.7.1.891 «Розробка теплотехнології створення композиційного палива на основі торфу і застарілих мулових осадів та біомаси» (ДР 0120U100613), у якій авторка бере участь як виконавець, приймає участь в проведенні експериментальних досліджень, аналізі та обробці дослідних даних, підготовці публікацій.

Мета та завдання дослідження. Мета дослідження – переробка застарілих мулових відкладень на альтернативне паливо.

Для досягнення мети були поставлені та вирішені наступні задачі дослідження:

- аналіз сучасного стану існуючих технологій отримання біопалива для можливого їх використання в технологіях виробництва композиційного біопалива;
- розробка підготовки сировини до сушіння;
- розробка гранулоутворення композиційного палива на основі застарілих мулових відкладень, торфу та біомаси;

- дослідження тепломасообмінних процесів при сушінні композиційної сировини на основі застарілих мулових відкладень, торфу та біомаси;
- дослідження адсорбційних властивостей матеріалів;
- дослідження питомої теплоти згоряння;
- дослідження процесу горіння композиційних гранул;
- розробка енергозберігаючої теплотехнології з виробництва альтернативного палива на основі застарілих мулових відкладень.

Об'єкт дослідження – процеси при сушінні, зберіганні та спалюванні мулових відкладень та композиту на їх основі.

Предмет дослідження – види сировини: застарілі мулові відкладення, фрезерний торф, гречана лузга, відходи деревини (тирса) та їх композитні суміші, технології та обладнання виготовлення твердих видів альтернативного палива і біопалива.

Методи дослідження. Експериментальні дослідження проводились із використанням експериментального методу дослідження кінетики конвективного сушіння, для оцінки якості композитних гранул використані стандартні методи дослідження адсорбційних властивостей, показника активності води, питомої теплоти згоряння, розрахунки математичної моделі теоретичного дослідження тепломасопереносу здійснювалися засобами програмування DELPHI.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються:

Достовірність отриманих наукових положень та висновків сформульованих в дисертації обґрунтовано методами та збігом теоретичних і експериментальних результатів досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів:

- визначено технологічні властивості застарілих мулових відкладень, торфу, лузги гречки, відходів деревини (тирси) та отримано оптимальне співвідношення компонентів з метою якісного гранулювання;
- визначено та узагальнено кінетичні закономірності конвективного сушіння композитних, які дозволяють інтенсифікувати процес порівняно з моно-

компонентами;

- розраховані відносні коефіцієнти та коефіцієнти сушіння, отримані формули тривалості сушіння дво- та трьохкомпонентних гранул, які обґрунтовують обрані режими;

- виконано чисельне моделювання тепломасопереносу при конвективному сушінні композитних гранул та отримано графіки залежностей;

- вперше проведено дослідження адсорбційних властивостей композиційних гранул, дозволили визначити рівноважні вологості матеріалу, не персушувати матеріал та зменшувати енергетичні витрати;

- вперше проведені мікроскопічні дослідження сорбційної ємності, які показали незначну кількість органіки та наявність в гранулах поліетилену;

- вперше визначено теплоту згоряння композитних гранул, яка обґрунтовує їх достатньо високі енергетичні показники;

- вперше вивчено ефективність спалювання композитних гранул за якої визначено можливість знешкодження мулових відкладень та його утилізації в якості альтернативного палива.

Практичне значення одержаних результатів:

Розроблена інноваційна теплотехнологія отримання композитних гранул.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи підтверджується поданим патентом України на винахід «Спосіб одержання паливних гранул із застарілих мулових відкладень» та отриманим патентом України на винахід «Лінія для сушіння термолабільних матеріалів».

Особистий внесок здобувача. Здобувачем виконано аналіз літератури, основний обсяг експериментальної роботи, обробку та аналіз отриманих даних. Участь у постановці загальної задачі досліджень, трактування та узагальнення експериментальних результатів. Підготовка доповідей та статей.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи обговорювались та отримали схвалення на XVIII Міжнародній науковій конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв» (Одеса, 2020), IV Всеукраїнській науково-практичній конференції

здобувачів вищої освіти і молодих учених «ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТЕРИТОРІЙ: ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА» (Харків, 2020), XIX міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання" (Київ, 2020), Міжнародній науково-практичній конференції «ПРОБЛЕМИ СУЧАСНОЇ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ», присвячується 100-річчю професора Драганова Бориса Харлампійовича (Київ, 2020), на 6-му Міжнародному молодіжному конгресі "Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування" (Львів, 2021), XX міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання" (Київ, 2021), XIX Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики: матеріали» (Київ, 2021), XXII Міжнародній науково-практичній конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (Київ, 2021), 3rd International Scientific Conference «Chemical Technology and Engineering» (Proceedins) (Львів, 2021), VIII Міжнародній науковій конференції «Інноваційні енерготехнології» (Одеса, 2021), XII Міжнародній онлайн-конференції: Проблеми теплофізики та теплоенергетики (Київ, 2021), Міжнародній науково-практичній конференції «Екологія. Ресурси. Енергія» (Київ, 2021), XXI міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання" (Київ, 2021), XXIX всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Обладнання хімічних виробництві підприємств будівельних матеріалів"(Київ, 2021), на XXII міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання" (Київ, 2022), на XXIII Міжнародній науково-практичній конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (Київ, 2022), XXIII міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенерго-зберігаючі технології та обладнання" (Київ, 2022).

Публікації. Основні положення та наукові результати викладено у 31 публікаціях наукових робіт, у тому числі: 1 колективна монографія, 3 статей у наукових спеціалізованих виданнях України, перелік яких затверджено МОН України; 2 статті у наукових виданнях, які включено до міжнародних наукометричної баз даних Scopus; 5 статей у наукових виданнях України та за кордоном; опубліковано 18 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій, одержано 1 патент України на винахід та подано 1 заявку патенту України на винахід.

Структура дисертації. Дисертаційна робота викладена на 202 сторінках, складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Обсяг основного тексту дисертаційної роботи становить 170 сторінка, включно 109 рисунків, 22 таблиці та 2 додатки. Список використаних джерел містить 126 найменувань.

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНОЛОГІЙ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОТРИМАННЯ БІОПАЛИВА

1.1. Аналіз сучасного стану розвитку технології очищення стічних вод

Джерелом одержання додаткової сировинної бази альтернативних енергоносіїв потенційно можуть стати очисні споруди, але через вади сучасних технологій очищення стічних вод їх потенціал не використовується повністю. В цілому системи водовідведення працюють споживаючи енергію та ресурси, створюючи при цьому відходи та продукт, які не піддаються рециклінгу.

У поверхневі водні об'єкти України за 2021 рік скинуто близько 4,7 млрд м³ стічних вод. З них було скинуто забруднених стічних вод близько 0,54 млрд м³ (11,6% від загального обсягу стічних вод); нормативно-чистих без очистки – 2,71 млрд м³ (57,9%); нормативно очищених – 1,43 млрд м³ (30,5%). Найбільше забруднених стічних вод було скинуто в Дніпропетровській області 0,12 млрд м³ (22,6% від загального обсягу забруднених стічних вод), в Львівській області 0,119 млрд м³ (22,1%), в Донецькій області 0,09 млрд м³ (16,6%), в Одеській області 0,033 млрд м³ (6,1%). Добувною промисловістю та розробленням кар'єрів було скинуто забруднених стічних вод 0,1 млрд м³ (18,5%), переробною промисловістю – 0,016 млрд м³ (3%); сільське господарство – 0,029 млрд м³ (5,4%) та житлово-комунальним господарством – 0,381 млрд м³ (70,6%). У процесі очищення забруднених стічних вод на каналізаційних спорудах України утворюється біологічно та бактеріологічно забруднені відкладення, які також потребують утилізації [4].

Поширені в Україні технології біоремедіації не гарантують видалення біологічних елементів. Щорічно разом зі стічними водами у поверхневі водні об'єкти надходить: нафтопродуктів – $224,9 \cdot 10^3$ кг; нітратів – $46,8 \cdot 10^6$ кг; СПАР – $0,2 \cdot 10^6$ кг; фосфатів – $5,7 \cdot 10^6$ кг; завислих речовин – $21,6 \cdot 10^6$ кг; азоту – $5,9 \cdot 10^6$ кг; нітритів – $1,7 \cdot 10^6$ кг; заліза – $0,4 \cdot 10^6$ кг; тощо [5].

Крім очищеної води, на очисних спорудах утворюється група речовин, які називаються осадам стічних вод (ОСВ). Для обробки великих об'ємів стічних вод

використовують системи очищення, засновані на утворенні активного мулу або мулового осаду, який залишається роками на звалищах і його потрібно переробляти [6 – 8].

Бортницька аераційна станція (БСА) — єдина очисна станція в Києві та сусідніх містах і селищ Київської області. Спроектована і побудована на 3 мільйони тонн осадів БСА в 60-х роках минулого століття, на сьогодні кількість оцінюється приблизно в 10-14 мільйонів тонн. Вся ця маса утримується загороджувальною дамбою і повинна постійно підніматися в міру цілодобового надходження $10\,000\text{м}^3$ осаду зі станції аерації. Враховуючи перепад висот між муловими картами та річкою Дніпро в 46 м, наслідки прориву дамби є катастрофічними. Єдиний шлях, необхідний у цій ситуації, — це обробка переробка мулових відкладень [9].

Необхідність проведення досліджень у даному напрямку зумовлена тим, що:

- збільшуються джерела мулоутворення і розширюється географія їх поширення, тому їх кількість з кожним роком збільшується як в абсолютних значеннях, так і на душу населення.

- склад мулових відкладень стає дедалі складнішим, в ньому міститься все більше екологічно небезпечних компонентів;

- дедалі більше негативне ставлення до «традиційних» методів утилізації цього виду відходів – вивезення на звалище;

- законодавство створює жорсткі умови для збереження відходів різного походження;

- недостатньо впроваджені інноваційні технології із утилізації відходів;

- використовується новий економічний підхід, який включає підвищення цін на утилізацію відходів і позицію щодо систем утилізації відходів від приватного бізнесу та великих інвесторів.

Виходячи з вищенаведеного, необхідно розробити комплексну переробку мулових відкладень, що включає в сукупності соціальні, економічні, технологічні, інженерні аспекти і дозволяє забезпечити екологічну безпеку запропонованих рішень на основі світових технологій.

1.2. Огляд сучасного рівня технологій і техніки в галузі очистки стічних вод

У розвинених країнах виробляється близько 19-20 кг сухої речовини ОСВ на людину на рік. Наприклад, як видно з рис. 1.1, коли населення таких країн, як Франція (67,39 млн осіб) і Великобританія (67,22 млн осіб) близькі, виробництво ОСВ у Франції 2,4 рази менше за Великобританію. Україна з населенням 44,13 млн. перевищує вироблену сумарну кількість ОСВ у Франції та Англії, тобто 1802 тис. т. протягом одного року. Лідером з виробництва ОСВ є Росія, на другому місці, але на сьомому за річним обсягом мулу Україна [10 – 12].

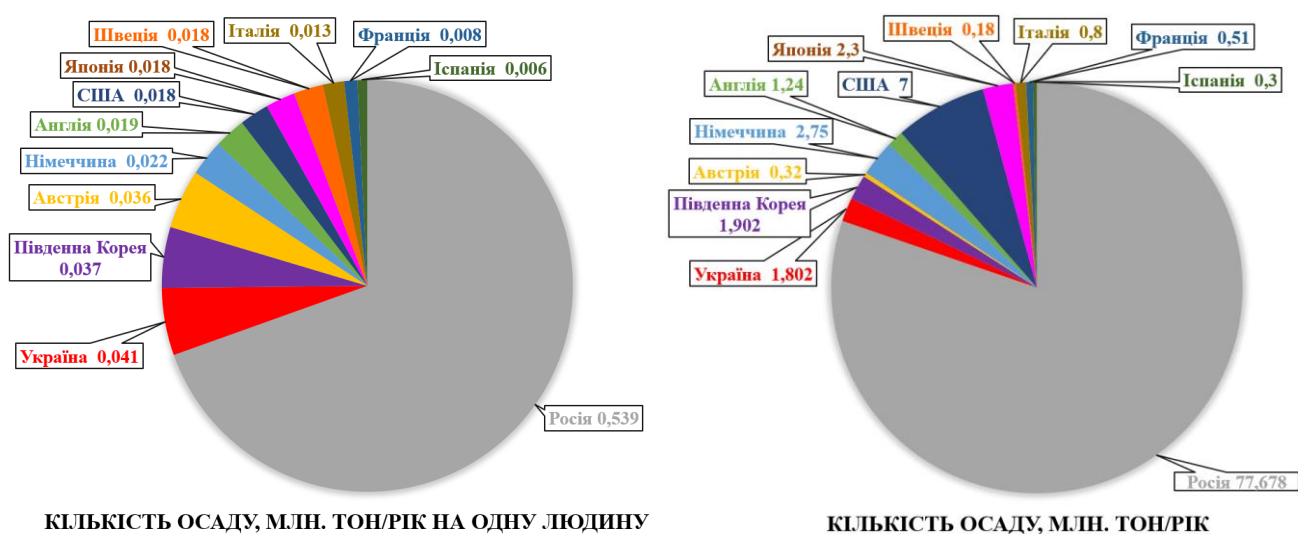


Рис. 1.1. Кількість осаду стічних вод в різних країнах світу [1, 10, 13 – 18]

На рис. 1.2 наведено методи утилізації ОСВ у розвинених країнах. У всьому світі очищення/утилізація стічних вод відбувається шляхом використання в сільському господарстві, захоронення на звалищах, скидання в океан або спалювання [19 – 22]. Як показано на рис. 1.2, значна частина осаду стічних вод утилізується на звалищах. Перед скиданням в море або океан країни ЄС та США проводять біохімічне очищення активного мулу під час якого проходить очищення від мікроорганізмів, ксенобіотиків, токсичних речовин, важких металів тощо.

Захоронення на звалищах у майбутньому країни планують скоротити. Використання мулових відкладень у сільському господарстві з 25% до 40% планує збільшити Німеччина. У Фінляндії від загальної кількості мулу, що використовується як добриво, одна третина використовується на місці, а одна

третина використовується для будівництва основних доріг; 17% – для міського озеленення, близько 16% компостується [10 – 12].

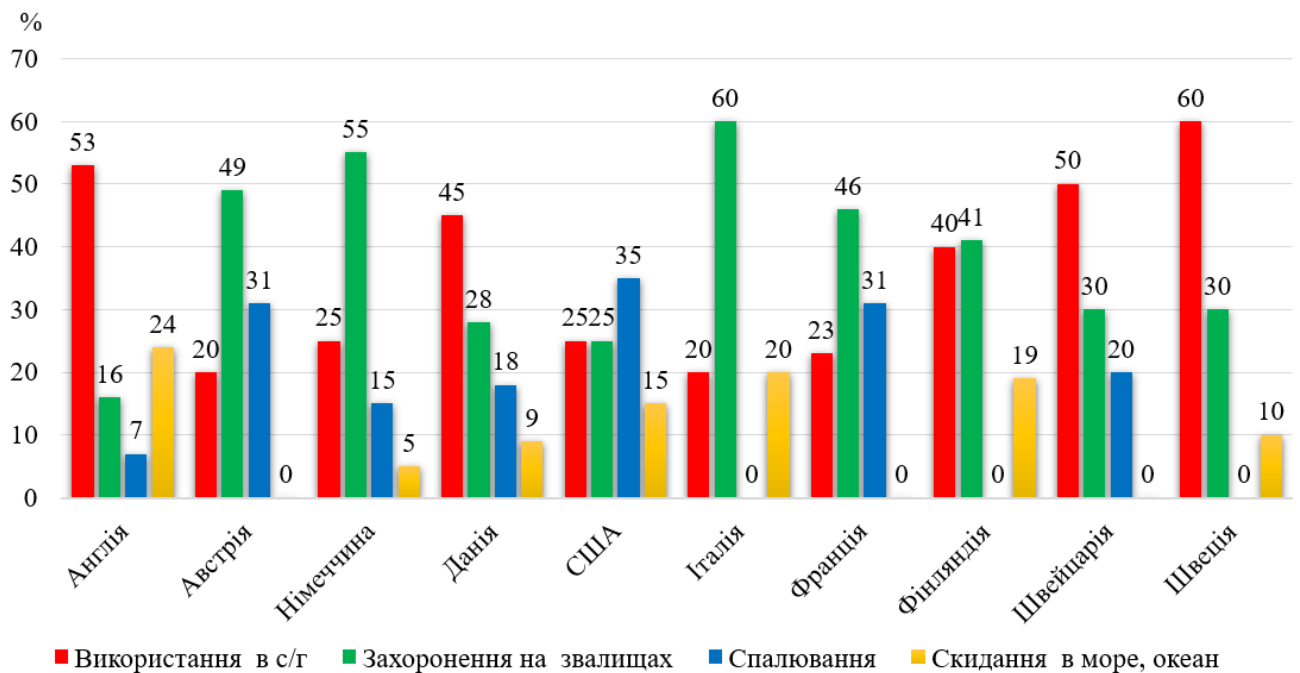


Рис. 1.2. Основні методи утилізації осадів стічних вод

У розвинених країнах, таких як Японія та США, основним методом обробки осаду стічних вод є спалювання. Основною перевагою цього методу полягає в тому, що він вимагає меншої площі для утилізації, не залежить від клімату та сезону, а також є невелика кількість зольного продукту, який можна безпечно використовувати при будівництві доріг.

Крім традиційних методів переробки стічних вод, наведених у на рисунку 1.2, у світі використовуються нові, не менш ефективні методи [9].

На рис. 1.3 представлена класична схема обробки стічних вод, яка включає в себе зернисту камеру для виділення твердих часток, первинні та вторинні засоби очищення, аеротенки для біологічного очищення [23]. Осад і активний мул отримують в первинному відстійнику для подальшої обробки. Вони спочатку анаеробно перетворюються з подальшим виробництвом біогазу, а потім зневоднюються і використовуються в сільському господарстві або для спалювання. Таку схему обробки стічних вод доцільно використовувати для активного мулу.

У країнах Європейського Союзу аеробне та анаеробне очищення стічних вод є досить популярним. Анаеробна обробка осаду стічних вод найчастіше

використовується в Іспанії, Великобританії, Італії, Фінляндії та Словаччині, тоді як аеробна технологія перетворення осаду стічних вод використовується в Чехії та Польщі [24]. Дослідження показали, що велика кількість гумінових кислот утворюється при аеробному перетворенні в осадах стічних вод, при анаеробному перетворенні – білки і ароматичні амінокислоти, що входять до складу органічних мінеральних добрив у сільському господарстві [25].

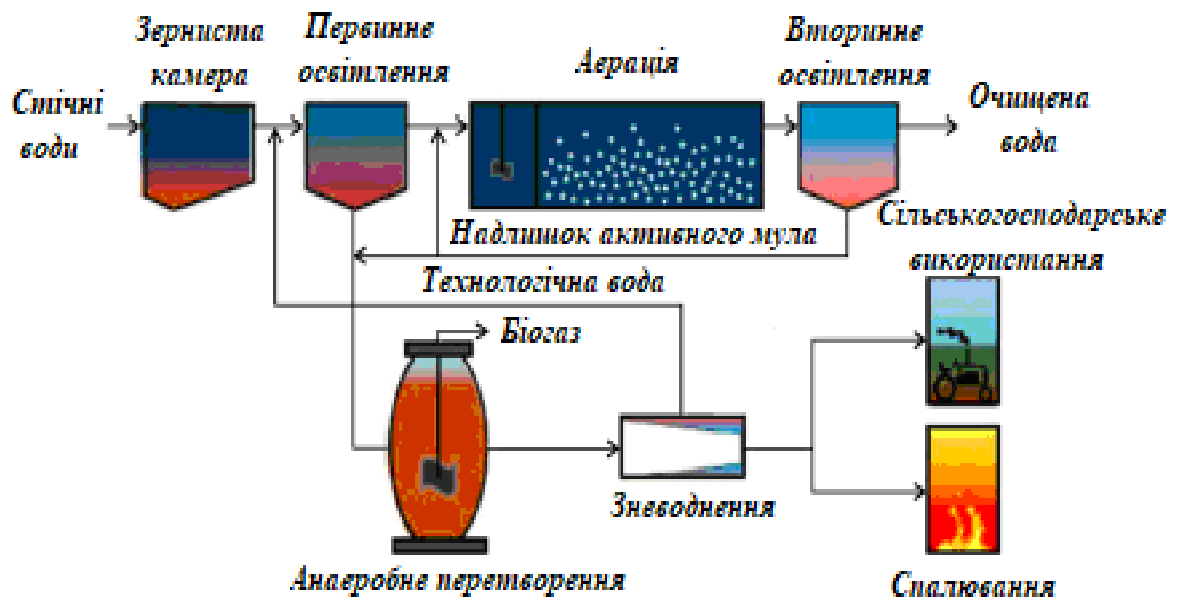


Рис. 1.3. Класична схема обробки стічних вод

Деякі країни Європейського Союзу мають тенденцію до збільшення утилізації осаду стічних вод у сільському господарстві. Тому в Німеччині осад стічних вод використовується як стабілізоване, компостоване та пастеризоване добриво. Для знищення яєць паразитів і патогенних мікроорганізмів пастеризацію проводять нагріванням при 65-70°C протягом 20-30 хв. Також використовують спалювання активного мулу як заміну нафти та вугілля. У Німеччині та Австрії також великий інтерес до розробки спільних компостних установок для відходів і осадів стічних вод [26].

У сучасних умовах спалювання осадів стічних вод і твердих побутових відходів використовується в багатьох країнах. Однак вміст твердих речовин в мулу має становити 40% або більше, а загальна вологість – 60% або менше. Перед спалюванням його необхідно зневоднити і висушити. Для спалювання осадів

використовуються в спеціальних печах (циклон, барабан, печі з псевдозрідженим шаром). Продукти згоряння газу, такі як оксиди сірки, миш'як, важкі метали, сірководень і хлор забруднюють атмосферу. При переробці 1 т відходів в атмосферу викидається 27 кг токсичних речовин. Розрахунки показують, що кількість теплової енергії, яка використовується для спалювання відходів, на 30% перевищує ту, яку отримують при утилізації [27].

У Європі все більшої популярності набуває технологія виробництва пелет з біовугілля або АСВ гранул (від англ. Accelerated Carbonized Biomass). Використання цієї технології для біомаси, в тому числі органічних відходів, збільшує теплоту згоряння, енергоспоживання та покращує параметри горіння. З цієї точки зору цікавим є процес карбонізації осаду стічних вод, і в цьому відношенні термічна обробка на місці осаду не тільки зменшує накопичення, але й дозволяє надалі використовувати осад як альтернативне паливо [28].

Також відомі технології із застосування низькотемпературного піролізу в процесі спалювання осаду. Найбільша кількість низькотемпературних піролізних установок спрямована на переробку сумішей побутових відходів і осадів стічних вод, який впроваджують в Японії, Італії, Німеччині та інших країнах. Обробка таких сумішей відбувається з розрахунку від 70 до 30%. Піроліз відходів відбувається при температурі 250 - 400°C. Особливістю низькотемпературного піролізу є те, що оброблений мул перетворюється на вуглеводні спочатку в газоподібному стані, а після конденсації виходить основний продукт «сира нафта» [12, 29]. Позитивним моментом низької температури піролізу є те, що вона виключає можливість випаровування токсичних солей важких металів.

В Японії перевага надається обробці осаду, такому як спалювання, газифікація, сушка та карбонізація [20]. Водночас мулові відкладення є цінним джерелом компонентів добрив, для виробництва адсорбентів та для очищення стічних вод від іонів важких металів [30].

У Європі та США впроваджується технологія переробки органічних відходів для біогазових установок на базі метантенків. Для ефективної дії необроблений осад необхідно попередньо підігріти і змішати з збродженим осадом.

Співвідношення змішування активного і зброженого мулу має бути 1:10. Біогазова технологія вважається одним з найефективніших методів знезараження та обробки органічних відходів з різних джерел, поряд з одночасним виробництвом біогазу, електроенергії та екологічно чистих добрив [26]. Склад біогазу і частка метану змінюються в залежності від типу органічної речовини, що міститься в стічних водах.

За даними Китаю, перспективним є виробництво біогазу та електроенергії шляхом анаеробної обробки та зневоднення [31]. Одночасне спалювання осадів та вугілля використовується як додаткове паливо в цегляних та цементних печах [29, 32]. Також у Китаї відкладення мулу використовуються для виготовлення будівельних матеріалів, таких як цемент, цегла та інші [33].

Високоєфективна технологія утилізації мулу з використанням вермікультури може значно підвищити ефективність очищення та дезінфекції мулу та зменшити викид шламу на муловій ділянці. Виробництво з осаду вермікомпосту є економічним з точки зору ефективності. Вартість обробки 1 т мулу за допомогою хробаків становить в середньому 120 грн., що невисоко порівняно з вартістю традиційної обробки полів зрошення або зневоднення та компостування. Оскільки 100% мулу викликає загибель комах, пропонується включати біомасу, включаючи опале листя, у співвідношенні 60–40% щодо оптимальної маси мулу [34].

В Україні, на відміну від інших країн, існує проблема так званих мулових майданчиків із «застарілим» мулом, який зберігався багато років і майже повністю видалив органічні домішки, що значно ускладнює процес очищення. У «активному» мулі – близько 80% органічних і 20% мінеральних домішок [35]. У більшості випадків території, передбачені для зберігання мулу в Україні, переповнені і не справляються з безперервним потоком наносів, що вимагають додаткової площі (понад 120 га на рік) [36]. Наприклад, у Києві осад не видаляли понад 25 років, у Херсоні – понад 25 років, у Смілі – понад 30 років.

Технологія очищення стічних вод в Україні. Однією з найбільш поширених технологій очищення стічних вод в Україні є відстоювання стічних вод з утворенням осаду, який потім обробляється метановим бродінням для нейтралізації

патогенних мікроорганізмів та розщеплення жироподібних речовин. Відокремлена з відстійника вода направляєється в аеротенк і контактує з активним мулом. Регенований активний мул подається в контактний бак з регенераційної установки, яка зазвичай є тим же аеротенком, що і контактна установка. Після змішування мулу з активним мулом, який поглинає зважені тверді речовини, суміш відокремлюють у вторинному відстійнику для утворення очищених стічних вод і вторинного мулу. Останній ділиться на два потоки. Найбільша частина відправляється на переробку і потім змішується зі стічними водами, а невелика частина становить надлишок активного мулу, який є основною частиною мулу, що утворюється на очисних спорудах. Через свою громіздкість мул піддається аеробній стабілізаційній обробці та направляєється на мул, щоб видалити великі площі землі та створити екологічну небезпеку як для навколишнього середовища, так і для людей [9].

1.3. Технологічні процеси обробки осадів стічних вод

Обробка осадів проводиться з метою отримання кінцевого продукту, завдає мінімальної шкоди навколишньому середовищу або придатного для утилізації в виробництві.

Технологічний процес очищення осаду стічних вод за типовою схемою має такі основні етапи: ущільнення, стабілізація органічних фракцій, кондиціонування, зневоднення, термообробка або дезінфекція, використання в народному господарстві (рис. 1.4) [37].

Ущільнення. Першим етапом технологічного планування процесу обробки мулу є етап ущільнення, спрямований на видалення вільної води. Ущільнення видаляє до 60% вільної вологи і зменшує масу осаду в 2,5 рази. Для практичної реалізації цього етапу використовуються гравітаційний, флотаційний, відцентровий, вібраційний, фільтраційний методи та їх комбінації [38].

Гравітаційне ущільнення є найпоширенішим і простим методом зниження вмісту води в осаді стічних вод у первинних відстійниках з тривалістю ущільнення від 4 до 24 годин при низькому споживанні енергії. У ряді випадків процес

ущільнення посилюється агломерацією, перемішуванням, співкомпресією різних видів опадів, нагріванням до 80-90 °С.

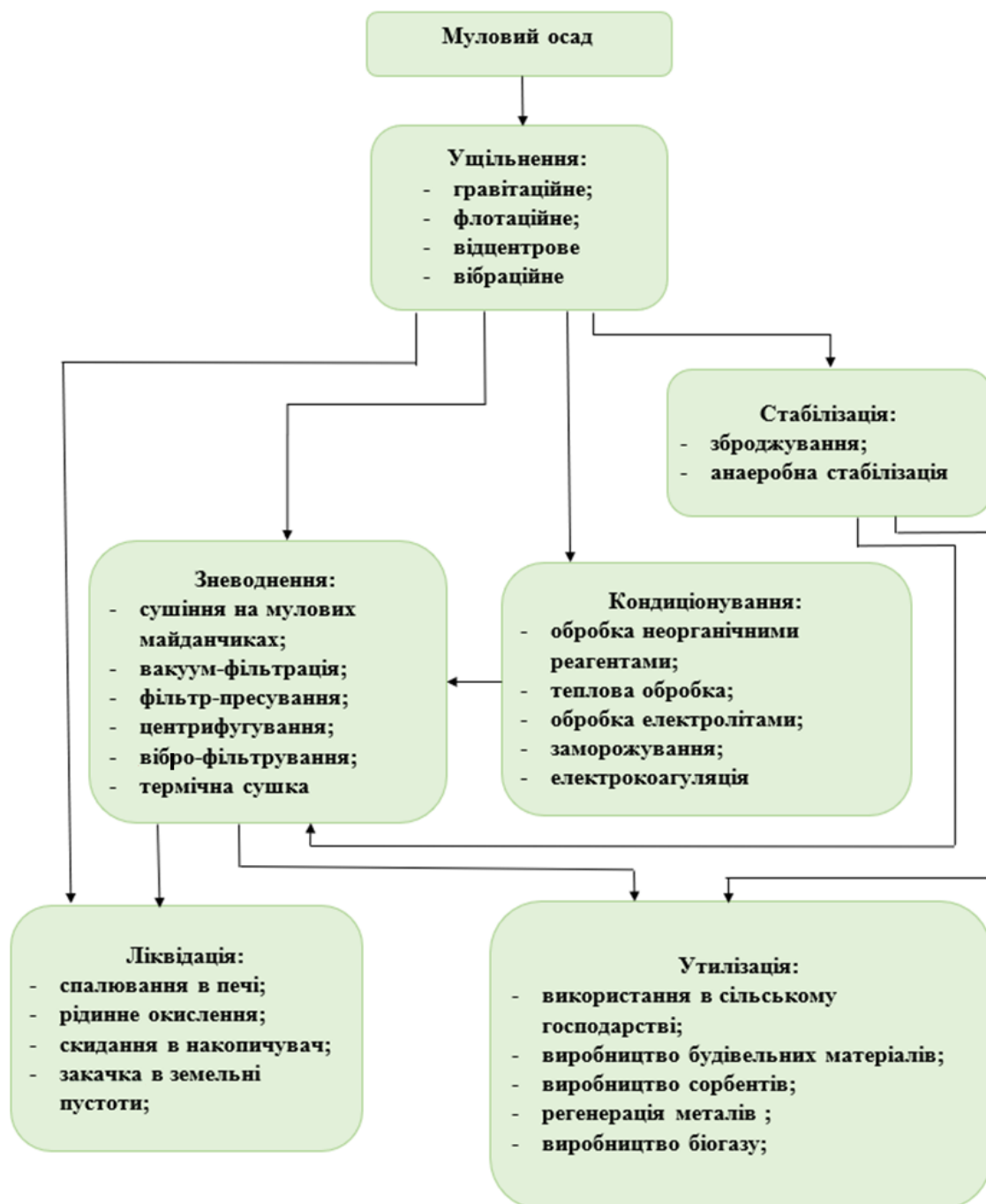


Рис. 1.4. Технологічні процеси обробки осадів стічних вод

Флотаційне ущільнення – займає менше часу і дозволяє досягти більш глибокого та регульованого об’єму ущільнення у флотаційній установці, але процес є енергоємним. Концентрація мулу в очищеній муловій воді становить 200 - 300 мг/дм³, що вище, ніж отримане за допомогою гравітаційного ущільнення, але складніше в експлуатації. Тривалість перебування активного мулу в зоні

ущільнення 2-3 години, тиск насичення повітрям – 0,3-0,4 МПа. Підвищення ступені ущільнення та скорочення тривалості процесу, досягається шляхом нагрівання, додавання хімічних реагентів, розведення активного мулу очищеними стічними водами та належної герметизації мулу від осаду в первинному відстійнику.

Поліелектроліти додають для посилення флотаційного процесу ущільнення мулу і в деяких випадках збільшення концентрації вивантажуваного осаду.

Механічне ущільнення відбувається в шнекових, барабанних і стрічкових мулових ущільненнях і центрифугах. Ущільнюючі центрифуги розроблені для ефективного ущільнення при низькій потужності та споживанні флокулянта з найбільш ефективним зниженням вологості. На відміну від інших методів механічного ущільнення, відцентрові сепаратори можуть працювати без додавання флокулянтів, але набагато менш ефективні при відділенні рідких фракцій від твердих.

Стабілізація досягається шляхом розкладу органічної фракції на прості сполуки або продукти, які протягом тривалого періоду часу засвоюються в навколишньому середовищі. Методи стабілізації: біологічні, хімічні, фізичні та зв'язувальні. На вибір методу впливають тип і кількість осаду, наявність та умови подальшого використання, а також наявність площі розміщення. Найбільшого поширення набули біологічні анаеробні та аеробні методи стабілізації [39].

Процеси біологічного очищення стічних вод і зброджування мулу відбуваються в септиках, двоступеневих відстійниках, зволожувачах і метантенках. Процес біологічної деградації органічної речовини інтенсивно відбувається під впливом зовнішніх умов. Під дією анаеробних мікроорганізмів органічна частина мулу перетворюється на гази та мінеральні сполуки. Основними перевагами ферментації є стабілізація осаду стічних вод, зменшення обсягу та отримання біогазу.

Ефективність процесу *анаеробного зброджування* оцінюють за ступенем розкладання органічної речовини, кількістю і складом біогазу, що утворюється. Анаеробні мікроорганізми мають три основні температурні зони: психрофільну до

20 °С, мезофільну 20-40 °С, термофільну 50-70 °С. При термофільному зброджуванні досягається повна дегельмінтизація осаду, тоді як при мезофільних температурах гине лише 50-80% від загальної кількості яєць паразитів.

Як альтернатива анаеробному зброджуванню, мул можна стабілізувати за допомогою тривалої аерації, коли леткі речовини біологічно руйнуються. Довготривала аерація відбувається в аеротенку, тому її називають «одночасним аеробним зброджуванням».

Аеробній стабілізації можуть підлягати неущільнений та ущільнений надлишковий активний мул, який є сумішшю активного мулу та осаду з первинного відстійника. Можна сказати, що це завершальний етап очищення стічних вод, на якому стабілізується лише активний мул, а мінімальна кількість розчинених поживних речовин відбувається самоокисленням матеріалу мікробної клітини.

Процес аеробної стабілізації вимагає постійної мезофільної або термофільної температури і подачі необхідної кількості кисню.

Процес аеробної стабілізації відбувається при температурах від 10 до 42 °С і слабшає при температурі нижче 8 °С. Розпад органічної речовини становить в середньому 10-50%, при цьому жири розпадаються на 65-75%, білки 20-30%, а вуглеводи практично не розпадаються. Під час аеробної стабілізації при мезофільних температурах вміст кишкової палички та інших патогенних бактерій і вірусів знижується на 70-90%, але яйця паразитів не гинуть.

Необхідну площу кисню може забезпечити тільки механічний аератор, але споживання енергії збільшується в 2-3 рази.

Кондиціонування – це технічний процес підготовки мулу до зневоднення. Першим етапом підготовки осаду до зневоднення є промивка, яка використовується лише для ферментаційного осаду. В результаті промивання з ферментаційного осаду видаляються колоїдні частинки і дрібні суміші. Промивання відбувається очищеною стічною водою. Методи кондиціонування поділяються на реагентні та безреагентні.

Реагентні методи включають використання неорганічних реагентів (хлорне залізо і сірчана кислота, вапно) і органічних високомолекулярних сполук

(полімерні електроліти). Недоліками реагентного методу є велика масоємність, висока корозійна активність, труднощі при транспортуванні та зберіганні, внесення великої кількості (до 40%) баластного матеріалу.

Безреагентні методи включають термічну обробку та заморожування-розморожування. Термічна обробка здійснюється шляхом нагрівання мулу в реакторі до температури 140-200°C. Переваги методу: повна стерилізація обробленого осаду. Недоліки: великі витрати енергії, висока концентрація органічних речовин у фільтраті, що направляється на біологічну очистку, складність конструкції реактора.

Зневоднення осаду стічних вод відбувається в осадах на місці, механічному зневодненні та термічній сушці. Зневоднення – це технологічний процес, спрямований на підвищення вмісту сухої речовини в мулі.

Муловий майданчик призначений для природного зневоднення мулу з біологічних очисних споруд і обробляє до 90% загального осаду.

Переваги: простота інженерного обслуговування, зручність експлуатації.

Недоліки: залежить від кліматичних і природних факторів.

За ступенем використання природних процесів мулові майданчики поділяються на природні місця сушіння та місця інтенсивного зневоднення/сушіння. Перший варіант стосується наявності мулу в умовах природних процесів випаровування та декантації. Тобто мул розташовується на місці або в польовому ущільненні з поверхневим дренажом. У другому варіанті використовується штучний дренаж, опалення, можливість створення вакууму в дренажній системі, спеціально призначені місця зі штучним гідроізоляційним покриттям. При виборі варіантів все визначається місцевими факторами: кліматичними умовами, територіально-енергетичними можливостями очисної споруди, фінансовим станом. Розмір ділянки та кількість відкладень, що виділяються, залежатимуть від вологості відкладень, ступеня розливу та способу їх обробки після висихання.

Мулові майданчики інтенсивного зневоднення та сушіння поділяються на традиційний спосіб: вертикальний та горизонтальний дренаж, і вдосконалений:

шляхом створення вакууму в системі дренажу та штучного гідроізоляційного покриття з продувкою повітря.

Зневоднення осаду на майданчиках створює загрозу вторинного забруднення та вимагає значних капітальних витрат і великих площ для розміщення. Використання природного зневоднення у великих містах з розвинутою інфраструктурою вважається недоцільним з економічної та екологічної точки зору. Ефективне вирішення проблеми відкладень вимагає впровадження сучасних і прогресивних методів.

Механічне зневоднення осаду. Залежно від виду механічної дії на структуру мулу відбувається зневоднення: під розрідженням (вакуумний фільтр), під тиском (фільтр-прес), у відстійному полі (центрифуга), у вібраційному полі (вібропрес). Найчастіше використовуються центрифуги, а попереднє кондиціонування неорганічними флокулянтами у вакуумних фільтрах дозволяє обробляти практично будь-який вид осаду. Ще одна важлива перевага цього обладнання полягає в тому, що вони можуть обробляти мул без виділення піску та розповсюдження смороду. При цьому слід враховувати, що для нормальної роботи вакуумного фільтра потрібне допоміжне обладнання, таке як вакуумні насоси, повітродувки, ресивери та відцентрові насоси. Тривала експлуатація цих пристроїв виявила ряд недоліків, таких як складність і високі витрати на технічне обслуговування, значні витрати реагентів (до 20% сухої речовини мулу), низька питома потужність [40].

Більш прогресивними є технології зневоднення на осаджувальних шнекових центрифугах, рамних, мембранно-камерні, стрічкових, камерних, барабанні та гвинтові фільтр-преси. Безсумнівно, просунувся прогрес у застосуванні синтетичних органічних флокулянтів для кондиціонування мулу [39]. Загальновідомою перевагою методу є швидкість циклу фільтрації, що призводить до значного зменшення об'єму вихідного осаду за рахунок низького вмісту води в отриманому кеку.

Центрифугування осаду входить до фазового поділу в області відцентрової сили. Перевагами використання центрифуги порівняно з іншими методами зневоднення є простота, ефективність та керованість процесу.

Осад центрифугують з мінеральним коагулянтом і флокулянтом або без них. При використанні флокулянта осад після зневоднення має менше вологи, а центрифуга має більшу потужність. Фугат, утворений центрифугуванням, менш забруднений. Витрата флокулянта коливається від 4 кг до 14 кг на тонну сухої речовини і залежить від кількох факторів, таких як концентрація мулу, ступінь ферментації, співвідношення первинного та надлишкового мулу та вміст органічних речовин в мулі. Витрата зменшується при правильному виборі катіонних полімерів як флокулянтів.

Порівняння механічних методів і пристроїв зневоднення представлено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1. Співставлення методів механічного зневоднення осадів стічних вод [41]

Апарати механічного зневоднення	Основні переваги	Основні недоліки
Вакуум-фільтри	Можливість обробки осадів без виділення піску і розповсюдження запаху. Скорочення топливно-енергетичних витрат на термосушку. Відсутність швидкозношувальних вузлів	Використання мінеральних реагентів, вакуум-насосів. Періодична заміна фільтрувальної тканини. Підвищена витрата електроенергії
Центрифуги	Компактність установок. Можливість роботи по безреагентним схемам і з використанням флокулянтів	Необхідність видалення з осадів великих включень і піску, періодичної наплавки або заміни шнеків. Підвищення в порівнянні з вакуум-фільтрами топливно-енергетичні витрати на термосушку
Стрічкові фільтр-преси	Відсутність швидкозношувальних деталей та вузлів. Скорочення витрат електроенергії. Відсутність необхідності виділення великих включень та піску з осаду	Підвищені габарити в порівнянні з центрифугами. Можливість розповсюдження запаху. Підвищення в порівнянні з вакуум-фільтрами топливно-енергетичні витрати на термосушку

Термічне сушіння призначене для знезараження та зменшення маси осаду стічних вод. Перед подачею на сушку необхідно провести максимальне зневоднення осаду. Після термічного сушіння осад є незагнившим, вільним від паразитів і патогенних мікроорганізмів, зовні висушеним (вологість 10-50%) сипучим матеріалом.

Для термічного сушіння мулу використовуються різні методи, такі як конвекція, радіаційна конвекція, електропровідність, сублімація електромагнітних полів. При конвекційному методі сушіння, який є найпоширенішим, осушувачем є димовий газ, перегріта пара або гаряче повітря.

Конвекційні сушарки можна розділити на дві групи:

1) барабанні, стрічкові та ін. – при продуванні сушильного агента через шар матеріалу частинки осаду залишаються не рухомими;

2) сушарки із псевдозрідженим шаром та пневмосушарки – частинки матеріалу переміщується і перемішуються потоком сушильного агента.

Барабанні сушарки працюють у прямому потоці осаду та сушильного агента (топкових газів) (рис. 1.5) [41]. За рахунок руху димових газів і обертання барабана з додатковими форсунками осад переміщується з барабані. Після сушіння в барабанній сушарці осад не гниє, не містить паразитів і патогенних мікроорганізмів, а вологість становить 20-30%.

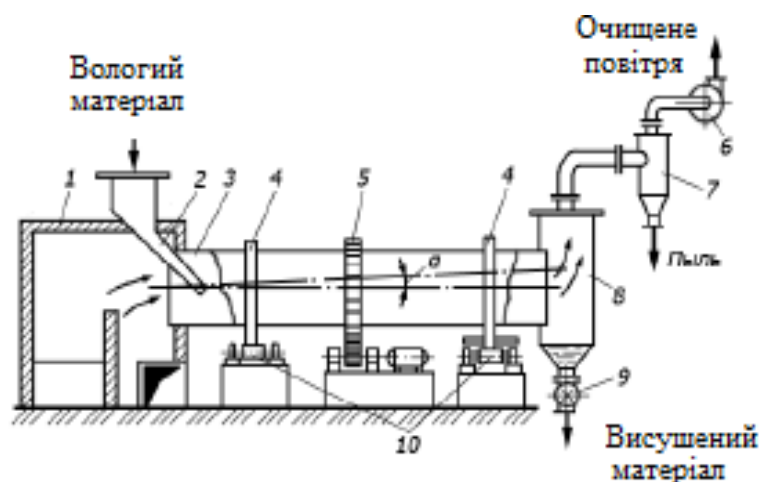


Рис. 1.5. Схема барабанної сушарки: 1 – топка; 2 – бункер; 3 – барабан; 4 – бандажі; 5 – зубчате колесо; 6 – вентилятор; 7 – циклон; 8 – приймальний бункер; 9 – шлюзовий затвор; 10 – опорні ролики

Параметри сушіння барабанної сушарки: напруга барабана по волозі – 60 кг/(м³ год); вологість мулу – 78 - 80 %; вологість осаду після сушіння – 20 - 25%; температура димових газів на вході в сушарку – 800°C; Температура димових газів на виході з сушарки становить 250 °C.

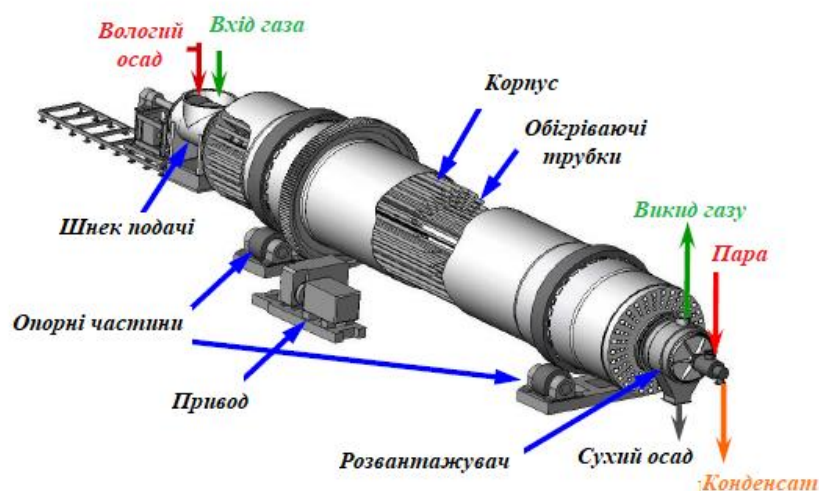


Рис. 1.6. Парова барабанна сушарка фірми TSK (Японія)

На рис. 1.6 представлена парова барабанна сушарка виробництва фірми TSK (Японія) [42]. Різниця між барабанною сушаркою компанії TSK (Японія) та стандартними полягає в тому, що відбувається рівномірна подача і нагрівання матеріалу під час сушіння. Нагрівання і сушіння відбувається за рахунок спалювання газів і парів через ряд нагрівальних труб.

Недоліками барабанних сушарок є великі розміри і металоємність, низька ефективність, великі капітальні витрати, складність експлуатації.

Вакуумні сушарки потребують попереднього центрифугування ущільненого активного мула до вологості 70 – 80% (рис. 1.7).

Сушіння осадів відбувається переважно в барабанних вакуумних сушарках формового типу, де сорочка нагрівається парою з температурою насичення 150°C. Сушарка періодично заповнюється шламом менше ніж на половину робочого об'єму. Потім створюють розрідження в пристрої, включаючи систему опалення сушарки і вакуумний насос.

Температура осаду під час сушіння коливається від 50 - 85°C (кипіння) до 30 - 40°C (в кінці сушіння). При температурі осаду близько 85 °C відбувається дегельмінтизація осаду. Після сушіння вакуум вимикають і висушений продукт вивантажується на конвеєр за допомогою реверсивної системи гребних штанг.

Вакуумний цикл сушіння мулу становить від 5 до 10 годин, залежно від початкової та кінцевої вологості мулу.

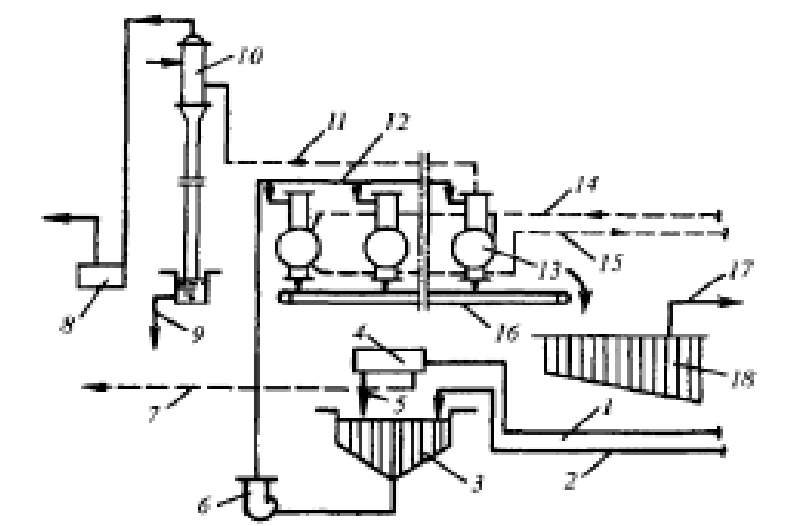


Рис. 1.7. Технологічна схема вакуум-сушіння осадів [43]:

1 – спресований надлишковий активний мул; 2 – осад з первинного відстійника; 3 – апарат – змішувач; 4 – центрифуга; 5 – відцентрифугований мул;
 6 – насос подачі мулу; 7 – повітряний резервуар фугату; 8 – вакуум-насос;
 9 – вторинний паровий конденсат; 10 – барометричний конденсатор; 11 – вторинна пара; 12 – вихідний осад; 13 – вакуум-сушарки;
 14 – пара із котельні; 15 – конденсат в котельню; 16 – конвеєр для сухого осаду;
 17 – сухий осад; 18 – бункер сухого осаду

Пневматичні сушарки забезпечують сушіння в трубі довжиною 20 м, переміщаючи знизу вгору димові гази і зважені в потоці частинки. Тривалість сушіння в пневмосушарках складає декілька секунд. Змішування та подрібнення мулу здійснюється в млинці або через шнековий конвеєр-гранулятор.

У США, Німеччині та ін. країнах отримали поширення горизонтальні та вертикальні пневматичні труби-сушарки, які випускаються фірмами «Раймонд» і «Рapid».

Висушений осад вологістю 10 - 15% відокремлюють від викидних газів в циклоні і за допомогою розподільчого вузла відбувається фасування або подача для спалювання в печі. Частина зневодненого осаду подається через шнековий конвеєр на сушильний млин, де змішується зі свіжою частиною механічно зневодненого осаду. Відсмоктувальним вентилятором подають запилені гази також на сушильний млин (рис. 1.8).

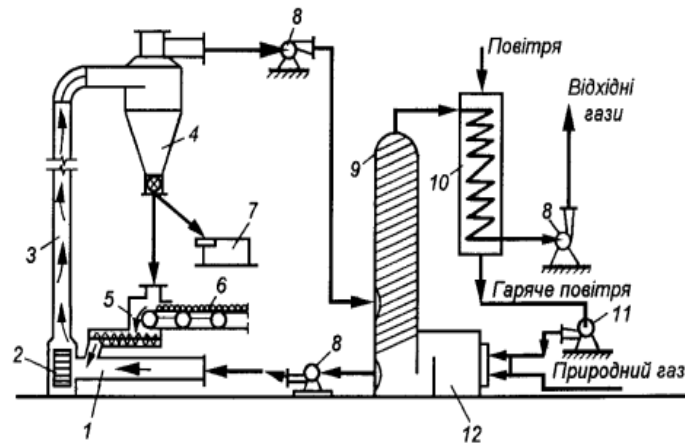


Рис. 1.8. Схема лінії з пневматичною трубою-сушаркою фірми «Раймонд» [44]:

- 1 – розгінна труба; 2 – дробарка; 3 – пневматична труба-сушарка;
 4 – пилозбірний циклон; 5 – шнековий транспортер; 6 – конвеєр;
 7 – фасувальна машина; 8 – димососи; 9 – дезодораційна колона;
 10 – теплообмінник; 11 – вентилятор; 12 – топка

Сушарки з псевдозрідженим шаром використовується для сушіння осаду стічних вод на аераційних станціях у США, Великобританії, Німеччині, Франції та ін. країнах. Сушарки з псевдозрідженим шаром мулу мають циліндричний конічний корпус (рис. 1.9).

Подача механічно зневодненого осаду в сушарку здійснюється за допомогою шнека. Активний мул змішують з частиною вже висушеного мулу, щоб знизити початкову вологість до 50%. Осад поміщають на газорозподільну решітку, під яку знизу подаються димові гази. При певній швидкості газу утворюється зріджений або псевдозріджений шар осаду. Частинки осаду ковзають по краях конуса в решітку і знову захоплюються потоком теплоносія. Таким чином, осад циркулює в сушильній камері. Сухий осад вологістю близько 10% видаляють із сушарки за допомогою розвантажувального пристрою. Температура димових газів на вході сушарки не перевищує 500°C, а температура димових газів на виході сушарки становить 150°C.

Переваги сушарок з псевдозрідженим шаром: простота конструкції, надійність, регулювання періоду сушіння та міцності теплообміну.

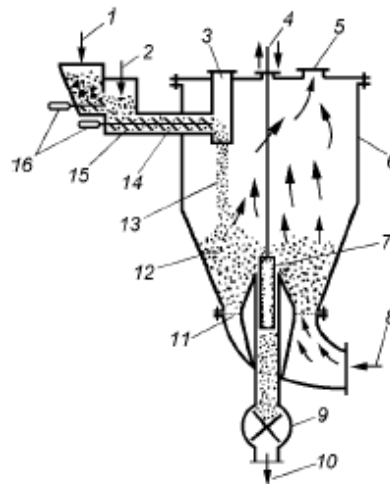


Рис. 1.9. Сушарки з псевдозрідженим шаром [44]:

- 1 – подача осаду для зневоднення; 2 – рециркуляція сухого осаду;
 3 – оглядовий люк; 4 – регулювальний пристрій; 5 – відпрацьовані газу;
 6 – циліндрично-конічний корпус; 7 – переливний поріг вивантажувального пристрою; 8 – теплоносій; 9 – секторний затвор; 10 – відведення сухого осаду;
 11 – газорозподільна решітка; 12 – киплячий шар; 13 – надходження осаду;
 14 – двовалковий шнековий транспортер; 15 – суміш вологого та сухого осаду;
 16 – електродвигун

Недоліками сушарок є складність завантаження мулу в гранульованому вигляді, рівномірний розподіл об'єму киплячого шару, необхідність додавання сухого мулу (кількість досягає 25-40% від загального сухого мулу), вимагається потужне вентиляційне обладнання. вимагається.

Спалювання осаду стічних вод. Спалювання — це процес, за допомогою якого органічна частина осаду окислюється до нетоксичних газів та золи. Перед спалюванням мулу необхідно провести механічне та термічне зневоднення мулу. Спалювання є економічно ефективним при обробці 7,5 тис. т. в рік по сухій речовині [45].

Під час спалювання осадів в газах можуть бути присутні токсичні компоненти, які необхідно очистити перед викидом його в атмосферу. Процес спалювання складається з етапів нагрівання, сушіння, відгонка летючих речовин, спалювання органічної частини і проколювання для випалювання залишків

вуглецю. Займання осаду відбувається при температурі 200 - 600°C. Проколювання зольної частини осаду закінчується охолодженням. Температура в печі повинна бути в межах 700 - 1000°C. Найбільш поширеними для спалювання шламу є багатоподові печі, печі з псевдозрідженого шару і барабанні обертові печі.

Багатоподові печі використовуються в Південній Африці, Німеччині та інших країнах. Їх продуктивність наближається до 2т/добу. Корпус багатоподової печі являє собою вертикальний сталевий циліндр, викладений вогнетривкою цеглою. Вони складаються з двох зон: верхня – сушарка, нижня – піч. Топковий пристрій печі поділено по висоті на сім - дев'ять горизонтальних подів [46].

Осад невинних відстійників і надлишковий мул ущільнюються до вмісту твердого 5 – 6%, підігрівається теплоносієм масляного котла до 60°C, зневоднюється на центрифугах до вологості 25 – 30% і подаються в піч.

На верхніх подах мул сушиться, на середніх – органічна частина осаду згорає при температурі 600 - 900°C, а на нижніх – охолоджується зола перед скиданням в бункер. З печі гази відводяться в мокрий пиловловлювач і димососом викидається в атмосферу. Багатоподові печі прості і надійні в експлуатації. До їх недоліків можна віднести високу вартість будівництва, великі розміри, часту поломку регулювальних пристроїв.

Печі з псевдозрідженого шару являють собою вертикальні сталеві циліндри, викладені зсередини вогнетривкою цеглою. Усередині топки вбудована камера згорання, яка являє собою конічну частину з герметичною решіткою [47].

На решітці насипаний пісок величиною 0,6 – 2,5 мм шаром 0,8 – 1 м. Киплячий шар піску створюється при продуванні повітря крізь решітку, при якій частинки зависають в газовому потоці. Повітря подається вентилятором, нагрівається в рекуператорі димовими газами і подається під решітку. Осад подається в топку через завантажувальний бункер.

У киплячому шарі осад і кварцовий пісок інтенсивно перемішуються, волога миттєво випаровується, а леткі органічні сполуки видаляються. Весь процес займає 1-2 хвилини.

Якщо для згорання органічної фракції мулу недостатньо тепла, для підтрим-

ки процесу горіння додатково використовують паливник. У рекуператорі охолоджений димовий газ очищається від вологого пилю і викидається в атмосферу без золи і пилю.

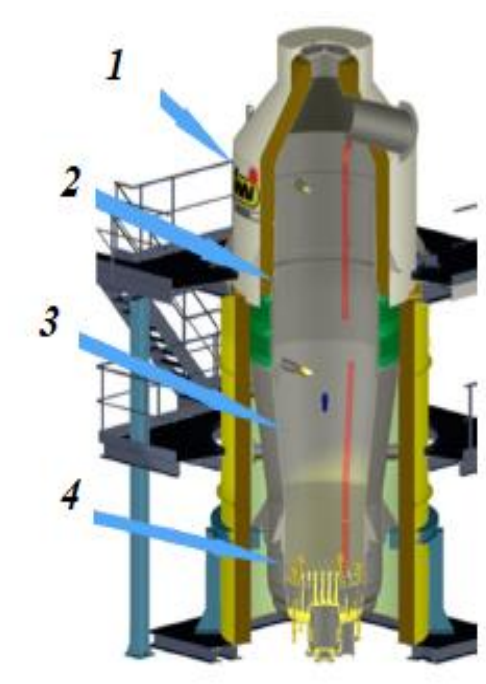


Рис.1.10. Піч киплячого шару за енергоефективною технологією спалювання *SUN SAND* [48]:

- 1 – циліндрична конструкція з теплоізоляцією; 2 – камера допалювання;
3 – камера горіння; 4 – псевдозріджений шар

Перевагами печей киплячого шару є компактність обладнання, інтенсивність процесу, можливість спалювання мулу при різному рівні вологості. Недоліки – високий вміст пилю у вихлопних газах і необхідність установки рекуператорів.

Піч із псевдозрідженим шаром, розроблена за розробленою технологією спалювання *SUN SAND*, здатна: однорідне горіння в киплячому шарі; швидкий запуск і легка зупинка; без використання вогнетривких матеріалів; відновлення енергії; безперервний аналіз вихлопних газів; скорочений час обслуговування (рис. 1.10) [48].

Для спалювання мулу, змішаного з побутовими відходами, використовують *барабанні обертіві печі*. На відміну від барабанних сушарок, барабани обертівих печей нахилені в бік топки. Зневоднений осад завантажується з іншого кінця барабана в піч. Переміщуючись всередині барабана, осад спочатку висихає, а потім

згорає. Гаряча зола з топки надходить у повітроохолоджувач і пневмотранспортом направляється в приймальний бункер і вивозиться. Вихлопні газы всмоктуються димососом, пропускаються через вологий скруббер і викидаються в атмосферу. Температура газу в зоні сушіння 200 °С, а в зоні горіння 900-1000 °С. У середині барабана в зоні сушіння встановлені насадки для перемішування і подрібнення осаду.

Барабанна піч має низький вміст пилу у вихлопних газах і може бути розміщена на відкритому повітрі, за винятком секції печі та завантажувальної камери. Недоліки обертаючих барабанних печей: громіздкі, великі капітальні витрати, відносно складна експлуатація.

Циклонні печі використовуються відносно рідко і служать для спалювання рідин або тонких матеріалів. Спалювання осаду в циклонній печі вимагає попередньої теплової сушки і ретельного подрібнення. Циклонна пічна установка складається з сушарки, муловго млина, циклонної печі, дезодоруючої камери, вологого пилососа, димоходу.

1.4. Сучасні технології утилізації осадів спалюванням

При виборі найкращої технології необхідно враховувати, що осад стічних вод є одним з основних забруднювачів навколишнього середовища: землі, води та повітря. Їх знешкодження та утилізація є глобальною проблемою, яка не вирішена належним чином.

Термічна обробка є єдиним надійним способом видалення осаду стічних вод від органічних забруднювачів. До них відносяться горіння, піроліз і газифікація. Осад стічних вод можна спалювати окремо або разом з іншим паливом, таким як вугілля, тверді побутові відходи та інші відходи. Моноспалювання здійснюють в обертових, багатоподових, циклонних печах та печах із псевдозрідженим шаром.

Загальні переваги термічних технологій: повна нейтралізація органічних компонентів осаду стічних вод і придатність золи до депонування на полігонах.

Загальні недоліки: значні енергетичні та фінансові затрати на спалювання, неконтрольоване випаровування солей важких металів у димові газы, що вимагає

встановлення дорогих систем газоочищення.

Технологія спалювання шламу в печах з псевдозрідженим шаром. За останні 30-40 років для спалювання осаду найбільше використовуються печі з псевдозрідженим шаром. Вони функціонують в США, Німеччині, Франції, Японії та в ін. країнах [49].

Принцип роботи такого процесу полягає в тому, що осад стічних вод з резервуару для змішування надходить на центрифугу або шнековий прес для зневоднення. Зневоднений осад через шнековий транспортер потрапляє у піч з псевдозрідженим шаром, куди паралельно подають гаряче повітря (близько 500 - 600°C) під решітку з шаром піску.

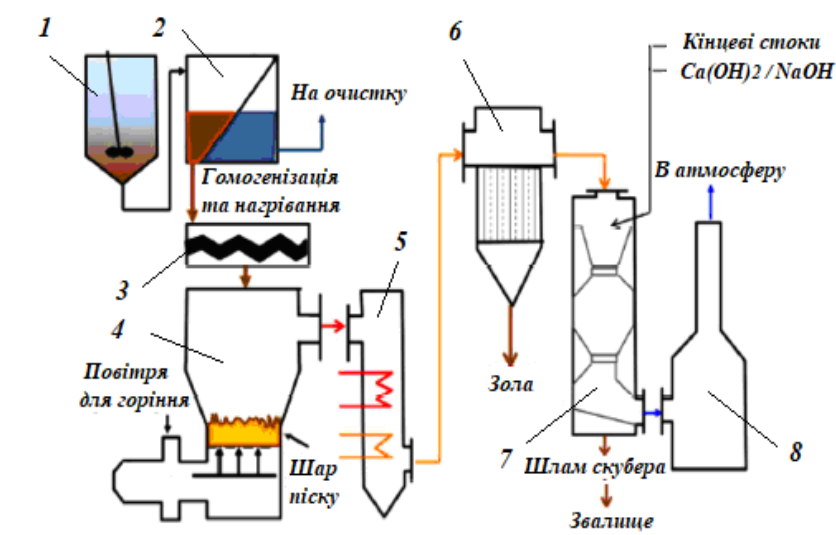


Рис. 1.11. Схема спалювання осадів стічних вод [48]:

- 1 – резервуар для змішування; 2 – центрифуга; 3 – шнековий транспортер;
- 4 – піч з псевдозрідженим шаром; 5 – теплообмінник-утилізатор;
- 6 – електрофільтр; 7 – мокрий скруббер; 8 – димова труба

Традиційна схема спалювання осаду стічних вод показана на рис. 1.11 [50]. Температура піщаного шару зазвичай становить 750°C. У печах із псевдозрідженим шаром вода випаровується з осаду стічних вод, а леткі метали та органічні сполуки повністю спалюються у вигляді газів. Решта неорганічних речовин видаляються з камери у вигляді дрібних частинок разом з вихлопними газами. Зола, що утворюється при спалюванні осаду стічних вод, зазвичай збирається

електрофільтрами (6) або циклоном після проходження через теплообмінник-утилізатор (5).

Утворені димові гази очищаються за допомогою мокрого скруббера (7), що містить певну кількість кислоти або лугу. У процесі очищення утворюється додатковий шлам, який зневоднюється і викидається на звалище небезпечних відходів.

Технологія сумісного спалювання осадів з вугіллям. Найекономічнішим способом енергетичного використання осадів стічних вод є їх сумісне спалювання з вугіллям у енергетичних установках, що широко використовується у Німеччині. Доведено, що вугільні електростанції легко спалюють до 60% осаду з теплотворною здатністю 4,4 МВт/кг. Для очищення вихлопного газу від шкідливих компонентів, таких як ртуть, перед електрофільтром вприскують буровугільний кокс і застосовують вугільні адсорбери. Витрати на очищення осадів стічних вод шляхом спільного спалювання зменшуються в 5,6 рази порівняно з спеціалізованими установками [51].

Технологія утилізації осадів піролізом. Піроліз — це термохімічний процес, який за відсутності кисню перетворює тверді речовини на такі продукти, як рідина (піролізні гази), гази та коксові залишки (зола) (рис. 1.12) [52].



Рис. 1.12. Процес піролізу осадів стічних вод [52]

Кількість продуктів піролізу залежить від хімічного складу осаду стічних вод і умов, за яких відбувається піроліз. Компоненти осадів стічних вод термічно розкладаються з різною швидкістю. Важливо точно визначити нижню температурну межу, при якій відбувається термохімічна деструкція осаду стічних вод. Процес піролізу відбувається в чотири етапи [53]:

- 1 фаза (до 200°C): видаляє вологу та виділяє леткі речовини, такі як етанол (оцтова кислота) та метан (мурашина кислота);

- 2 фаза (200-280 °C) піроліз виділення кислоти, піроліз води та нафтових газів (CO, CO₂);

- 3 фаза (280~500°C): виділяються горючі леткі продукти, такі як CO, CH₄, H₂, метанова кислота, етанолова кислота та метанол;

- 4 фаза (вище 500°C): карбонізацію процесу завершено. Якщо продукти реакції не видаляти із зони реакції відразу після утворення, починається вторинна реакція коксу і газу.

Газифікацію можна розглядати як продовження процесу піролізу. Газ, піролізна нафта (піролізний газ) і коксові залишки далі вступають у реакцію під час газифікації після піролізу. У порівнянні з піролізом, для процесу газифікації додається певна кількість кисню [54].

Процес газифікації відбувається при високих температурах (700-1000 °C). В основному газ складається з компонентів, що утворюються при газифікації: CO, CO₂, H₂O, H₂, CH₄ та інші вуглеводні [55].

Процес газифікації протікає в два етапи [56]:

- 1 фаза при температурах вище 500°C: деякі леткі та тверді залишки реагують з киснем з утворенням CO₂ та невеликої кількості CO.

- 2 фаза (зменшення зони горіння): продукти неповного згорання (H₂O, CO₂ та ненасичені продукти термічного розкладання) реагують з водяною парою, тим самим знижуючи температуру отриманих продуктів газифікації (CO, CO₂, CH₄, H₂, N₂). Температура оселі близько 700-950 °C.

На схемі, представленій на рисунку 1.10, також передбачена система очищення відпрацьованих газів і виробництва пари на виході з камери згорання.

1.5. Виробництво, сушіння та спалювання паливних біобрикетів як засіб ефективного процесу утилізації осаду

Створення брикетів не є обов'язковим для реалізації перелічених технологій, але зменшує економічну складову процесу.

Узагальнена схема технології брикетування шламу паливними брикетами, що характеризується зниженням втрат енергії та покращенням властивостей готових брикетів (рис. 1.13).

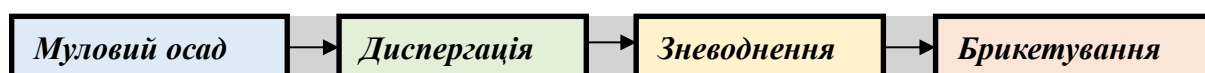


Рис. 1.13. Узагальнена технологічна схема брикетування мулових осадів

Для отримання якісних паливних брикетів осад необхідно висушити до вологості 10%. Однак лише 60~65% води в початковому мулі є корисним, решта 25~30% відноситься до капілярно-зв'язаної, видалення якої найбільш ефективно термічними методами та 4 – 10% відноситься до гігроскопічної води, яка не видаляється навіть при термічному сушінні.

На процес зневоднення мулового осаду до рівня вологості 10% приходиться основна доля енергетичних втрат утилізації осаду в цілому.

Відповідно до узагальненої технологічної схеми, представленої на рис. 1.13, на рис. 1.14 показана технологічна лінія брикетування паливних біобрикетів від Biosmartex [57].

Лінія отримання паливних брикетів фірми Biosmartex (Україна) складається з системи підготовки теплоносія, ушіння в барабанній сушарці та формування паливних біобрикетів (рис. 1.14). Суміш з рослинної сировини надходить в бункер для зберігання 4, шнековим транспортером 5 подається на подрібнювач суміші 6, звідки направляється на барабанну сушарку 7. Після висушування матеріалу в барабанній сушарці 7, він поступає в циклон 8, звідки висушений матеріал потрапляє на подрібнювач сухої продукції 9 та викидається топкові гази через вентилятор 10 та димову трубу 11.

Після подрібнювача сухої продукції 9 висушений матеріал надходить на цик-

лон 12, а потім в накопичувальний бункер 13. Звідки відбувається дозування суміші на установки для брикетування 14.

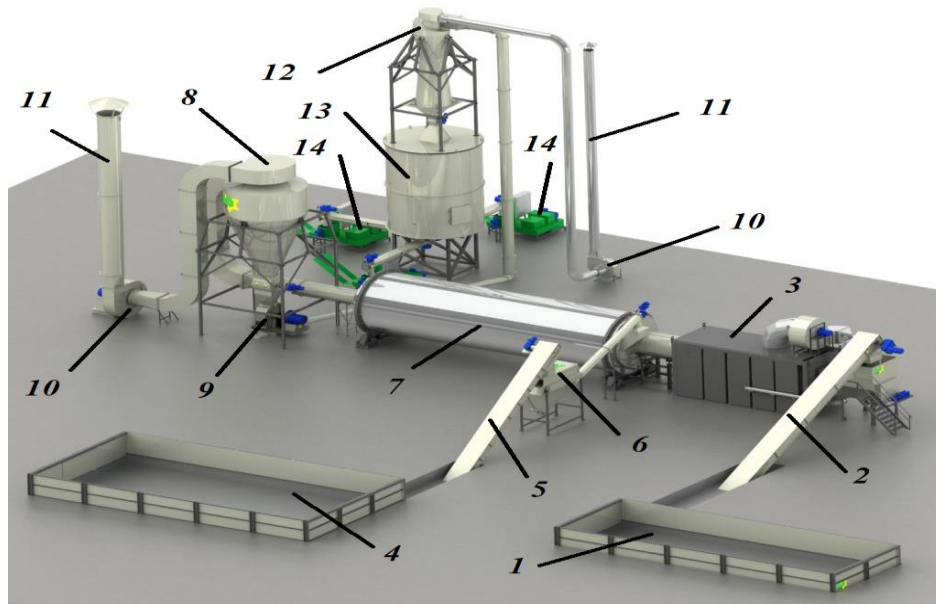


Рис. 1.14. Лінія для отримання паливних біобрикетів фірми Biosmartex (Україна) [57]:

1 – бункер для паливних біобрикетів; 2,5 – шнекові транспортери;
 3 – теплогенератор; 4 – бункер для суміші; 6 – подрібнювач суміші;
 7 – барабанна сушарка; 8,12 – циклони; 9 – подрібнювач сухої продукції;
 10 – вентилятори; 11 – димова труба; 13 – накопичувальний бункер;
 14 – установки для брикетування

Утворені паливні біобрикети використовуються для спалювання в теплогенераторі (3) барабанної сушарки (7), що підвищує енергоефективність і створює закрите виробництво.

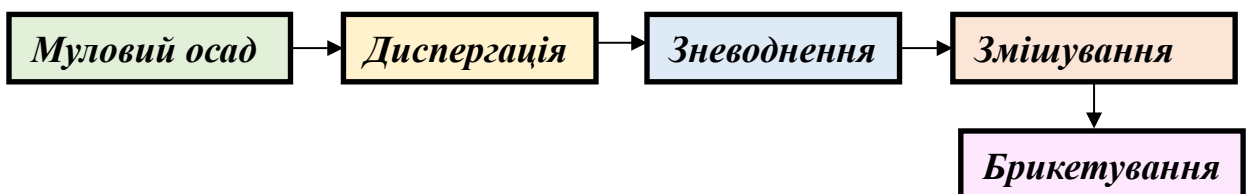


Рис. 1.15. Технологічна схема отримання брикетів з мулових осадів, відходів з деревини та лінгосульфонатами

До технологічної схеми виробництва брикетів на рис. 1.20 після зневоднення додається операція змішування мулових осадів з відходами деревини та лінгосульф-

фонатами (рис. 1.15).

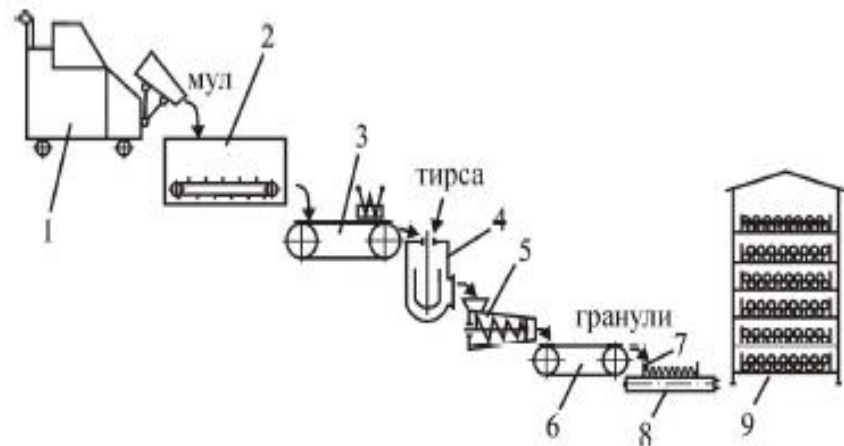


Рис. 1.16. Технологічна схема виробництва паливних гранул з мулових осадів із додаванням 5% тирси [58]:

- 1 – автoнавантажувач; 2 – приймальний бункер; 3 – стрічковий конвеєр;
4 – якірна мішалка; 5 – шнековий транспортер; 6 – сітчастий конвеєр;
7 – піддон; 8 – роликoвий конвеєр; 9 – сушарка

Таблиця 1.2. Порівняльна характеристика різних видів брикету [59]

Вид палива / Назва показників	Брикет на основі осадів стічних вод	Брикет на основі лігніну	Брикет на основі торфу	Довгопо- лум'яне вугілля ДР
Загальна волога робочого палива, %	10,5	11,0	15,7	15,0
Зольність робочого палива, %	12,0	12,7	12,2	16,0
Вихід летких речовин робочого палива, %	61,7	54,6	54,7	42,0
Масова доля загальної сірки робочого палива, %	0,75	0,06	0,10	0,50
Масова доля вуглецю робочого палива, %	40,9	38,5	38,6	68,0
Масова доля водню робочого палива, %	4,92	3,53	4,09	-
Нижня теплота спалювання робочого палива, МДж/кг	16,735	14,800	13,341	23,040

Інститутом відновлюваної енергетики НАН України розроблено енергоефективну технологію утилізації мулових відкладень шляхом виробництва паливних гранул із мула. При виробництві гранул, змішаних з 5% тирсою, брикетування відбувається перед процесом зневоднення (рис. 1.16) [58].

Виробництво паливних брикетів пов'язане зі складом. Тому властивості отриманих брикетів на основі осаду стічних вод представлені в табл. 1.2 для порівняння з аналогічними продуктами.

1.6. Висновки до першого розділу та завдання дослідження

Аналіз сучасних технологій очищення стічних вод показує, що в світі немає технології переробки застарілих мулових відкладень, а в Україні ці технології наразі є недосконалими.

Проблемою переробки застарілих мулових відкладень, є малий вміст в них органічних речовин та перевищена зольність, тому вони не придатні для спалювання в чистому вигляді та для добрив.

Тому **метою дисертаційної роботи** є переробка застарілих мулових відкладень на альтернативне паливо.

Тому для вирішення поставленої мети пропонуються наступні завдання:

- аналіз сучасного стану існуючих технологій отримання біопалива для можливого їх використання в технологіях виробництва композиційного біопалива;
- розробка підготовки сировини до сушіння;
- розробка гранулоутворення композиційного палива на основі застарілих мулових відкладень, торфу та біомаси;
- дослідження тепломасообмінних процесів при сушінні композиційної сировини на основі застарілих мулових відкладень, торфу та біомаси;
- дослідження адсорбційних властивостей матеріалів;
- дослідження питомої теплоти згоряння;
- дослідження процесу горіння композиційних гранул;
- розробка енергозберігаючої теплотехнології з виробництва альтернативного палива на основі застарілих мулових відкладень.

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Матеріали досліджень

Для проведення експериментів були використані застарілі мулові відкладення очисних споруд (м. Фастів), торфу та біомаси у різних співвідношеннях (рис. 2.1). Торф був добутий з родовища ДП «Чернігівторф» (м. Чернігів) та з пойми Ірпеня. Біомасу використовували на прикладі тирси та лузги гречки [60].

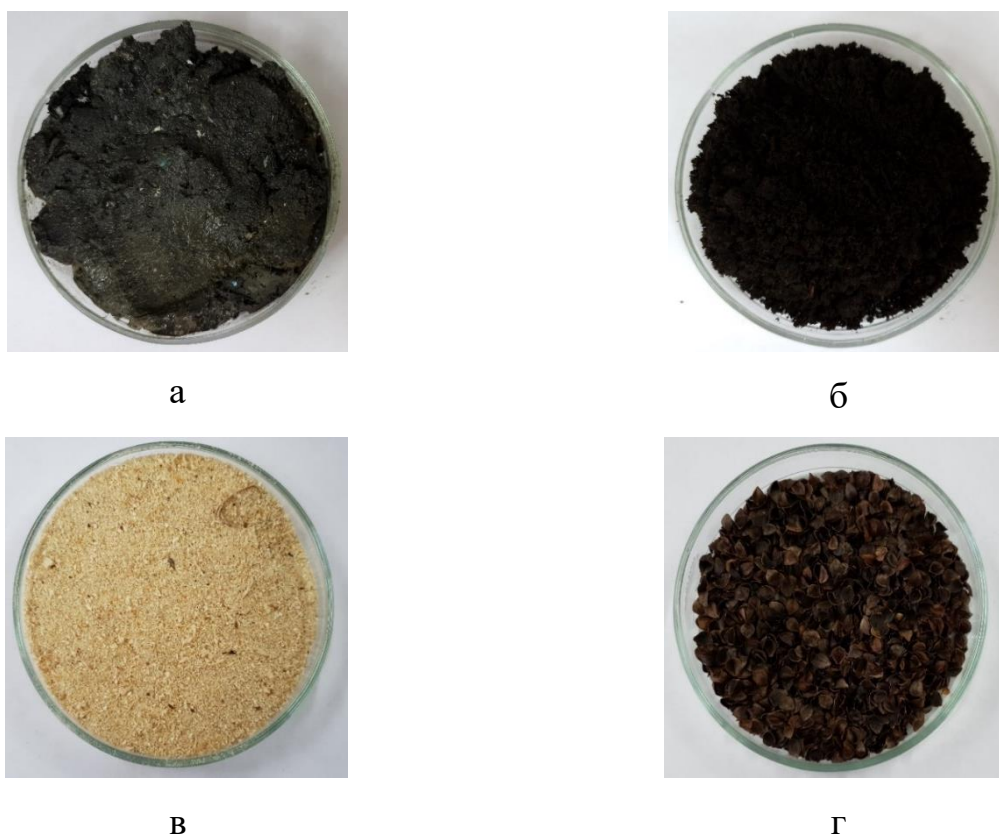


Рис. 2.1. Вихідна сировина:

- а) застарілі мулові відкладення; б) торф з родовища ДП «Чернігівторф»;
- в) тирса; г) лузга гречки

Застарілі мулові відкладення доставлені з Київської області з м. Фастова і мають початкову вологість – 63,1%, органічна складова – 53,7% до абс. сухої маси та зольність – 47,3% до абс. сухої маси. Для використання в якості палива мулових відкладень, їх необхідно піддавати сушінню, а велику зольність необхідно зменшувати, тобто створювати композит з даванням до них торфу та біомаси.

2.2. Експериментальні установки та методики досліджень

2.2.1. Гідравлічний прес HLR-12 для формування одиночних гранул з мулових відкладень та гранул на їх основі

Гідравлічний прес HLR-12 призначений для формування одиночних гранул шляхом продавлювання циліндра (7) через встановлену призму (11) (рис. 2.2). Циліндр 7 приводиться в рух масляним насосом 12 з надлишковим тиском 2 МПа. Гранули розміром 6 і 12 мм отримують з використанням матриць різного діаметру.

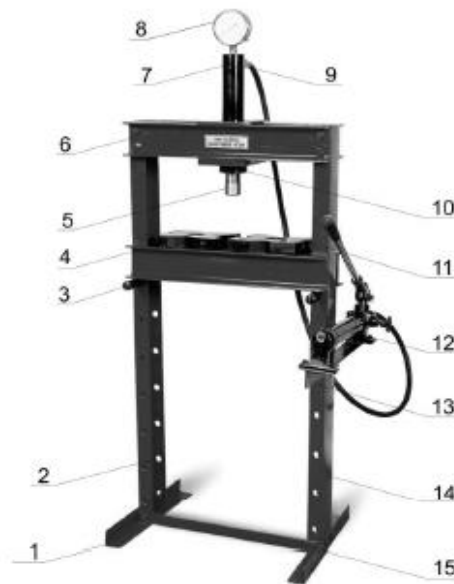


Рис. 2.2. Гідравлічний прес HLR-12:

- 1 – кутник основи преса; 2 – отвори для опорних штоків; 3 – опорні штоки;
 4 – поперечина; 5 – шток; 6 – верхня поперечина циліндра; 7 – циліндр;
 8 – манометр; 9 – шланг; 10 – гайка кріплення циліндра; 11 – призма;
 12 – масляний насос; 13 – площа насосу; 14 – стійка; 15 – поперечина основи

Методика гранулювання гранул на гідравлічному пресу:

1. Для надійної роботи гідравлічного преса його необхідно встановлювати на твердій рівній поверхні та в сухому середовищі.
2. Вибрати висоту столу і вставити суміш для пресування.
3. Розміщуємо матрицю діаметром 6 або 12 мм у формувачі, а потім засипаємо суміш.
4. Закрити впускний клапан (1) і перевести важіль масляного насоса (2) у нижнє положення. Поршень тисне на штовхач і в матриці починають утворюватися

гранули (рис. 2.3).



Рис. 2.3. Гідравлічна система пресу для формування гранул:
1 – впускний клапан; 2 – важіль масляного насосу; 3 – манометр



Рис. 2.4. Формування гранул в матриці
(тиск формування гранул
2,118 – 2,197 МПа (21,6 – 22,4 кгс/см²))

5. Після того, як гранули сформовані у формувачі, нагнітальний клапан відкривається і повертає поршень у вихідне положення. Після завершення відкриття впускний клапан (1). Поршень повертається у вихідне положення.

6. Слід ретельно контролювати значення манометра (3) і стан вихідних гранул під час гранулювання (рис. 2.4).

2.2.2. Шнековий механічний пристрій для формування партій гранул з мулових відкладень та гранул на їх основі

Шнековий механічний пристрій призначений для формування гранул через витискання шнеком через встановлену матрицю. Для отримання гранул 4,6,8 мм використовуються матриці різного діаметру. Загальний вигляд шнекового механічного пристрою представлений на рис. 2.5, який працює наступним чином: продукт подається до гранулятора, де він зтягується між матрицею і роликками, що обертаються, і протискується в радіальні отвори, які формують гранули. Ножем гранули відокремлюються від матриці

Технічна характеристика шнекового механічного пристрою:

– робоча довжина шнека – 140 мм;

- діаметр шнека – 70 мм;
- діаметр матриці – 80 мм;
- товщина матриці – 8 мм;
- отвори в матриці діаметром – 8, 6, 4 мм.

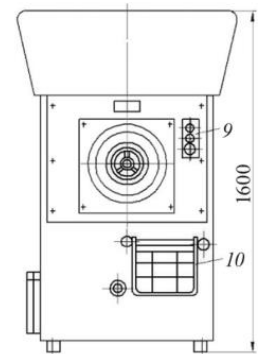
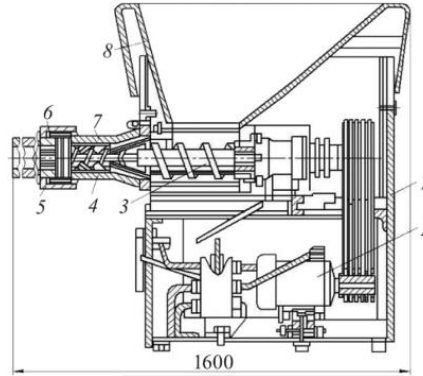


Рис. 2.5. Шнековий механічний пристрій для формування гранул:

- 1 – станина; 2 – привід; 3 – допоміжний шнек подачі сировини;
- 4 – робочий шнек; 5 – ріжучий механізм; 6 – притискний пристрій;
- 7 – робочий циліндр; 8 – завантажувальний бункер; 9 – панель управління;
- 10 – відкидний майданчик

Таблиця 2.1. Характеристика матриць для формування гранул

№	Діаметр отворів, Ø, мм	Площа матриць, $S_{\text{ф}}$, мм ²	Роб. пл. матриць $S_{\text{ф.р}}$, мм ²	Кількість отворів в матриці, n, шт.	Площа перерізу одного отвору матриці, $S_{\text{п}}$, мм ²	Площа перерізу всіх отворів матриць, $S_{\text{п.п}}$, мм ²	Площа супротиву матриці, $S_{\text{с}}$, мм ²
1	4	5027	4850	90	13	1170	3857
2	6	5027	4575	40	28	1120	3907
3	8	5027	4850	34	50	1700	3327

В табл. 2.1 наводимо характеристики матриць для формування гранул. Фото матриць з діаметром отворів 4, 6, 8 мм представлено на рис. 2.6.

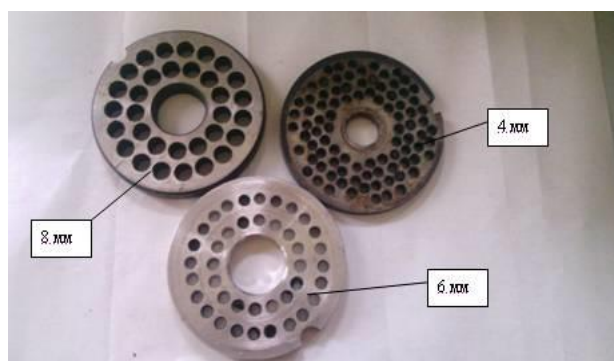


Рис. 2.6. Фото фільтрних матриць з діаметром отворів 4, 6, 8 мм

2.2.3. Експериментальний конвективний сушильний стенд

Для дослідження кінетики процесу сушіння муло-торф'яних гранул використано експериментальний конвективний стенд, обладнаний автоматичною системою збору та обробки інформації (рис. 2.7) [61].

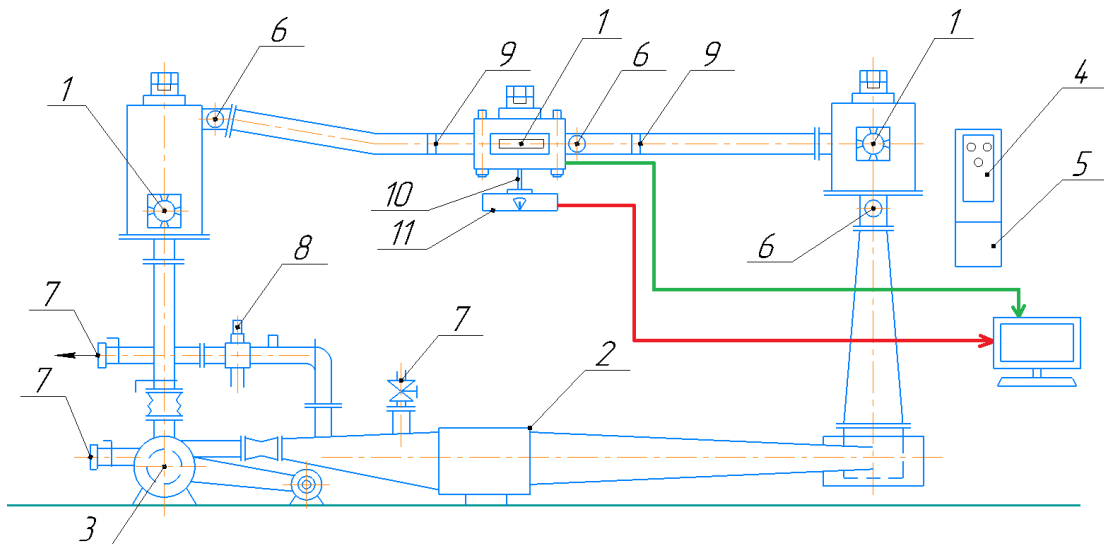


Рис. 2.7. Схема експериментального конвективного стенду для сушіння муло-торф'яних гранул:

- 1 – сушильна камера; 2 – електронагрівачі; 3 – вентилятор;
 4 – терморегулятор; 5 – регулятор швидкості; 6 – термометри опору;
 7 – патрубки з клапанами; 8 – психрометр; 9 – спеціальні решітки;
 10 – вагова планка; 11 – ваги

Експериментальний конвективний сушильний стенд складається з основних компонентів: сушильної камери (1), блоку електронагрівачів (2), вентилятора (3), ізольованих повітропроводів та систем контролю процесу сушіння.

Вентилятором (3) досягається широкий діапазон коливань швидкості і температури теплоносія на пульті керування (5) регулятором швидкості. Швидкість теплоносія змінюється подачею повітря відцентровим вентилятором шляхом використання частотного перетворювача з ручним регулюванням. Співвідношення між витяжним і свіжим повітрям можна регулювати за допомогою клапана форсунки (7).

Після встановлення заданого режиму дослідження на стенді поміщають зразок досліджуваної сировини на штангу вагів (10) у сушильній камері та

безперервно записують втрату маси зразка в процесі сушіння за допомогою ваг АД-500 (11), які підключено до комп'ютера.

Конвективний сушильний стенд дозволяє проводити термічну обробку муло-торф'яних гранул з температурою осушувача 30 – 150 °С і швидкістю 0,5 – 5 м/с. Встановлені високоточні ваги можуть реєструвати зміни маси зразка до 0,001 г і підтримувати температуру в сушильній кімнаті з точністю до 0,02°С. Зчитування експериментальних даних про зміну маси та температури зразка, температури сушильного агента в сушильній камері відбувається 7 раз за хвилину.

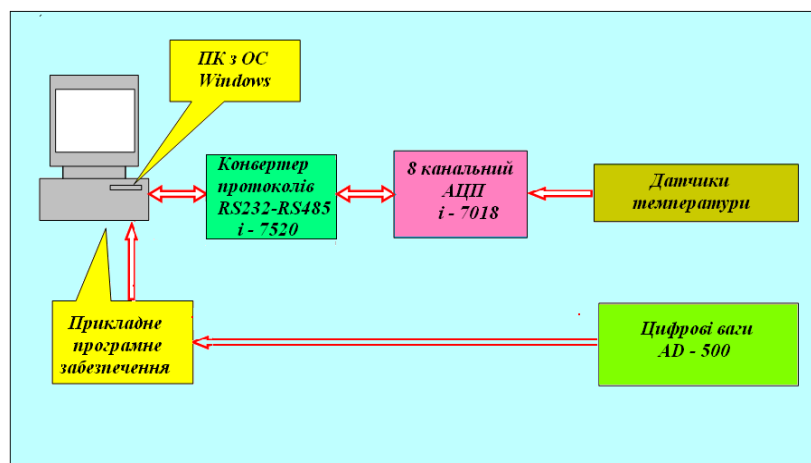


Рис. 2.8. Структурна схема автоматичного збору та обробки інформації з конвекційної сушильної установки

З метою підвищення точності, інформативності та зручності обробки інформації, отриманої під час проведення експериментів, експериментальний стенд оснащений допоміжним обладнанням: аналого-цифровим перетворювачем і-7018, перетворювачем інтерфейсу і-7520, персональним комп'ютером (рис. 2.8).

На рис. 2.9 показані ваги із встановленим на них штанги із матеріалом. В гранули встановлені хромель-копелеві термоелектричні перетворювачі (ДСТУ 2837 – 94 [62]) діаметром 0,2 мм.

Сушильна камера являє собою прямокутний короб з листового металу з знімальним люком. Камера має прозоре скло, тому можна спостерігати за станом матеріалу під час сушіння. Для визначення зміни маси під час сушіння на вагу встановлена штанга із сіткою, на якій розташовані муловоторф'яні гранули, що піддаються термічній обробки.



а)

б)

Рис. 2.9. Установка для сушіння муловоторфяних гранул:

а – загальний вид терезів із встановленими гранулами в сушильній камері;

б – сушильна камера під час сушіння гранул

Методика проведення досліджень на конвективному сушильному стенді:

1. Об'єктом дослідження обрано мулоторфяні гранули.

2. Перед проведенням дослідження визначають початкову вологість гранул.

Гранули поміщують у бюкси і сушать у сушильній шафі при 105°C протягом 5 годин. Після сушіння виймають бюксу із сушильної шафи і поміщають його в ексикатор для охолодження на 15-30 хв. Охолоджені бюкси з гранулами зважують на вагах у закритому стані [61].

Вологість гранул по відношенню до маси сухої речовини розраховується у відсотках:

$$W = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \cdot 100\%, \quad (2.1)$$

де m_1 – маса порожньої бюкси (з кришкою), г; m_2 – маса бюкси з наважкою до сушіння, г; m_3 – маса бюкси з наважкою після сушіння, г.

3. Дослідження сушіння муло-торфяних гранул починається з встановлення режиму сушіння на стенді, розміщення його на ваговій решітці в сушильній камері та включення комп'ютерної програми збору та обробки інформації, яка постійно фіксує час і зміни. Маса проби, температура теплоносія та середовища гранулювання.

На рис. 2.10 представлено знімання кінетики процесу сушіння муло-торфяних гранул при температурі теплоносія 120 °C і швидкості теплоносія 2 м/с.

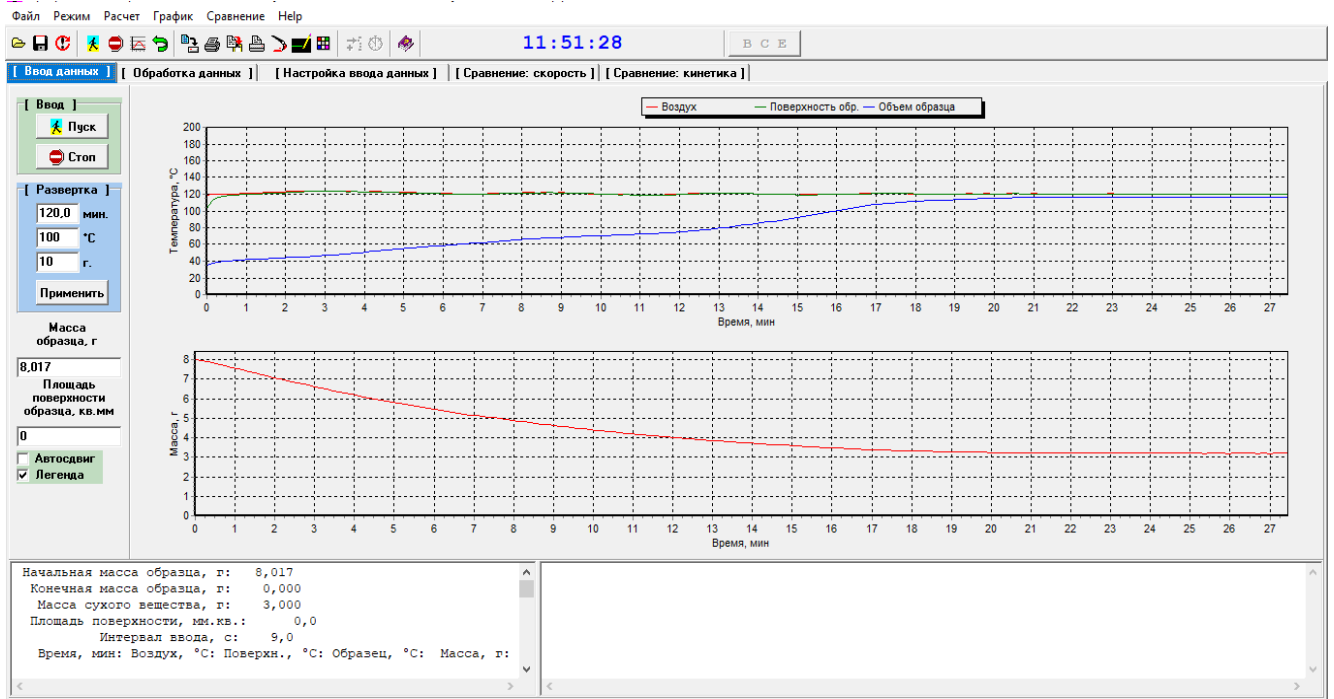


Рис. 2.10. Панель управління для зняття кінетики сушіння муло-торф'яних гранул при температурі теплоносія 120°C і швидкості руху 2 м/с

4. Розрахунок характеристики проводиться за допомогою спеціально розробленої програми «Sooshka».

4.1. Кінетика процесу сушіння:

$$W(t) = \frac{G(t) - G_{a.c.}}{G_{a.c.}} \cdot 100\%, \quad (2.2)$$

де $G(t)$ – розрахунки маси зразка, г; $G_{a.c.}$ – абсолютно суха маса матеріалу, г.

4.2. Швидкість сушіння визначається :

$$N = \frac{dW}{d\tau}, \quad (2.3)$$

4.3. Температурний коефіцієнт сушіння є оцінкою похідної середньої температури зразка при вологості:

$$b = dt_{cp}/dU, \quad (2.4)$$

де $U = W/100$ – вологовміст зразка, %; t_{cp} – вираховується як середнє значення розрахунку температури на поверхні та в матеріалі зразка, °C.

4.4. Число Ребіндера дорівнює відношенню кількості теплоти, витраченої на нагрівання тіла, до кількості теплоти на випаровування вологи за нескінченно малий проміжок часу:

$$Rb = \frac{c}{r}b, \quad (2.5)$$

де c – питома теплоємність матеріалу, кДж/(кг °С); r – питома теплота фазового перетворення, кДж/кг .

2.2.4. Визначення зольності утворених гранул на основі мулу в муфельній лабораторній електропечі

Для визначення зольності отриманих гранул використовують муфельну піч представлену на рис. 2.11.



Рис. 2.11. Муфельна лабораторна електропіч

Муфельна лабораторна електропіч складається з керамічного муфеля – легко замінного блоку із вбудованим нагрівачем, зносостійкої корундової плитки-підкладки для захисту нижньої частини муфеля, футеровки з волокнистих матеріалів, спеціальної технологічної палочкою з нержавіючої сталі. Все це оброблено в металевому корпусі з полімерним порошковим покриттям. Муфельна

піч оснащена програматором-регулятором температури на базі мікропроцесора з цифровою індикацією. Гранули засипаються у виготовлені із інертного матеріалу спеціальні тиглі діаметром 10 см, глибиною від 10 до 20 мм.

Проведення випробування. Зольність визначають шляхом спалювання гранул масою 1,5-2,0 г у двох попередньо прокалених і зважених тиглях у муфельній печі, нагрітій до яскраво-червоного кольору (~ 815 С).

Спалювання ведуть до повного зникнення чорних частинок. Потім тигель охолоджують в ексикаторі, зважують, знову прокалюють протягом 20 хвилин, охолоджують і зважують. Якщо, два послідовних зважування дають різницю не більше 0,0002 г, озолення вважають закінченим. Усі зважування проводять на аналітичних вагах із точністю до 0,0002 г.

Обробка результатів. Зольність аналітичної проби A , % за масою визначається за формулою:

$$A = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \cdot 100, \quad (2.6)$$

де m_1 – вага тигля, г; m_2 – вага тигля з пробою, г; m_3 – вага тигля з золою, г.

Результати визначення зольності беруть, як середнє значення двох паралельних визначень.

2.2.5. Дослідно-промисловий сушильний стенд камерного типу

Дослідно-промисловий сушильний стенд складається з системи подачі і нагрівання теплоносія, сушильної камери та блоку автоматичного регулювання температури теплоносія, що реєструється в потенціометрі (рис. 2.12).

Технічна характеристика дослідно-промислового сушильного стенда представлена на рис. 2.2.

Після виходу на встановлений режим сушіння відкривається камера і на нагрітій піддон накладається матеріал, зважується і встановлюється в сушильну камеру.



Рис. 2.12. Дослідно-промисловий сушильний стенд

Таблиця 2.2. Технічна характеристика дослідно-промислової сушильної установки

1.	Продуктивність по вилученій вологості	кг/год	8 - 10
2.	Температура сушильного агенту	°С	50 - 150
3.	Питома витрата енергії	кВт год/кг	1,4 – 1,5
4.	Максимальне завантаження	кг	50
5.	Встановлена потужність	кВт	10,8
6.	Габарити	м	2,3x1,05x1,8

Для точної підтримки заданої температури обігрівач підключається до системи автоматичного регулювання, що складається з електричного термостата ЕРТ-4 і термометра опору ТСМ-50. Надлишок вологи під час сушіння відводиться через трубу в задній частині сушарки.

2.2.6. Методика визначення рівноважної вологості композитної сировини та її компонентів

Рівноважна вологість має важливе значення для розробки технології обробки застарілих мулових відкладень та отримання композиту з додаванням торфу та біомаси до них, що визначає кінцеву вологість при сушінні, а також умови зберігання.

Рівноважна вологість - це вологість, при якій матеріал не набирає і не втрачає вологу. Значення рівноважної вологості залежить від відносної вологості та температури повітря, що контактує з матеріалом. Швидкість, з якою це відбувається, залежить від властивостей матеріалу, відношення площі поверхні до

об'єму об'єкта та швидкості транспортування вологи [63]. Рівноважна вологість є одним із ключових показників під час зберігання, який залежить від кінцевої вологості та енергетичних витрат процесу зневоднення [64, 65].

Рівноважну вологість досліджуваного зразка як функції відносної вологості φ повітря визначали за тензометричним (статичним) методом Ван Бамелена [63 – 65]. Суть цього методу полягає в тому, що зразок матеріалу із заданою вологістю витримують в ексікаторі над водним розчином сірчаної кислоти. Відома концентрація розчинів відповідає конкретному парціальному тиску пари при даній температурі, тобто відповідному значенню відносного тиску p/p_s .

У процесі адсорбції потенціалом переносу є парціальний тиск пари. Рівновага системи настає, коли при однаковій температурі повітря і матеріалу парціальні тиски пари повітря $p_{n\text{ нов}}$ і пари в тонкому шарі над матеріалом $p_{n\text{ мат}}$ рівні. Тобто $p_{n\text{ нов}} = p_{n\text{ мат}}$. За цих умов матеріал піддається дії постійної вологості W_p , яка називається рівноважною, і рівновага системи розуміється лише, як динамічна. Коли матеріал поглинає воду, $p_{n\text{ нов}} > p_{n\text{ мат}}$ - відбувається адсорбція, а коли він виділяє воду ($p_{n\text{ нов}} < p_{n\text{ мат}}$) - відбувається десорбція. У рівноважному стані вологість матеріалу W_p однакова в будь-якій його точці.

Вміст водяної пари в повітрі визначається відотною вологістю φ , яка дорівнює відношенню парціального тиску пари повітряного $p_{n\text{ нов}}$ і тиску насичення $p_{нас}$ при тій же температурі над водою.

Зразки періодично зважували на аналітичних вагах з точністю $\pm 0,0001$ г, а вимірювання маси зразка вели до досягнення постійної маси, при якій вологість їх відповідає рівноважній.

Експеримент включає три етапи:

1. Приготування розчинів.

Для створення у замкнутому просторі ексікаторів повітряного середовища із заданою вологістю, приготували розчини сірчаної кислоти різної концентрації.

Оскільки в довідниках показано залежність тиску водяної пари від розчину сірчаної кислоти в мм.рт.ст. від концентрації H_2SO_4 у вагових %, проведений перерахунок даного тиску на відносну вологість φ за формулою 2.9:

$$\varphi = p/p_s, \quad (2.7)$$

де p та p_s – парціальний тиск та тиск насичення водяної пари при тиску 760 мм рт.ст. і температурах, що охоплюють можливий діапазон їх зміни в експерименті. Результати перерахунку подані в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3. Відносна вологість φ над розчинами H_2SO_4 при 760 мм.рт.ст.

H ₂ SO ₄ , вагові	φ					
	Температура пари, °С					
	10	15	20	25	30	35
10	0,956	0,962	0,981	0,956	0,955	0,956
20	0,880	0,877	0,878	0,880	0,880	0,882
25	0,814	0,821	0,827	0,825	0,826	0,828
30	0,749	0,759	0,753	0,754	0,754	0,756
35	0,673	0,680	0,662	0,665	0,660	0,669
40	0,565	0,571	0,559	0,564	0,569	0,574
45	0,456	0,461	0,456	0,463	0,465	0,472
50	0,348	0,352	0,354	0,358	0,361	0,368
55	0,250	0,250	0,251	0,291	0,264	0,268
60	0,163	0,164	0,160	0,164	0,170	0,175
65	0,0869	0,0938	0,0913	0,0962	0,101	0,104
70	0,0326	0,0391	0,0456	0,0379	0,0409	0,0451
75	0,0109	0,0156	0,0171	0,0168	0,0189	0,0190
80	0,00434	0,00469	0,00570	0,00421	0,00629	0,00711
85	0,00109	0,00156	0,00171	0,00168	0,00189	0,00190
90	0,000217	0,000235	0,000285	0,000337	0,000314	0,000474

У довідниках в таблиці наведено залежність тиску водяної пари над розчином від масового відсотка (тобто концентрації) H_2SO_4 у розчині та залежність вмісту H_2SO_4 на 100 г. розчину і 1 л розчину до густини розчину в г/см³ при 20°С для кислоти з густиною 1,8305 [65].

Були приготовлені чотири розчини для чотирьох різних φ в діапазоні від 0,4 до 0,9 відповідно до техніки приготування розчину. Потрібні властивості сірчаної кислоти визначали за розрахунковими таблицями (табл. 2.3) і довідковими даними

(табл. 2.4). Досліди проводили при температурі навколишнього середовища 18–20°C.

Таблиця 2.4. Властивості водних розчинів сірчаної кислоти при температурі 20°C

H ₂ SO ₄ , вагові	<i>p</i> , мм рт. ст.	φ	Густина р-ну H ₂ SO ₄ , г/см ³	Концентрація р-ну H ₂ SO ₄ , г/л
10	17,2	0,981	1,066	106,6
20	15,4	0,878	1,139	227,9
25	14,5	0,827	1,178	294,6
30	13,2	0,753	1,219	365,6
35	11,6	0,662	1,260	441,0
40	9,8	0,559	1,303	521,1
45	8,0	0,456	1,348	606,4
50	6,2	0,354	1,395	697,5
55	4,4	0,251	1,445	794,8
60	2,8	0,160	1,498	898,8
65	1,6	0,0913	1,553	1010
70	0,8	0,0456	1,611	1127
75	0,3	0,0171	1,669	1252
80	0,1	0,00570	1,727	1382
85	0,003	0,00171	1,779	1512
90	0,05	0,000285	1,814	1633

2. Підготовка зразків.

Матеріали завантажували в заздалегідь підготовлені бюкси. Для зменшення випадкових помилок, експерименти проводилися з двома паралельними зразками. Бюкси із зразками висушували до постійної маси в сушильній електричній шафі при 130°C протягом 6 годин. Після висихання зразки зважували. Бюкси з відкритою кришкою поміщали в ексікатор згідно з протоколом експерименту. Кришка ексікатора надійно закрита. Зразки зберігали в ексікаторі протягом 32 днів до врівноваження з навколишнім середовищем.

3. Проведення вимірів.

Зважування бюксів з наважками, проводили на лабораторних аналітичних

вагах ВЛР – 200 г з допуском 0,5 мг. У експерименті фіксували також температуру, тиск навколишнього повітря і час.

Приріст маси зразків на початку експерименту визначали через 6 годин 40хв. Потім визначали щодня. Зважування зразків проводили до досягнення ними постійної маси. Експерименти проводили при температурі навколишнього середовища, яка коливалась в межах 19-21 °С.

Вівноважну вологість необхідно розрахувати відносно абсолютної сухої маси матеріалу, ця величина залишається незмінною під час процесів адсорбції-десорбції та сушки-зволоження. Тому обробка всіх даних отриманих під час експериментів, волога, яка поглинена матеріалом, була віднесена до маси абсолютно сухого матеріалу.

Вологість матеріалу визначали по формулі:

$$W^c = \frac{m_i - m_{\text{сух}}}{m_{\text{сух}} - m_{\text{бюк}}}, \quad (2.8)$$

де W^c – вологість матеріалу, віднесена до маси сухого матеріалу, %; m_i - маса бюкса з вологим матеріалом (поточне значення), г; $m_{\text{сух}}$ - маса бюкса з сухим матеріалом, г; $m_{\text{бюк}}$ – маса бюкса, г.

Рівноважна вологість матеріалу визначалася по формулі:

$$W_p^c = \frac{m_p - m_{\text{сух}}}{m_{\text{сух}} - m_{\text{бюк}}}, \quad (2.9)$$

де m_p – маса бюкси з вологим матеріалом в рівноважному стані, г.

Перехід від вологості W^c , розрахованої по відношенню до маси сухої речовини матеріалу, до вологості W , розрахованої до загальної маси матеріалу, здійснюється згідно формул переходу:

$$W = \frac{W^c}{100 + W^c} \cdot 100, \quad (2.10)$$

$$W^c = \frac{W}{10 - W} \cdot 100, \quad (2.11)$$

При обробці експериментальних даних використовувалися програми Microsoft Office Excel.

2.2.7. Методика визначення показника активності води композитної сировини та її компонентів

Оскільки градієнт значень активності води дослідних зразків і вологість відповідного середовища є рушійними силами масообміну під час різних термічних і гідротермальних процесів і зберігання, дані для показнику активності води є важливими [66, 67]. Цей показник вказує на кількість вологи, яку зберігає тестовий зразок, яка може поєднуватися з іншими сполуками, щоб вплинути на форму, структуру та ефективність зберігання.

Із загальної кількості води, яка міститься в сировині, мікроорганізми для своєї життєдіяльності можуть використовувати лише певну частину води, так звану «вільну воду». Кількість такої води, яка відображає активність води, залежить від природи та кількості компонентів, які розчинені у початковій фазі експериментального зразка [68]. Різні види мікроорганізмів можуть розвиватися лише за певних порогів активності води. Тому показники активності води можна використовувати для прогнозування росту мікробних забруднювачів і визначення мікробіологічної стабільності лабораторних проб.

Показник активності води включений в європейські стандарти (введений в систему ISO 9000 та ISO 18787:2017) для харчової промисловості і використовуються для визначення якості і прогнозування розвитку мікроорганізмів [69]. В Україні з 2007 року набув чинності ДСТУ ISO щодо використання показника «активність води» (a_w) для визначення якості та безпеки матеріалів, таких як харчові продукти. Водночас визначення показнику активності води для технічних виробів, таких як складні гранули, ще не проводилося.

Гранульовані зразки подрібнювали в лабораторному млині та засипали в спеціальні бюкси масою $5 \pm 0,1$ г. Термодинамічні параметри гранул вимірювалина апараті Hygrolab-2 (Rotronic, Швейцарія) за температури 18–20 °C (рис. 2.13) з точністю вимірювання 1,5 %, 0,3 °C 0,005 од. $a_w + 1,5\%$ від вартості.

Мікроскопічну адсорбційну здатність гранул досліджували з використанням індикаторів йоду та метиленового блакитного. Гранули подрібнювали на

лабораторному млині, розміщували на предметні скла і до них додавали: 1 – дистильовану воду (контроль), 2 – розчин йоду, 3 – робочий розчин індикатора метиленового блакитного. Вимірювання проводили за допомогою мікроскопа Delta Optimal Genetic Pro, підключеного до комп'ютера (рис. 2.14).



Рис. 2.13. Аналізатор активності води HygroLab-2



Рис. 2.14. Мікроскоп Delta Optimal Genetic Pro

Активність води - це відношення парціального тиску водяної пари над досліджуваним зразком до парціального тиску водяної пари над чистою водою при однаковій температурі:

$$a_W = \frac{C_{EM}}{100} = \frac{P_F(T)}{P_S(T)}, \quad (2.12)$$

де C_{EM} - рівноважна відносна вологість атмосфери, яка контактує з дослідним зразком; $P_F(T)$ - парціальний тиск водяної пари над поверхнею дослідного зразку при температурі T (підтримуваною на постійному рівні в час вимірювання); $P_S(T)$ - парціальний тиск насиченої пари над чистою водою за тією ж температурою.

Активність води є безрозмірною величиною, яка становить 0,0 для повністю безводних проб і 1,0 для чистої води без солі. Принцип вимірювання показника активності води заснований на вимірюванні точки роси або визначенні електропровідності електроліту або зміни діелектричної проникності полімеру [70].

Мірою активності води є рівноважна відносна вологість, і залежно від значення (a_w) виділяються продукти з високою вологістю ($a_w = 1,0 - 0,0$), продукти з середньою вологістю ($a_w = 0,9 - 0,6$) і продукти з низькою вологістю ($a_w = 0,6 - 0,0$) [69].

Для визначення активності води досліджуваного зразка використовуються різні принципи вимірювання, включаючи пряме або непряме визначення рівноважного тиску водяної пари в замкнутій системі [71, 72]. При цьому важлива ступінь зв'язку води з неводними компонентами. Тобто вода з міцнішими зв'язками менш імовірно підтримує процеси, які призводять до деградації. Таким чином, показники активності води являють собою хімію гідролізу, змінюючи стандартні показники для конкретного продукту.

Гранули досить гігроскопічні, тому їх слід зберігати в герметичній упаковці. Готові вироби такої технології мають низьку якість і недостатню міцність. Гранули руйнуються і беруться цвіллю і грибками [73].

2.2.8. Калорифер для дослідження теплоти згоряння

Теплоту згоряння зразка досліджували за допомогою калориметра для вимірювання теплоти згоряння палива моделі КТС-4, до якого входить калориметрична бомба БКУ-2 № 11 рис. 01. 2.15.

Основні технічні характеристики калориметра КТС-4 [74]

- діапазон вимірювання кількості теплоти – від 10 до 35 кДж;
- похибка вимірювань – не більше $\pm 0,1\%$;
- споживана потужність – не більше 1,0 кВА;
- загальна маса теплового та електронного блоків - не більше 70 кг.

Калориметр КТС-4 вимірює тепловий потік, який утворюється при спалюва-

нні палива та визначення з нього теплоти, що виділяється при згоранні проби.

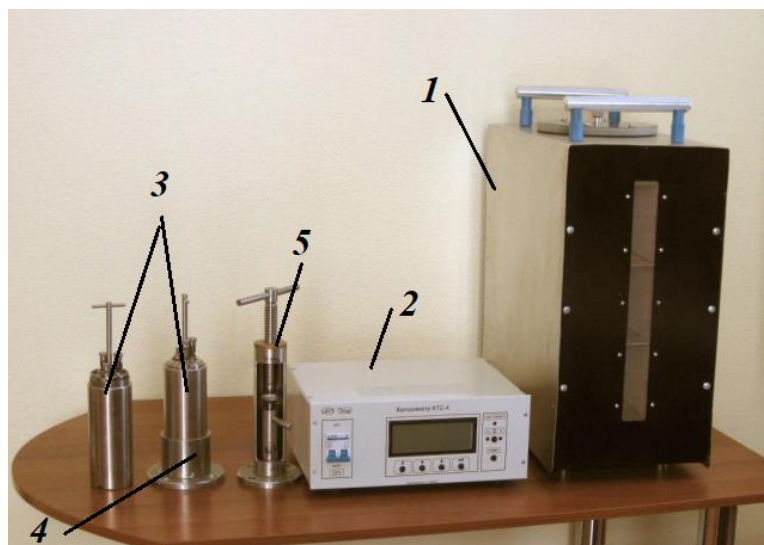


Рис. 2.15. Загальний вигляд калориметра КТС-4:

- 1 - бомбовий анероїд ізоперіболічний калориметр;
- 2 – електронно-обчислювальний пристрій; 3 – 2 універсальні реакційні ємності – калориметричні бомби БКУ-2 та обслуговуюче обладнання;
- 4 – бомботримач і ключ; 5 – прес для виготовлення проби

На калориметрі досліджуються види палива різного агрегатного стану [75-77]. Масу проб для калориметрії теплоти згорання та запалювання дроту визначали за допомогою ваг ВЛР-20. В тепловому блоці калориметрі КТС-4 розміщують калориметричну бомбу зі пробою палива в атмосфері кисню, закриваючи кришки пристрою та розігріваючи до заданої температури. Тепловий потік, що утворюється при нагріванні, вимірюється термоелектричним сенсором теплового потоку. Інформація, виміряна та оброблена мікропроцесорним блоком, послідовно передається на персональний комп'ютер для подальшої обробки.

Для зразків сировини проводиться калориметричний аналіз за визначенням вищої та нижчої теплоти згорання, зольності та вологості. Зі зразка сировини відбирають частку для визначення вологості у стані поставки, частку підсушують та подрібнюють до повітряно-сухого стану. З підсушеного матеріалу відбирають аналітичні проби для визначення теплоти згорання та для вологості.

Методика визначення теплотворної здатності відповідає стандартному методу для твердого палива ДСТУ ISO 1928:2006 та європейському стандарту ISO

18125:2017 «Solid biofuels — Determination of calorific value (Тверде біопаливо — Визначення теплотворної здатності)» [78, 79]. Відповідно до цих стандартів проводяться два або більше експериментів для вимірювання теплоти згоряння, і якщо різниця між результатами експерименту перевищує певний рівень, проводиться третій експеримент, результатом якого є середнє значення двох найближчих вимірювань. При обробці експериментальних даних використовувалися значення вмісту водню та азоту для визначення поправки, як рекомендовано в [78] та в технічній літературі [74].

Методика розрахунків теплоти згоряння за експериментальними даними наведено нижче.

Питома теплота згоряння палива в бомбі розраховується за формулою:

$$q_b = \frac{Q_p - q_{\text{папір}} m_{\text{папір}} - q_{\text{др}} (m_1 - m_2)}{m_3}, \quad (2.13)$$

де $q_{\text{др}} = 2510$ Дж/г – питома теплота згоряння запального дроту; $q_{\text{папір}} = 15044$ Дж/г – питома теплота згоряння паперової упаковки.

Вищу теплоту згоряння аналітичної проби з врахуванням поправок на створення та розчинення кислот розраховують за формулою:

$$q_B^a = q_b - (94 \cdot S + \alpha \cdot q_b) \text{ (кДж/кг)}, \quad (2.14)$$

де 94 – коефіцієнт, що враховує теплоту утворення сірчаної кислоти з діоксиду сірки та розчинення сірчаної кислоти у воді на 1% сірки, яка перейшла при згорянні палива в сірчану кислоту, кДж/кг; S – масова доля сірки в паливі, %; $\alpha \cdot q_b$ – добуток, що враховує теплоту утворення та розчинення в воді азотної кислоти, для біопалива приймаємо значення $\alpha \cdot q_b = 29$ кДж/кг.

За літературними даними, вміст сірки S_c у всіх зразках становить 0,8 % на суху масу, а вміст водню $H_c = 6,0$ % на суху масу. Вміст сірки і водню у вологості W_a , розраховують за формулою:

$$S_a = S_c \cdot \frac{100 - W_a}{100}, H_a = H_c \cdot \frac{100 - W_a}{100}. \quad (2.15)$$

Нижча теплота згоряння аналітичної проби розраховується за формулою:

$$q_H^a = q_B^a - 24,42 \cdot (8,94 \cdot H_a + W_a) \text{ (кДж/кг)}. \quad (2.16)$$

В абсолютно сухому стані вища теплота згоряння складає:

$$q_B^c = q_B^a \cdot \frac{100}{100 - W_a}. \quad (2.17)$$

В абсолютно сухому стані нижча теплота згоряння складає:

$$q_H^c = q_B^c - 24,42 \cdot 8,94 \cdot H_c. \quad (2.18)$$

При довільній робочій вологості W_p , розрахунки проводяться за формулами:

– вища теплота згоряння:

$$q_B^p = q_B^c \cdot \frac{100 - W_p}{100} \text{ (кДж/кг)}. \quad (2.19)$$

– вміст водню:

$$H_p = H_c \cdot \frac{100 - W_p}{100}. \quad (2.20)$$

– нижча теплота згоряння:

$$q_H^p = q_B^p - 24,42 \cdot (8,94 \cdot H_p + W_p) \text{ (кДж/кг)}. \quad (2.21)$$

2.2.9. Методика проведення технічного аналізу твердого палива

Методика проведення технічного аналізу твердого палива дозволяє визначити гігроскопічну вологу, зольність та вміст летких. Методика побудована на підставі лабораторного практикуму [80], за яким проводять технічний аналіз твердих горючих копалин.

Аналіз проводиться аналітичної проби палива – дрібна фракція повітряної сухої лабораторної проби.

Спочатку визначається гігроскопічна вологість W^a , яка проводиться шляхом висушування аналітичної проби палива масою 1 – 2 г в бюксі до постійної маси в сушильній шафі при температурі 95⁰С – 100⁰С. Визначають за формулою 2.1.

Зольність A^a визначають в муфельній печі при температурі 800 – 830°C. Оголення палива провадять в порцелянових глазурованих тиглях висотою 23,5 – 35 мм та діаметром 32 – 45 мм або в порцелянових човниках 25x43 мм або 36x47 мм. Тиглі та човники повинні бути пронумеровані та прожарені до постійної маси. Визначають за формулою 2.6.

Вихід летких визначається нагріванням проби палива в закритому кришкою тиглі (без доступу повітря) при температурі 840 – 860°C продовж 7 хв. та зважується після охолодження тигля з коксовим залишком.

Дії при проведенні аналізу наступні. Піч попередньо нагрівається до температури 840 – 860°C. В тиглі розміщують масу палива $1 \pm 0,001$ г. Після прогріву тигля в печі продовж 7 хв., його виймають. Охолоджують на повітрі не більше 5 хв., після чого охолоджують в ексікаторі та зважують.

Вихід летких визначають за формулою, %:

$$V^a = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \cdot 100 - W^a, \quad (2.22)$$

де m_1 – вага тигля, г; m_2 – вага тигля з пробєю до визначення, г; m_3 – вага тигля з після визначення, г; W^a – аналітична волога, %.

Вихід летких на горючу масу палива (з без зольної і без водної маси) визначається за формулою, %:

$$V^r = \frac{V^a \cdot 100}{100 - (W^a - A^a)}, \quad (2.23)$$

де V^a – вихід летких, %; W^a – аналітична волога, %; A^a – аналітична зольність, %.

2.2.10. Методика спалювання окремої частки мулових відкладень

Спалювання окремої частки мулових відкладень дозволяє визначити як сам процес горіння так і його складових: займання палива, структуру полум'я, вигоряння палива, а також його затухання.

Отримані результати можуть бути використанні при спалювання палива у різний спосіб спалювання: в факелі, у шарі та інш., або при створенні нових спосо-

бів спалювання.

Досліди по спалюванню окремої частки мулових відкладень проводились на створеній з цією метою експериментальній установці.

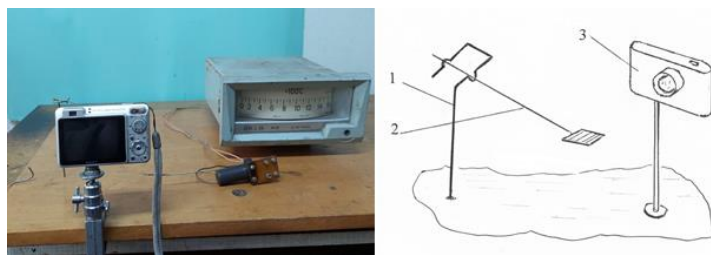


Рис. 2.15. Експериментальна установка та схема

для дослідження процесу горіння окремої частки твердого палива:

1 – сійка; 2 – тримач палива; 3 – камера

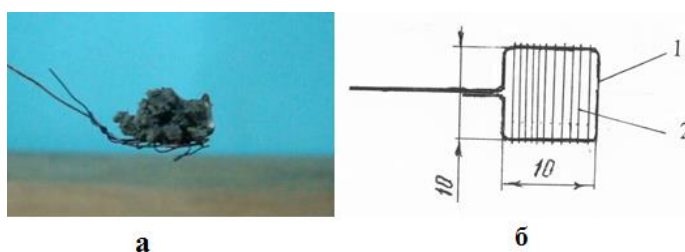


Рис. 2.16. Колосниковий тримач палива: а – частка палива на тримачі;

б – устрій тримача: 1- рамка; 2 – решітка (колосники)

На рис. 2.15 показана експериментальна установка та її схема для дослідження процесу горіння окремої частки твердого палива показана. До складу установки входять колосниковий тримач палива 2, установлений на стійці 1 та камера 3 для фото та відео фіксації процесу горіння окремої частки палива, яка розташовувалась на колосниковому тримачі (рис. 2.16, а). Також за допомогою термопар вимірювалась температура продуктів згоряння.



Рис. 2.17. Вимірювання температури факелу

Колосниковий тримач палива показаний на рис. 2.16. Він виконаний у вигляді рамки, на якій намотаний дріт - колосники (рис. 2.16 б). Рамка виконана з мідного дроту діаметром 0,15 мм; решітка (колосники), з метою зменшення відводу тепла від частки палива в процесі горіння, виконана з константанового дроту діаметром 0,1 мм, який має меншу теплопровідність ніж мідь.

Дослідження спалювання окремої частки мулу включало займання палива, структуру його полум'я, вигорання палива, а також його затухання. Крім того вивчався вплив відводу тепла на процес горіння.

При дослідженні спалювання окремої частки мулових відкладень для визначення маси частки та золи після згорання використовувались ваги ВЛР-20.

Час горіння частки визначався відео фіксацією процесу. Температура продуктів згорання вимірювалась безпосередньо біля фронту факелу (рис. 2.17) броньованою хромель-алюмелівою термопарою з діаметром спаю 0,1мм.

Маса часток мулу при експериментальному дослідженні була в межах від 0,02 г до 0,25г.

2.2.11. Пальникові пристрої для спалювання композитного палива та його компонентів

На рис. 2.18. представлений пальниковий пристрій двостадійного горіння палива. Для спалювання у факелі мулові відкладення були подрібнені до пиловидного стану. Після чого був визначений гранулометричний склад пилу, який суттєво впливає на процес спалювання палива за методикою, викладеною [81].



Рис. 2.18. Пальниковий пристрій двостадійного горіння палива

Для спалювання у факелі мулові відкладення були подрібнені до пиловидного стану. Після чого був визначений гранулометричний склад пилу, який суттєво впливає на процес спалювання палива за методикою, викладеною [81].

Визначення гранулометричного складу палива провадилось шляхом розсіву палива на декількох стандартних ситах. З цією метою використовувались сита з розміром отворів D : 0,05; 0,1; 0,315; 0,5; 1,0 мм.

Кількісними характеристиками гранулометричного складу є залишки на ситах з різними розмірами чарунк. Повний залишок на ситі з розміром чарунки x позначений R_x і є відношенням маси палива, яке залишилося на ситі, до маси всієї проби.

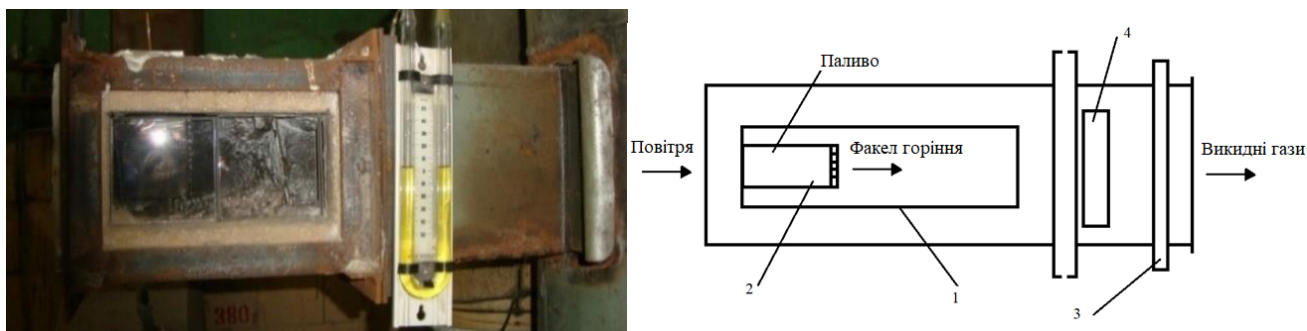


Рис. 2.19. Експериментальна установка для дослідження горіння палива в швидкісному (затисненому) шарі:

- 1 – стінка з кварцового скла; 2 – решітки з титану з дзеркалом горіння; 3 – шибер;
4 – манометр

Дослідження горіння композитного палива проводили на експериментальній установці, яка дозволяє спалювати паливо в швидкісному (затисненому) шарі при різних перепадах тиску на ньому. При цьому горіння при низьких перепадах тиску дає можливість моделювати спалювання палива в звичайному шарі.

Експериментальна установка показана на рис. 2.19. Вона являє собою прямокутний канал з поперечним перерізом 40мм x 80мм, одна з бокових стінок розміром 80мм x 170мм виконана з кварцового скла (1) товщиною 15мм. В середині каналу в якості колосників встановлені решітки з титану з дзеркалом горіння (2) 40мм x 80мм.

Установка працює під розрідженням. Окислювач – повітря засмоктується димосмоком. Шибер (3) на виході з установки дозволяє встановлювати необхідне розрідження на шарі. Манометром (4) регулюють величину тиску розрідження в шарі.

2.2.12. Методика по визначенню хімічного складу золи паливних гранул

Одним з проблемних питань, що виникають при спалюванні паливних гранул є їхній хімічний склад, що впливає процес спалювання, а саме – золи, яка за дії високих температур спалювання гранул спікається, що може призводити до блокування рухомих елементів топки, відкладення розплавлених часток на конвективних поверхнях теплообміну, внаслідок чого погіршуються умови тепловіддачі та перегріваються труби. Таким чином, актуальним є вивчення хімічного складу, утвореної після спалювання гранул, золи для подальшого їхнього застосування.



Рис. 2.20. Підготовка зразків паливних гранул до аналізу:

- 1 – двокомпонентні гранули на основі мулових відкладень та торфу;
 2 – трьохкомпонентні гранули на основі мулових відкладень, торфу та лузги гречки;
 3 – трьохкомпонентні гранули на основі мулових відкладень, торфу та тирси

Хімічний склад золи досліджувався для композитних гранул, отриманих на основі мулових відкладень, торфу та біомаси (лузги гречки або тирси). Гранули подрібнювали й випалювали (рис. 2.20) для визначення вмісту карбонатів кальцію і магнію, сульфату кальцію, оксидів алюмінію та заліза, нерозчинних у соляній кислоті речовин, домішок тощо.

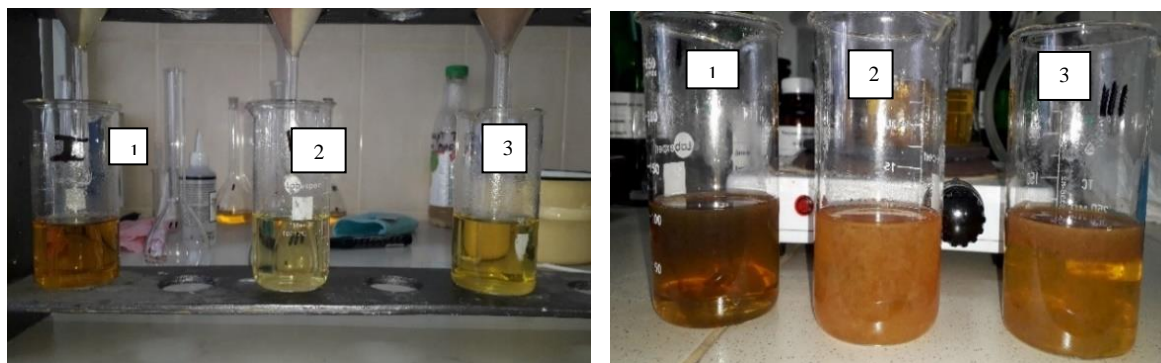


Рис. 2.21. Аналіз зразків паливних гранул на вміст гіпсу:

- 1 – двокомпонентні гранули на основі мулових відкладень та торфу;
 2 – трьохкомпонентні гранули на основі мулових відкладень, торфу та лузги гречки; 3 – трьохкомпонентні гранули на основі мулових відкладень, торфу та тирси

Визначення хімічного складу дослідних зразків гранул проводили згідно ДСТУ 1451-96 «Камінь вапняковий для цукрової промисловості» [82]. Визначення масової частки гіпсу (рис. 2.21) показав, що найбільше гіпсу міститься в зразку 2, про що свідчить утворення щільного драгледоподібного осаду. Дослідження проведенні в трьохкратній повторюваності.

2.4. Висновки до другого розділу

1. У розділі наведено опис приладів та установок, які підібрані для проведення експериментальних теплофізичних досліджень композитної сировини на основі мулових відкладень, торфу та біомаси.
2. Викладено підібрані та використані методики для проведення і обробки результатів експериментальних досліджень.
3. Дослідження процесів конвективного сушіння з використанням експериментального стенду дозволили отримати кінетику сушіння композитної сировини.
4. За допомогою аналізатору води Hygrolab-2 визначено активність води композитних гранул, показано вкраплення пластику в ньому.
5. Використання калориметра КТС-4, дозволила отримати питому теплоту згоряння композитних гранул, яка вища ніж у складових композиту.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОМАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ СУШІННІ КОМПЗИТНОЇ СИРОВИНИ НА ОСНОВІ ЗАСТАРІЛИХ МУЛОВИХ ВІДКЛАДЕНЬ, ТОРФУ ТА БІОМАСИ

3.1. Підготовка сировини, створення композиту та гранулоутворення з застарілих мулових відкладень, торфу та біомаси

В лабораторії відділу тепломасоперносу в теплотехнологіях Інституту технічної теплофізики НАН України проведені дослідження із визначення вологості та зольності мулових відкладень, торфу, лузги гречки, тирси та створені на їх основі дво- та трьохкомпонентний композит(рис. 3.1) [60].

З рисунка 3.1 видно, що зольність мулових відкладень становить 47,3%, що не допустимо при спалюванні. Торф з родовища ДП «Чернігівторф» має достатньо низку зольність 14,1%. При поєднанні цих матеріалів зольність композиту становить 33,1%, що також перевищує допустимі норми при спалюванні гранул. Зольність біомаси у тирси – 3,1%, а лузги гречки –1,6%. Для підвищення якості і зменшення зольності муловоторф'яних гранул доцільно до них додавати тирсу та лузгу гречки. Зольність трьохкомпонентних сумішей становить 25% [60].

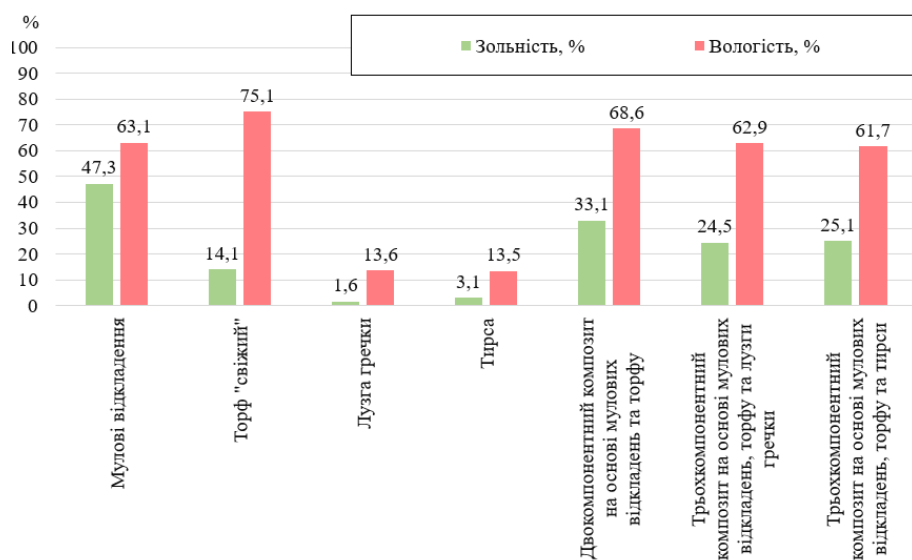


Рис. 3.1. Визначення зольності і вологості мулових осадів, торфу, лузги гречки, відходів деревини (тирси) та їх композит

Приготування композиту проводили за етапами:

1. При приготуванні робочої суміші з чистих застарілих мулових відкладень

видаляли дрібні камінчики, пробки від пластикових пляшок, плівки та інший великий сміття.

2. При наявності грудок торф подрібнюють в однорідну масу. Біомасу подрібнюють на дрібні фракції.

3. Після цього застарілі мулові відкладення розминаємо з торфом вручну в різних пропорціях до утворення мулово-торфової суміші. При замішуванні був неприємний запах.

3. Під час створення трьохкомпонентного композиту до мулоторф'яної суміші додаємо тирсу або гречану лузгу.

4. Попередню дегідратацію проводили мулу та торфу в сушильній шафі для створення мулових сумішей з різною вологістю.

5. Створений композит залишали на деякий час для усереднення.

На основі застарілих мулових відкладень з вологістю 63,1% та торфу з вологістю 75,1% при змішуванні в підібраних співвідношеннях: а) 70% мулу на 30% торфу; б) 50% мулу на 50% торфу; в) 30% мулу на 70% торфу, створений різний композит [83 – 87]. Композит замішувався досить легко на протязі 5 – 10 хв.



Рис. 3.2. Композит:

а) співвідношення 1(70% мулу на 30% торфу); б) співвідношення 2 (50% мулу на 50% торфу); в) співвідношення 3(30% мулу на 70% торфу)

Перше співвідношення: мало вигляд однорідної густої пасти (рис. 3.2 а) [83]. Друге співвідношення: мало вигляд однорідної розсипчастої маси, яка місцями зліплена в грудки (рис. 3.2 б) [84]. Третє співвідношення: мало вигляд однорідної розсипчастої маси (рис. 3.2 в) [85].

Після перемішування суміш гранулювали в гідравлічному пресі HLR-12 під тиском 2,118 - 2,197 МПа. Кожну суміш гранулювали протягом 1 години до отримання необхідної кількості.



Рис. 3.3. Отримані гранули з суміші:

- співвідношення 1: а) $d = 6$ мм; б) $d = 12$ мм
- співвідношення 2: в) $d = 6$ мм; г) $d = 12$ мм
- співвідношення 3: д) $d = 6$ мм; є) $d = 12$ мм

Гранули за першим співвідношенням вологі, слизькі, м'які, при невеликому навантаженні втрачають форму і злипаються (рис. 3.3 а, б). Порівняно з першим, гранули за другим співвідношенням більш тверді, деформуються при більших навантаженнях і не злипаються (рис. 3.3 в, г). Гранули за третім співвідношенням є найбільш твердими, крихкими та антипригарними порівняно з двома іншими (рис. 3.3 г, д).

В результаті змішування двокомпонентного композиту (торф з «Чернігівторф», застарілі мулові відкладення з м. Фастів) різної вологості та пропорції були отримані мулоторф'яні гранули з різною початковою вологістю (рис. 3.4.) [86, 87].

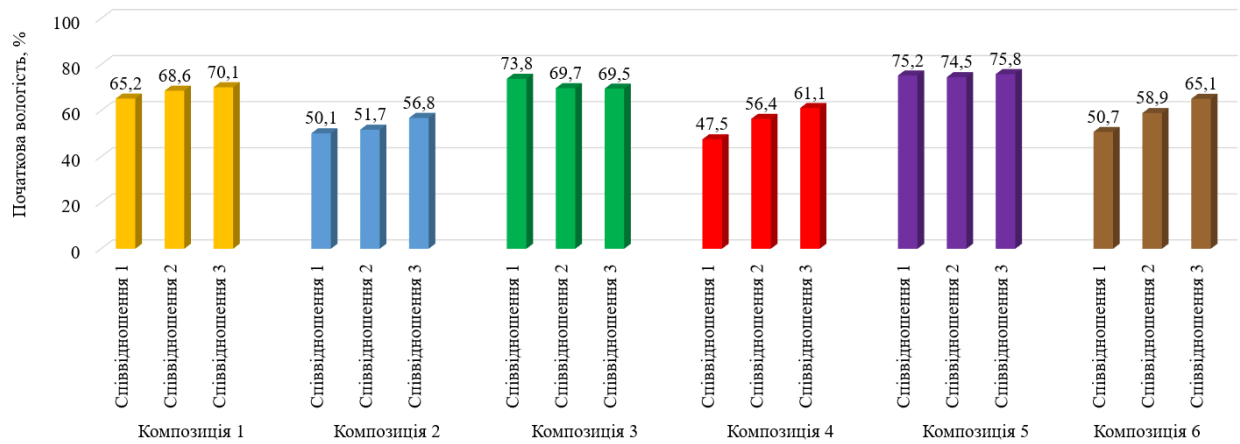


Рис. 3.4. Змінна початкової вологості в залежності від композитту та співвідношення складу гранул

Композит 1 та 2 створенні з мулових відкладень вологістю 63,1% та торфом з вологістю 75,1% та 45,1% відповідно. Композит 3 та 4 з мулових відкладень вологістю 70,1% та торфом з вологістю 75,1% та 45,1% відповідно. Композит 5, 6, 7 з мулових відкладень вологістю 75,9% та торфом з вологістю 75,1%, 45,1% та 20,1% відповідно.

Небажано складати композицію з 20,1% торфу, тому що гранули, що утворюються після змішування торфу вологістю 45,1% з осадом вологістю 63,1% і 70,1% є крихкими і розсичастими.

На рисунку 3.5 зображено зміна зольності та вмісту органічних речовин в залежності від співвідношення складу муло-торф'яних гранул. Чим більше в співвідношенні мулових відкладень тим більше зольність та менше вміст органічних речовин.

Також створений трьохкомпонентний композит з торфу з вологістю 75,13%, зольністю 14,11%; застарілі мулові осади вологістю 63%, зольністю 47,33% та біомаса (лузга гречки з вологістю 13,6%, зольністю 1,6%; відходи деревини (тирси) з вологістю 13,5%, зольністю 3,1%) [88].

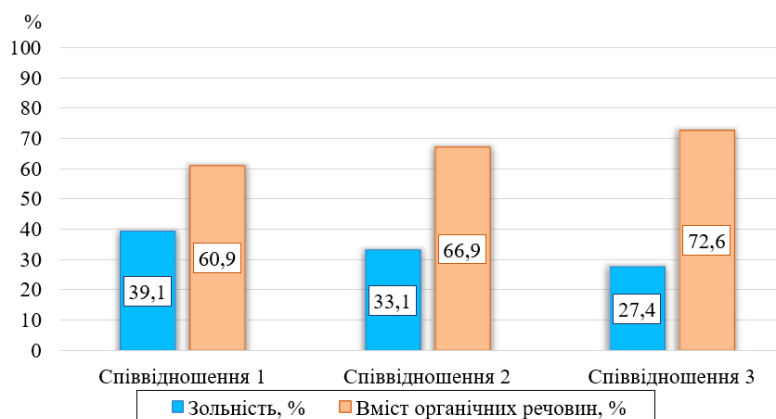


Рис. 3.5. Зміна зольності та вмісту органічних речовин в залежності від співвідношення складу гранул

Композит з лузою гречки комкувався (рис. 3.6 а). Композит з тирсою був розсипчастим (рис. 3.6 б). Гранули формували під тиском 1,961 – 3,923 МПа. Сформовані гранули з трьохкомпонентного композиту не злипаються, при не великих навантаженнях руйнуються (рис. 3.7).

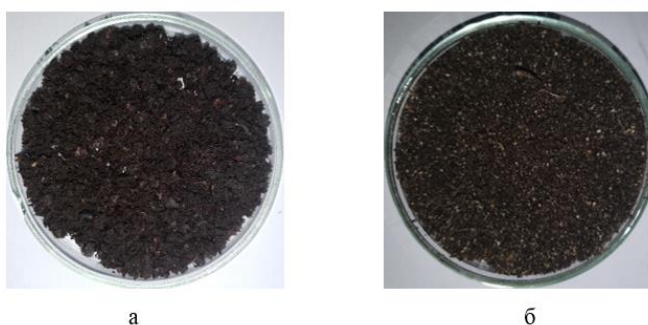


Рис. 3.6. Трьохкомпонентний композит
а) з лузою гречки; б) з тирсою



Рис. 3.7. Отримані трьохкомпонентні гранули
а) з лузою гречки; б) з тирсою

Як видно з рисунка 3.8, трьохкомпонентні гранули мають меншу зольність та більший вміст органічних речовин в порівнянні з двокомпонентними.

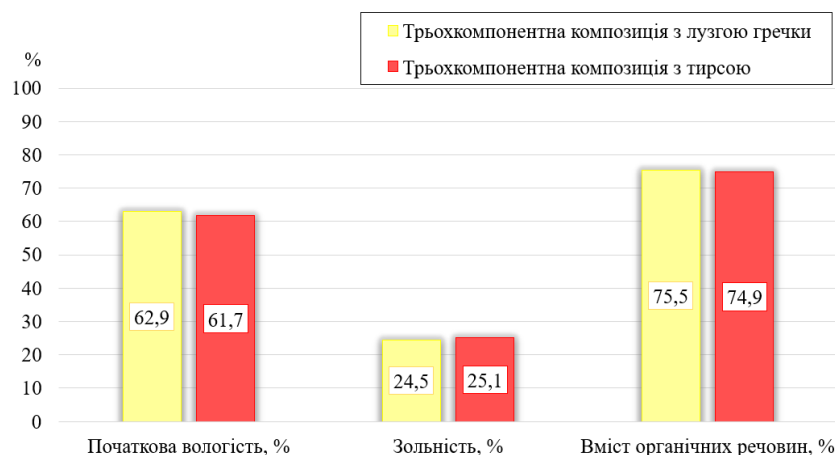


Рис. 3.8. Зміна початкової вологості гранул, зольності та вмісту органічних речовин від складу композиту



Рис. 3.9. Гранули з двокомпонентного композиту сгранульовані на шнековому механічному пристрої:

- а) двокомпонентні гранули на основі мулових відкладень та торфу;
- б) трьохкомпонентні гранули на основі мулових відкладень, торфу та тирси;
- в) трьохкомпонентні гранули на основі мулових відкладень, торфу та лузги гречки

На рис. 3.9. представлено дво- та трьохкомпонентні гранули сгранульовані на шнековому механічному пристрої діаметром 6 мм. Для гранулювання були використані суміші у відповідних пропорціях наведені вище на рис. 3.2, б та 3.6. Трьохкомпонентні гранули мають більш рихлу структуру порівняно з двокомпонентними.

Створений композит основі застарілих мулових відкладень з вологістю 63,1% та торфу з пойми Ірпеня з вологістю 55,13% та зольністю 47,3% виглядає ідентично

торфу з Чернігівторфа, але формується суміш довше. Перше співвідношення: після легкого перемішування протягом 10 хвилин суміш має форму однорідної густої пасти (рис. 3.10а). Друге співвідношення: порівняно з першим, після 15 хвилин складнішого перемішування виглядала як однорідна крихка маса, а в деяких місцях утворювалася в грудки (рис. 3.10 б). Трете співвідношення: замішувалась досить складно на протязі 20 – 25 хвилин, після цього суміш мала вигляд однорідної розсипчастої маси (рис. 3.10 в).

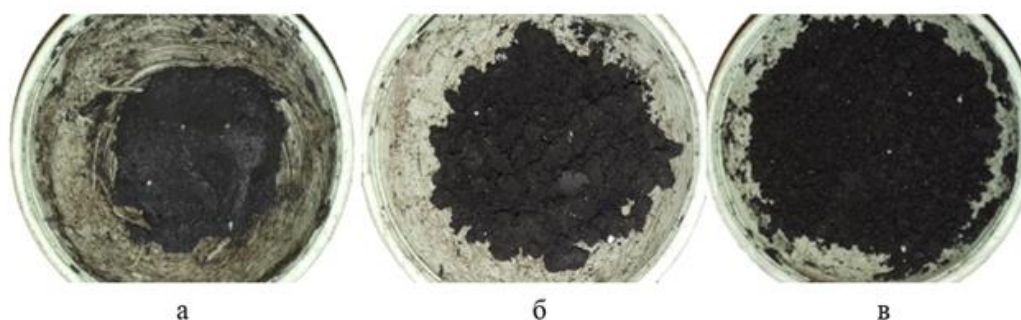


Рис. 3.10. Композит:

а) співвідношення 1 (70% мулу на 30% торфу); б) співвідношення 2 (50% мулу на 50% торфу); в) співвідношення 3 (30% мулу на 70% торфу)

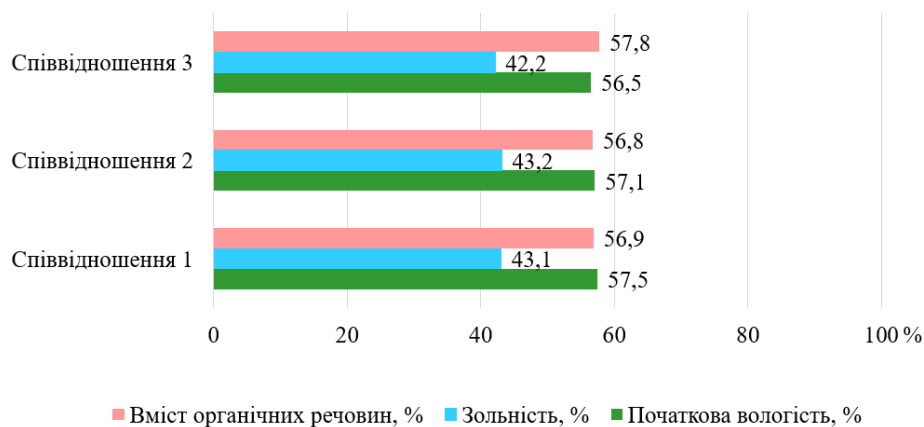


Рис. 3.11. Зміна початкової вологості, зольності та вмісту органічних речовин від складу композиту

Як видно з рисунка 3.11, композит з торфом з пойми Ірпеня мають перевищену зольність, яка більше допустимих норм при спалюванні. Тому композит з торфом з пойми Ірпеня не підходять для подальшої роботи [89].

Створені дво- та трьохкомпонентні суміші гранулювали і піддавали сушінню на конвективному сушильному стенді.

3.2. Дослідження кінетики процесу сушіння композитних гранул на основі застарілих мулових відкладень, торфу та біомаси на конвективному сушильному стенді

Температурні криві вперше були введені А.В. Ликовим та мають важливе значення для аналізу процесу сушіння. В початковій стадії прогрів поверхні матеріалу відбувається інтенсивно, швидко досягаючи температури мокрого термометра. Криві сушіння характеризують зміну середньої вологості матеріалу W^c з часом. Аналіз цих кривих сушки показує, що на початку процесу коли вологість матеріалу інтенсивно зменшується по кривій має місце короткочасна стадія прогріву матеріалу, потім вологість змінюється по прямій лінії, цей перший період називається першим періодом сушіння [90].

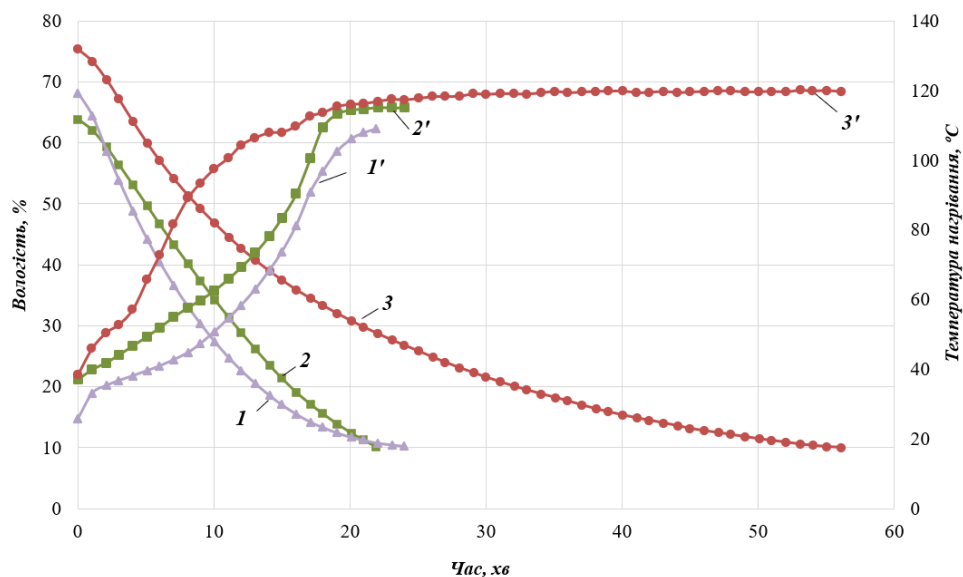


Рис. 3.12. Зміна вологості (1,2,3) і температури всередині шару (1',2',3') мулоторф'яного композиту та його складових від часу.

Режимні параметри $t = 120^{\circ}\text{C}$, $V = 2 \text{ м/с}$:

1, 1' – мулоторф'яний композит; 2, 2' – мул; 3, 3' – торф

На рисунку 3.12 наведені криві температурні та кінетики сушіння мулових відкладень, торфу та їх композиту. На протязі 30 хвилин торф прогрівається до температури сушіння 120°C . Мул досягає цієї температури на протязі 20 хвилин, а їх композит має характер прогрівання мулових відкладень і досягає заданої температури через 20 хвилин. Проведено порівняння кінетики сушіння торфу, мулу

та композиту. Як видно з рисунку, у всіх представлених кривих цей період короткий. В основному у нас спостерігається другий період сушіння, який характеризується зменшенням інтенсивності віддачі вологи.

Мулоторфяний композит при температурі теплоносія 120°C до кінцевої вологості 10% сушиться 24 хв, що більше на 12% від мулу і в 2,3 менше за торф. Температура прогрівання матеріалу в мулі – 109,1°C, торфі – 119,6 °С, мулоторфяному композиті – 115,2 °С.

3.2.1. Дослідження кінетики сушіння композитних гранул після гранулювання на гідравлічному пресі (тиск формування 2,118 – 2,197 МПа)

Дослідження гранулювання показало, що міцні гранули отримані при співвідношенні компонентів 50%М (мулові відкладення)+50%Т(торф) та 45%М+45%Т+10% біомаси. Подальші дослідження проводилися на цих композитах [61].

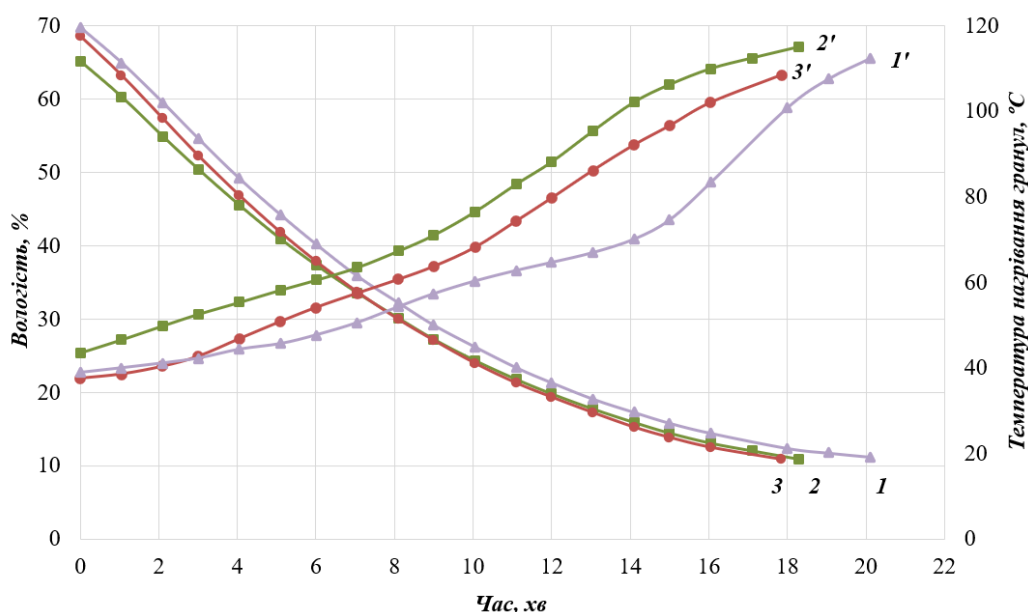


Рис. 3.13. Зміна вологості (1,2,3) і температури всередині гранул (1',2',3') в залежності пропорції мулоторфяного композиту від часу.

Режимні параметри $t = 120^{\circ}\text{C}$, $V = 2$ м/с, $d = 6$ мм:

1, 1' – 70% мулу / 30% торфу; 2, 2' – 30% мулу / 70% торфу;

3, 3' – 50% мулу / 50% торфу

На рис. 3.13 представлено температурні криві та кінетика сушіння мулотор-

фяних гранул на конвективному сушильному стенді при температурі 120°C у різних пропорціях: $70\%M + 30\%T$; $50\%M + 50\%T$; $30\%M + 70\%T$.

Дослідження впливу складу композиту показало, що найменша тривалість сушіння гранул у композиту $50\%M+50\%T$ (крива 3). Збільшення в співвідношенні мулових відкладень призводить до збільшення тривалості сушіння гранул (крива 1), але зменшення в співвідношенні мулових відкладень не завжди зменшує тривалість сушіння (крива 2) [91].

Характер сушіння гранул з композиту $70\%M+30\%T$ відрізняється в порівнянні з іншими (крива 4), до 12 хв йде повільне прогрівання, після цього спостерігається різке нагрівання до кінцевої температури. Найбільш міцні гранули після сушіння у пропорції $50\%M + 50\%T$ та найменша тривалість сушіння.

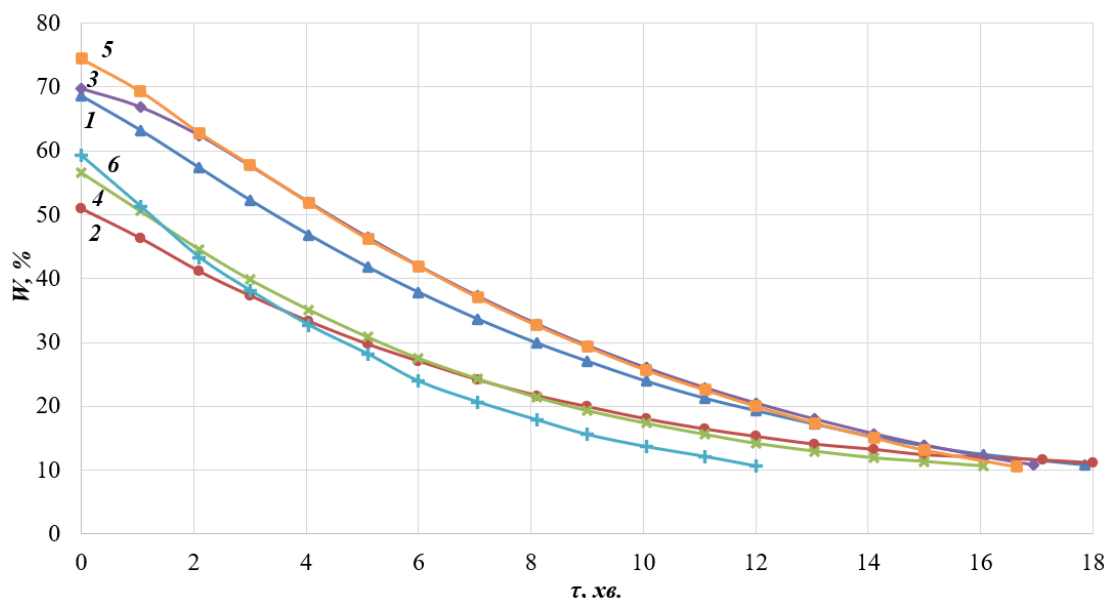


Рис. 3.14. Зміна вологості в залежності компонентів композиту 1 – 6 на тривалість сушіння у співвідношенні $50\%M+50\%T$.

Режимні параметри $t = 120^{\circ}\text{C}$, $V = 2$ м/с, $d = 6$ мм:

1 – $75\%M75\%T$; 2 – $70\%M75\%T$; 3 – $63\%M75\%T$; 4 – $75\%M45\%T$;

5 – $70\%M45\%T$; 6 – $63\%M45\%T$

На рис. 3.14. зображено дослідження кінетики процесу сушіння композиту № 1 – 6 у співвідношенні компонентів $50\%M + 50\%T$. Як видно з рисунку найменша тривалість сушіння у співвідношення 6, яка у 1,5 раз менша ніж у співвідношення 2. В загальному тривалість сушіння гранул діаметром 6 мм у різного композиту при

різних співвідношеннях становить 16 – 18 хвилин.

Характер сушіння гранул з композиту 70%М+30%Т відрізняється в порівнянні з іншими (крива 1'), до 12 хв йде повільне прогрівання, після цього спостерігається різке нагрівання до кінцевої температури. Найбільш міцні гранули після сушіння у пропорції 50%М + 50%Т та найменша тривалість сушіння.

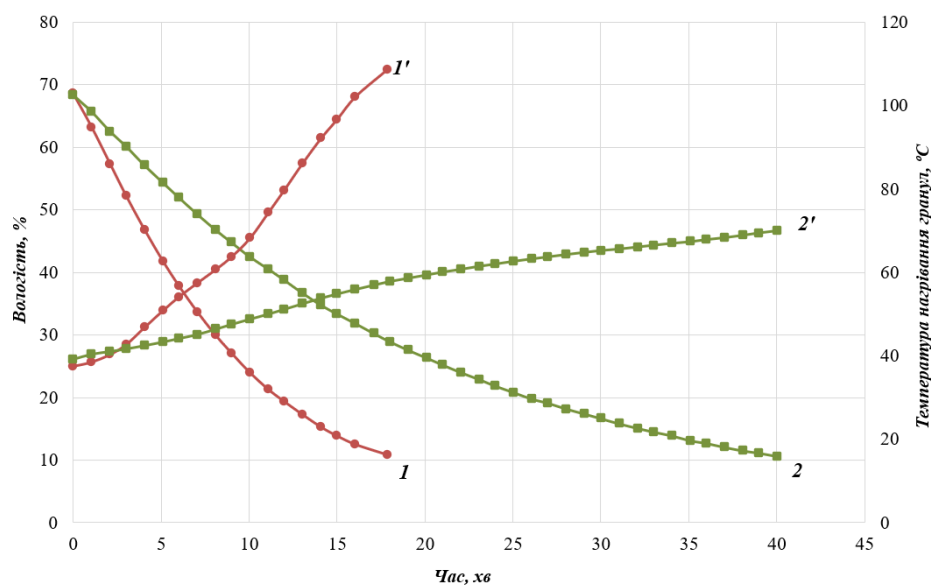


Рис. 3.15. Зміна вологості (1,2) і температури всередині гранул (1',2') в залежності діаметру гранул мулоторф'яного композиту від часу.

Режимні параметри $t = 120^{\circ}\text{C}$, $V = 2 \text{ м/с}$, пропорція 50% мулу / 50% торфу :

1, 1' – $d = 6 \text{ мм}$; 2, 2' – $d = 12 \text{ мм}$

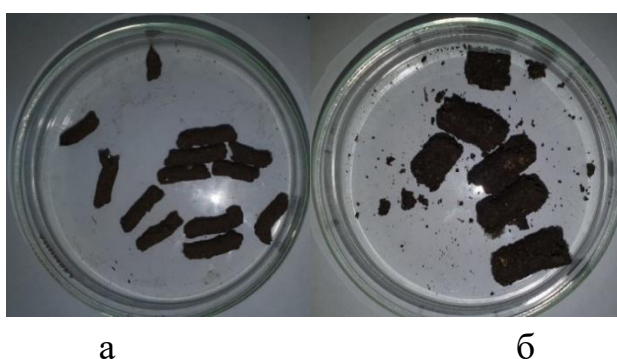


Рис. 3.16. Зразки гранул після сушіння при температурі теплоносія 120°C :

а) $d = 6 \text{ мм}$; б) $d = 12 \text{ мм}$

На рисунку 3.15 представлені температурні криві та кінетика сушіння композиту 50М+50Т в залежності діаметра гранул. Як видно з температурних кривих прогрів відбувається інтенсивніше в гранулах діаметром 6 мм. Дослідження

впливу діаметра гранул показали, що при збільшенні діаметру гранул тривалість сушіння збільшується у 2,2 рази.

На рис. 3.16 зображені зразки гранул діаметром 6 та 12 мм після сушіння при температурі теплоносія 120 °С. Як видно з рисунку гранули діаметром 6 мм мають однорідну форму та більш міцніші.

Для зменшення зольності гранул була створена трьохкомпонентний композит на основі мулоторф'яної суміші до якої додавали 10% тирси або 10% гречаної лузги. Створення трьохкомпонентних гранул відбувалось на гідравлічному пресі.

На рис. 3.17 представленні температурні криві та кінетика сушіння дво- та трьохкомпонентних гранул.

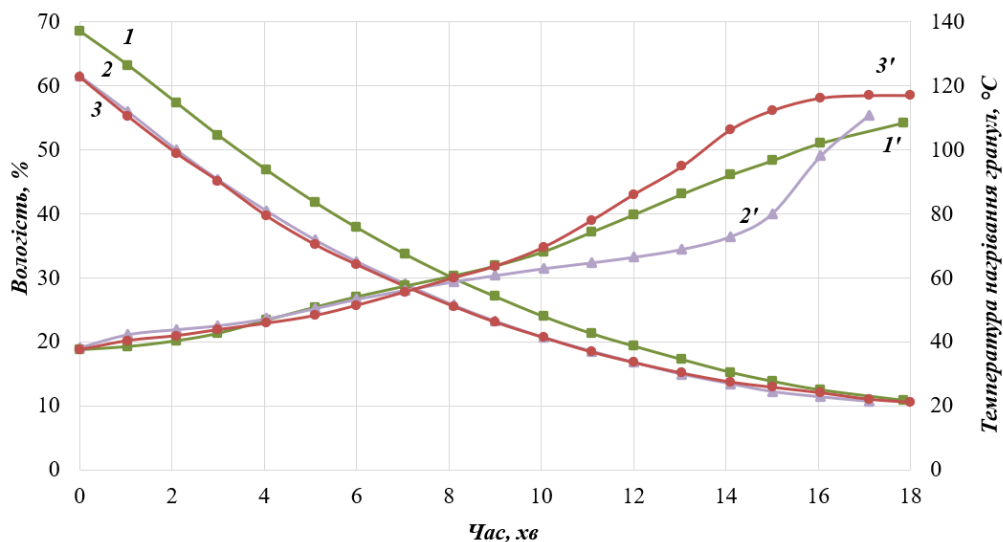


Рис. 3.17. Зміна вологості (1,2,3) і температури всередині гранул (1',2',3') дво- та трьохкомпонентних гранул від часу.

Режимні параметри $t = 120^{\circ}\text{C}$, $V = 2 \text{ м/с}$, $d = 6 \text{ мм}$:

1, 1' – двокомпонентні гранули у пропорції 50% мулу/50% торфу;

2, 2' – трьохкомпонентні гранули у пропорції 45% мулу/45% торфу/10% гречаної лузги; 3, 3' – трьохкомпонентні гранули у пропорції 45% мулу/45% торфу/10%

тирси

Як видно з рисунку 3.17, кінетика сушіння гранул з трьохкомпонентного композиту схожі і криві налягають одна на одну (крива 2, 3). Криві кінетики сушіння дво- та трьохкомпонентного композиту показують, що сушіння йде з

поступовим зменшенням вологості. Тривалість сушіння гранул як за дво- та і за трьохкомпонентного композиту знаходиться в межах 17 – 18 хв. [92, 93].

Температурні криві мають різний характер кривих. Трьохкомпонентні гранули з тирсою до 16 хв прогриваються інтенсивно виходячи на рівномірну температуру (крива 3'), але гранули з лузгою гречки до 14 прогриваюся повільно, а після спостерігається різке зростання до кінцевого значення (крива 2').

Порівняння сформованих трьохкомпонентних гранул і двоконпонентних гранул показало однакові характеристичні криві сушіння. Час висихання трикомпонентних гранул до кінцевої вологості 10% при температурі теплоносія 120°C становить 17-18 хвилин.

3.2.2. Дослідження кінетики сушіння композитних гранул на конвективному сушильному стенді після гранулювання на шнековому механічному пристрої (тиск формування 7,5 – 8,0 МПа)

Отримана залежність зміни кінетики сушіння та зміна температури від способу гранулювання при температурі теплоносія 120°C (рис. 3.18) [94].

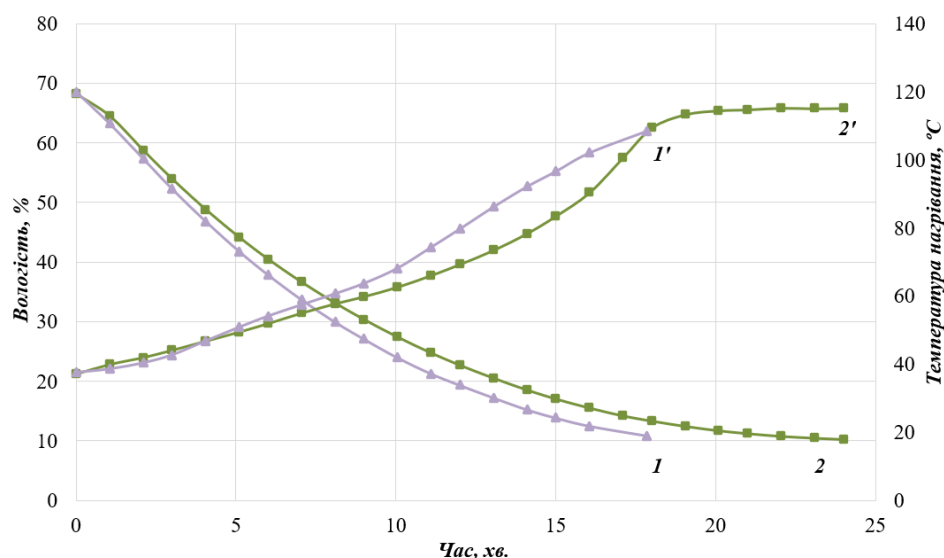


Рис. 3.18. Зміна вологості (1,2) і температури всередині гранул (1',2') від способу гранулювання композиту у пропорції 50% мулу/50% торфу.

Режимні параметри $t = 120^{\circ}\text{C}$, $V = 2 \text{ м/с}$, $d = 6 \text{ мм}$:

1, 1' – на гідралічному пресі; 2, 2' – на шнековому механічному пристрої

При гранулюванні на гідралічному пресу мулоторф'яні гранули сушаться

швидше на 25%, але при цьому пресуються одиночні гранули, що різко збільшує трудомісткість технологічної операції і не може бути рекомендований для виробництва. При отриманні гранул в шнековому пресі при їх сушінні збільшується тривалість, що пов'язано з утворенням більш міцніших гранул і не потребує ручної праці при гранулюванні.

Гранули отримані при формуванні на шнековому пристрої мають вищу температуру прогрівання ніж гранули при формуванні на гідравлічному пристрої.

На рис. 3.19 представлені температурні криві та кінетика сушіння мулоторф'яних гранул на конвективному сушильному стенді при температурах 80°C та 120°C у пропорції 50% мулу/50% торфу.

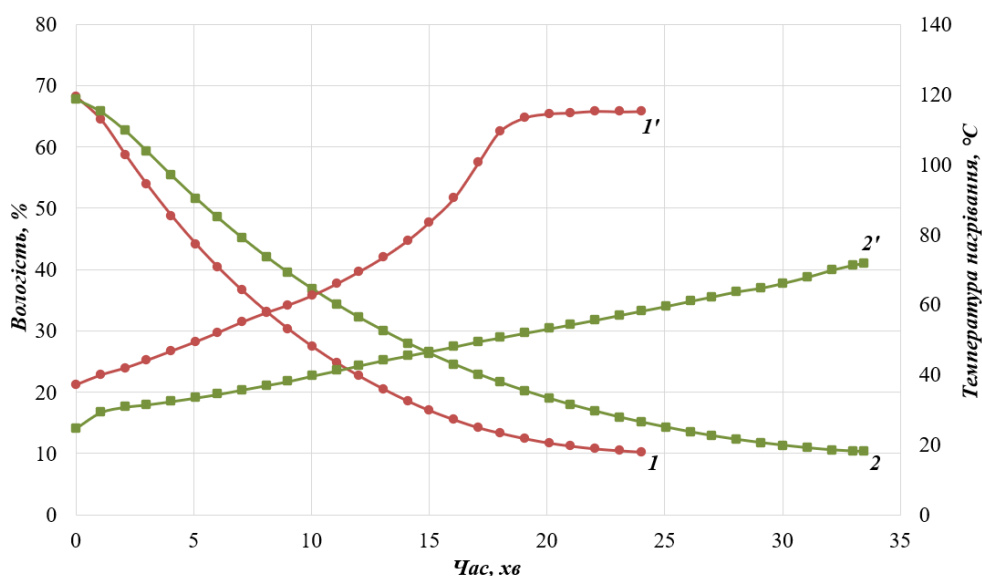


Рис. 3.19. Зміна вологості (1,2) і температури всередині гранул (1',2') мулоторф'яних гранул у пропорції 50% мулу/50% торфу від часу.

Режимні параметри $V = 2$ м/с, $d = 6$ мм:

1,1' – 120°C; 2,2' – 80°C

Тривалість сушіння мулоторф'яних гранул з підвищенням температури теплоносія від 80 до 120°C зменшується на 29,5% (рис. 3.19). Нагрівання гранул при температурі теплоносія 80°C проходить рівномірно і при вологості гранул 10% складає 72°C, при температурі 120°C нагрівання гранул йде інтенсивніше і при відповідній вологості складає 115°C.

Швидкість сушіння мулоторф'яних гранул з підвищенням температури від

80 до 100°C підвищується від 3,8 до 5,5 %/хв. (рис. 3.20).

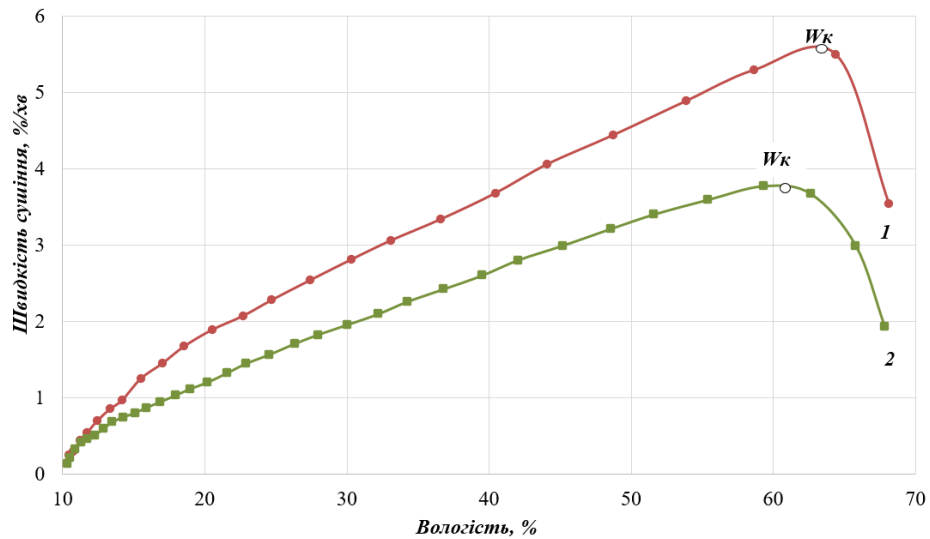


Рис. 3.20. Зміна швидкості сушіння мулоторф'яних гранул у пропорції 50% мулу/50% торфу. Режимні параметри $V = 2$ м/с, $d = 6$ мм: 1 – 120°C; 2 – 80°C

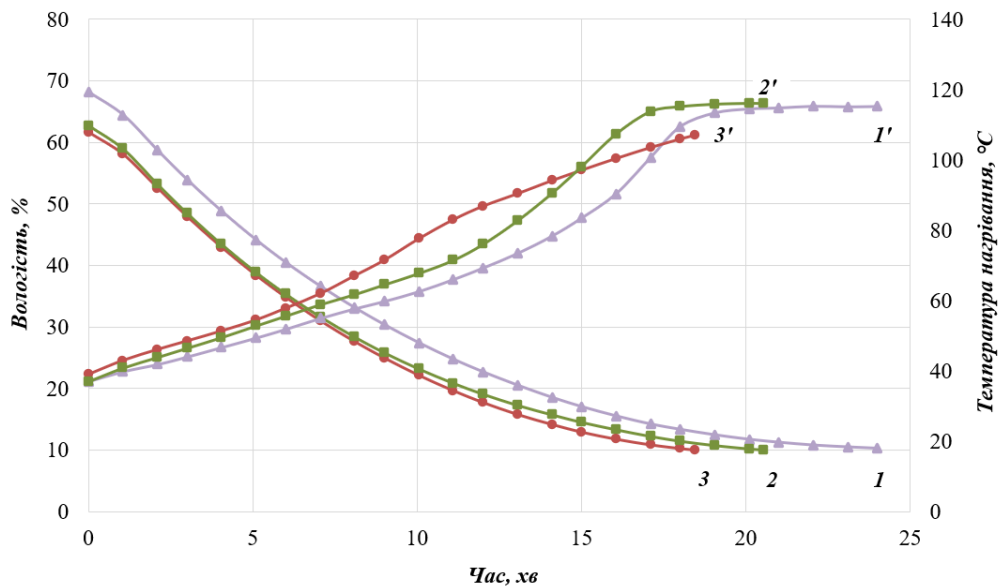


Рис. 3.21. Зміна вологості (1,2,3) і температури всередині гранул (1',2',3') двох та трьохкомпонентних гранул від часу.

Режимні параметри $t = 120^\circ\text{C}$, $V = 2$ м/с, $d = 6$ мм:

- 1, 1' – двокомпонентні гранули у пропорції 50% мулу/50% торфу;
- 2, 2' – трьохкомпонентні гранули у пропорції 45% мулу/45% торфу/10% гречаної лузги;
- 3, 3' – трьохкомпонентні гранули у пропорції 45% мулу/45% торфу/10% тирси

Також було досліджено сушіння трьохкомпонентних гранул після гранулюва-

ння на шнековому пресі із включення до мулоторф'яної суміші 10% тирси або 10% гречаної лузги. Трьохкомпонентні гранули сушаться швидше на 13 – 25% від двокомпонентних гранул на основі мула та торфу (рис. 3.21) [95].

На рис. 3.22 представлені залежність швидкості сушіння від вологості дво- та трьохкомпонентних гранул. У двокомпонентних мулоторф'яних гранул швидкість сушіння в критичній точці W_k такаж як і у трьохкомпонентних гранул на основі мулових відкладень, торфу та лузги гречки та складає 5,7%/хв. При цьому трьохкомпонентні гранули на основі мулових відкладень, торфу та тирси мають нижчу швидкість сушіння в критичній точці W_k яка складає 5,3%/хв.

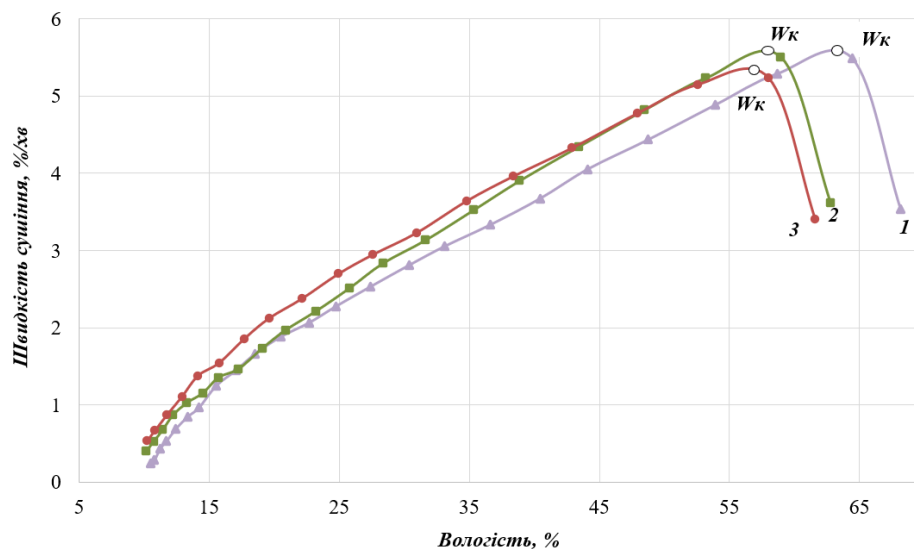


Рис. 3.22. Зміна швидкості сушіння дво- та трьохкомпонентних гранул.

Режимні параметри $t = 120^{\circ}\text{C}$, $V = 2 \text{ м/с}$, $d = 6 \text{ мм}$:

- 1 – двокомпонентні гранули у пропорції 50% мулу/50% торфу;
 2 – трьохкомпонентні гранули у пропорції 45% мулу/45% торфу/10% гречаної лузги;
 3 – трьохкомпонентні гранули у пропорції 45% мулу/45% торфу/10% тирси

Аналогічно проводимо сушіння дво- та трьохкомпонентних гранул при температурі теплоносія 80°C (рис. 3.23).

Як видно з рисунка 3.23 сушіння трьохкомпонентних сумішей при температурі теплоносія 80°C прискорює процес на 10 – 16%. Найвища температура прогрівання спостерігається у трьохкомпонентних гранулах 45% мулу/45% торфу/10% гречаної лузги і становить $78,7^{\circ}\text{C}$, найменше прогрівання $70,3^{\circ}\text{C}$ в трьохкомпонентних гранулах 45% мулу/45% торфу/10% тирси.

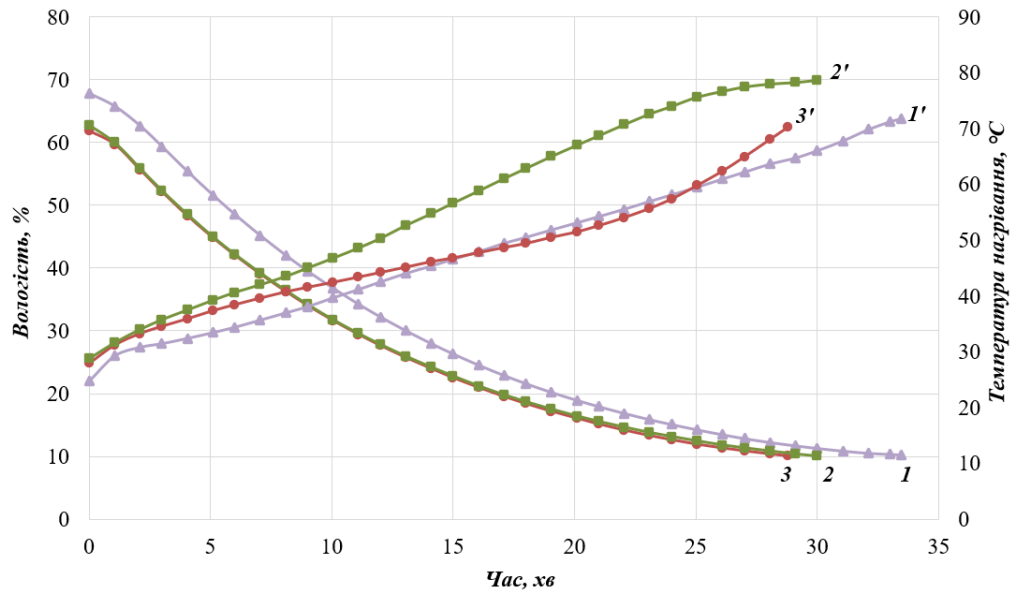


Рис. 3.23. Зміна вологості (1,2,3) і температури всередині шару (1',2',3') дво- та трьохкомпонентних гранул від часу.

Режимні параметри $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 2\text{ м/с}$, $d = 6\text{ мм}$:

- 1, 1' – двокомпонентні гранули у пропорції 50% мулу/50% торфу; 2, 2' – трьохкомпонентні гранули у пропорції 45% мулу/45% торфу/10% гречаної лузги; 3, 3' - трьохкомпонентні гранули у пропорції 45% мулу/45% торфу/10% тирси

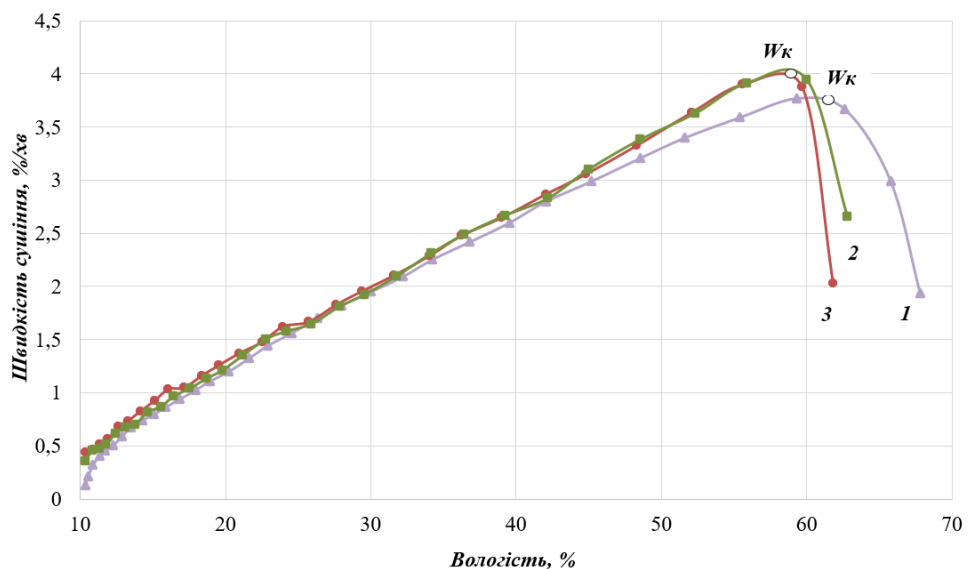


Рис. 3.24. Зміна швидкості сушіння дво- та трьохкомпонентних гранул.

Режимні параметри $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 2\text{ м/с}$, $d = 6\text{ мм}$:

- 1 – двокомпонентні гранули у пропорції 50% мулу/50% торфу;
2 – трьохкомпонентні гранули у пропорції 45% мулу/45% торфу/10% гречаної лузги; 3 - трьохкомпонентні гранули у пропорції 45% мулу/45% торфу/10% тирси

На рис. 3.24 представлені залежність швидкості сушіння від вологості дво- та трьохкомпонентних гранул. Так у двокомпонентних мулоторф'яних гранул швидкість сушіння в критичній точці W_k нижче, ніж у трьохкомпонентних гранул і складає 3,8%/хв. У трьохкомпонентних гранулах в критичній точці W_k швидкість сушіння складає 4%/хв., що вище на 0,2%. Після вологості гранул 42% швидкості сушіння дво та трьохкомпонентних гранул співпадають.

На основі проведених досліджень було визначено, що додавання органічної складової у виді тирси або гречаної лузги зменшує тривалість сушіння та підвищує швидкість сушіння (рис. 3.24).

3.2.3. Дослідження кінетики сушіння композитних гранул на дослідно-промисловій сушильній установці після гранулювання на шнековому механічному пристрої

Також були проведені експериментальні дослідження із сушіння дво- та трьохкомпонентних гранул на дослідно-промисловій сушильній установці при температурі теплоносія 80°C.

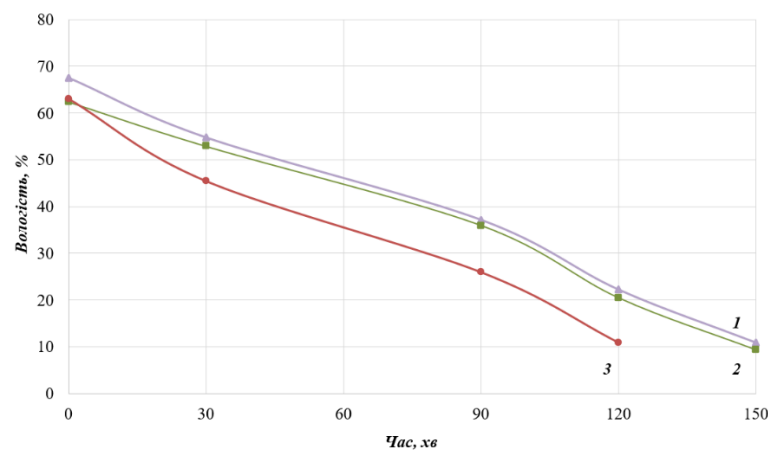


Рис. 3.25. Зміна вологості (1,2,3) дво- та трьохкомпонентних гранул від часу при сушінні в дослідно-промисловій установці.

Режимні параметри $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 2\text{ м/с}$, $d = 6\text{ мм}$:

1 – двокомпонентні гранули у пропорції 50% мулу/50% торфу; 2 – трьохкомпонентні гранули у пропорції 45% мулу/45% торфу/10% тирси; 3 – трьохкомпонентні гранули у пропорції 45% мулу/45% торфу/10% гречаної лузги

На рис. 3.25 представлено результати сушіння на дослідно-промисловій сушильній установці. Як видно з рис. 1 характер сушіння двокомпонентних композитних гранул на основі застарілих мулових відкладень, торфу та трьохкомпонентних композитних гранул на основі застарілих мулових відкладень, торфу та тирси при різних початкових вологостях після 30 хвилини схожий і тривалість сушіння становить 150 хв. При цьому тривалість сушіння трьохкомпонентних біогранул на основі застарілих мулових відкладень, торфу та лузги гречки менше за попередні і становить 120 хв.

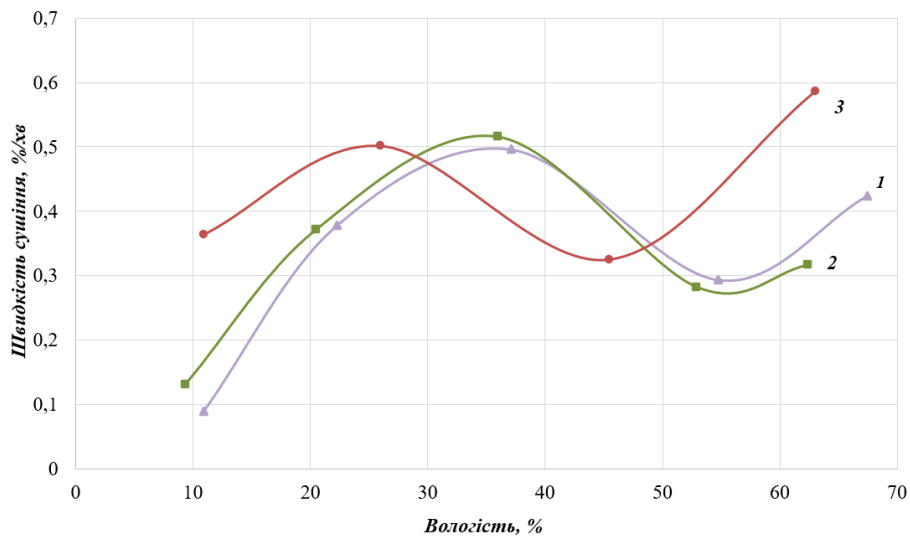


Рис. 3.26. Зміна швидкості сушіння дво- та трьохкомпонентних гранул при сушінні в дослідно-промисловій установці.

Режимні параметри $t = 80^{\circ}\text{C}$, $V = 2 \text{ м/с}$, $d = 6 \text{ мм}$:

1 – двокомпонентні гранули у пропорції 50% мулу/50% торфу; 2 – трьохкомпонентні гранули у пропорції 45% мулу/45% торфу/10% тирси; 3 – трьохкомпонентні гранули у пропорції 45% мулу/45% торфу/10% гречаної лузги

На рис. 3.26 представлено зміну швидкості сушіння дво- та трьохкомпонентних гранул при сушінні в дослідно-промисловій установці. Характер кривих швидкості сушіння не рівномірний і спостерігаються стрибки. У двокомпонентних композитних гранул на основі застарілих мулових відкладень та торфу спостерігається падіння швидкості сушіння з 0,42 %/хв до 0,29 %/хв при вологості 55%, після чого швидкість зростає до 0,5 %/хв при вологості 35%, а далі

швидкість сушіння починає повільно спадати. У трьохкомпонентних композитних гранул на основі застарілих мулових відкладень, торфу та тирси перше падіння швидкості сушіння менше ніж у двокомпонентних композитних гранул та становить з 0,32 %/хв до 0,28 %/хв, далі швидкість зростає до 0,37 %/хв, а потім повільно спадає. Швидкість сушіння трьохкомпонентних композитних гранул на основі застарілих мулових відкладень, торфу та лузги гречки спадає від початку процесу з 0,58 %/хв до 0,32 %/хв, потім підіймається до 0,5 %/хв і після чого спадає.

При сушінні в дослідно-промисловій сушильній установці при температурі теплоносія 80°C тривалість сушіння збільшується в 4 – 5 рази чим при сушінні на конвективному сушильному стенді. Це пояснюється повним завантаженням камери та товщиною шару із утворених композитних гранул на піддонах.

3.3. Розрахунок тривалості та швидкості процесів сушіння композитних гранул

Характеристики процесу сушіння, відображені в кривих сушіння, швидкості сушіння і температурних кривих, в основному визначаються фізико-хімічними і структурно-механічними властивостями матеріалу, які залежать від форми зв'язку вологи з матеріалом, дифузійний характер явища і спосіб підведення тепла, тобто закономірність тіла і середовища. Отримання аналітичної залежності кінетики сушіння матеріалу значно складніше через різноманітність факторів та їх взаємозв'язку. Тому при описі сушіння використано емпіричну залежність. Найближчим методом розрахунку кінетики сушіння є метод, заснований на вивченні загальних закономірностей процесу, аналогічній теорії і практиці сушіння.

Для розрахунку кінетики тепловологообміну при сушінні композитних гранул нами використано метод В.В. Краснікова [96 – 98].

Кінетика сушіння описує зміну середніх вологості та температури матеріалу з часом. За цими залежностями можна розрахувати кількість вологи, що випаровується з матеріалу, витрати тепла на сушіння і тривалість процесу.

Аналізуючи велику кількість експериментальних даних кінетики сушіння

різних матеріалів за різними методами сушіння, отриманих вітчизняними та зарубіжними дослідниками, встановлено наступну закономірність: при сушінні даного матеріалу з початковою вологістю W_n на всіх режимах сушіння зберігається незалежне значення $N\tau$, відповідне цій проміжній вологості W [99, 100]

В математичній формі запису ці закономірності представлені виразом:

$$N_1\tau_1 = N_2\tau_2 = \dots = N_n\tau_n = (N\tau)_W = const, \quad (3.1)$$

де N_1, N_2, \dots, N_n – швидкість сушіння для першого періоду в різних режимах (якщо немає першого періоду - максимальна швидкість сушіння); $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ – проміжний час сушіння, на протязі якого вологість змінюється від початкової вологості W_n до вологості W .

Оскільки змінна $N\tau$ є стабільною величиною, характерною для процесу сушіння, значення $N\tau$ називають узагальненою змінною або узагальненим часом сушіння відповідно до принципів теорії подібності та аналізу розмірів [101, 102].

В частковому випадку для першого періоду сушіння:

$$(N\tau)_W = W_n - W. \quad (3.2)$$

В загальному випадку для другого періоду сушіння:

$$(N\tau)_W = W_n - W + W_x = const, \quad (3.3)$$

де W_x – величина, яка залежить від властивостей матеріалу, визначається з експерименту.

Оперування узагальненим часом сушіння надає дослідженню процесу сушіння узагальнюючий характер. Багато різних комбінацій N і τ дають однакове значення. Тобто фіксоване значення $N\tau$ відповідає не одному визначеному набору основних величин, а великій кількості подібних наборів. Тому дослідження процесів сушіння з використанням $N\tau$ аналізують не окремі часткові випадки, а різні випадки сушіння в поєднанні з деякими узагальненнями параметрів процесу. Більше значення N призводить до меншого часу сушіння τ для досягнення заданої вологості W , але для всіх можливих N значення $N\tau$ залишається незмінним для цього W , залежно від (4.1) або (4.3). Вище, якщо розмістимо на осі абсцис

нормалізований час $N\tau$ і значення проміжної вологості W на осі ординат, усі експериментальні криві сушіння для цього матеріалу будуть отримані при однаковій початковій вологості W_0 . Але при різних режимах перенесені в нову систему координат в іншу область (групу кривих) $W-N\tau$, об'єднані в одну криву, яка називається узагальненою кінетикою сушіння [96 – 98].

За даним методом, швидкість сушіння кожної частини другого періоду є лінійною функцією вологості. Тобто фактична крива швидкості сушіння в другому періоді замінюється ломаною лінією.

Використовуємо для розгляду, так звану відносну швидкість сушіння, яка визначається виразом:

$$N^* = \left| \frac{dW}{d\tau} \right| \div N = \frac{1}{N} \left| \frac{dW}{d\tau} \right|. \quad (3.4)$$

Значення відносної швидкості сушіння при заданому W , отримане з узагальненої кривої сушіння $W-N\tau$, чисельно дорівнює тангенсу кута нахилу точки кривої W до осі $N\tau$, тобто знаходиться безпосередньо з узагальненої кривої сушіння:

$$N^* = \frac{1}{N} \frac{dW}{d\tau} = tg(W, N\tau) = f(W). \quad (3.5)$$

Величина N^* не залежить від режиму сушіння і для конкретного матеріалу при даному методі сушіння є лише функцією вологості.

Виконуючи графічну диференціацію однієї узагальненої кінетичної кривої сушіння, можна отримати криву N^*-W , яку називають узагальненою кривою швидкості сушіння.

Криві сушіння і швидкостей сушіння капілярно-пористих матеріалів мають в основному однакові характеристики, незважаючи на відмінності механізмів волого- і тепловіддачі при різних режимах сушіння і в широкому діапазоні температур теплоносія. Крива має два періоди, другий період розбитий на дві або три частини, і виділені критичні точки W_{K1} , W_{K2} і W_{K3} . Різниця лише кількісна. Подібна аналогія спостерігається при порівнянні кривих сушіння та швидкості сушіння для заданого матеріалу з різними способами сушіння. Іншими словами, відмінності в режимах і методах сушіння не призводять до зміни типу кривої

сушіння і швидкості сушіння для заданого матеріалу. У зв'язку з вищевикладеним при математичному описі кінетики вологообміну під час сушіння у другому періоді слід враховувати емпіричні значення коефіцієнтів, обумовлені властивостями даного матеріалу. Як правило, ці коефіцієнти визначаються безпосередньо з експериментів сушіння для цього матеріалу [96 – 98].

Рівняння кривої сушіння в першому періоді має вигляд:

$$W = W_{\pi} - N\tau. \quad (3.6)$$

Другий період сушіння починається при всіх режимах в W_{K_1} і часу τ , рівного тривалості першого періоду сушіння.

Рівняння для першої частини другого періоду має вигляд:

$$\lg(W - W_p) = \lg(W_{K_1} - W_p) - K_1\tau_1. \quad (3.7)$$

$$W_{K_1} \geq W \geq W_{K_2}$$

де K_1 – коефіцієнт сушіння 1-ої частини другого періоду; τ_1 – час, який відраховується від початку 1-ої частини другого періоду.

Рівняння для другої частини другого періоду має вигляд:

$$\lg(W - W_p) = \lg(W_{K_2} - W_p) - K_2\tau_2. \quad (3.8)$$

$$W_{K_2} \geq W \geq W_{K_3}$$

де K_2 – коефіцієнт сушіння 2-ої частини другого періоду; τ_2 – час, який відраховується від початку 2-ї частини другого періоду.

Рівняння для третьої частини другого періоду має вигляд:

$$\lg(W - W_p) = \lg(W_{K_3} - W_p) - K_3\tau_3. \quad (3.9)$$

$$W_{K_3} \geq W \geq W_K$$

де K_3 – коефіцієнт сушіння 3-ої частини другого періоду; τ – час, який відраховується від початку 3-ї частини другого періоду.

Значення W_p являє собою рівноважну вологість в матеріалі. Величина W_K визначає кінцеву вологість висушеного матеріалу.

Коефіцієнти K_1 , K_2 і K_3 називаються коефіцієнтами сушіння і чисельно дорівнюють тангенсу кута нахилу відрізка до осі τ , в напівлогарифмічному анаморфозі. Значення цих коефіцієнтів залежать від виду, характеристик, режиму і способу сушіння вологого матеріалу [96-98].

Вплив режиму на коефіцієнти K_1 , K_2 і K_3 можна представити значеннями N , як максимальна швидкість сушіння матеріалу на заданому режимі в перший період сушіння (або за відсутності першого періоду - максимальна швидкість сушіння при заданому Wn). Це можливо тому, що N є нормованим значенням, яке відображає вплив усіх параметрів, що впливають на швидкість висихання даного матеріалу, і поширюється на весь другий період сушіння [96–98].

$$K_1 = \chi_1 N. \quad (3.10)$$

$$K_2 = \chi_2 N \quad (3.11)$$

$$K_3 = \chi_3 N. \quad (3.12)$$

Значення χ_1 , χ_2 , χ_3 називають відносними коефіцієнтами сушіння, які різні в двох частинах другого періоду і визначаються формою, структурою і способом сушіння зв'язку вологи з матеріалом, але не залежать від режиму.

Відносні коефіцієнти сушіння визначаються з дослідної кривої за наступним виразом:

$$\chi_1 = \frac{\lg W_{K_1} - \lg W_{K_2}}{N\tau_1}. \quad (3.13)$$

$$\chi_2 = \frac{\lg W_{K_2} - \lg W_{K_3}}{N\tau_2}. \quad (3.14)$$

$$\chi_3 = \frac{\lg W_{K_3} - \lg W_K}{N\tau_3}. \quad (3.15)$$

Загальна тривалість τ_T процесу сушіння (без періоду прогрівання) складається з першого періоду τ_1 , першого τ_2 у другому періоді, періоду сушіння у другій τ_3 і третьої τ_4 частин:

$$\tau_T = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4. \quad (3.16)$$

Вирішивши рівняння (3.6) – (3.9) відносно τ і використовуючи співвідноше-

ння (3.10), (3.11) і (3.12) отримують вираз для розрахунку тривалості сушіння в кожній частині процесу.

Тривалість сушіння в перший період дорівнює:

$$\tau_1 = \frac{W_{\Pi} - W_{K_1}}{N}. \quad (3.17)$$

Тривалість сушіння в 1 – й частині другого періоду:

$$\tau_2 = \frac{1}{\chi_1 N} \lg \frac{W_{K_1}}{W_{K_2}}. \quad (3.18)$$

Тривалість сушіння в 2 – й частині другого періоду:

$$\tau_3 = \frac{1}{\chi_2 N} \lg \frac{W_{K_2}}{W_{K_3}}. \quad (3.19)$$

Тривалість сушіння в 3 – й частині другого періоду:

$$\tau_4 = \frac{1}{\chi_3 N} \lg \frac{W_{K_3}}{W_K}. \quad (3.20)$$

Загальна тривалість процесу:

$$\tau_T = \frac{1}{N} (W_{\Pi} - W_{K_1} + \frac{1}{\chi_1} \lg \frac{W_{K_1}}{W_{K_2}} + \frac{1}{\chi_2} \lg \frac{W_{K_2}}{W_{K_3}} + \frac{1}{\chi_3} \lg \frac{W_{K_3}}{W_K}). \quad (3.21)$$

При відсутності першого періоду в (3.21) замість N вводять максимальну швидкість сушіння, а W_{K_1} замінюється на W_{Π} .

Для дослідження кінетики сушіння були взяті композитні гранули на основі мулу та торфу у пропорції 50%М/50%Т, гранули з додаванням до них 10% тирси у пропорції 45%М/45%Т/10%тирси та з додаванням 10% гречаної лузги 45%М/45%Т/10% гречаної лузги.

Проводимо побудову в системі напівлогарифмічних координатах $\lg W$ від часу проведення дослідів τ для визначення відносних коефіцієнтів сушіння створених композитних гранул (рис. 3.27).

Криві сушіння мулоторф'яних гранул в напівлогарифмічних координатах, які представлені на рис. 3.27 вказують на те, що другий період складається з трьох

частин з критичними точками K_1 , K_2 та K_3 . Чим нижче температура теплоносія, тим пізніше виникають значення критичних точок і повільніше йде процес.

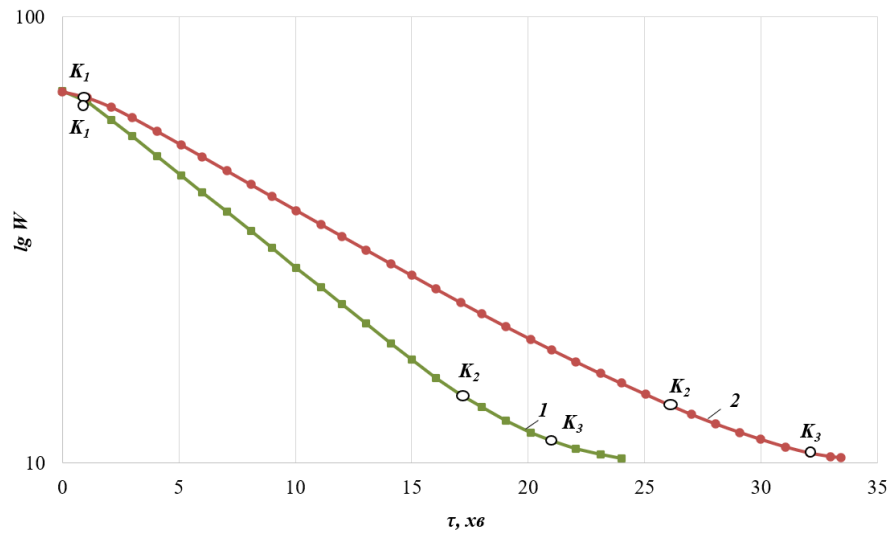


Рис. 3.27. Вплив температури теплоносія на тривалість сушіння двокомпонентних гранул у пропорції 50% мулових відкалденей/50% торфу в напівлогарифмічній системі координат: $V = 1,5$ м/с, $d = 10$ г/кг с. п.
1 – 120°C; 2 – 80°C

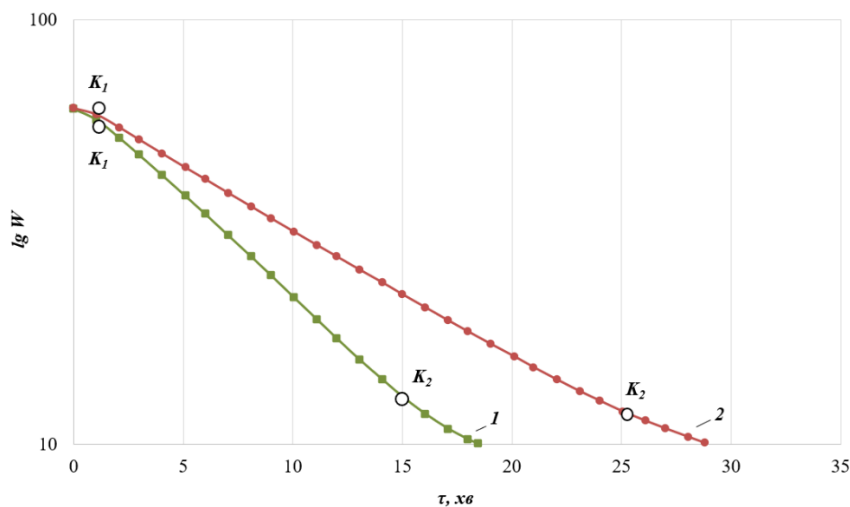


Рис. 3.28. Вплив температури теплоносія на тривалість сушіння трьохкомпонентної гранули у пропорції 45% мулу/45% торфу/10% тирси в напівлогарифмічній системі координат: $V = 1,5$ м/с, $d = 10$ г/кг с. п.
1 – 120°C; 2 – 80°C

Аналогічно проводимо побудову кривих сушіння в напівлогарифмічній системі координат $lg W$ від часу проведення дослідів τ для трьохкомпонентних гранул (рис. 3.28, 3.29).

Криві сушіння композитних трьохкомпонентних гранул в напівлогарифмічних координатах, які представлені на рис. 3.28 і 3.29, показують, що другий період складається з двох частин з критичними точками K_1 та K_2 . Чим нижче температура теплоносія, тим пізніше виникають значення критичних точок і повільніше йде процес.

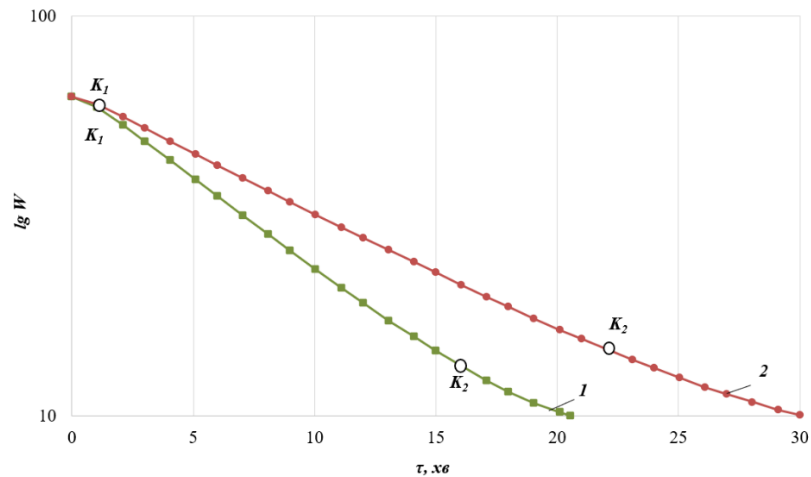


Рис. 3.29. Вплив температури теплоносія на тривалість сушіння трьохкомпонентної гранули у пропорції 45% мулу/45% торфугу/10% гречаної лузги в напівлогарифмічній системі координат: $V = 1,5$ м/с, $d = 10$ г/кг с. п.
1 – 120°C; 2 – 80°C

При математичному описі кінетики вологообміну при сушінні в другому періоді необхідно враховувати величини, що визначаються властивостями цього матеріалу, а точніше емпіричними коефіцієнтами. Ці коефіцієнти необхідно визначати безпосередньо з експерименту. Коефіцієнт відносного висихання χ визначається тільки формулою зв'язку, структури, щільності матеріалу з вологою і не залежить від режиму обробки.

Значення відносних коефіцієнтів сушіння композиційних гранул у другому періоді визначено з рисунка 3.27. На прикладі для режиму 1 приклад з формул 3.13 - 3.15 рівні:

$$\chi_1 = \frac{\lg W_{K_1} - \lg W_{K_2}}{N\tau_1} = \frac{\lg 64,4 - \lg 14,2}{5,48 \cdot 16} \approx 0,008.$$

$$\chi_2 = \frac{\lg W_{K_2} - \lg W_{K_3}}{N\tau_2} = \frac{\lg 14,2 - \lg 11,24}{5,48 \cdot 4} \approx 0,005.$$

$$\chi_3 = \frac{\lg W_{K_3} - \lg W_K}{N\tau_3} = \frac{\lg 11,24 - \lg 10,26}{5,48 \cdot 2} \approx 0,004.$$

Розраховуємо коефіцієнти сушіння в другому періоді композитних гранул для режиму 1 на рис. 3.27 на прикладі режиму 1 із формул 3.10 – 3.12:

$$K_1 = \chi_1 \cdot N = 0,008 \cdot 5,48 \approx 0,044 \text{ хв}^{-1}.$$

$$K_2 = \chi_2 \cdot N = 0,005 \cdot 5,48 \approx 0,027 \text{ хв}^{-1}.$$

$$K_3 = \chi_3 \cdot N = 0,004 \cdot 5,48 \approx 0,022 \text{ хв}^{-1}.$$

Всі розрахунки коефіцієнтів сушіння зводимо в табл. 3.1., 3.2.

Таблиця 3.1. Відносні та кінетичні коефіцієнти сушіння двохкомпонентних гранул (мулоторфяних)

№	Назва гранул	Діапазон критичних вологості, %	Відносні коефіцієнти сушки			Кінетичні коефіцієнти сушки		
			χ_1	χ_2	χ_3	K_1	K_2	K_3
1	Мулоторфяні гранули 50%М/50%Т. Режим 1 (t = 120°C, V = 1,5 м/с)	64,4 – 14,2	0,008			0,044		-
		14,2 – 11,2		0,005			0,027	
		11,2 – 10,2			0,004			0,022
2	Мулоторфяні гранули 50%М/50%Т. Режим 2 (t = 80°C, V = 1,5 м/с)	65,8 – 13,5	0,007			0,026		
		13,5 – 10,54		0,005			0,019	
		10,54 – 10,29			0,013			0,049

Залежно від діапазону між критичними точками змінюються відносний і кінетичний коефіцієнти сушіння. В режимі 1, що відповідає температурі теплоносія 120°C, відносні коефіцієнти вищі ніж в режимі 2 при температурі теплоносія 80°C (табл. 3.1, 3.2).

Аналізуючи узагальнені криві сушіння, можна сказати, що всі режими сушіння укладаються в одну криву з похибкою менше 10 % (рис. 3.30). За комплексом $N_{max} \tau$ найшвидше процес відбувається при сушінні трьохкомпонентної гранули у пропорції 45% мулу/45% торфу/10% тирси.

Під час графічної диференціації узагальнених кінетичних кривих сушіння, представлених на рис. 3.30, були отримані узагальнені криві швидкості сушіння композитних гранул, які представлені на рис. 3.31.

Таблиця 3.2. Відносні та кінетичні коефіцієнти сушіння трьохкомпонентних гранул (мулоторфяних+тирса або мулоторфяних+лузга)

№ п/ п	Назва гранул	Діапазон критичних вологості, %	Відносні коефіцієнти сушки		Кінетичні коефіцієнти сушки	
			χ_1	χ_2	K_1	K_2
1.	Мулоторфяні гранули + гречана лузга 45% мулу/45% торфу/10% гречаної лузги Режим 1 ($t = 120^\circ\text{C}$, $V = 1,5$ м/с)	58,9 – 13,3	0,010		0,043	
		13,3 – 10,2		0,005		0,028
2.	Мулоторфяні гранули + гречана лузга 45% мулу/45% торфу/10% гречаної лузги. Режим 2. ($t = 80^\circ\text{C}$, $V = 1,5$ м/с)	60,0 – 14,6	0,007			0,029
		14,6 – 10,0		0,005		0,021
3.	Мулоторфяні гранули + тирса 45% мулу/45% торфу/10% тирси. Режим 1 ($t = 120^\circ\text{C}$, $V = 1,5$ м/с)	58,1 – 11,8	0,009		0,047	
		11,8 – 10,0		0,044		0,24
4.	Мулоторфяні гранули + тирса 45% мулу/45% торфу/10% тирси. Режим 2. ($t = 80^\circ\text{C}$, $V = 1,5$ м/с)	59,7 – 14,2	0,008		0,031	
		14,2 – 10,1		0,005		0,02

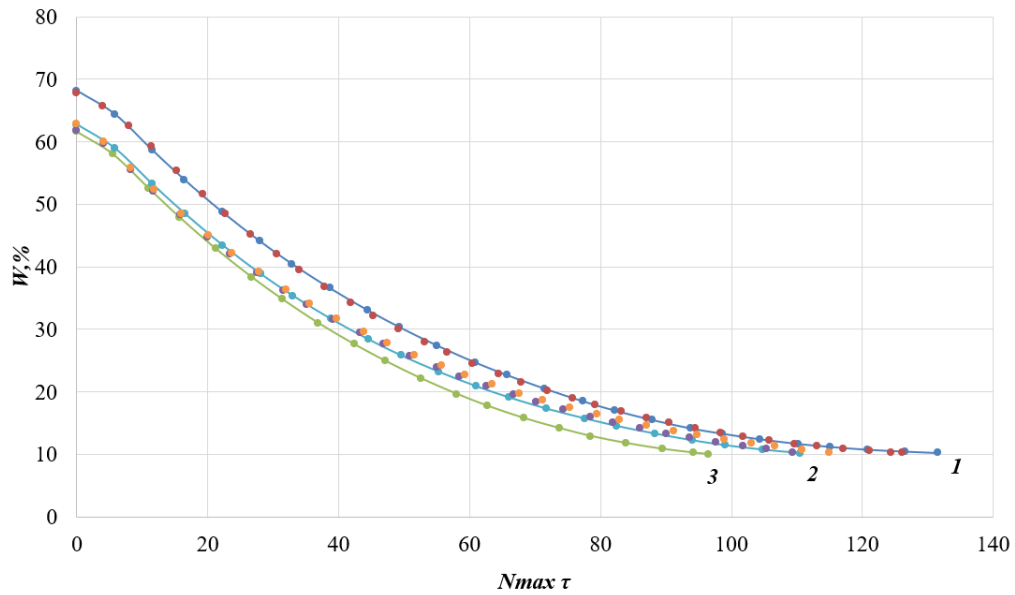


Рис. 3.30. Узагальнені криві сушіння композитних гранул в системі координат $W - N_{max} \tau$: 1 – мулоторф'яні гранули у пропорції 50%М/50%Т; 2 – трьохкомпонентної гранули у пропорції 45% мулу/45% торфу/10% гречаної лузги; 3 – трьохкомпонентні гранули у пропорції 45% мулу/45% торфу/10% тирси

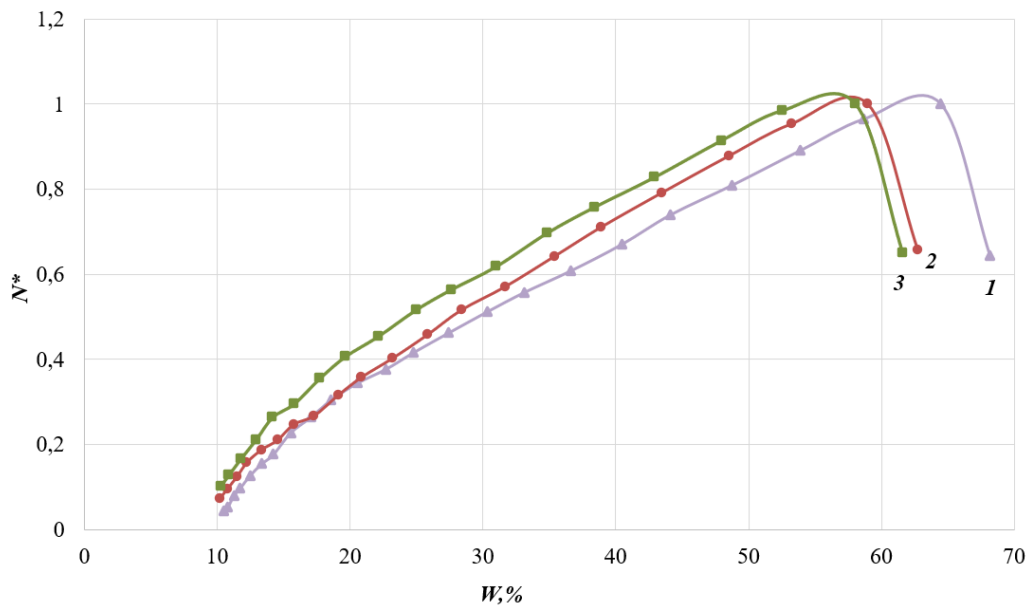


Рис. 3.31. Узагальнені криві швидкості сушіння композитних гранул: 1 – мулоторф'яні гранули у пропорції 50%М/50%Т; 2 – трьохкомпонентні гранули у пропорції 45% мулу/45% торфу/10% гречаної лузги; 3 – трьохкомпонентні гранули у пропорції 45% мулу/45% торфу/10% тирси

Загальна тривалість сушіння гранул за розрахунками за формулою (3.21) та зведена в таблицю 3.3.

Таблиця 3.3. Тривалість процесу сушіння композитних гранул

№ п/п	Назва композитних гранул	Розрахункова тривалість процесу сушіння, хв.
1.	Мулоторф'яні (50% мулу/50% торфу)	$\tau = \frac{112,47}{N}$
2.	Мулоторф'яні з додавання гречаної лузги (45% мулу/45% торфу/10% гречаної лузги)	$\tau = \frac{86}{N}$
3.	Мулоторф'яні з додавання тирси (45% мулу/45% торфу/10% тирси)	$\tau = \frac{78,4}{N}$

Загальна змінна $b \frac{\bar{c}}{r}$ це важлива характеристика кінетики процесу сушіння. Вона визначає відношення тепла до нагріву матеріалу під час сушіння і випаровування вологи за нескінченно малий проміжок часу. Цей ключовий критерій висихання називається числом Ребіндера [98].

$$Rb = b \frac{\bar{c}}{r} = \frac{\bar{c}}{r} \left(\frac{dt}{dW} \right). \quad (3.22)$$

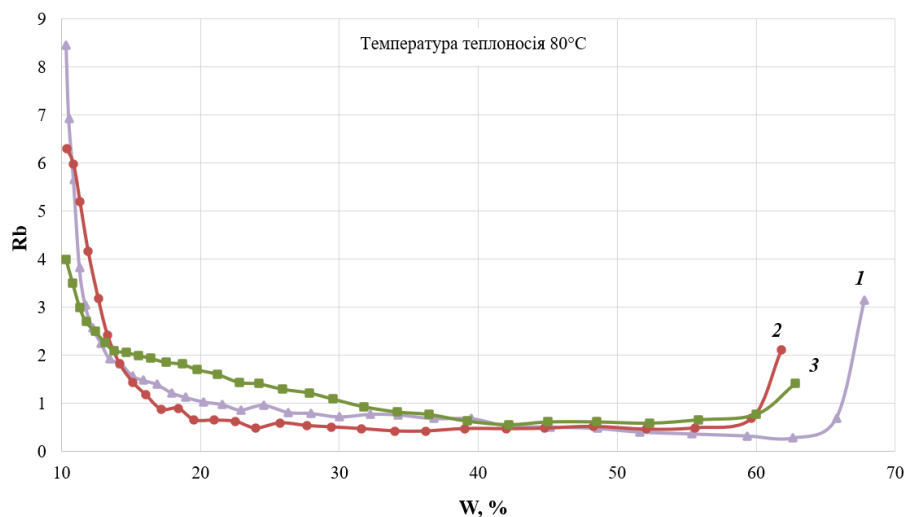


Рис. 3.32. Зміна числа Ребіндера від вологості композитних гранул при температурі теплоносія 80°C: 1 – мулоторф'яні гранули у пропорції 50%М/50%Т; 2 – трьохкомпонентні гранули у пропорції 45% мулу/45% торфу/10% тирси; 3 – трьохкомпонентні гранули у пропорції 45% мулу/45% торфу/10% гречаної лузги

На рисунку 3.32 представлено зміну числа Ребіндера від вологості компози-

тних гранул при температурі теплоносія 80°C . З рис. 3.32 видно, що число Rb залежить від температури теплоносія та вологості.

На початку процесу сушіння відбувається зниження вологості та прогрівання матеріалу, при цьому зменшується величина Rb . У двокомпонентних гранул на основі мулових відкладкладень та торфу ця стадія йде до вологості 68%, а в трьохкомпонентних гранулах на основі мулових відкладкладень, торфу та біомаси до 60 %.

На наступній стадії інтенсивно видаляється волога з композитних гранул до вологості 20%. Після чого більше теплоти витрачається на нагрів матеріалу, що показує не доцільність подвільшого сушіння.

3.4. Чисельне моделювання процесу тепломасопереносу в процесі сушіння композитних гранул

Для розробки розрахункової моделі сушіння циліндричних гранул з пористого матеріалу застосовується наближена теплофізична модель заглиблення зони випаровування. В основу цієї моделі покладено припущення, що випаровування вологи протікає не в усьому об'ємі пористої циліндричної частинки, а лише на деякій поверхні, яка в процесі сушіння рухається від поверхні циліндричного тіла до її центру. Вище цієї поверхні (суха зона) знаходиться пароповітряна суміш, а нижче цієї поверхні (волога зона) - вода.

Дана модель, що застосовувалася в роботі [103], достатньо задовільно описує процес сушіння гранул циліндричної форми малих розмірів. Результати розрахунків за цією моделлю задовільно узгоджується з результатами експериментів.

Модель передбачає, що фрагмент капілярно - пористого матеріалу циліндричної форми можна схематично представити у вигляді системи, що складається з твердого скелету (1), рідини (2) та пароповітряної суміші (3) (рис.3.33). На рис.1 представлено розрахунковий елемент, що має вигляд сектору циліндричного тіла з кутом розкриття $\Delta\varphi$. Якщо матеріал має пористість ε , то сектор з кутом розкриття $\varepsilon\Delta\varphi$ відноситься до елементів рідини (2) та пароповітряної

суміші (3), а сектор з кутом $(1-\varepsilon)\Delta\varphi$ - до твердого скелета (1). Вважається, що кут $\Delta\varphi$ - достатньо малий і що наведений на рис.1 елемент періодично повторюється в напрямку кутової координати φ . Вважається також, що в кожному елементі $\Delta\varphi$ теплофізичні процеси протікають однаково. Тому дану задачу тепломасоперенесення в циліндричній гранулі можна розглядати, як одновимірну. Тобто, величини, що характеризують температурно - вологісний стан гранули вважаються залежними лише від поточного радіусу гранули r та часу τ (рис. 3.33).

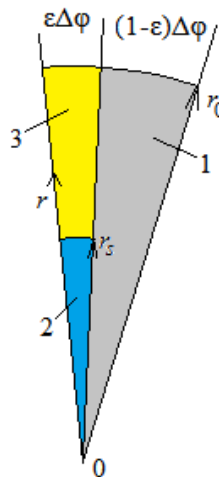


Рис. 3.33. Розрахунковий елемент циліндричного пористого матеріалу

Перенесення маси пари в області (3), що містить парогазову суміш, відбувається дифузією та за рахунок фільтраційного руху суміші, що виникає внаслідок градієнта повного тиску газу в пористому середовищі. Але внаслідок малих розмірів гранул цим градієнтом тиску можна знехтувати і вважати, що тиск в газовій суміші такий самий, як і у зовнішньому повітрі. Тому фільтраційним рухом газу також можна знехтувати. Швидкість Стефана також вважається надто малою, щоб впливати на процес перенесення маси. Отже вважається, що перенесення пари в пористому середовищі відбувається тільки дифузією. Дифузійний потік маси пари в пароповітряній суміші описується законом Фіка

$$j = -\rho_g \frac{D}{z} \text{grad}(Y), \quad (3.23)$$

де $Y = \frac{\rho_v}{\rho_g} = \frac{\rho_v}{\rho_v + \rho_a}$, кг/кг - відносна масова концентрація водяної пари в повітрі; D , m^2/s - коефіцієнт дифузії водяної пари в повітрі; ρ_v ; ρ_a , kg/m^3 - парціальні густини

водяної пари та сухого повітря відповідно; $\rho_g = \rho_v + \rho_a$, кг/м³ – густина поро-повітряної суміші; ζ - коефіцієнт опору дифузії парів води в пористому матеріалі.

Складене на основі закону Фіка (3.23) рівняння перенесення дифузиею маси водяної пари в пароповітряній суміші має в полярних координатах вигляд:

$$\rho_g \frac{\partial Y}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\rho_g \frac{D}{\zeta} r \frac{\partial Y}{\partial r} \right), \quad (3.24)$$

де r , м - радіальна координата; τ , с - час.

Рівняння (3.24) описує дифузію водяної пари в області (3), де радіус r змінюється у межах $r_s \leq r \leq r_0$; r_s - радіальна координата поверхні випаровування рідини; r_0 - зовнішній радіус гранули. Граничними умовами для рівняння будуть:

$$\text{при } r = r_0: -\rho_g \frac{D}{\zeta} \frac{\partial Y}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = \beta(Y(r_0) - Y_T), \quad (3.24)$$

$$\text{при } r = r_s: Y = Y_s(T_s, W), \quad (3.25)$$

де β , кг/(м²с) - коефіцієнт масовіддачі; Y_T - відносна вагова концентрація водяної пари в теплоносії; $Y_s(W, T_s)$ - відносна вагова концентрація водяної пари на поверхні випаровування, яка залежить від температури поверхні випаровування T_s та вологості гранули W .

Якщо сума парціальних тисків водяної пари і сухого повітря - постійна і дорівнює тиску атмосферного повітря p_0 , величину Y_s можна визначити за виразом

$$Y_s = \frac{1}{1 + \left(\frac{p_0}{\phi \cdot p_{v,sat}(T_s)} - 1 \right) \frac{R_v}{R_a}}, \quad (3.26)$$

де $p_{v,sat}(T_s)$, Па - парціальний тиск насиченої водяної пари при температурі T_s , К; R_v ; R_a , Дж/(кг·К) - газові сталі для водяної пари і сухого повітря відповідно; p_0 , Па - сумарний тиск пароповітряної суміші; ϕ - відносна вологість повітря біля поверхні випаровування. Значення $p_{v,sat}(T_s)$ може бути знайдена за виразом, наведеним в [104]

$$p_{v,sat}(T) = 611 \exp \left[\frac{17,08 \cdot (T - 273,15)}{T - 38,97} \right], \quad (3.27)$$

а відносна вологість повітря біля поверхні випаровування ϕ визначається з експериментально знайдених залежностей рівноважної вологості W_p від відносної вологості ϕ , тобто з ізотерм сорбції - десорбції для температури T_s . Якщо залежність $W_p(\phi)$ апроксимується виразом

$$W_p = a \cdot \left(\frac{\phi}{(1-\phi)} \right)^b, \quad (3.28)$$

то відповідно

$$\phi = \left[\left(\frac{a}{W_p} \right)^{\frac{1}{b}} + 1 \right]^{-1}. \quad (3.29)$$

Рівняння перенесення теплоти в області $0 < r < r_s$, в порах якої міститься крапельна волога, має вигляд:

$$[\rho_w C_w \varepsilon + \rho_s C_s (1 - \varepsilon)] \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[(\lambda_w \varepsilon + \lambda_s (1 - \varepsilon)) r \frac{\partial T}{\partial r} \right], \quad (3.30)$$

де ρ , кг/м³ - густина; C , Дж/(кг·К) - теплоємність; λ , Вт/(м·К) - теплопровідність. Величини з індексом w - відносяться до води, а з індексом s - до твердої фази. Ці значення густини, теплоємності і теплопровідності для рідини і твердої фази вважаються постійними.

Рівняння перенесення теплоти в області $r_s < r < r_0$, в якій міститься пароповітряна суміш, має вигляд:

$$[(\rho_v C_v + \rho_a C_a) \varepsilon + \rho_s C_s (1 - \varepsilon)] \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \left(\lambda_g \varepsilon + \lambda_s (1 - \varepsilon) \right) \frac{\partial T}{\partial r} \right). \quad (3.31)$$

В рівнянні (3.31) величини з індексом v відносяться до водяної пари, а індексом a - до сухого повітря. Перенесенням теплоти дифузійними потоками водяної пари та сухого повітря в даній наближеній моделі можна знехтувати без суттєвої втрати її точності. Величина теплопровідності пароповітряної суміші розраховується за виразом $\lambda_g = \lambda_v Y + \lambda_a (1 - Y)$.

Для рівняння (3.30) гранична умова при $r=0$ має вигляд

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0. \quad (3.32)$$

Для рівняння (3.31) гранична умова при $r = r_0$ має вигляд

$$-\left(\lambda_g \varepsilon + \lambda_s(1 - \varepsilon)\right) \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_0} = \alpha(T(r_0) - T_T), \quad (3.33)$$

де α - коефіцієнт тепловіддачі на поверхні циліндричної гранули; T_T - температура теплоносія.

На поверхні випаровування ($r=r_s$) умова спряження для рівнянь (3.30) і (3.31) має вигляд:

$$\begin{aligned} & -[\lambda_w \varepsilon + \lambda_s(1 - \varepsilon)] \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_s-0} = \\ & = -[\lambda_g \varepsilon + \lambda_s(1 - \varepsilon)] \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_s+0} - \Delta h \cdot \varepsilon \rho_g \left. \frac{D}{\zeta} \frac{\partial Y}{\partial r} \right|_{r=r_s+0}, \end{aligned} \quad (3.34)$$

де Δh - теплота випаровування води. Вираз (3.34) відображає баланс теплоти на поверхні розподілу рідкої та газової фаз, згідно з яким теплота, що надходить теплопровідністю з боку газової фази до поверхні випаровування, частково витрачається на випаровування рідини, а частково переноситься теплопровідністю вглиб рідкої фази.

У випадку, коли в початковий момент часу пори повністю заповнені рідиною, а область з пароповітряною сумішшю ще не сформувалася і випаровування рідини відбувається з поверхні гранули, замість граничної умови у формі (3.33) застосовується умова

$$-[\lambda_w \varepsilon + \lambda_s(1 - \varepsilon)] \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_0} = \alpha(T(r_0) - T_T) + \varepsilon \cdot \Delta h \cdot \beta(Y(r_0) - Y_T), \quad (3.35)$$

яка враховує теплоту випаровування води з поверхні гранули.

Для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі α та масовіддачі β з поверхні циліндричної гранули застосовуються рівнянь подібності [105]:

$$Nu_t = 0,5 \cdot Re^{0,5} Pr_t^{0,38} (Pr_{t,T}/Pr_{t,\Pi})^{0,38}, \quad (3.36)$$

$$Nu_m = 0,5 \cdot Re^{0,5} Pr_m^{0,38} (Pr_{m,T}/Pr_{m,\Pi})^{0,38}, \quad (3.37)$$

що описують інтенсивність тепло -та масовіддачі з поверхонь циліндрів при їх зовнішньому обтіканні теплоносієм. В наведених рівняннях: $Nu_t = \frac{\alpha d}{\lambda_a}$; $Nu_m = \frac{\beta d}{\rho_T D_T}$; $Re = \frac{Vd}{\nu_T}$; $Pr_t = \frac{\nu_T}{a_T}$; $Pr_m = \frac{\nu_T}{D}$; d - діаметр гранули; V - швидкість потоку теплоносія, що обтікає гранулу; ν_T - кінематичний коефіцієнт в'язкості теплоносія (нагрітого повітря); a_T - коефіцієнт температуропровідності теплоносія. Величини з індексом "т" визначаються за температурою теплоносія, а з індексом "п" - за температурою поверхні гранули.

Зміну у часі радіальної координати поверхні випаровування рідини r_s визначається з диференціального рівняння:

$$\rho_w F dr_s = F j d\tau,$$

де F - поверхні, з якої відбувається випаровування. Після спрощень це рівняння матиме вигляд

$$\frac{dr_s}{d\tau} = \frac{j}{\rho_w}. \quad (3.38)$$

Система диференціальних рівнянь (3.24), (3.30), (3.31) з граничними умовами (3.24), (3.25), (3.32)-(3.35) розв'язується методом скінчених рівниць. З цією метою в розрахунковій області $0 < r < r_0$ будується різницева сітка з кроком $dr = r_0/N$, де N - кількість елементів сітки. Вузли сітки, до яких відносяться дискретні значення температури, розташовуються на серединах елементів. Номер кроку сітки, на кому закінчується область (3.24), що зайнята рідиною, позначається як i_w . Рівняння (3.24), (3.30), (3.32) в скінчених різницях мають вигляд:

$i_w + 1 < i < N$:

$$\rho^*_{g,i} \frac{Y_i - Y^*_i}{\Delta\tau} = \frac{1}{dr_i r_{i-1/2}} \left(\rho^*_{g,i+1/2} r_i \frac{D Y_{i+1} - Y_i}{\zeta dr_{i+1/2}} - \rho^*_{g,i-1/2} r_{i-1} \frac{D Y_i - Y_{i-1}}{\zeta dr_{i-1/2}} \right); \quad (3.39)$$

$1 < i < i_w$:

$$(C_w \rho_w \varepsilon + \rho_s C_s (1 - \varepsilon)) \frac{T_i - T^*_i}{\Delta\tau} = \frac{(\lambda_w \varepsilon + \lambda_s (1 - \varepsilon))}{r_{i-1/2} dr_i} \left(r_i \frac{T_{i+1} - T_i}{dr_{i+1/2}} - r_{i-1} \frac{T_i - T_{i-1}}{dr_{i-1/2}} \right); \quad (3.40)$$

$i_w + 1 < i < N$:

$$\left[(C_a \rho_{*a,i} + C_v \rho_{*v,i}) \varepsilon + \rho_s C_s (1 - \varepsilon) \right] \frac{T_i - T_{*i}}{\Delta \tau} = \frac{1}{r_{i-1/2} dr_i} \times$$

$$\times \left(r_i \left(\lambda_{g,i+1/2} \varepsilon + \lambda_s (1 - \varepsilon) \right) \frac{T_{i+1} - T_i}{dr_{i+1/2}} - r_{i-1} \left(\lambda_{g,i-1/2} \varepsilon + \lambda_s (1 - \varepsilon) \right) \frac{T_i - T_{i-1}}{dr_{i-1/2}} \right); \quad (3.41)$$

В рівняннях (3.39)-(3.41):

$$\rho_{g,i+1/2} = (\rho_{g,i+1/2} + \rho_{g,i})/2;$$

$$\rho_{g,i-1/2} = (\rho_{g,i-1/2} + \rho_{g,i})/2;$$

$$\lambda_{g,i+1/2} = \lambda_a (1 - Y_{*i+1/2}) + \lambda_v Y_{*i+1/2};$$

$$\lambda_{g,i-1/2} = \lambda_a (1 - Y_{*i-1/2}) + \lambda_v Y_{*i-1/2};$$

$$r_{i-1/2} = (r_i + r_{i-1})/2; \quad dr_{i-1/2} = (dr_i + dr_{i-1})/2; \quad dr_{i+1/2} = (dr_i + dr_{i+1})/2;$$

$$\text{при } i=1: \quad dr_{i-1/2} = dr_1/2;$$

$$\text{при } i=N: \quad dr_{i+1/2} = dr_N/2;$$

$$\text{при } i = i_w; \quad dr_{i+1/2} = dr_i/2$$

$$\text{при } i = i_w + 1: \quad dr_{i-1/2} = dr_i/2.$$

В рівнянні (3.40), що складено для елемента рідкої фракції з номером i_w , який знаходиться біля границі з областю, що містить газову фракцію, замість функції T_{i+1} використовується $T_{i_w+1/2}$. Дане значення температури відносяться до поверхні випаровування. В рівнянні (20), що складається для i_w+1 , замість T_{i-1} використовується та ж сама величина $T_{i_w+1/2}$. Це забезпечує нерозривність функції розподілу температури в гранулі.

Рівняння (3.39)-(3.41) складені для неявною часовою схемою, за якою невідомі величин відносяться до поточного моменту часу. Величин, що мають індекс *, відносяться до попереднього моменту часу і їх значення вважаються відомими. Граничні умови (3.24), (3.25), (3.32)-(3.35) також записуються у формі скінчених різниць:

$$-\rho_{g,N+1/2} \frac{D}{\zeta} \frac{Y_{N+1/2} - Y_N}{0,5 dr_N} \Big|_{r=r_0} = \beta (Y_{N+1/2} - Y_T); \quad (3.42)$$

$$Y_{i_w+1/2} = Y_s (T_{i_w+1/2}, W); \quad (3.43)$$

$$\frac{T_1 - T_0}{0,5 dr_1} = 0; \quad (3.44)$$

$$-\left(\lambda_{g,N+1/2}\varepsilon + \lambda_s(1 - \varepsilon)\right) \frac{T_{N+1/2} - T_N}{0,5dr_N} \Big|_{r=r_0} = \alpha(T_{N+1/2} - T_T) \quad (3.45)$$

В початковий момент часу, коли поверхня випаровування збігається з поверхнею гранули, ця умова матиме вигляд:

$$\begin{aligned} & -\left(\lambda_{g,N+\frac{1}{2}}\varepsilon + \lambda_s(1 - \varepsilon)\right) \frac{T_{N+\frac{1}{2}} - T_N}{0,5dr_N} \Big|_{r=r_0} = \\ & = \alpha(T_{N+1/2} - T_\infty) + \varepsilon\Delta h\beta(Y_{N+1/2} - Y_T) \end{aligned} \quad (3.46)$$

Якщо поверхня випаровування знаходиться всередині гранули, умова спряження (3.34) в скінчених різницях матиме вигляд:

$$\begin{aligned} & -[\lambda_w\varepsilon + \lambda_s(1 - \varepsilon)] \frac{T_{i_w+1/2} - T_{i_w}}{0,5dr_{i_w}} = \\ & = -[\lambda_{g,i_w+1/2}\varepsilon + \lambda_s(1 - \varepsilon)] \frac{T_{i_w+1} - T_{i_w+1/2}}{0,5dr_{i_w+1}} - \Delta h \cdot \varepsilon\rho_{g,i_w+1/2} \frac{D}{\zeta} \frac{Y_{i_w+1} - Y_{i_w+1/2}}{0,5dr_{i_w+1}} \end{aligned} \quad (3.47)$$

В граничних умовах (3.42), (3.45), (3.46) величини $T_{N+1/2}$ та $Y_{N+1/2}$ відносяться до поверхні гранули, а величини T_N та Y_N - до центральної вузлової точки елемента з номером N . У виразі (3.47) величини $T_{i_w+1/2}$ та $Y_{i_w+1/2}$ відносяться до поверхні випаровування, що в поточний час знаходиться між основними вузлами сітки з номерами i_w та i_w+1 . Величина $T_{i_w+1/2}$ визначається з умови (3.47) і має вигляд:

$$\begin{aligned} T_{i_w+\frac{1}{2}} &= \frac{\frac{\lambda_w^-}{0,5dr_{i_w}}}{\frac{\lambda_g^+}{0,5dr_{i_w+1}} + \frac{\lambda_w^-}{0,5dr_{i_w}}} T_{i_w} + \frac{\frac{\lambda_g^+}{0,5dr_{i_w+1}}}{\frac{\lambda_g^+}{0,5dr_{i_w+1}} + \frac{\lambda_w^-}{0,5dr_{i_w}}} T_{i_w+1} + \\ &+ \frac{\frac{\Delta h \cdot \varepsilon\rho_{g,i_w+1/2} \frac{D}{\zeta}}{\frac{\lambda_g^+}{0,5dr_{i_w+1}} + \frac{\lambda_w^-}{0,5dr_{i_w}}}}{0,5dr_{i_w+1}} Y_{i_w+1}^* - Y_{i_w+1/2}^* \end{aligned} \quad (3.48)$$

де $\lambda_w^- = \lambda_w\varepsilon + \lambda_s(1 - \varepsilon)$; $\lambda_g^+ = \lambda_{g,i_w+1/2}\varepsilon + \lambda_s(1 - \varepsilon)$.

За значенням $T_{i_w+1/2}$ розраховується також величина $Y_{i_w+1/2}$. Для цього застосовується вираз (3.26). Цей вираз містить величини $p_{v,sat}(T_s)$ та φ . Величина $p_{v,sat}$ розраховується за виразом (3.27), в якому $T_s = T_{i_w+1/2}$. Для розрахунку

величини φ використовується співвідношення (3.29), яке містить вологість гранули W . За визначенням, вологість розраховується як відношення маси рідкої фракції, що містить гранула, до маси твердого скелету гранули за відсутності вологи. За прийнятою моделлю,

$$W = \frac{\rho_w U_w}{\rho_s U_s} \quad (3.49)$$

де $U_w = \varepsilon \pi r_s^2 L$ - об'єм рідкої фракції; $U_s = (1 - \varepsilon) \pi r_0^2 L$ - об'єм твердої фракції; r_s - радіус поверхні випаровування; r_0 - початковий радіус гранули; L - довжина гранули. Радіус поверхні випаровування циліндричної гранули r_s^k в момент часу τ_k визначається з диференціального рівняння (3.38), яке розв'язується чисельним методом:

$$r_s^k = r_s^{k-1} + j_v \Delta \tau / \rho_w, \quad (3.50)$$

де r_s^{k-1} - радіус поверхні випаровування в попередній момент часу. Густина потоку пари j_v з поверхні випаровування визначається за виразом:

$$j_v = \rho_{g, i_w+1/2} \frac{D}{\zeta} \frac{Y_{i_w+1} - Y_{i_w+1/2}}{0,5 d r_{i_w+1}}. \quad (3.51)$$

Номер i_w останнього елемента області, що містить рідку вологу, визначається з умови $r_{i_w} \leq r_s < r_{i_w-1}$. Тобто поверхня випаровування, що має радіус r_s , повинна перетинати елемент з номером i_w . Цей номер, як і радіус r_s , змінюється у часі.

Система різницевих рівнянь (3.39)-(3.41) з граничними умовами (3.42)-(3.46) та умовами спряження (3.47), (3.48) розв'язується методом прогонки. За результатами цього розв'язання визначається розподіли температури T_i та концентрації водяної пари Y_i вздовж радіуса гранули, а також залежність цих величин від часу.

Як приклад розглядається процес тепломасообміну при конвекційному сушінні гранули діаметром $d=6$ мм ($r_0=3$ мм), що виготовлена на шнековому механічному пристрої і містить 50% мулу та 50% торфу. Швидкість теплоносія (повітря) $V_T = 2$ м/с, температура $t_T = 120^\circ\text{C}$, відносна вологість $\varphi_T = 0,956$ %. Відносна концентрація водяної пари в теплоносії за цих параметрів становить $Y_T = 0,01172$.

Коефіцієнт тепловіддачі становить $\alpha=21$ Вт/(м²К), а коефіцієнт масовіддачі - $\beta=0,02086$ кг/(м²с). Приймається, що пористість матеріалу гранули складає $\varepsilon=0,29$. Густина скелету гранули дорівнює $\rho_s=600$ кг/м³, його теплоємність складає $C_s=840$ Дж/(кг·К), а теплопровідність - $\lambda_s=0,35$ Вт/(м·К). Теплофізичні властивості води в порах: $\lambda_w=0,618$ Вт/(м·К); $C_w=4174$ Дж/(кг·К); $\rho_w=1000$ кг/м³. Теплофізичні властивості пароповітряної суміші в порах залежать як від температури, так і від концентрації водяної пари, які змінюються вздовж радіуса гранули і у часі. В початковий момент часу значення цих параметрів складають: $\lambda_g=0,0267$ Вт/(м·К); $C_g=1005$ Дж/(кг·К); $\rho_g=1,165$ кг/м³. Теплота випаровування дорівнює $\Delta h=2,4538 \cdot 10^6$ Дж/кг. Початкова температура гранули складає $t_0=30$ °С. Початкова вологість гранули W розраховується за залежністю (3.49), для якої приймаються $r_s=r_0$, тобто вважається що всі пори гранули в початковий момент часу заповнені рідкою фазою. З цього випливає, що $W_0 = \frac{\rho_w \varepsilon}{\rho_s(1-\varepsilon)} = 0,68$.

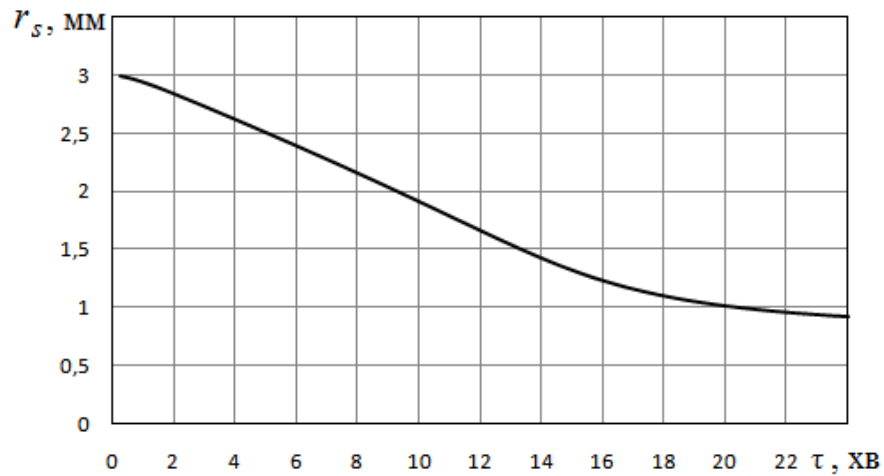


Рис. 3.34. Зміна у часі радіусу поверхні випаровування при сушінні гранули, що містить 50% мулу та 50% торфу при $t_T = 120^\circ\text{C}$, $V_T = 2$ м/с, $d = 6$ мм

Результати розрахунків температурно - вологісного стану гранули, що виготовлена на шнековому механічному пристрої і містить 50% мулу та 50% торфу, представлено на рисунках 3.34 – 3.38. На рис.3.34 наведено зміну у часі радіусу поверхні випаровування. Початковий радіус відповідає радіусу гранули і становить 3,0 мм. За 24 хвилини сушіння в даному режимі цей радіус зменшується до 0,9 мм.

Характер зміни у часі густини потоку пари з поверхні випаровування видно

з рисунку 3.35. З рисунку видно, що за перші 2 хвилини густина потоку маси збільшується з $0,74 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$ до $1,7 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$. Далі густина потоку маси продовжує збільшуватися до $\tau=11$ хв, але повільніше. Потім дана величина починає зменшуватися.

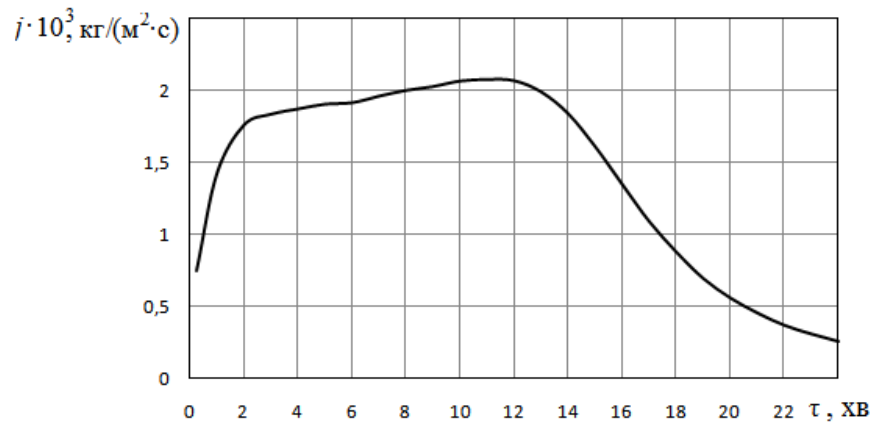


Рис. 3.35. Зміна у часі густини потоку маси пари при сушінні гранули що містить 50% мулу та 50% торфу при $t_T = 120^\circ\text{C}$, $V_T = 2 \text{ м/с}$, $d = 6 \text{ мм}$

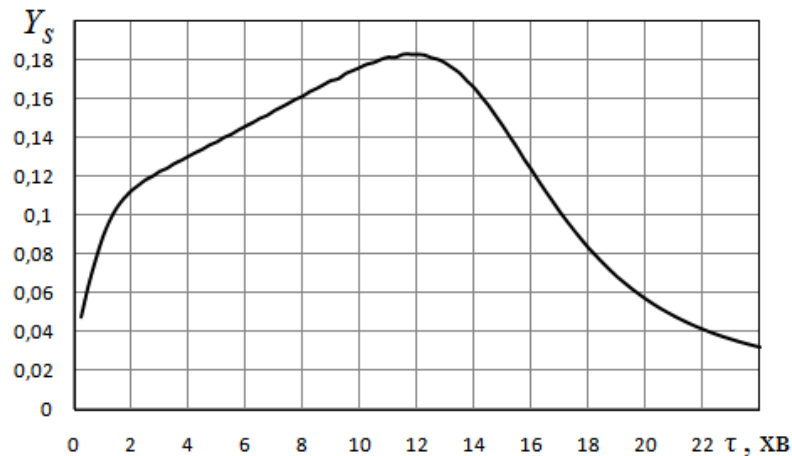


Рисунок 3.36. Зміна у часі відносної вагової концентрації водяної біля поверхні випаровування при $t_T = 120^\circ\text{C}$, $V_T = 2 \text{ м/с}$, $d = 6 \text{ мм}$

Зростання густини потоку маси викликано збільшенням температури поверхні випаровування на початковій стадії сушіння. Внаслідок цього збільшується відносна масова концентрація водяної пари біля цієї поверхні Y_s . Але далі, по мірі зменшення вологості гранули W , відносна вологість повітря біля поверхні випаровування починає зменшуватися навіть при зростанні температури

поверхні випаровування. Тому зменшується також і Y_s (рисунок 3.36).

Внаслідок видалення пароподібної вологи з поверхні випаровування, зменшується вологість гранули W . Ця величина розраховується за виразом (3.49). Зміна цієї величини у часі наведена на рисунку 3.37. На цьому рисунку представлено як залежність, що одержана за наведеною розрахунковою моделлю (крива 1), так і дані, одержані з експерименту (крива 2).

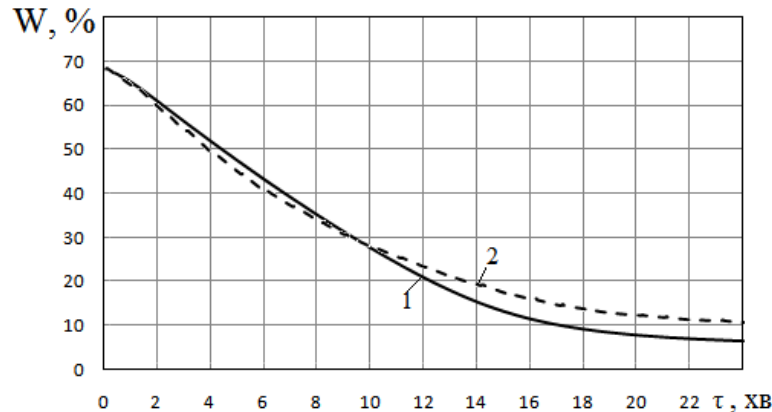


Рис. 3.37. Зміна у часі вологості гранули, що містить 50% мулу та 50% торфу при $t_T = 120^\circ\text{C}$, $V_T = 2$ м/с, $d = 6$ мм:
1 - теоретичні розрахунки; 2 – експеримент

Ця експериментальна крива наведена також на рисунку 3.18 (крива 2). Як видно з зіставлення цих кривих, наближена розрахункова модель у цілому задовільно описує характер зміни у часі вологості гранули при її сушінні в умовах, що розглядаються. Найбільша розбіжність розрахункових і експериментальних даних спостерігається в кінці інтервалу сушіння. Експериментальна значення вологості складає $W_\epsilon = 10,67\%$, а розрахункове $W_p = 6,37\%$.

Зміну у часі температури у центрі гранули ($r=0$), що визначена за результатами розрахунків, наведено на рисунку 3.38 (крива 1). На цьому ж рисунку представлено дані експерименту (крива 2), що відповідають кривій 2' на рисунку 3.19. Як видно з зіставлення цих кривих, розрахункові значення температури на початковій стадії сушіння вищі (на $10\dots 12^\circ\text{C}$), ніж ті, що одержано з експерименту. В середній частині часового інтервалу ці данні майже збігаються. На завершальній стадії розрахункові температури дещо нижчі (на $4\dots 5^\circ\text{C}$), ніж експериментальні. В

кінці процесу сушіння ці дані знову майже збігаються.

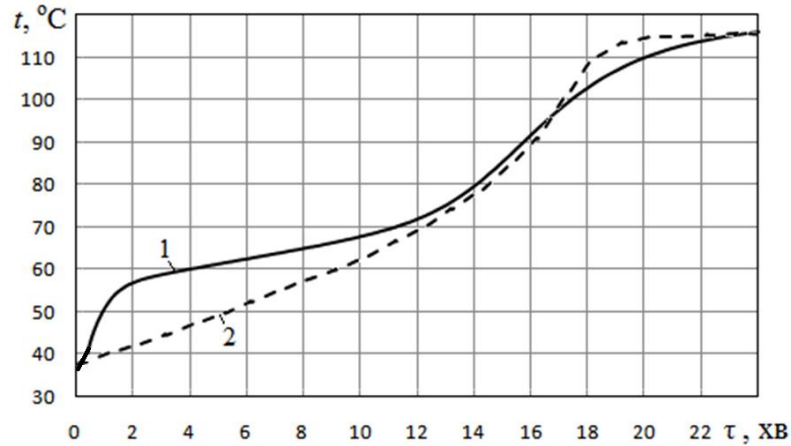


Рис. 3.38. Зміна у часі температури центру гранули, що містить 50% мулу та 50% торфу при $t_T = 120^\circ\text{C}$, $V_T = 2 \text{ м/с}$, $d = 6 \text{ мм}$:

1 - теоретичні розрахунки; 2 - експеримент.

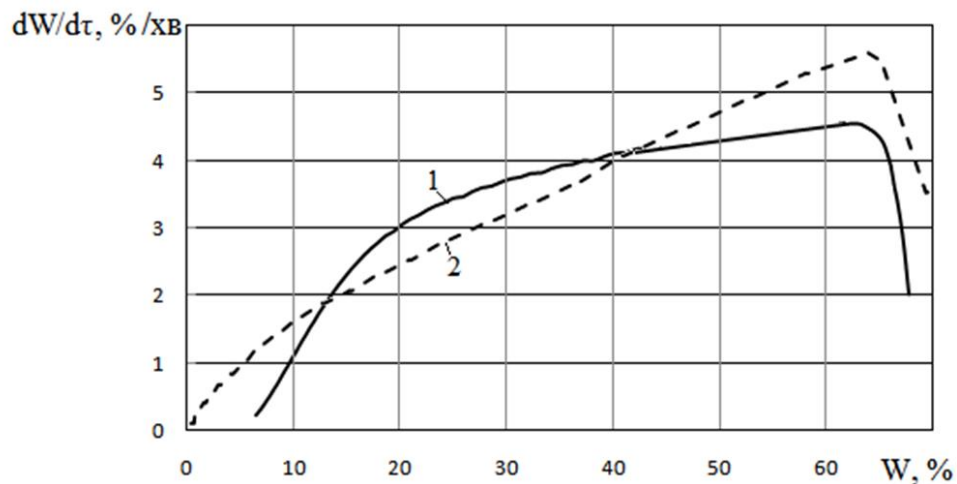


Рис. 3.39. Залежність швидкості сушіння від вологості для гранули, що містить 50% мулу та 50% торфу при $t_T = 120^\circ\text{C}$, $V_T = 2 \text{ м/с}$, $d = 6 \text{ мм}$:

1 - теоретичні розрахунки; 2 - експеримент

Залежність швидкості сушіння від вологості наведено на рисунку 3.39. Суцільна крива відповідає результатам розрахунків за наведеною моделлю, а крива 2- результатам експериментальних досліджень, що наведені також на рисунку. 3.20 (крива 1). За даними експериментів максимальна швидкість сушіння спостерігається при $W=63,9 \%$ і становить $dW/d\tau=5,6 \%$ /хв. Розрахункові результати показують, що максимальна швидкість сушіння не перевищує $dW/d\tau=4,55 \%$ /хв і відповідає близьким до експериментальним значенням вологості $W=61,0 \%$.

З зіставлення результатів розрахунків за запропонованою моделлю заглиблення зони випаровування з результатами експериментальних досліджень випливає, що дана модель у цілому задовільно описує характер зміни у часі температури в центрі гранули і її вологості в процесі конвекційного сушіння. Але в кількісних показниках є певні розбіжності. Розрахункові значення температури в центрі гранул найбільш суттєво відрізняються на початковому та завершальному етапах процесу сушіння. В середній частині та наприкінці часового інтервалу сушіння ці значення практично збігаються (рисунок 6). Найбільші відхилення розрахункових значень вологості гранули від експериментальних відзначаються наприкінці інтервалу сушіння. Розрахункові значення вологості в кінці процесу сушіння виявляються меншими, ніж експериментальні. У цілому ж можна відзначити, що розглянута модель може застосовуватися для наближеної попередньої оцінки часу сушіння гранули, що виготовлена на шнековому механічному пристрої і містить 50% мулу та 50% торфу.

3.5. Висновки до третього розділу

1. Проведені дослідження з визначення зольності показали, що в осаді міститься велика кількість золи, яку необхідно зменшити для подальшого спалювання. Для зниження зольності використовували торф і біомасу.

2. Підібрано оптимальне співвідношення компонентів композиту яке підвищує якість та зменшує зольність.

3. Досліджено процеси сушіння композитних гранул на основі застарілих мулових відкладень, торфу та біомаси при яких інтенсифікується процес порівняно з монокомпонентами.

4. Визначено та узагальнено кінетичні закономірності конвективного сушіння дво- та трьохкомпонентних гранульованого композиту.

5. Промислове сушіння композитних гранул можна на проводити розробленій в лінії для сушіння термолабільних матеріалів описаної в патенті №125421 України на винахід від 02.03.2022.

6. Из узагальнених кривих сушіння та швидкості сушіння розраховані відносні коефіцієнти та коефіцієнти сушіння, розраховані формули тривалості сушіння дво- та трьохкомпонентних гранул.

7. Проведено дослідження залежності числа Ребіндера від вологості матеріалу, що обґрунтовує ефективність вибраних режимів сушіння.

8. Виконане чисельне моделювання конвективного сушіння кополімерних гранул показало, що дана модель у цілому задовільно описує характер зміни у часі температури в центрі гранули і її вологості в процесі конвекційного сушіння.

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТРИСТИК РОЗРОБЛЕНОГО КОМПОЗИТНОГО БІОПАЛИВА

4.1. Дослідження процесів сорбції композитної сировини на основі застарілих мулових відкладень, торфу та біомаси

Методика дослідження процесів сорбції композитної сировини на основі застарілих мулових осадів, торфу та біомаси наведено в розділі 2.2.6 [98].

Таким чином, у досліджуваному інтервалі відносної вологості повітря отримано ізотерми сорбції $W_p^c = f(\varphi)$ та криві кінетики сорбції $W^c = f(\tau)$, оскільки в плані досліду також передбачена можливість фіксування зміни вологості зразка у часі.

Отримані в результаті експериментів кінетичні криві адсорбції водяної пари над торфом наведені на рис. 4.1. Кінетичні крива адсорбції свідчить про повільний процес. Так, для торфу зі значенням $\varphi=0,4$ (рис. 4.1, крива 1) рівновага встановлюється на 19 добу; при $\varphi=0,6$ на 15 добу (рис. 4.1, крива 2); $\varphi=0,8$ на 22 добу (рис. 4.1, крива 3); при $\varphi=0,9$ (рис. 4.1, крива 4) протягом 34 діб. При $\varphi=0,6$ рівноважна вологість торфу становить 13%.

На рисунку 4.2 вказані кінетичні криві на муловими відкладеннями. Кінетичні криві в порівнянні з торфом мають нерівномірний характер, з 2 по 5 день проходять стрибки при відносних вологостях 0,4; 0,6; 0,8; при $\varphi=0,9$ стрибок з'являється на 15 день. Для мулових відкладень рівноважний стан при встановлюється $\varphi=0,4$ (рис. 4.2, крива 1) на 19 добу; при $\varphi=0,6$ (рис. 4.2, крива 2) на 15 добу; при $\varphi=0,8$ (рис. 4.2, крива 3) на 30 добу; при $\varphi=0,9$ (рис. 4.2, крива 4) на 34 добу. Рівноважна вологість мулових відкладень складає при $\varphi=0,6$ складає 2%.

Як видно з кінетичних кривих адсорбції над тирсою (рис. 4.3), рівноважний стан встановлюється при $\varphi=0,4$ (рис. 4.3, крива 1) на 11 добу; при $\varphi=0,6$ (рис. 4.3, крива 2) на 18 добу; при $\varphi=0,8$ (рис. 4.3, крива 3) на 30 добу; при $\varphi=0,9$ (рис. 4.3, крива 4) на 34 добу. Рівноважна вологість тирси при $\varphi=0,6$ складає 9%.

На рисунку 4.4 вказані кінетичні криві адсорбції водяної пари над лузгою гречки. При значенні $\varphi=0,4$ (рис. 4.4, крива 1) рівноважний стан встановлюється на

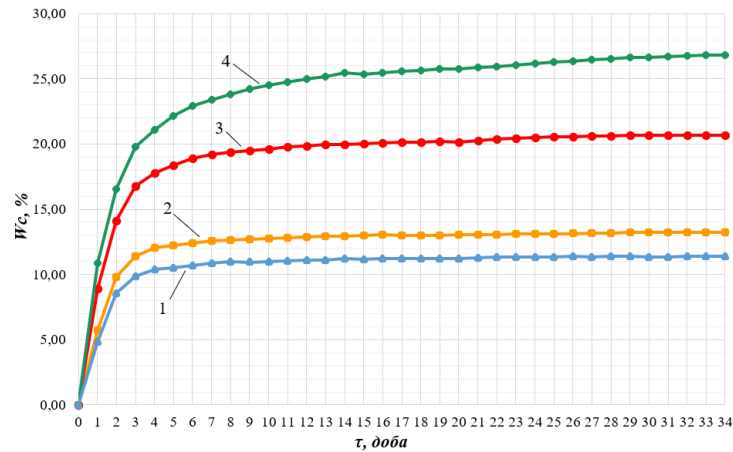


Рис. 4.1. Кінетичні криві адсорбції водяної пари над торфом:

1 – $\phi = 0,4$; 2 – $\phi = 0,6$; 3 – $\phi = 0,8$; 4 – $\phi = 0,9$

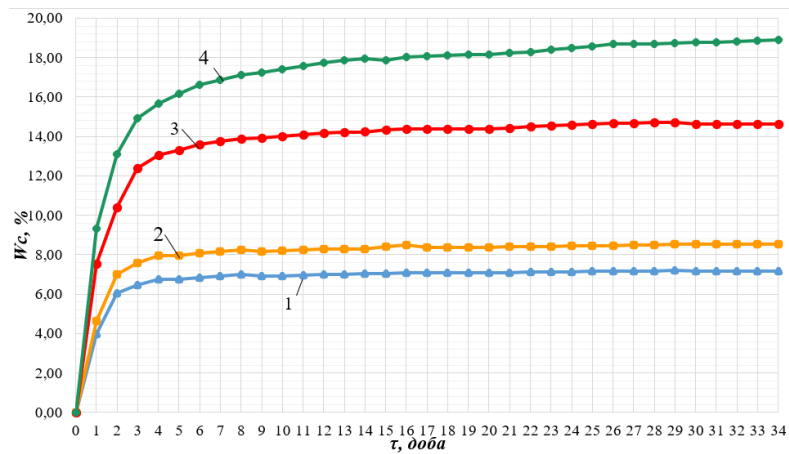


Рис. 4.3. Кінетичні криві адсорбції пари водяної над тирсою:

1 – $\phi = 0,4$; 2 – $\phi = 0,6$; 3 – $\phi = 0,8$; 4 – $\phi = 0,9$

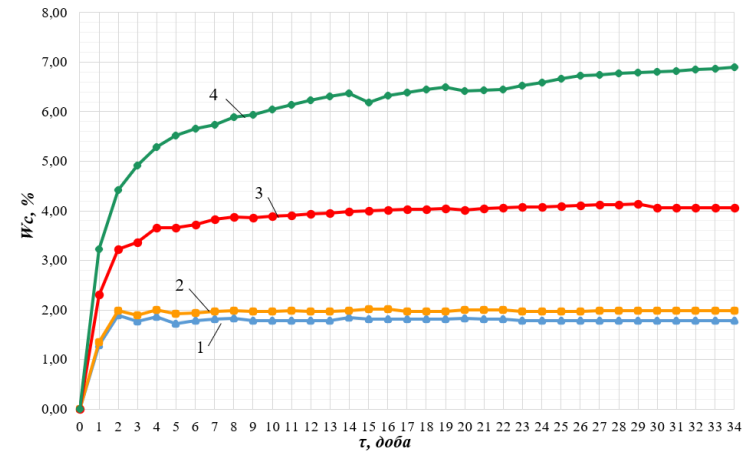


Рис. 4.2. Кінетичні криві адсорбції водяної пари над муловими відкладеннями:

1 – $\phi = 0,4$; 2 – $\phi = 0,6$; 3 – $\phi = 0,8$; 4 – $\phi = 0,9$

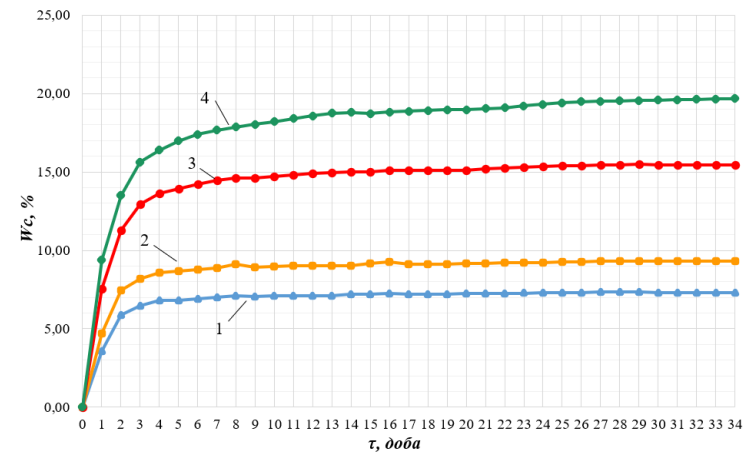


Рис. 4.4. Кінетичні криві адсорбції водяної пари над лузгою гречки:

1 – $\phi = 0,4$; 2 – $\phi = 0,6$; 3 – $\phi = 0,8$; 4 – $\phi = 0,9$

7 день; при $\varphi=0,6$ (рис. 4.4, крива 2) на 12 день; при $\varphi=0,8$ (рис. 4.4, крива 3) на 30 день; при $\varphi=0,9$ (рис. 4.4, крива 4) 34 день. Рівноважна вологість лузги гречки при $\varphi=0,6$ становить 9 %.

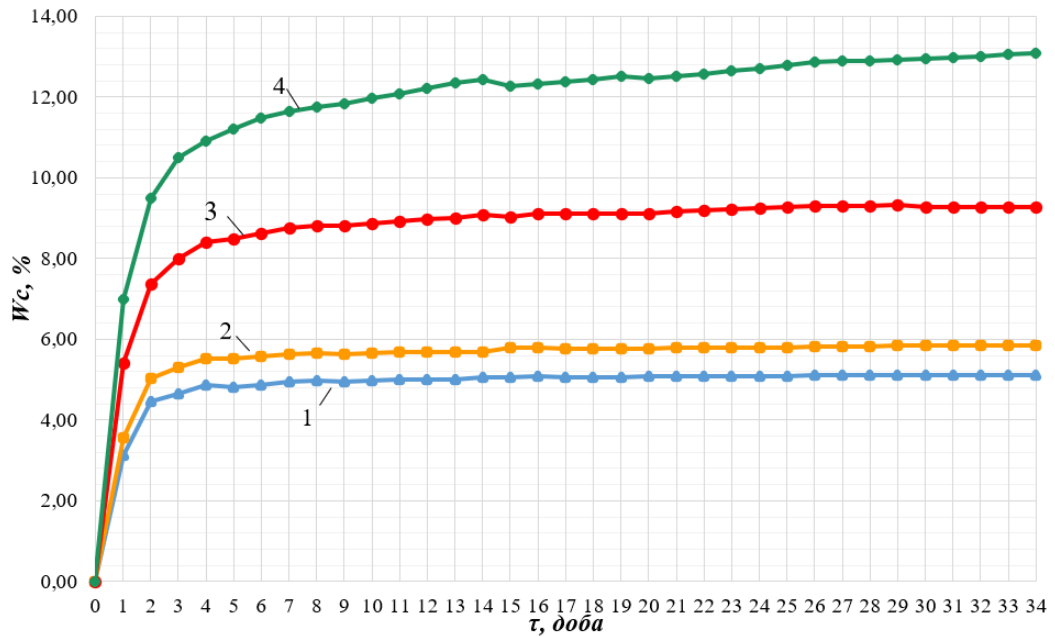


Рис. 4.5. Кінетичні криві адсорбції водяної пари над двокомпонентним композитом на основі мулових відкладень та торфу:

1 – $\varphi = 0,4$; 2 – $\varphi = 0,6$; 3 – $\varphi = 0,8$; 4 – $\varphi = 0,9$

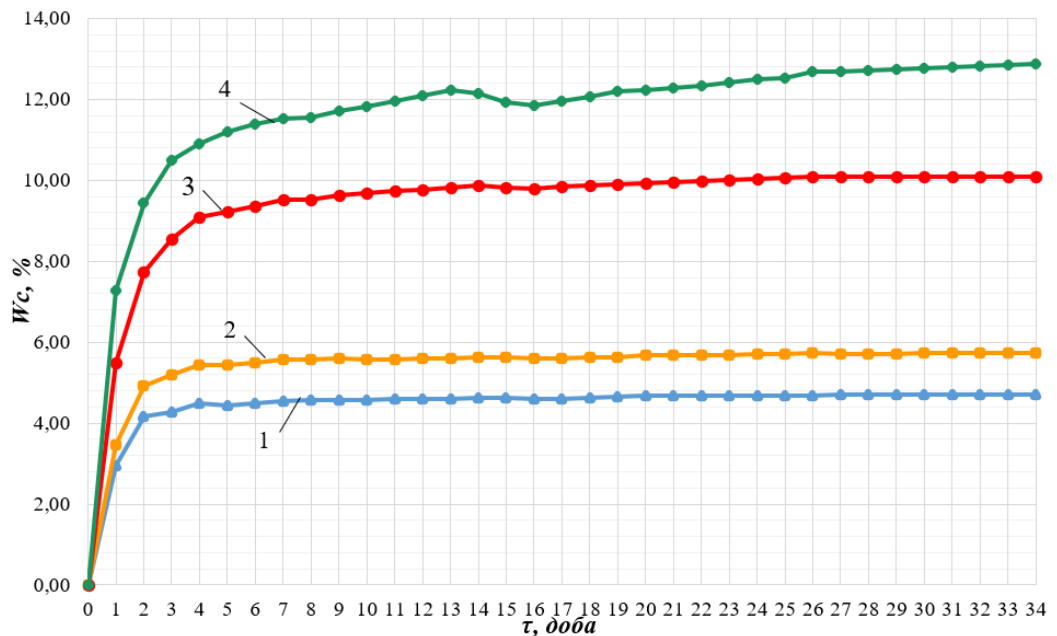


Рис. 4.6. Кінетичні криві адсорбції водяної пари над двокомпонентними гранулами на основі мулових відкладень та торфу:

1 – $\varphi = 0,4$; 2 – $\varphi = 0,6$; 3 – $\varphi = 0,8$; 4 – $\varphi = 0,9$

Кінетичні криві адсорбції над двокомпонентним композитом на основі мулових відкладень та торфу представлені на рис. 4.5. Рівноважний стан у двокомпонентного композиту встановлюється при $\varphi=0,4$ (рис. 4.5, крива 1) на 8 добу; при $\varphi=0,6$ (рис. 4.5, крива 2) на 7 добу; при $\varphi=0,8$ (рис. 4.5, крива 3) на 28 добу; при $\varphi=0,9$ (рис. 4.5, крива 4) на 34 добу. Рівноважна вологість при $\varphi=0,6$ двокомпонентного композиту складає 6 %.

Кінетичні криві адсорбції над двокомпонентними гранулами на основі мулових відкладень та торфу представлені на рис. 4.6. Рівноважний стан у двокомпонентних гранул встановлюється при $\varphi=0,4$ (рис. 4.6, крива 1) на 8 добу; при $\varphi=0,6$ (рис. 4.6, крива 2) на 7 добу; при $\varphi=0,8$ (рис. 4.6, крива 3) на 28 добу; при $\varphi=0,9$ (рис. 4.6, крива 4) на 34 добу. Рівноважна вологість при $\varphi=0,6$ двокомпонентних гранул складає 6 %.

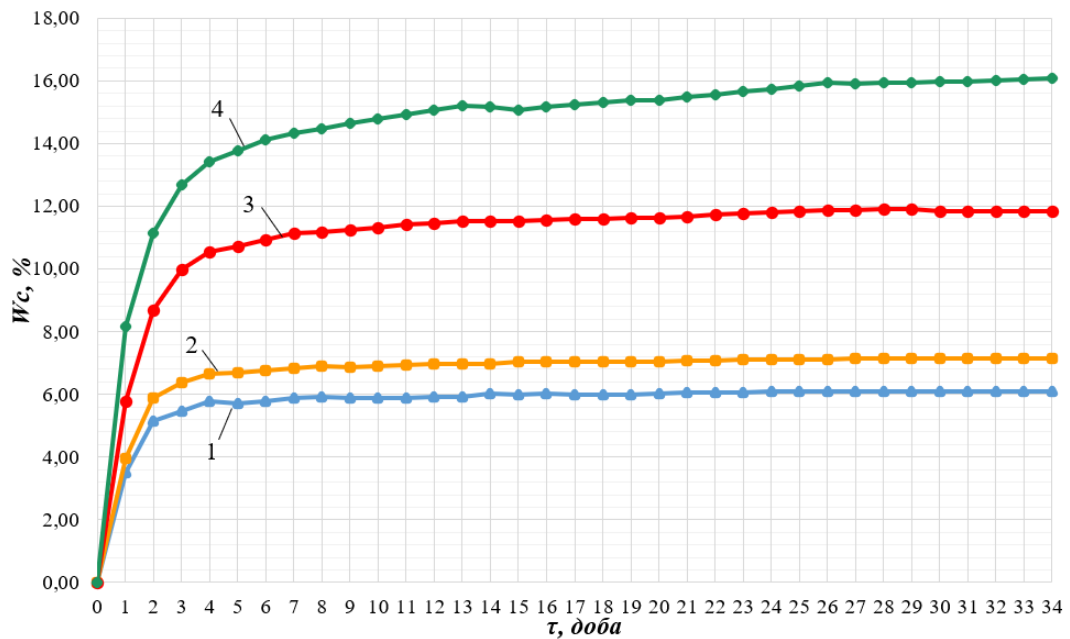


Рис. 4.7. Кінетичні криві адсорбції водяної пари над трьохкомпонентним композитом на основі мулових відкладень, торфу та тирси:

$$1 - \varphi = 0,4; 2 - \varphi = 0,6; 3 - \varphi = 0,8; 4 - \varphi = 0,9$$

Кінетичні криві адсорбції над трьохкомпонентним композитом на основі мулових відкладень, торфу та тирси зображені на рис. 4.7. Рівноважний стан у трьохкомпонентного композиту встановлюється при $\varphi=0,4$ (рис. 4.7, крива 1) на 14 добу; при $\varphi=0,6$ (рис. 4.7, крива 2) на 15 добу; при $\varphi=0,8$ (рис. 4.7, крива 3) на 27

добу; при $\varphi=0,9$ (рис. 4.7, крива 4) на 29 добу. Рівноважна вологість трьохкомпонентного композиту на основі мулових відкладень, торфу та тирсою при $\varphi=0,6$ складає 7%.

Кінетичні криві адсорбції над трьохкомпонентними гранули на основі мулових відкладень, торфу та тирси зображені на рис. 4.8. Рівноважний стан у трьохкомпонентних гранул встановлюється при $\varphi=0,4$ (рис. 4.8, крива 1) на 10 добу; при $\varphi=0,6$ (рис. 4.8, крива 2) на 12 добу; при $\varphi=0,8$ (рис. 4.8, крива 3) на 27 добу; при $\varphi=0,9$ (рис. 4.8, крива 4) на 34 добу. Рівноважна вологість трьохкомпонентних гранул на основі мулових відкладень, торфу та тирси при $\varphi=0,6$ складає 7%.

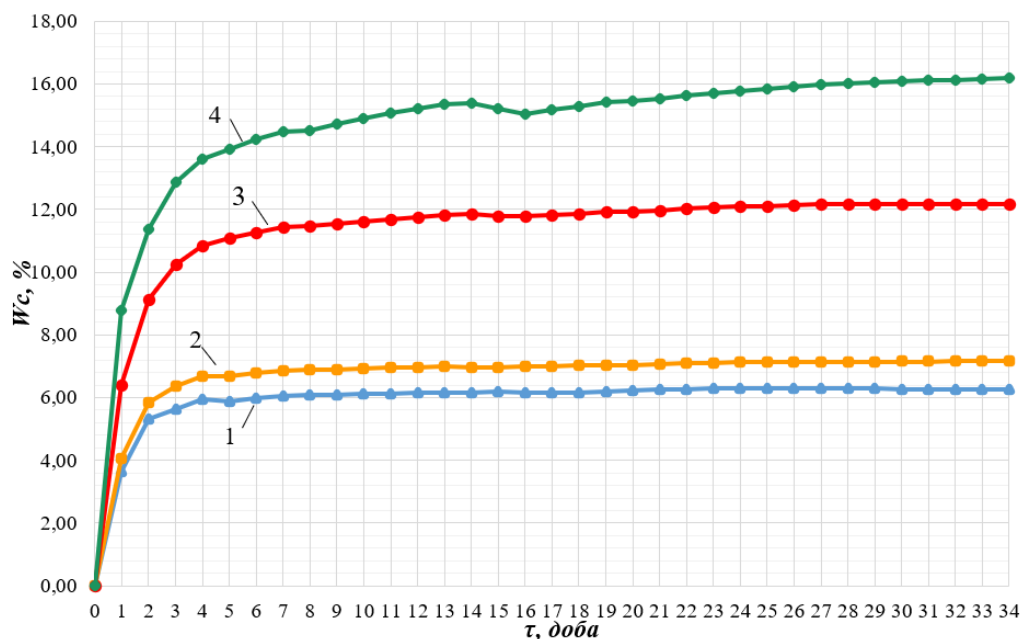


Рис. 4.8. Кінетичні криві адсорбції водяної пари над трьохкомпонентними гранулами на основі мулових відкладень, торфу та тирси:

1 – $\varphi = 0,4$; 2 – $\varphi = 0,6$; 3 – $\varphi = 0,8$; 4 – $\varphi = 0,9$

Кінетичні криві адсорбції водяної пари над трьохкомпонентним композитом на основі мулових відкладень, торфу та лузги гречки зображено на рисунку 3.9. При значенні $\varphi=0,4$ (рис. 4.9, крива 1) рівноважний стан встановлюється на 9 день; при $\varphi=0,6$ (рис. 4.9, крива 2) на 16 день; при $\varphi=0,8$ (рис. 4.9, крива 3) на 26 день; при $\varphi=0,9$ (рис. 4.9, крива 4) 34 день. Рівноважна вологість трьохкомпонентним композитом на основі мулових відкладень, торфу та лузги гречки при $\varphi=0,6$ становить 7%.

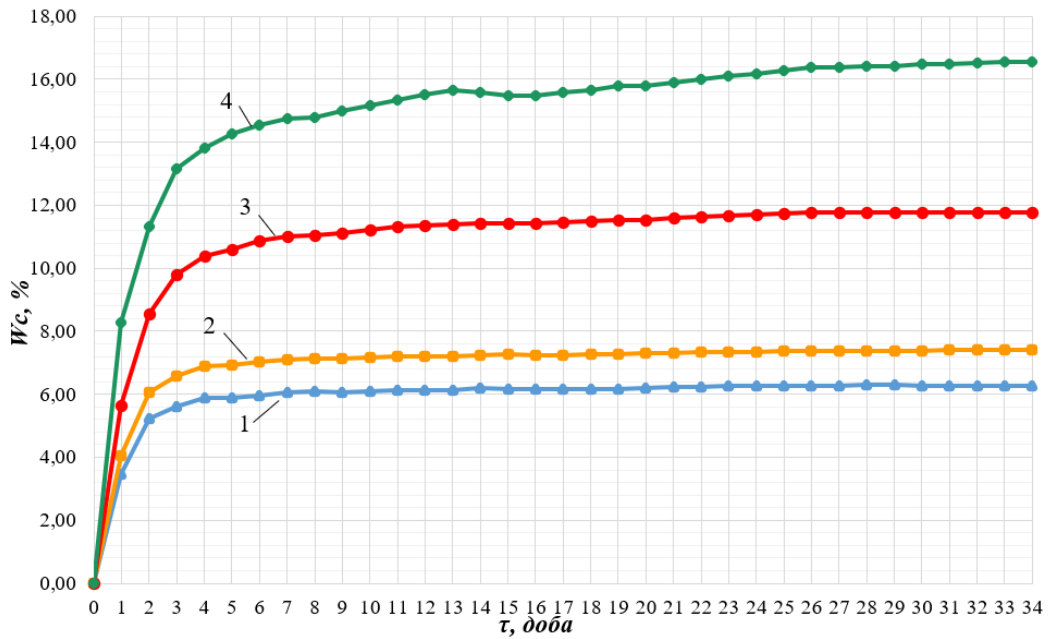


Рис. 4.9. Кінетичні криві адсорбції водяної пари над трьохкомпонентним композитом на основі мулових відкладень, торфу та лузги гречки:

1 – $\varphi = 0,4$; 2 – $\varphi = 0,6$; 3 – $\varphi = 0,8$; 4 – $\varphi = 0,9$

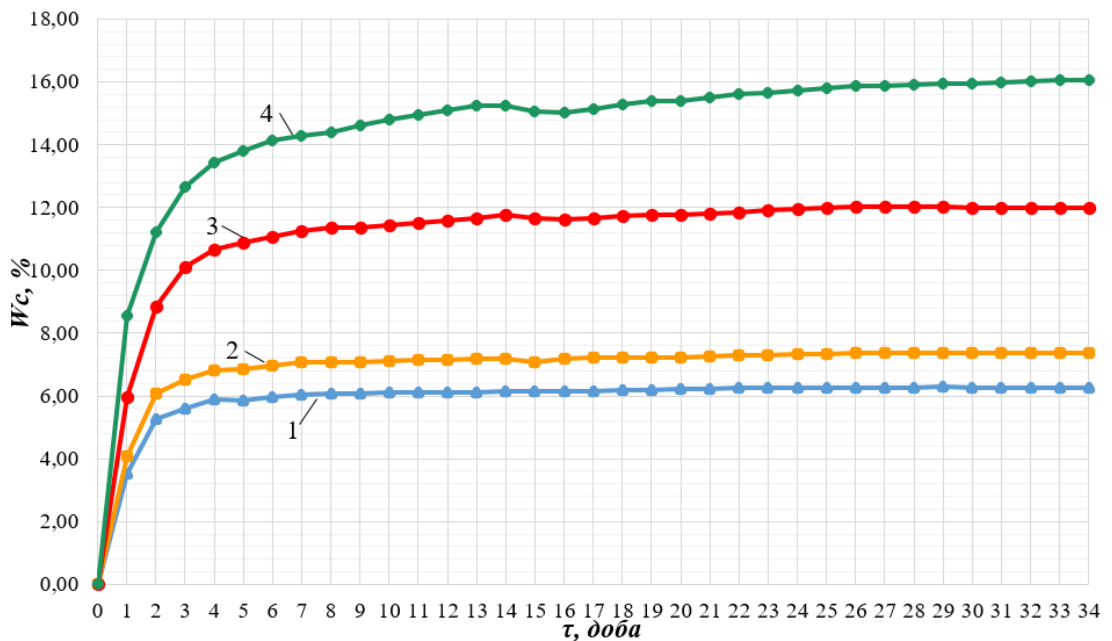


Рис. 4.10. Кінетичні криві адсорбції водяної пари над трьохкомпонентними гранулами на основі мулових відкладень, торфу та лузги гречки:

1 – $\varphi = 0,4$; 2 – $\varphi = 0,6$; 3 – $\varphi = 0,8$; 4 – $\varphi = 0,9$

Кінетичні криві адсорбції водяної пари над трьохкомпонентними гранулами на основі мулових відкладень, торфу та лузги гречки зображено на рисунку 3.10. При значенні $\varphi=0,4$ (рис. 4.10, крива 1) рівноважний стан встановлюється на 10 день;

при $\varphi=0,6$ (рис. 4.10, крива 2) на 16 день; при $\varphi=0,8$ (рис. 4.10, крива 3) на 26 день; при $\varphi=0,9$ (рис. 4.10, крива 4) 34 день. Рівноважна вологість трьохкомпонентними гранулами на основі мулових відкладень, торфу та лузги гречки при $\varphi=0,6$ становить 7 %.

Кінетичні криві адсорбції дво- та трьохкомпонентного композиту мають характер кривих мулових відкладень. При відносній вологості повітря $\varphi=0,6$ рівноважна вологість торфу складає близько 13%; мулових відкладень – 2%; тирси – 9%; лузги гречки – 9%; двокомпонентного композиту – 6%; трьохкомпонентного композиту на основі мулових відкладень, торфу та тирси – 7%; трьохкомпонентного композиту на основі мулових відкладень, торфу та лузги гречки – 7%. Дво- та трьохкомпонентні гранули при відносній вологості $\varphi=0,6$ мають рівноважну вологість таку ж, як у відповідних композитів.

Аналіз експериментальних ізотерм дозволяє відносно віднести ізотерми адсорбції типу IV згідно з класифікацією Брунуера, Демінга, Демінга і Теллера (BDDT). Ізотерми IV типу спостерігаються для неорганічних оксидів та інших пористих тіл, а також мають петлі гістерезису [106]. Звичайні петлі гістерезису є результатом неідеальної необоротності процесів випаровування і конденсації. На експериментальній кривій петля гістерезису знаходиться в області низького відносного тиску і може бути пояснена властивостями матеріалу та властивостями води як адсорбату. При більш високих відносних тисках ізотерма змінюється і крива «злітає» вгору [107].

Криві ізотерм адсорбції торфу, мулових відкладень, двокомпонентного композиту на основі мулових відкладень і торфу, тирси, трьохкомпонентного композиту на основі мулових відкладень, торфу та тирси, трьохкомпонентного композиту на основі мулових відкладень, торфу та лузги гречки, дво- та трьохкомпонентних гранул зображені на рисунках 4.11, 4.12.

На рис. 4.11 показані ізотерми адсорбції водяної пари у композиту та їх компонентів. Дво- та трьохкомпонентний композит на основі мулових відкладень, торфу та біомаси займають положення між ізотермами їх компонентів. Ізотерми композиту мають характер його компонентів, так двокомпонентний композит на

основі мулових відкладень та торфу (крива 5) подібна до мулових відкладень (крива 1), трьохкомпонентний композит на основі мулових відкладень, торфу та тирси (крива 6) подібна до кривої тирси (крива 3), трьохкомпонентний композит на основі мулових відкладень, торфу та лузги гречки (крива 7) подібна до кривої лузги гречки (крива 4).

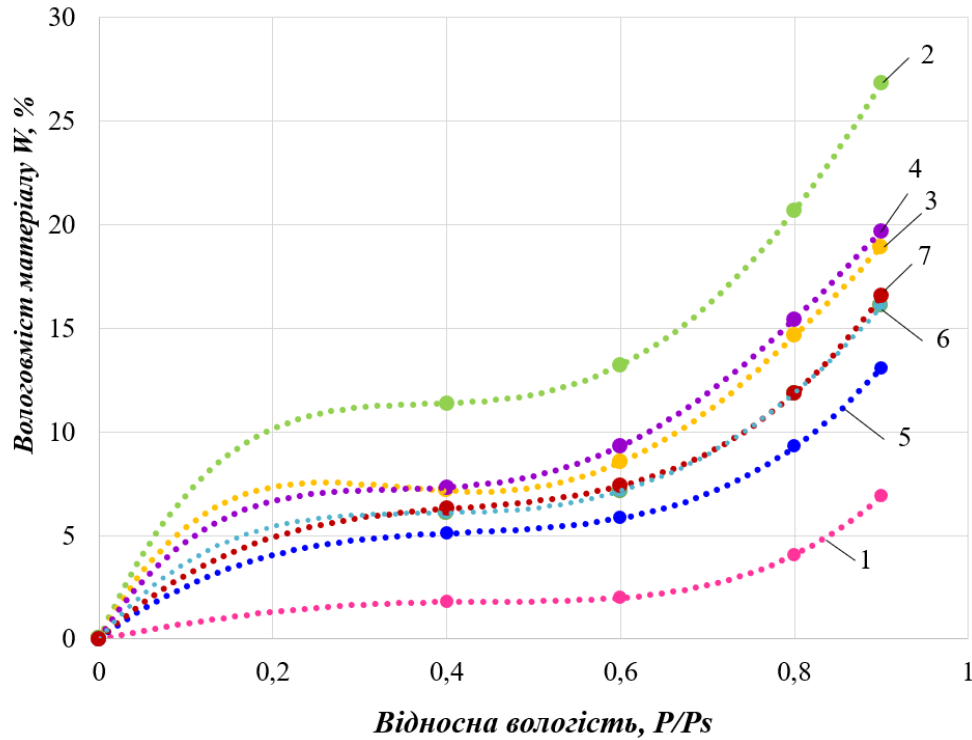


Рис. 4.11. Ізотерми адсорбції водяної пари композиту та його компонентів:
 1 – мулові відкладення; 2 – торф; 3 – тирса; 4 – лузга гречки; 5 – двокомпонентна суміш на основі мулових відкладень та торфу; 6 – трьохкомпонентна суміш на основі мулових відкладень, торфу та тирси; 7 – трьохкомпонентна суміш на основі мулових відкладень, торфу та лузги гречки

При $\varphi = 0,6$ рівноважна вологість всіх зразків різна, що свідчить про неоднорідний склад матеріалу. Рівноважна вологість для мулових відкладень (крива 1) становить близько 2%; торфу (крива 2) – 13%; для тирси (крива 3) – 8%; для лузги гречки (крива 4) – 9%; для двокомпонентного композиту на основі мулових відкладень та торфу (крива 5) – 6%; для трьохкомпонентного композиту на основі мулових відкладень, торфу та тирси (крива 6) – 6 %; для трьохкомпонентного композиту на основі мулових відкладень, торфу та лузги гречки (крива 7) – 7 %.

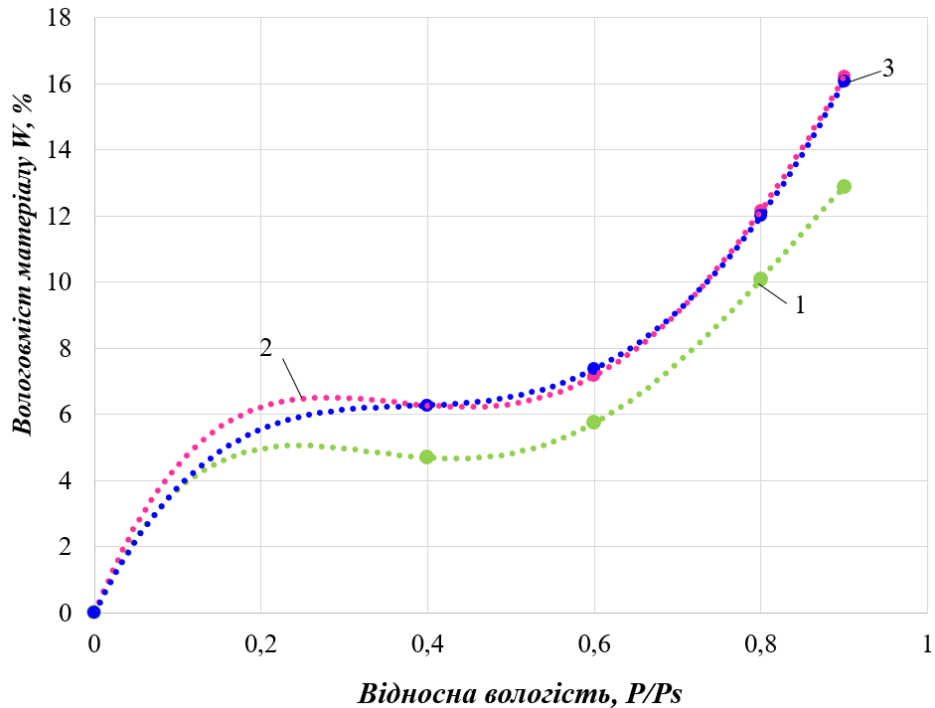


Рис. 4.12. Ізотерми адсорбції водяної пари композитних гранул:

1 – двокомпонентні гранули на основі мулових відкладень та торфу; 2 – трьохкомпонентні гранули на основі торфу, мулових відкладень та тирси; 3 – трьохкомпонентні гранули на основі торфу, мулових відкладень та гречаної лузги

На рис. 4.12 показані ізотерми адсорбції водяної пари для двокомпонентних гранул на основі мулових відкладень та торфу (крива 1), трьохкомпонентних гранул на основі мулових відкладень, торфу та тирси (крива 2), трьохкомпонентних гранул на основі мулових відкладень, торфу та лузги гречки (крива 3). При відносній вологості повітря $\varphi = 0,6$ рівноважна вологість двокомпонентних гранул на основі мулових відкладень та торфу складає близько 6 %; трьохкомпонентних гранул на основі мулових відкладень, торфу та тирси – 7 %; трьохкомпонентних гранул на основі мулових відкладень, торфу та лузги гречки – 7 %.

У таблиці 4.1 наведені рівняння експериментальних ізотерм та лінеаризованих ізотерм адсорбції для торфу, мулових відкладень, тирси, лузги гречки та композиту на їх основі.

Таблиця 4.1. Рівняння експериментальних ізотерм адсорбції

Матеріал	Рівняння експериментальних ізотерм	Рівняння лінеаризованих ізотерм
Торф	$W = 21,0376\varphi^3 + 32,2698\varphi^2 - 39,0201\varphi + 20,4774$	$W = 5,2576e^{1,7387\varphi}$
Мулові відкладення	$W = 72,7388\varphi^3 - 107,5176\varphi^2 + 53,2690\varphi - 6,9790$	$W = 0,5068e^{2,71\varphi}$
Тирса	$W = -39,495\varphi^3 + 130,52\varphi^2 - 93,686\varphi + 26,275$	$W = 2,9577e^{1,9981\varphi}$
Лузга гречки	$W = -24,462\varphi^3 + 95,656\varphi^2 - 67,091\varphi + 20,417$	$W = 3,0709e^{2,0189\varphi}$
Двокомпонентний композит на основі торфу та мулових відкладень	$W = 70,1308\varphi^3 - 92,2586\varphi^2 + 42,6232\varphi - 1,6759$	$W = 2,1853e^{1,8761\varphi}$
Двокомпонентні гранули на основі торфу та мулових відкладень	$W = -41,008\varphi^3 + 115,15\varphi^2 - 78,779\varphi + 20,411$	$W = 1,8841e^{2,0845\varphi}$
Трьохкомпонентний композит на основі торфу, мулових відкладень та тирси	$W = 32,606\varphi^3 - 13,13\varphi^2 - 6,3313\varphi + 8,634$	$W = 2,5349e^{1,9641\varphi}$
Трьохкомпонентні гранули на основі торфу, мулових відкладень та тирси	$W = 0,2641\varphi^3 + 50,847\varphi^2 - 46,615\varphi + 16,771$	$W = 2,6211e^{1,9386\varphi}$
Трьохкомпонентний композит на основі торфу, мулових відкладень та лузги гречки	$W = 81,358\varphi^3 - 104,57\varphi^2 + 48,303\varphi - 1,515$	$W = 2,6481e^{1,9348\varphi}$
Трьохкомпонентні гранули на основі торфу, мулових відкладень та лузги гречки	$W = 28,816\varphi^3 - 7,7217\varphi^2 - 8,7141\varphi + 9,1538$	$W = 2,6938e^{1,9005\varphi}$

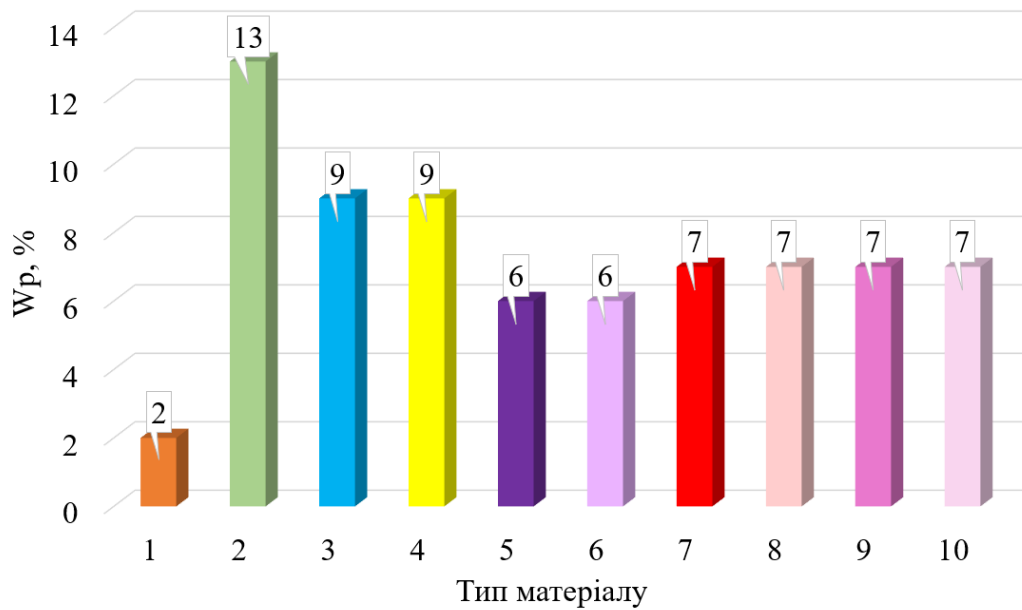


Рис. 4.13. Рівноважні вологості матеріалів при $\varphi = 0,6\%$:

- 1 – торф; 2 – мулові відкладення; 3 – тирса; 4 – лузга гречки;
 5 – двокомпонентний композит на основі мулових відкладень та торфу;
 6 – двокомпонентні гранули на основі мулових відкладень та торфу;
 7 – трьохкомпонентний композит на основі мулових відкладень, торфу та тирси;
 8 – трьохкомпонентні гранули на основі мулових відкладень, торфу та тирси;
 9 – трьохкомпонентний композит на основі мулових відкладень, торфу та лузги гречки; 10 – трьохкомпонентні гранули на основі мулових відкладень, торфу та лузги гречки

На рис. 4.13 показані рівноважні вологості монокомпонентів та композиту при відносній вологості $\varphi = 0,6\%$. Рівноважні вологості композитних гранул співпадають з вологостями композиту. Додавання мулових відкладень до композиту дозволяє зменшувати рівноважну вологість.

4.2. Дослідження показника активності води для композитної сировини на основі застарілих мулових відкладень, торфу та біомаси

Вперше проведено дослідження визначення показника активності води для дво- та трикомпонентних гранул. Результати дослідження основних

термодинамічних показників та результуючі показники активності води наведені в таблиці 4.2.

За загальноприйнятою класифікацією гранули відносяться до продуктів з низьким вмістом вологи і мають високу теплотворну здатність завдяки своїй крихкій структурі. Вплив такого компонента, як тирса, на цей показник не погіршує якість продукту, але свідчить про кращу здатність поглинати вологу в порівнянні з аналогами.

За отриманими результатами досліджень (табл. 4.2) отримано кореляційні коефіцієнти згідно рівняння регресії другого порядку:

$$a_w = -0,0015x^2 + 0,0065x + 0,221, \quad (4.1)$$

де x – компонентний вміст сполук (незалежні змінні).

Гранули, отримані шляхом додавання біомаси, розтріскуються та розпушуються. Це пов'язано з тим, що коли в мулових відкладеннях присутні залишки поліетилену, зона взаємодії між біомасою та поліетиленом зростає, а висока температура всередині гранул створює умови для плавлення частинок поліетилену. Проникає в пори і тріщини гранул і рівномірно зв'язує частини рослинного матеріалу.

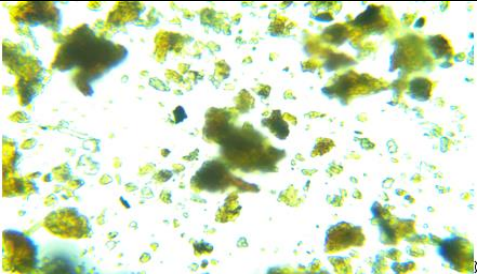
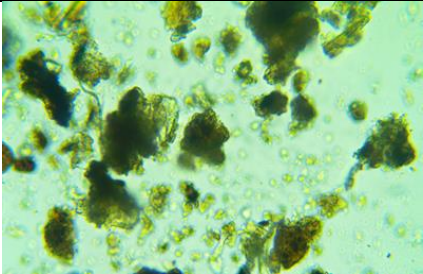
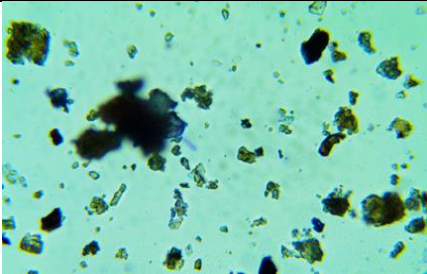
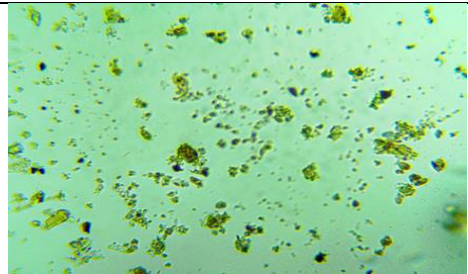
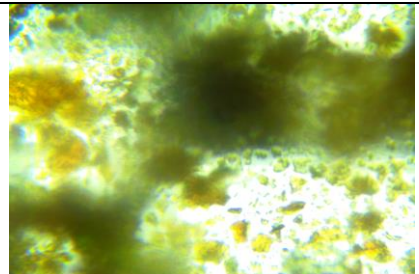
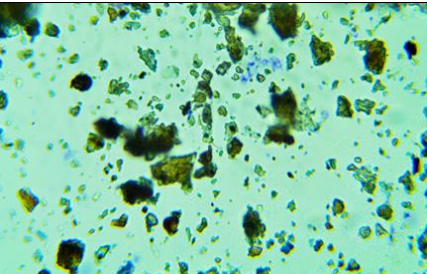
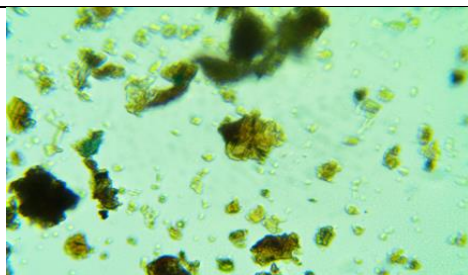
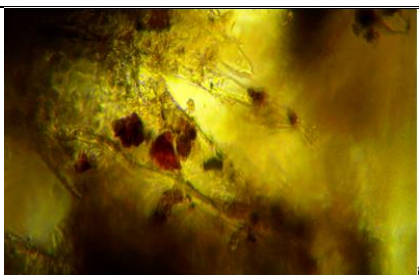
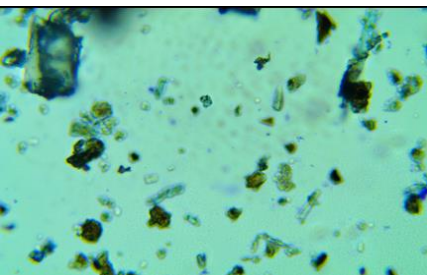
Рідина в целюлозних волокнах перетворюється на пару і спінює розплав, вивільняючи леткі неорганічні сполуки. Загалом процеси, що відбуваються при формуванні гранул палива, утворюють значні пори. При цьому вміст зв'язаної вологи досягає критичного значення в гранулах, що підтверджується даними показника активності води (табл. 4.2). Пористість гранул не контролюється і погано прогнозується. При цьому зменшується щільність гранул і утворюються додаткові порожнини.

Мікроскопічні дослідження з сорбційної ємності та зміну структури зразків композитних гранул представлено в таблиці 4.3. Отримані гранули погано поглинають вологу, що видно по часточках подрібнених зразків, які не набухли і зберегли власну структуру.

Таблиця 4.2. Термодинамічна характеристика композитних гранул

	Показник	Двокомпонентні гранули на основі торфу та мулових відкладень	Трьохкомпонентні гранули на основі торфу та мулових відкладень, гречаної лузги	Трьохкомпонентні гранули на основі торфу та мулових відкладень, тирси
1	Температура, °С	18,6	18,7	18,8
2	Точка роси/інею, °С	2,81	2,76	2,40
3	Температура за вологим термометром, °С	8,82	8,89	9,01
4	Ентальпія, Дж/г	26,33	26,48	26,75
5	Питомий вологовміст, г/кг	3,01	3,02	3,11
6	Співвідношення концентрацій компонентів суміші, г/кг	3,02	3,03	3,12
7	Концентрація парів при насиченні, г/м ³	3,58	3,59	3,70
8	Парціальний тиск водяного пару, гПа	4,82	4,84	4,99
9	Тиск насиченого пару види, гПа	21,43	21,57	21,63
10	Активність води (a_w)	0,225	0,224	0,231

Таблиця 4.3. Мікрофотографії подрібнених зразків композитних гранул (100×40)

	у воді	у воді з йодом	у воді з метиленовим блакитним
Двокомпонентні гранули на основі торфу та мулових відкладень			
Трьохкомпонентні гранули на основі торфу та мулових відкладень, гречаної лузги			
Трьохкомпонентні гранули на основі торфу та мулових відкладень, тирси			

На мікрофотографіях подрібнених зразків гранул у водному розчині йоду виявлено відсутність складних вуглеводних комплексів і наявність простих сполук, що свідчить про зменшення органічних компонентів.

На мікрофотографіях подрібнених зразків гранул у розчині йоду та робочому розчині метиленового синього укрупнення частинок вказує на збільшення пароподібного простору гранул та їхньої здатності поглинати сполуки (наприклад, сажу від спалених гранул).

Молекули йоду мають більший розмір і адсорбуються як на мікропористих, так і на мезопористих поверхнях гранул. Зі зменшенням розміру частинок гранул збільшується питома поверхня і зменшується кількість пор до розміру 0,5-1,0 мкм. При цьому питома поверхня дещо збільшується порівняно зі зменшенням кількості пор у гранульованих частинках. Як, видно, з табл. 4.3. на вироблені гранули також впливають домішки, додані до основної сировини. Тому при додаванні в композит лузги гречки і тирси питома поверхня мулоторф'яних гранул значно збільшується.

Молекули метиленового синього індикатора адсорбуються в пори площею 0,78-1,3 нм² [108]. Індикатор метиленового синього являє собою поліедральну молекулу і не проникає в мікро- і мезопори. Тому адсорбція метиленового синього залежить від питомої поверхні гранул.

4.3. Дослідження теплоти згорання розробленого композитного палива на основі застарілих мулових відкладень, торфу та біомаси

Калориметричний комплекс КТС-4 застосовувався для проведення чималої кількості дослідів з визначення теплотворної здатності зразків біопалива різного агрегатного стану [109 – 114].

Біопаливо створене нами на основі застарілих мулових осадів, торфу та біомаси раніше не було досліджено на відміну від традиційних видів палива. Методика визначення теплоти згорання наведена у розділі 2.2.8.

Результати визначення теплоти згорання мулових відкладень представлені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4. Теплота згоряння мулових відкладень

Характеристика	Мулові відкладення	
	кДж/кг	ккал/кг
Вища теплота згоряння аналітичної проби	12678	3029
Вища теплота згоряння у сухому стані	13124	3135
Вища теплота згоряння у стані поставки	12792	3056
Нижча теплота згоряння аналітичної проби	11835	2827
Нижча теплота згоряння у сухому стані	11814	2822
Нижча теплота згоряння у стані поставки	11964	2858

Теплота згоряння мулових відкладень, як видно, досить висока і за своїми показниками наближається до близького до нього палива – торфу. Так торф (в стані поставки) в середньому має нижчу теплоту згоряння 3450 ккал/кг при кількості летких 42,2% [115], а мул 2858 ккал/кг при кількості летких 39,11%.

Слід зазначити, враховуючи структуру мулових відкладень, що близькість паливних характеристик мулових відкладень та торфу дозволяє створювати композитне паливо.

Щоб виміряти теплоту згоряння згідно з цим стандартом, проводять принаймні два експерименти. Якщо похибка результатів експерименту перевищує вказане значення, проводять третій експеримент і беруть середнє значення двох найближчих вимірювань, як результат. Саме таким чином отримані результати для трикомпонентних гранул з мулових відкладень, торфу та лузги гречки.

Для двох інших досліджених зразків, перші результати дослідів визначення теплоти згоряння у бомбі помітно відрізнялися між собою, тому для них проведено по 5 дослідів і як результат вимірювання прийнято середнє значення теплоти згоряння за проведеними дослідями.

Причиною помітної розбіжності між окремими результатами є неоднорідність досліджених зразків та наявність у них шматочків мікропластику. При обробці експериментальних даних для визначення поправок

використовувалися значення вмісту водню, сірки та азоту, які є середніми у діапазоні, що наведені у літературі, а саме вміст водню $H=6,0\%$, вміст сірки $S=0,8\%$.

Проби спалювалися в упаковці з паперу з відомою теплою згорання. Результати вимірювань та розрахунків наведені в таблицях 4.5.

Таблиця 4.5. Визначення теплоти згорання аналітичної проби композиту в бомбі

№ п/п	Результати вимірювань					Результати обчислень
	Визначення маси				Показання приладу, Q_p , Дж	Виміряна теплота згорання в бомбі, q_b , кДж/кг
	Проби палива m_3 , МГ	Паперової упаковки $m_{\text{папір}}$, МГ	Дроту до згорання m_1 , МГ	Залишку дроту, що не згорів, m_2 , МГ		
<i>Двокомпонентні гранули на основі мулових відкладень та торфу</i>						
1	624,83	131,3	38,425	4,2	10878	14111
2	607,63	143,9	38,455	5,88	10679	13878
3	467,705	136,2	37,51	5,74	8553	13736
4	568,39	128,955	37,39	5,18	9980	14003
5	518,025	140,535	37,515	4,63	9506	14110
Середнє значення q_b для наведених гранул, кДж/кг						13968
<i>Трьохкомпонентні гранули на основі мулових відкладень, торфу та лузги гречки</i>						
1	592,39	141,43	22,32	6,73	11395	15578
2	716,655	134,97	21,91	7,14	12923	15148
3	718,44	127,47	22,21	6,58	12882	15207
Середнє значення між 2 та 3 дослідями q_b для наведених гранул, кДж/кг						15177
<i>Трьохкомпонентні гранули на основі мулових відкладень, торфу та тирси</i>						
1	618,245	130,72	22,535	5,6	11663	15615
2	639,245	133,51	22,63	8,54	11886	15397
3	436,485	140,225	37,925	4,9	9188	16027
4	525,13	148,175	38,645	4,23	10649	15870
5	632,21	136,625	38,65	4,62	12349	16147
Середнє значення q_b для наведених гранул, кДж/кг						15811

В таблиці 4.6 наведені результати розрахунків вмісту водню в аналітичній пробі, вищої та нижчої теплоти згорання аналітичної проби, абсолютно сухого палива та зразка у стані поставки згідно формул наведених в розділі 2.2.8.

Таблиця 4.6. Результати розрахунків для композитних гранул

Зразок	Вологість аналіт. проби W_a , %	Вміст водню в аналіт. пробі H_a , %	Теплота згоряння в бомбі, q_b , кДж/кг	Теплота згоряння					
				Аналітична проба		У сухому стані		У стані поставки	
				Вища q^a_в , кДж/кг	Нижча q^a_н , кДж/кг	Вища q^c_в , кДж/кг	Нижча q^c_н , кДж/кг	Вища qⁿ_в , кДж/кг	Нижча qⁿ_н , кДж/кг
Двокомпонентні гранули на основі мулових відкладень та торфу	5,7	3,62	13968	13868	12939	14700	13390	13509	12541
Трьохкомпонентні гранули на основі мулових відкладень, торфу та лузги гречки	5,5	4,18	15177	15077	14030	15952	14642	15442	14428
Трьохкомпонентні гранули на основі мулових відкладень, торфу та тирси	5,0	4,22	15811	15711	14668	16532	15222	15970	14951

Таблиця 4.7. Результати калориметричного аналізу композитних гранул

Характеристика	Двокомпонентні гранули на основі мулових відкладень та торфу		Трьохкомпонентні гранули на основі мулових відкладень, торфу та лузги гречки		Трьохкомпонентні гранули на основі мулових відкладень, торфу та тирси	
	МДж/кг	ккал/кг	МДж/кг	ккал/кг	МДж/кг	ккал/кг
Вища теплота згоряння аналітичної проби	13,87	3313	15,08	3602	15,71	3753
Вища теплота згоряння у сухому стані	14,70	3512	15,95	3811	16,53	3949
Вища теплота згоряння у стані поставки	13,51	3227	15,44	3689	15,97	3815
Нижча теплота згоряння аналітичної проби	12,94	3091	14,03	3352	14,67	3504
Нижча теплота згоряння у сухому стані	13,39	3199	14,64	3498	15,22	3637
Нижча теплота згоряння у стані поставки	12,54	2996	14,43	3447	14,95	3572

Узагальнені результати вимірювань та розрахунків властивостей досліджених гранул у аналітичному повітряно-сухому стані, у стані поставки та у сухому стані наведені в таблиці 4.7. Теплота згоряння застарілих мулових відкладень знаходиться в межах 11,81 – 13,12 МДж/кг, і наближається до близького до нього палива – торфу. Питома теплота згоряння торфу в середньому становить 14,44 МДж/кг. З таблиці 4.7 видно, що двокомпонентні гранули на основі мулових відкладень та торфу мають показники теплоти згоряння майже такі самі як і у торфу. Зі створенням трьохкомпонентних гранул на основі мулових відкладень, торфу та біомаси теплота згоряння вже починає перевищувати показник торфу. Енергетичні показники гранул на основі мулових відкладень достатньо високі (таблиці 4.7), що дозволяє їх використовувати, як альтернативне паливо в побуті та комунальній енергетиці.

4.4. Дослідження процесу спалювання розробленого композитного палива на основі застарілих мулових відкладень, торфу та біомаси

4.4.1. Спалювання мулових відкладень

Технічний аналіз мулових відкладень проводився згідно викладеній методи-

ці. При цьому було використано наступне обладнання. При визначенні вологості використовувалось сушильна шафа №3, летких та зольності муфельна піч №8, для визначення маси використовувались ваги лабораторні ВЛР-7 та ВЛР-20.

Таблиця 4.8. Технічний аналіз мулових відкладень

Компонент	Волога робоча W^p , %	Зольність A^p , %	Горюча маса, %	Леткі	
				V^a , %	V^r , %
Мулові відкладення	2,53	38,98	58,49	39,11	66,86

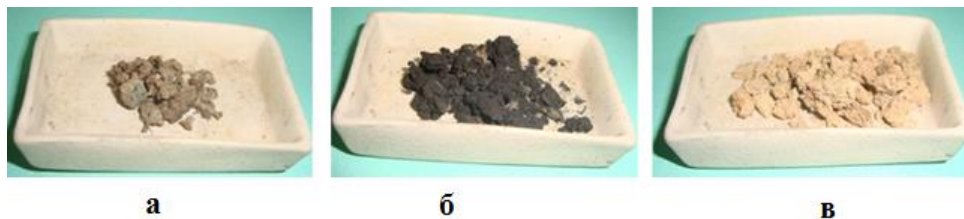


Рис.4.13. Вигляд мулових відкладень та його залишків після технічного аналізу: а – мулові відкладення, б – мулові відкладення після видалення летких, в – зола мулових відкладень

На рис. 4.13 показано вигляд застарілих мулових відкладень та його залишків після технічного аналізу. Як видно з рис. 4.13 під час проведення технічного аналізу після видалення летких з застарілих мулових відкладень (рис. 4.13, б) залишається коксовий залишок та визначення зольності (рис. 4.13, в) – зола.

Результати технічного аналізу наведені в таблиці 4.8. Як видно горюча маса мулових відкладень (мулові відкладення без води та зольності) складає 58,49%. Вміст летких на горючу масу 66,86%. Вказані параметри повинні забезпечувати легко займистість мулових відкладень та високу температуру його згоряння. Останнє необхідно визначити лабораторно за існуючими методиками.

Дослідження процесу горіння

Займання окремої частки мулових відкладень проводилось шляхом її інтенсивного розігріву зовнішнім джерелом тепла (рис. 4.14). Це вело до виділення летких, які займались, створюючи навколо частки фронт полум'я зони, в якій відбувається хімічна реакція взаємодії окислювача та палива з виділенням тепла та

продуктів згоряння, які дифундуючи до поверхні частинки, підтримують її розігрів і приводять до займання частки. Як видно до повного займання частки масою 0,11225г за рахунок спалювання летких необхідно час 1,85 с. Як показали досліди, останній залежить від маси частки: зі збільшенням маси, час збільшується.

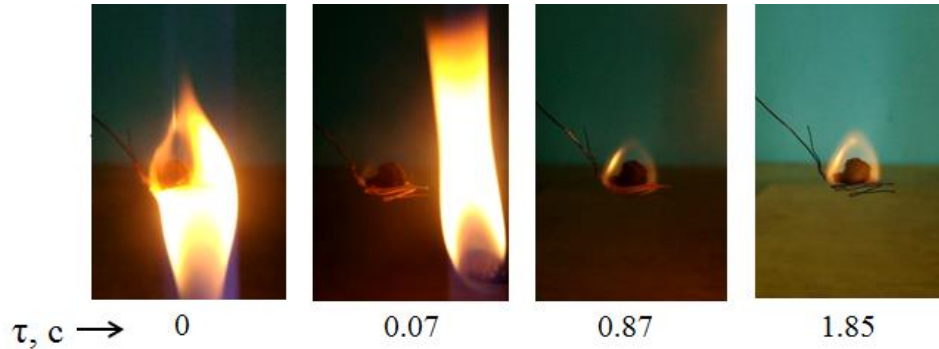


Рис. 4.14. Процес займання окремої частки мулових відкладень
(маса частки 0,11225г)

При дослідженнях окремої частки мулових відкладень було з'ясовано, що процес горіння відбувається у висхідному конвективному потоці окислювача за подвійним пограничним шаром. Як видно з фотографії (рис. 4.15), навколо частки мулових відкладень є високотемпературна зона, в якій відбувається горіння газової фази, - фронт полум'я (показаний пунктиром). Вона виникає при займанні частки за рахунок спалювання летких Z , які рухаються від частки палива до фронту полум'я, до якого зовні рухається окислювач – кисень повітря 1 . При чому фронт полум'я встановлюється в зоні стехіометричного співвідношення окислювача та пального [116], а температура в зоні реакції горіння визначається теплотою згоряння палива. Таким чином відбувається нормальний процес горіння – дефлаграція.

Від фронту полум'я в обидва боки дифундують продукти згоряння 2 (рис. 4.15), головною складовою яких є діоксид вуглецю CO_2 . Процес горіння на фронті полум'я відбувається між газовими фазами: окиснювачем та паливом і є гомогенним.

Після розігріву частки мулових відкладень, діоксид вуглецю, який дифундує в бік частки палива, взаємодіє на її поверхні з вуглецем, в наслідок чого відбувається газифікація вуглецю і створюється оксид вуглецю CO , який дифундує

до фронту полум'я та вигоряє замість летких.

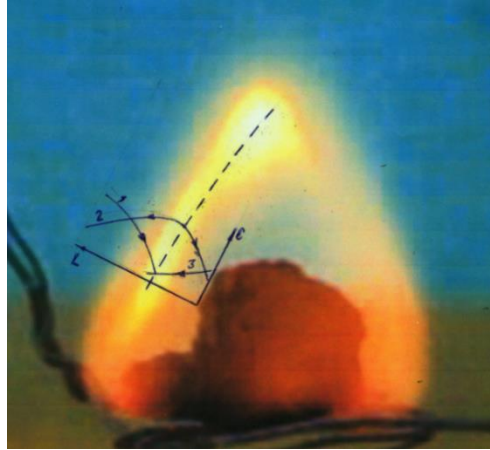


Рис. 4.15. Процес горіння частки мулових відкладень за подвійним пограничним шаром

Створення оксиду вуглецю відбувається при взаємодії газової фази та поверхні частки, внаслідок цього процес є гетерогенний, а загалом процес горіння відбувається за подвійним пограничним шаром [117].

При горінні внаслідок автотурбулізації відбувається розширення фронту полум'я, що добре видно на рис. 4.15, і інтенсифікація процесу горіння, при цьому зона між твердою фазою і фронту полум'я з часом заповнюється продуктами горіння та газифікації (рис. 4.16), надлишки яких рухаються вгору, зустрічаються з киснем повітря і створюють гострий хвіст полум'я.

Температура продуктів згорання окремих часток мулових відкладень, як показали вимірювання, була в межах 690°C - 750°C . Така температура не відповідає теплоті згорання мулових відкладень, вона низька внаслідок тепловтрат в простір. При груповому спалювання часток мулових відкладень (у факелі) температура продуктів згорання повинна бути більша.

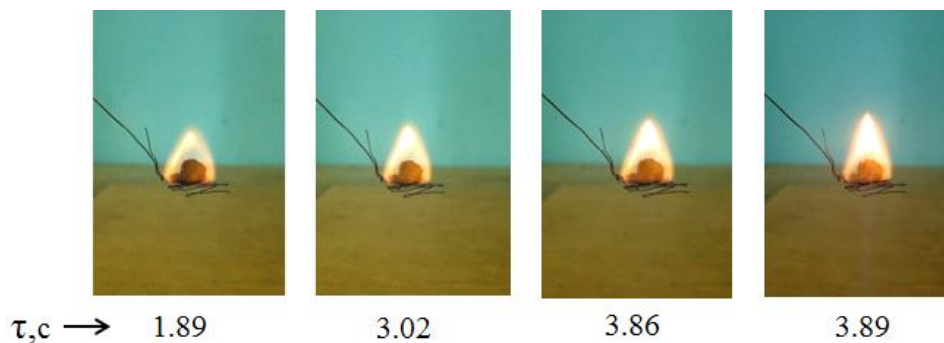


Рис. 4.16. Горіння частки мулових відкладень

На рис. 4.17 показаний по часово процес затухання полум'я частки мулових відкладень, який відбувається в наслідок вигорання горючої маси. При цьому зменшується виділення тепла при сталих тепловтратах, знижується температура і відповідно зменшується швидкість хімічних реакцій взаємодії компонентів згідно закону Ареніуса.

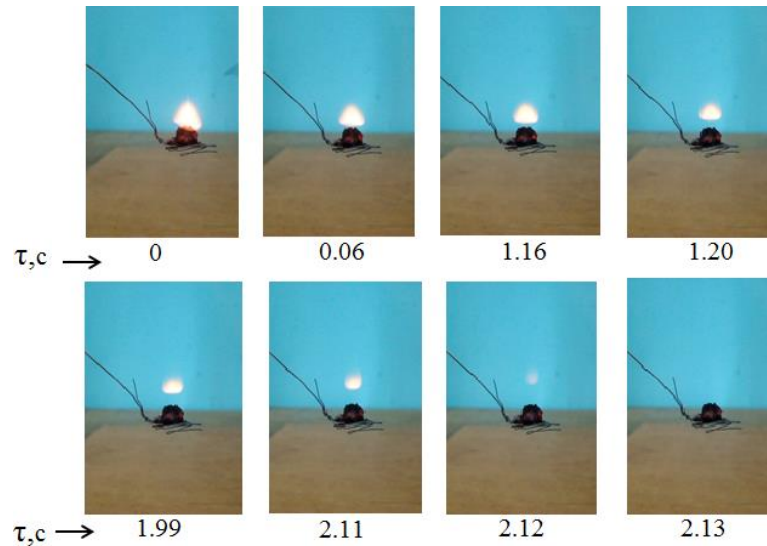


Рис. 4.17 Затухання полум'я горіння частки мулових відкладень

Враховуючи, що процес горіння мулових відкладень відбувається за подвійним пограничним шаром, затухання горіння частки відбувається при зменшенні швидкості гетерогенного процесу. Останнє відбувається в наслідок втрат тепла в навколишнє середовище та зменшенням підводу тепла від фронту полум'я – гомогенного процесу. При цьому на поверхні частки уповільнюється реакція газифікації, яка поступово затухає, що приводить до зменшення розміру полум'я та його затухання. Як бачимо на рис. 4.17, зона горіння з часом зменшується і остаточно щезає при згасанні палива.

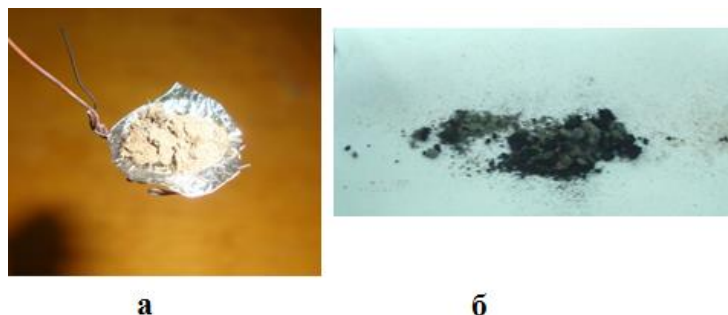


Рис.4.18. Паливо на колосниковому тримачі покритому:

а –алюмінієвою фольгою, б – зольний залишок



Рис.4.19. Паливо для спалювання на колосниковому тримачі:
а – без алюмінієвої фольги; б – зольний залишок

Проведені досліді по впливу відводу тепла в процесі горіння на вигорання палива. З цією метою паливо спалювалось на колосниковому тримачі покритою алюмінієвою фольгою (Рис. 4.18) і без неї (Рис. 4.19).

Результати досліді представлені в таблиці 4.9. Як бачимо, частки палива різні за масою, незважаючи на тепловідвід через алюмінієву фольгу, згоряють майже з однаковою швидкістю.

Таблиця 4.9. Вплив відводу тепла на вигорання палива

Тримач палива	Вихідна маса М, г	Механічна неповнота горіння q_4 , %	Швидкість горіння u , кг/год	Температура продуктів згорання, °С	Час горіння τ , с
Алюмінієва підкладка	0,04455	19,94	7,2	690	11
Колосники	0,08825	0	7,43	720	28

Паливо на алюмінієвій фользі відповідно до співвідношень мас повинно було горіти довше. Але в наслідок тепловідводу процес горіння завершився раніше, що привело до механічного недопалу палива майже до 20%, в той час паливо при спалюванні на колосниковому тримачі без алюмінієвої фользі згоріло повністю.

Температура продуктів згорання, як бачимо, при горінні частки мулових відкладень з підвищеним тепловідводом менша майже на 30°С.

Зольний залишок при повному згорянні частки мулових відкладень складається з оксидів кальцію, магнію, кремнію та інших мінеральних складових (рис. 4.19 б), а при недопалі, як видно в золі багато коксових залишків (рис. 4.19 б).

Проведені досліді по спалюванню окремої частки мулових відкладень показали, що в наслідок горіння мулових відкладень за подвійним пограничним

шаром швидкість горіння на одиниці поверхні частки незалежна від її розміру однакова. Це видно з графіку (рис. 4.20), де частки різні за масою згорають з однаковою швидкістю. Це підтверджується і часом горіння часток (рис. 4.21): більші частки згорають за більший час.

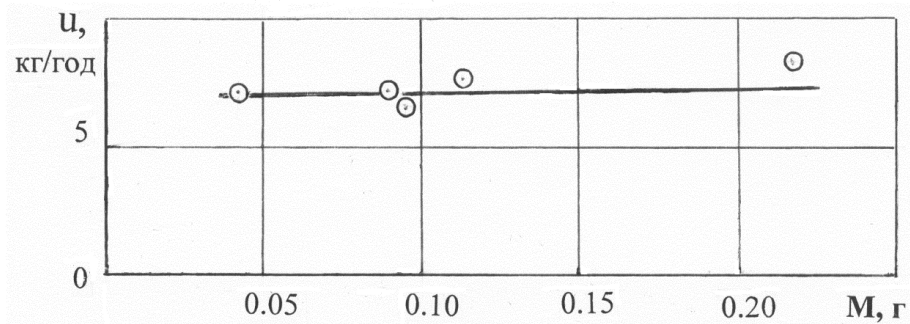


Рис. 4.20. Швидкість горіння часток мулових відкладень

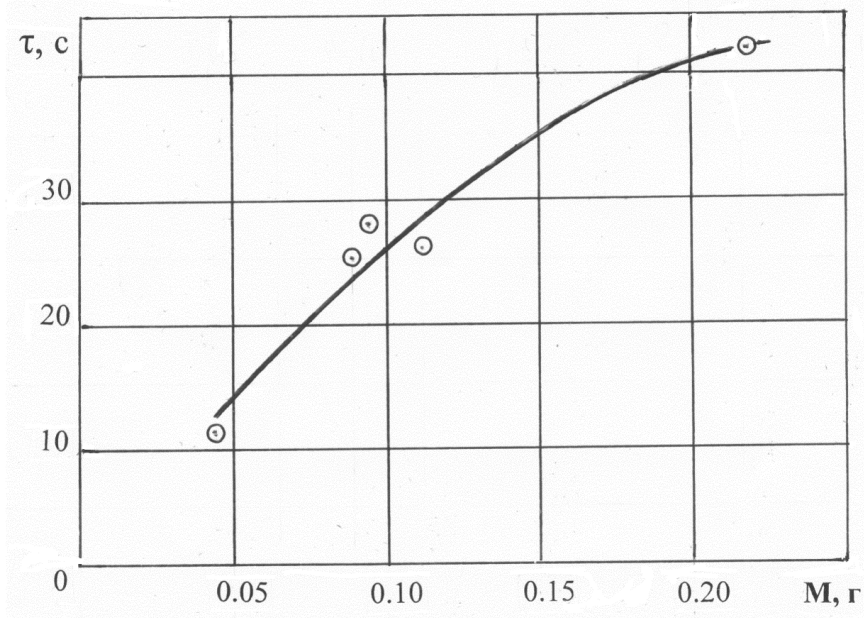


Рис. 4.21. Час горіння часток мулових відкладень

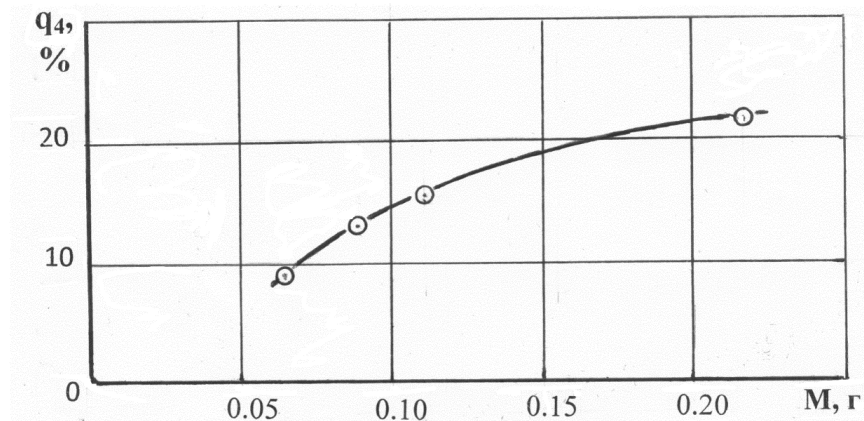


Рис. 4.22. Механічний недопал часток мулових відкладень

Механічний недопал палива більший у більших частках (Рис. 4.22), це викликано тим, що величина поверхні, на якій відбувається гетерогенних процес горіння, на одиницю маси зменшується при збільшенні маси часток.

Факельне спалювання мулових відкладень

Враховуючи результати дослідів по спалюванню окремої частки мулових відкладень було проведено спалювання у факелі.

При спалюванні твердого палива, залежно від його виду, воно подрібнюється до розмірів часток менше 90 мкм 95 – 75%. Як бачимо з кривої повних залишків, показує неоднорідність за складом мулових відкладень, частки з розміром 0,1 мм складають $R_x = 12\%$ (рис. 4.23), в той же час всі інші, більш грубі – до 1 мм складають 88%.

Неоднорідність подрібненого палива з мулових відкладень підтверджується кривою фракційних залишків палива (рис. 4.24), де положення максимуму диференційної кривої відносно вісі абсцис визначає найбільш характерні значення розміру частки; чим більш різкий максимум тим більш однорідний гранулометричний склад палива.

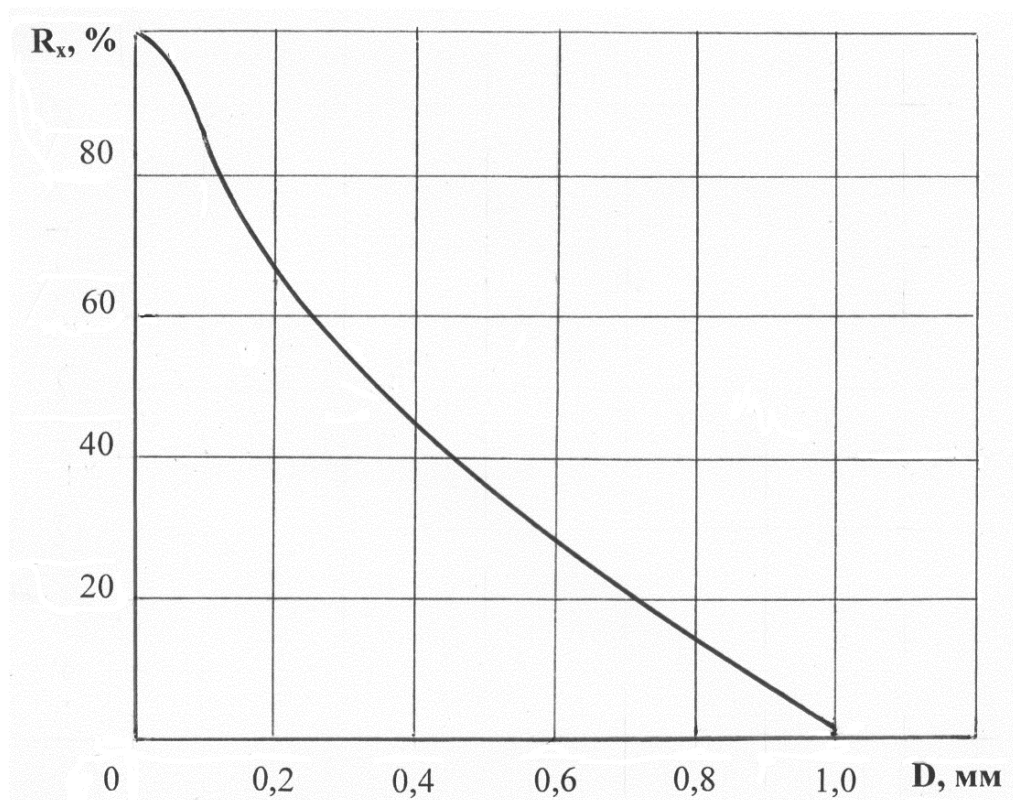


Рис. 4.23. Крива повних залишків палива

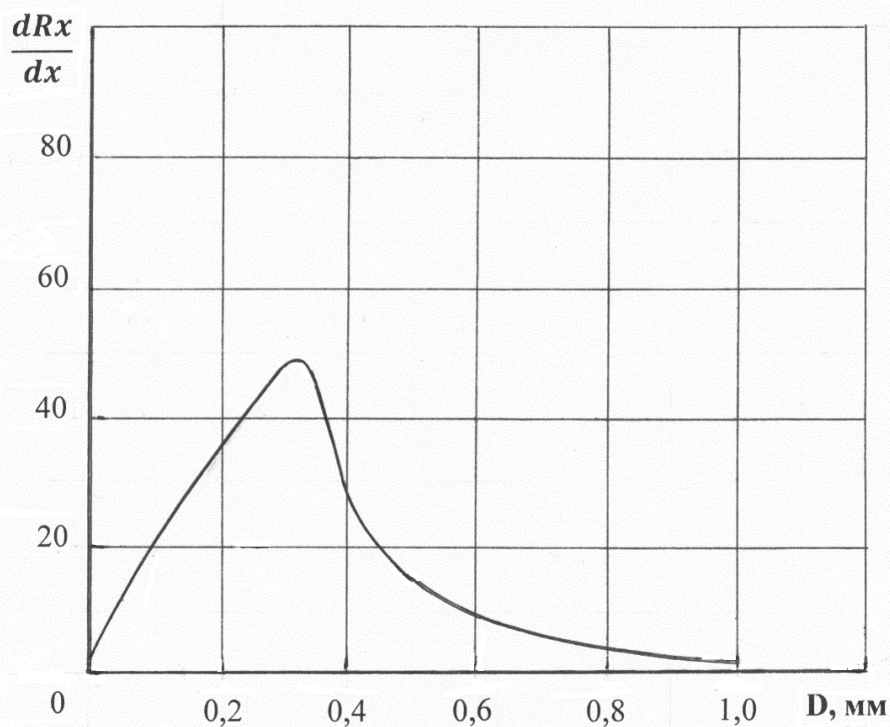


Рис. 4.24. Крива фракційних залишків палива

Неоднорідність гранулометричного складу палива впливає на процес його горіння в факелі. Відомо, і показано при спалювання окремої частки мулових відкладень, що у факелі на його початку вигорять дрібні частки. При цьому у факелі зменшується кількість кисню, що ускладнює процес горіння крупних часток, які вигорять за межами факелу, що подальшому може вести до механічного недопалу.

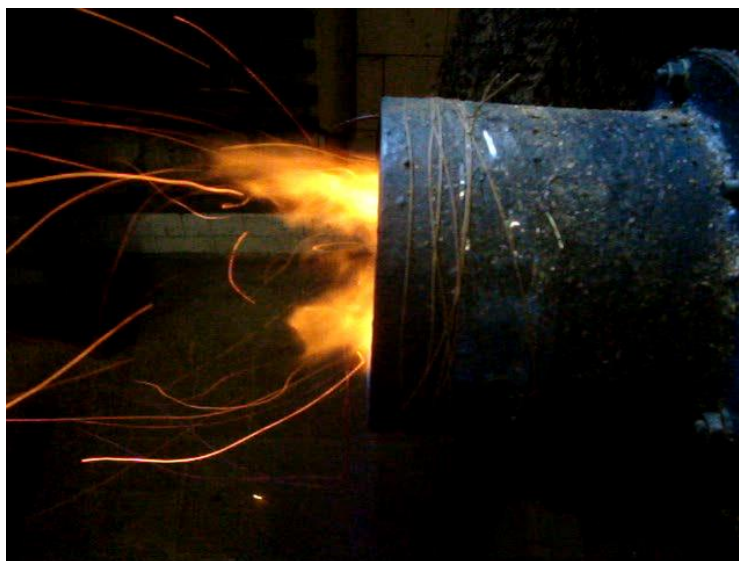


Рис. 4.25. Факел полум'я часток мулових відкладень

На рис. 4.25 показаний факел горіння мулових відкладень. Процес горіння відповідає загально прийнятому і викладеному вище процесу горіння твердого палива у факелі. Але на відміну, в наслідок того, що частки мулових відкладень мають температуру самозаймання, великі частки які залишають факел, виходячи за його межі, згоряють повністю. На рисунку 4.25 видно треки часток, які повністю згоряють. При цьому механічний недопал відсутній.

Показаний факел мав теплову потужність 5кВт, середня температура продуктів згоряння була 860°C.

4.4.2. Спалювання композитних гранул на основі застарілих мулових відкладень, торфу та біомаси

Технічний аналіз та визначення теплоти згоряння композитного палива – гранул на основі мулових відкладень було проведено за викладеними методиками у розділі 2.2.9.

Таблиця 4.10. Технічний аналіз комопозиційних гранул

Компонент	Волога робоча W^p , %	Зольність A^p , %	Горюча маса, %	Леткі	
				V^a , %	V^r , %
Двокомпонентні гранули на основі мулових відкладень та торфу	6,1	32,35	61,55	40,51	65,82
Трьохкомпонентні гранули на основі мулових відкладень, торфу та тирси	4,35	24,86	70,79	51,66	72,97
Трьохкомпонентні гранули на основі мулових відкладень, торфу та лузги гречки	4,36	23,08	72,56	46,18	63,64

Результати технічного аналізу представлені в таблиці 4.10. Як бачимо, гранули мають при малій вологості та відносно малій зольності високі паливні характеристики при наявності горючої маси 60% - 70%. Великий вміст летких забезпечує легко займистість отриманих гранул.

Дослідження горіння композитного палива в швидкісному (затисненому) шарі

Дослідження горіння композитного палива проводились при розрідженнях 100, 250 та 500 Па на експериментальній установці, яка дозволяє спалювати паливо в швидкісному (затисненому) шарі при різних перепадах тиску на ньому.



Рис. 4.26. Факел горіння двокомпонентних гранул на основі мулових відкладень та торфу розрідження 250 Па

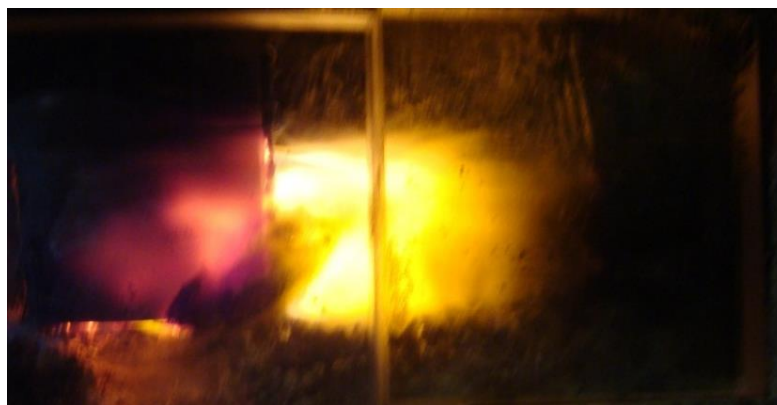


Рис 4.27. Факел горіння трьохкомпонентних гранул на основі мулових відкладень, торфу та лузги гречки: розрідження 250 Па



Рис. 4.28. Факел горіння трьохкомпонентних гранул на основі мулових відкладень, торфу та тирси: розрідження 500 Па

На рис 4.26, 4.27, 4.28 показані факели двокомпонентних гранул на основі мулових відкладень та торфу; трьохкомпонентних гранул на основі мулових відкладень, торфу та тирси; трьохкомпонентних гранул на основі мулових відкладень, торфу та лузги гречки.

Факел горіння двокомпонентних гранул на основі мулових відкладень та торфу (рис. 4.26) має високотемпературне ядро на початковій ділянці і достатньо довгий хвіст, в якому догоряють частки виносу палива. На відміну від нього факел горіння трьохкомпонентних гранул на основі мулових відкладень, торфу та лузги гречки (рис. 4.27) майже немає хвоста, все паливо згоряє в ядрі факела. Обидва види гранул горять при однаковому розрідженні, що виключає вплив градієнта швидкості повітря на порівняння факелів. Відміна визначається різним вмістом горючої маси, яка у трьохкомпонентних гранул на основі мулових відкладень, торфу та лузги гречки більше (див.табл. 4.10).

Вплив різниці перепаду тиску видно з рис. 4.28, де показаний факел горіння гранул трьохкомпонентних гранул на основі мулових відкладень, торфу та тирси. Незважаючи на те, що гранули мають найбільший вміст летких V^r , збільшення перепаду тиску і відповідно градієнту швидкості повітря веде до збільшення швидкості горіння палива та скороченню факелу.

Таблиця 4.11. Швидкість горіння гранул композитного палива в швидкісному (затисненому) шарі

Паливо	Швидкість горіння, кг/м ² год.		
	При $\Delta P=100$ Па	При $\Delta P=250$ Па	При $\Delta P=500$ Па
Торф	947,3	1292	-
Тирса	662,85	712	786,44
Двокомпонентні гранули на основі мулових відкладень та торфу	369,20	446,22	517,99
Трьохкомпонентні гранули на основі мулових відкладень, торфу та тирси	431,40	500,00	572,16
Трьохкомпонентні гранули на основі мулових відкладень, торфу та лузги гречки	442,36	526,12	628,37

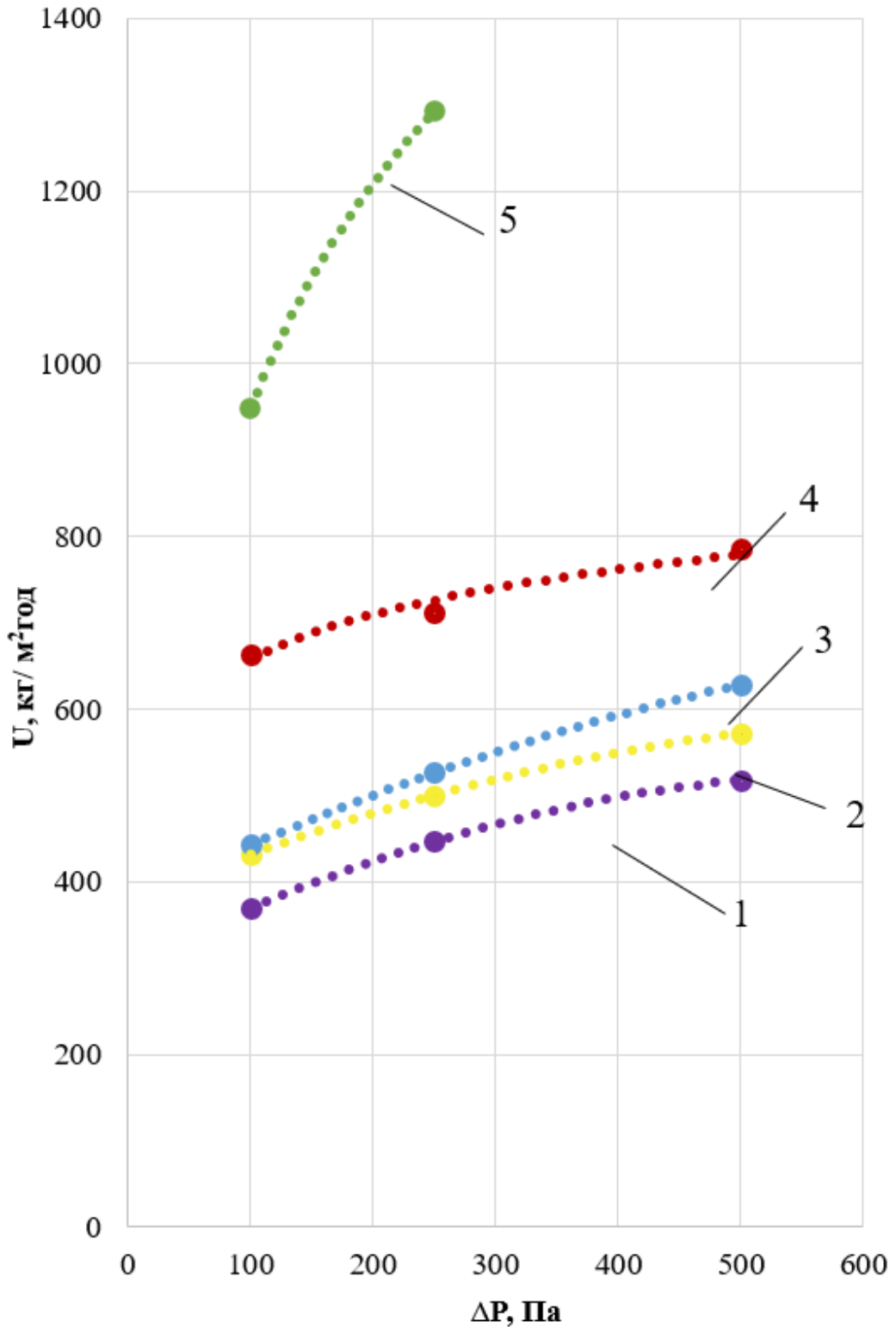


Рис. 4.29. Швидкість горіння гранул композитного палива в швидкісному (затисненому) шарі: 1 – двокомпонентний композит на основі мулових відкладень та торфу; 2 – трьохкомпонентний композит на основі мулових відкладень, торфу та тирси; 3 - трьохкомпонентний композит на основі мулових відкладень, торфу та лузги гречки; 4 – тирса, 5 – торф.

Була визначена також швидкість горіння в швидкісному (затисненому) шарі (табл. 4.11 та рис. 4.29) гранул з композитного палива: двокомпонентний композит на основі мулових відкладень та торфу; трьохкомпонентний композит на основі мулових відкладень, торфу та тирси; трьохкомпонентний композит на основі мулових відкладень, торфу та лузги гречки. Швидкість горіння залежить в прямоточному шарі як від перепаду тиску на шарі(градієнту швидкості в шарі) так і від виду палива. На швидкість горіння також впливає вміст летких сполук.

Як видно, паливні характеристики гранул значно відрізняються від паливних характеристик вихідної сировини. Швидкість горіння гранул: двокомпонентний композит на основі мулових відкладень та торфу – 1, трьохкомпонентний композит на основі мулових відкладень, торфу та тирси – трьохкомпонентний композит на основі мулових відкладень, торфу та лузги гречки – 3, значно нижча швидкості горіння вихідної біомаси: деревини – 4 та торфу 5 [118]. Пояснюється це зменшенням поверхні реагування та ущільненні гранул при пресуванні вихідної сировини. Однак, швидкість горіння гранул набагато переважає швидкість горіння окремої частки мулових відкладень.

4.4.3. Визначення хімічного складу золи паливних гранул

За еволюційного розвитку рослини виробили здатність щодо концентрування певних елементів у надземній частині залежно від типу ґрунту, мінерального фону внесення добрив та агрокліматичних умов. Крім того, рослини знаходяться в постійному контакті із ґрунтом у період збирання зернових культур, що призводить до того, що частка ґрунту (до 10% від маси, у середньому за умови добре організованої технології збору – 3-5 %) залишається на надземній частині. Це призводить до підвищеного показника зольності порівняно із тирсою та за всіма показниками хімічного складу гранул (табл. 4.12).

Зокрема, гранули з умістом гречаної лузги містять більшу кількість речовин не розчинних у соляній кислоті (піску тощо), що зумовлено післязбиральною обробкою гречка. Більш високий вміст глини містять двокомпонентні гранули на основі торфу й мулу (24,01%), що зумовлено умовами знаходження мулово-

торф'яного шару. Експериментальні дані показують, що більший вміст карбонатів кальцію та магнію, оксидів алюмінію та заліза міститься в гранулах з умістом гречаної лузги.

Як відомо, основними елементами, які є утворювачами золи з біомаси є кремній (Si), кальцій (Ca), магній (Mg), калій (K), натрій (Na) і фосфор (P) [119].

Характерною особливістю залишків сільськогосподарських культур порівняно із деревинними складовими гранул є високий вміст у них азоту (N), сірки (S), хлору (Cl) і калію (K) завдяки залишкам на надземній частині добрив, пестицидів та гербіцидів, що застосовуються в технології вирощування цих рослин. Такі елементи призводять до істотно вищих викидів NO_x , SO_x та HCl порівняно з деревними гранулами [120, 121].

Враховуючи, що майже вдвічі переважають за умістом сульфату кальцію та карбонатів кальцію й магнію гранули із умістом гречаної лузги, то можна стверджувати, що такі гранули можуть викликати більший рівень зольної корозії обладнання. Утворення газів (втрати за спалювання) зростають із збільшенням частки рослинної складової в гранулах, що показує вплив природи сировини на якість паливних гранул.

Зазвичай властивості золи під час її плавлення характеризуються температурами [122]: початку деформації (IT), розм'якшення (ST), утворення напівсфери (HT) та розтікання (FT). Вміст у сировині іонів кальцію (Ca) і магнію (Mg), як відомо, спричинює підвищення температури плавлення золи [123].

Гранули, що містять гречану лузгу мають вдвічі більший вміст сполук із умістом іонів кальцію та магнію. Це підтверджує ствердження, що такі гранули порівняно з двома іншими зразками можуть прискорювати утворення шлаків у камері згоряння та зменшувати тим самим ефективність використання обладнання. Під час подальшого охолодження продуктів згоряння в секції котла SO_x утворює сульфати та конденсати на поверхнях теплообмінника, утворює дрібні частинки золи-винесення або безпосередньо реагує з частинками золи-винесення, що осідають на поверхнях теплообмінника. (сульфурація).

Таблиця 4.12. Хімічний склад паливних гранул (% до маси сухої речовини)

№ п/п	Найменування показника	Двокомпонентні гранули на основі мулових відкладень та торфу	Трьохкомпонентні гранули на основі мулових відкладень, торфу та гречаної лузги	Трьохкомпонентні гранули на основі мулових відкладень торфу та тирси
1	Масова частка вуглекислотного кальцію (CaCO_3), %	3,613	5,823	3,996
2	Масова частка вуглекислотного магнію (MgCO_3), %	0,563	1,108	0,542
3	Масова частка $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ в сумі, %	2,039	2,701	1,485
4	Масова частка речовин, нерозчинних в соляній кислоті (пісок, вуглець та ін.), %	7,13	11,977	3,623
5	Масова частка сульфатів (CaSO_4 та ін.), %	0,206	0,623	0,178
6	Масова частка решти домішок (глина та ін.), %	24,01	11,376	20,479
7	Масова частка органічних речовин з врахуванням вологості, %	45,069	43,437	23,000
8	Втрати за випалювання (зв'язана волога, SO_2 , CO_2 , який утворюється за згорання палива) без врахування вмісту органічних речовин та CO_2 , який міститься в карбонатах, %	17,369	22,955	46,696

Дослідження [119, 124] показали, що при спалюванні деревної стружки або кори 40–70 % (або до 90 %) сірки в паливі поглинається летючою золою. І 40–55 % адсорбується у разі спалювання соломи зернових. Ефективність фіксації сірки в золі залежить від концентрації в паливі лужних і лужноземельних металів (зокрема Са). Такі елементи, як Cl, S, K і Na, відіграють важливу роль у формуванні осаду та механізмах корозії.

Вплив сірки (S) в основному визначається її роллю в процесі корозії та утворенні викидів SO₂. Вищі концентрації SO₂ у димових газах призводять до сульфатації хлоридів лужних і лужноземельних металів зі зниженням температури димових газів. При цьому виділяється хлор (Cl). Коли ця реакція відбувається в частинках золи, що осідають на поверхні трубок теплообмінника, вивільнений хлор може утворювати на поверхні металу хлорид заліза та/або цинку (FeCl і ZnCl), що спричиняє корозію [125].

Різні типи сміттєспалювальних установок виробляють золу різної якості. Таким чином, згідно з класифікацією зола поділяється на золу виносу (летку) і подову, і існує різниця між золою, що утворюється під час спалювання в киплячому шарі, і золою, утвореною в решітці. В установках для спалювання біомаси зазвичай є три фракції золи:

- зольний залишок (подова зола), що утворюється на решітці в топці;
- зола виносу з циклонів (циклонна зола);
- зола виносу з фільтрів (фільтраційна зола).

Зола в основному змішується з мінеральними домішками, що містяться в біопаливі, такими як пісок, камінь і ґрунт. Циклонний зольний пил містить дрібні, здебільшого неорганічні частинки золи, які переносяться разом із топковими газами в піч і осідають у мультициклонах, розташованих переважно позаду печі. Фільтруюче середовище є другою дрібнішою фракцією, яка осідає у вигляді конденсованого осаду з електростатичних фільтрів, тканинних фільтрів або конденсаційних установок димових газів (зазвичай розташованих після мультициклонів). Цей попіл містить переважно аерозолі.

Таблиця 4.13. Регресійний аналіз хімічного складу паливних гранул

№ п/п	Найменування показника	Рівняння регресії
1	Масова частка вуглекислотного кальцію (CaCO ₃), %	$y_1 = 0,3312x^3 - 3,2805x^2 + 10,123x - 6,174$ $y_2 = 0,6218x^3 - 5,5965x^2 + 16,214x - 9,239$ $y_3 = 0,124x^3 - 1,146x^2 + 3,47x + 0,552$
2	Масова частка вуглекислотного магнію (MgCO ₃), %	$y_1 = -0,578x^2 + 2,312x - 1,234$ $y_2 = -0,5445x^2 + 2,1585x - 0,991$ $y_3 = -0,5445x^2 + 2,1585x - 0,991$
3	Масова частка Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ в сумі, %	$y_1 = 0,039x + 1,961$ $y_2 = 0,006x + 2,689$ $y_3 = 0,15x^2 - 0,443x + 1,771$
4	Масова частка речовин, нерозчинних в соляній кислоті (пісок, вуглець та ін.), %	$y_1 = 0,13x + 6,87$ $y_2 = 0,077x + 11,823$ $y_3 = 0,023x + 3,577$
5	Масова частка сульфатів (CaSO ₄ та ін.), %	$y_1 = 0,011x + 0,184$ $y_2 = 0,023x + 0,577$ $y_3 = 0,02x + 0,138$
6	Масова частка решти домішок (глина та ін.), %	$y_1 = 0,535x + 23,19$ $y_2 = 0,138x + 11,125$ $y_3 = 0,069x + 20,341$
7	Масова частка органічних речовин з врахуванням вологості, %	$y_1 = 0,07x + 44,93$ $y_2 = 0,137x + 43,163$ $y_3 = 2x + 19$
8	Втрати за випалювання (зв'язана вода, SO ₂ , CO ₂ , який утворюється за згорання палива) без врахування вмісту органічних речовин та CO ₂ , який міститься в карбонатах, %	$y_1 = 0,06x + 17,243$ $y_2 = 0,15x + 22,718$ $y_3 = 0,1x + 46,499$

де y_1 - двокомпонентні гранули на основі мулових відкладень та торфу;

y_2 - трьохкомпонентні гранули на основі мулових відкладень, торфу і гречаної лузги;

y_3 - трьохкомпонентні гранули на основі мулових відкладень, торфу та тирси фруктової.

Отримана зола може бути складовою комплексного складного добрива пролонгованої дії, завданням якого є: забезпечити рослину поживним комплексом мікроелементів, нейтралізувати надлишкову кислотність ґрунту, структурувати ґрунт, створити сприятливі умови для життєдіяльності мікроорганізмів, підвищити родючість ґрунту та посухостійкість рослин. це досягається завдяки певним складовим добрива:

- кальцій є одночасно розкислювачем для ґрунту і його структуроутворюючим елементом, приймає участь в гормональних процесах рослин, утворенні клітинних стінок, переміщенні вуглеводів та перетворенні азотистих речовин. Нестача кальцію відбивається на розвитку листя та кореневої системи рослин, викликає

фізіологічні хвороби (в першу чергу – коренеплодів);

- магній сприяє утворенню в листовій поверхні хлорофілу, впливає на формування вуглеводів та їх транспортування з листя до коріння, внаслідок чого формується потужна коренева система, зростає концентрація цукрів у точці росту, активізує процеси перетворення фосфору з мінеральних сполук в органічні;

- сірка впливає на ріст і розвиток стебел в товщину, що сприяє підвищенню морозостійкості рослин.

Регресійний аналіз експериментальних даних полягає в побудові кореляційних полів і в підборі відповідних типів регресійних рівнянь з розташування експериментальних точок на цих полях. Проведення трьох паралельних вимірювань значень вмісту певних хімічних сполук дозволяє отримати чисельні значення коефіцієнтів регресії для складних видів взаємозв'язку параметрів (табл. 4.13).

Отримані поліноми високих ступенів для вмісту карбонатів кальцій і магнію в зразках гранул показує швидко мінливість процесів їх отримання в тому випадку, якщо межі коливання параметрів цих процесів значні. Отже, вести процес згорання таким чином у виробничих умовах тривалий час неможливо [126]. Інші експериментальні дані хімічного складу мають лінійні ряди регресії, що показують вплив не тільки основних, але і численних другорядних (випадкових) чинників.

4.5. Висновки до четвертого розділу

1. Вперше проведено дослідження адсорбційних властивостей дво- та трьохкомпонентного композиту, які показали що під час зберігання композитних гранул рекомендуються підтримувати вологість повітря на рівні 60 -70 %.

2. Отримані рівноважні вологісті композитів не перевищують стандартну вологість для паливних гранул, що складає 20%, та становить 6-7 %.

3. Вперше визначено показник активності води для композитних гранул, діапазон значень яких становить 0,224-0,231. Показано, що тирса впливає на показник активності води – гранули мають більшу пористість, і відповідно краще вбирають вологу.

4. Отримано кореляційні коефіцієнти, які мають однакове значення для всіх видів композитних гранул.

5. Визначено, що умови проведення технологічного процесу отримання паливних гранул сприяє формуванню пористої структури, крихкої та придатної для адсорбції сполуки. Це впливає на умови зберігання гранул та їх обов'язковому дотриманню.

6. Вперше визначено питому теплоту згорання композитних гранул, яка перевищує торф у 1,2 рази.

7. Енергетичні показники гранул на основі мулових відкладень достатньо високі, тому їх можливо використовувати як альтернативне паливо в побуті та комунальній енергетиці.

8. Вперше досліджено процес горіння композитних гранул показав, що отримані результати можуть бути використанні при спалювання палива у різний спосіб: в факелі, у шарі та інш., або при створенні нових способів спалювання.

9. Швидкість горіння гранул значно нижча швидкості горіння вихідної біомаси, однак переважає швидкість горіння окремої частки мулових відкладень.

10. Проведені дослідження показали можливість знешкодження мулових відкладень та його утилізації в якості альтернативного палива, з використанням золи для виробництва цегли, цементу та інших будівельних матеріалів.

11. Визначено хімічний склад композитних паливних гранул, за якого встановлено, що додавання до складу гранул гречаної лузги спричинює збільшення вмісту в золі таких сполук, що містять іони кальцію й магнію та сульфату кальцію. Це ускладнює можливість постійного застосування гранул з лузгою гречки через сприяння утворення корозійної золи на робочих органах установки та прискореному зносу обладнання, що зумовлює їх використання періодично.

12. Регресійний аналіз хімічного складу паливних гранул отриманих експериментальних даних показує значний вплив параметрів технологічного процесу згорання гранул та короткотривалість процесу утворення карбонатів кальцію і магнію в золі.

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА КОПОЗИТНОГО ПАЛИВА НА ОСНОВІ ТОРФУ, ЗАСТАРІЛИХ МУЛОВИХ ВІДКЛАДЕНЬ ТА БІОМАСИ

5.1. Технологія отримання композитного палива на основі мулових відкладень, торфу та біомаси

Під час літературного аналізу, зазначеному в першому розділі, було виявлено, що на сьогоднішній в Україні та світі технології направлені на переробку активного мулу. У нашій країні у великих кількостях є застарілі мулові відкалення. Розробка нових технологій їх переробки вирішує екологічну проблему, яка постала в Україні на протязі останніх років.

На основі проведених досліджень, розроблено технологію отримання композитного палива на основі застарілих мулових відкладень, торфу та біомаси. Було визначено попередню підготовку матеріалу до гранулювання. Досліджено вплив способу гранулювання на якість отриманої продукції. Визначено теплофізичні характеристики отриманих гранул, які показали оптимальні умови зберігання для подальшого виробництва.

Створення такого композитного палива дозволить підвищити якість гранул, забезпечити сталий цілорічний цикл роботи підприємств та дозволить уникнути екологічної небезпеки для довкілля. Технологічна схема отримання композитного палива на основі застарілих мулових відкладень, торфу та органічної сировини представлена на рис. 5.1.

Для отримання двокомпонентних композитних гранул попередньо подрібнений та просіяний через сита фрезерний торф – 50%, подрібнені та просіяні мулові відкалення – 50 %, подаються у змішувач, де перемішуються до однорідного стану. Одержану однорідну суміш направляють на гранулювання, яке здійснюють за допомогою шнекового механічного пристрою, після чого паливні гранули транспортером завантажують в сушарку, в якій проводять сушіння конвективним способом за температури теплоносія 120°C до кінцевої вологості гранул 12 – 14%. Висушені гранули охолоджують до температури 20°C, після чого

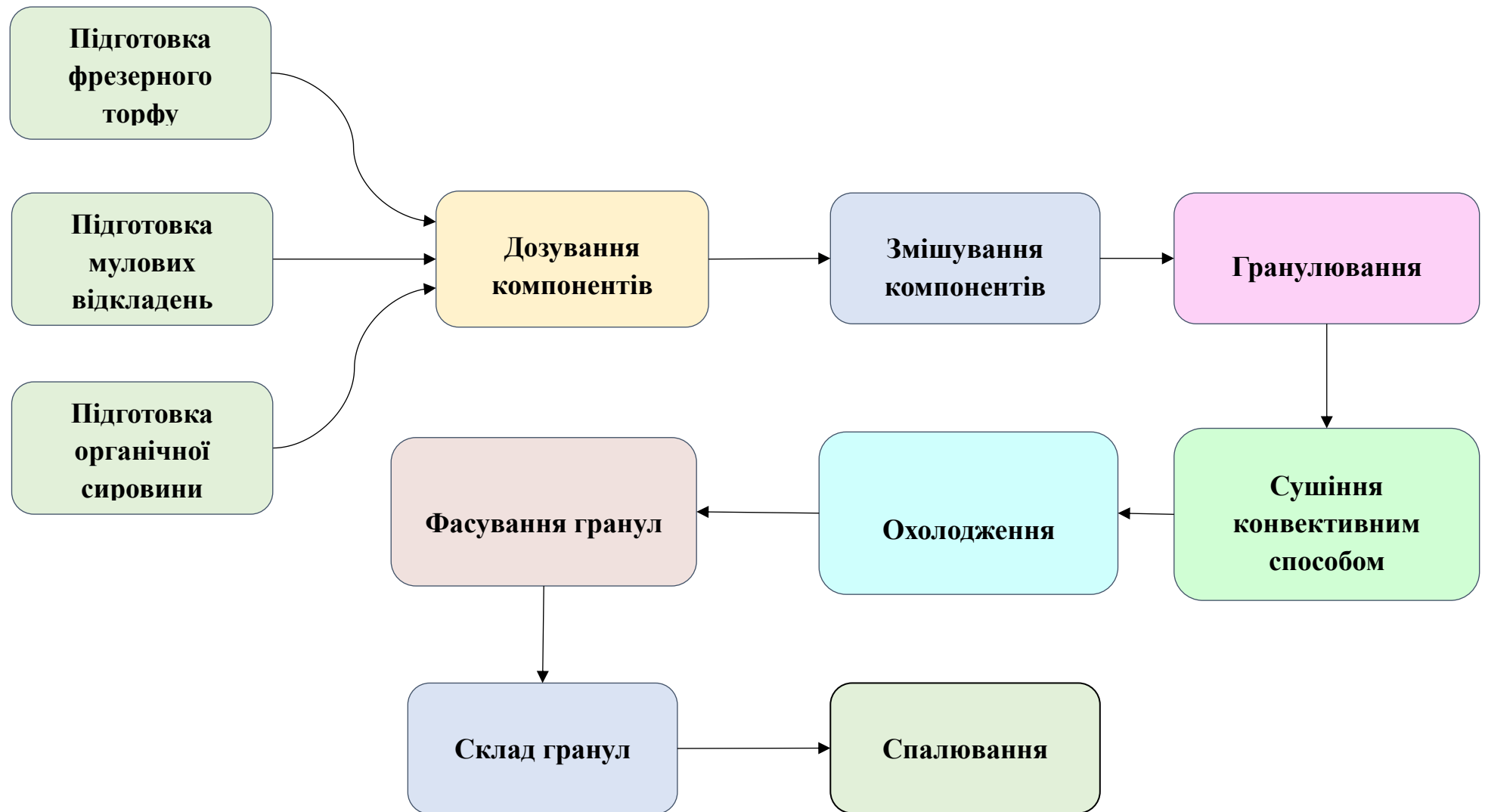


Рис. 5.1. Технологічна схема отримання композитного палива на основі застарілих мулових відкладень, торфу та органічної сировини

фасують у відповідну тару.

Отримання трьохкомпонентних композитних гранул проводиться, як і для двокомпонентних. Для отримання суміші використовують попередньо подрібнений та просіяний через сита фрезерний торф – 45%, подрібнені та просіяні мулові відкладення – 45 %, лузга гречки або тирса – 10 %, які перемішуються до однорідного стану та гранулюються за допомогою шнекового механічного пристрою, після чого гранули транспортером завантажують в сушарку. Висушені гранули охолоджують та фасують у відповідну тару.

Отримані дво- та трьохкомпонентні гранули направляють до складу гранул. Зі складу гранули подають на спалювання, після чого отриману золу складують на складі попелу. Отриману золу можна використовувати для виробництва цегли, цементу та інших будівельних матеріалів.

5.2. Розробка технологічної лінії виробництва композитного палива на основі мулових відкладень, торфу та біомаси

З метою реалізації способу виробництва композитних гранул на основі мулових відкладень, торфу та біомаси запропоновано лінію для виробництва (рис. 5.2). Лінія виробництва складається з технологічних ділянок: підготовки компонентів, дозування компонентів, змішування, гранулювання композиту дво- або трьохкомпонентного, сушіння і охолодження, фасування та подача на спалювання.

Однією з важливих ділянок технологічної лінії є підготовка основних компонентів гранул. В технології використовується фрезерний торф, який потрібно підготувати, тобто прибрати металеві домішки за допомогою магнітного уловлювача. Сепарування для вилучення деревних частинок, додаткове подрібнення.

Мулові відкладення надходять у приймальний бункер (1) для мулових відкладень, транспортером (4) надходять подрібнення молотковою дробаркою (5), після подрібнення транспортером (4) з магнітною пасткою (7) надходить на сита (6) для просіювання, після сит транспортером (4) подаються у бункер з дозатором

для попередньо оброблених мулових відкладень (8).

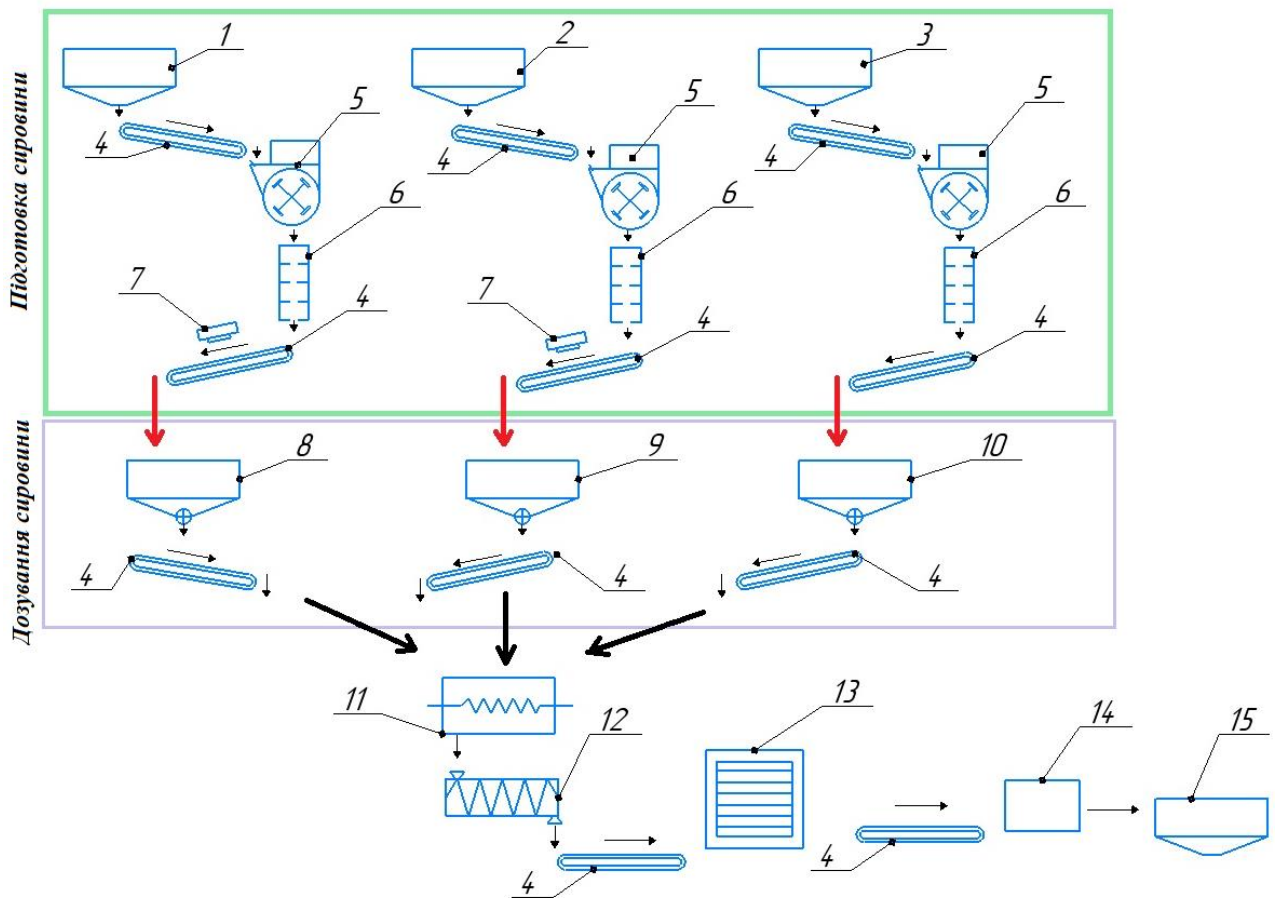


Рис. 5.2. Технологічна лінія отримання композитного палива на основі застарілих мулових відкладень, торфу та біомаси:

1 – бункер мулових відкладень; 2 – бункер фрезерного торфу; 3 – бункер біомаси; 4 – стрічковий транспортер; 5 – подрібнювач; 6 – сита; 7 – магнітний уловлювач; 8 – бункер з дозатором для попередньо оброблених мулових відкладень; 9 – бункер з дозатором для попередньо обробленого фрезерного торфу; 10 – бункер з дозатором для попередньо обробленої біомаси; 11 – перемішувач; 12 – шнековий механічний пристрій; 13 – сушарка; 14 – лінія для фасування та пакування композитних гранул; 15 – бункер готової продукції

Фрезерний торф надходить у приймальний бункер (2) для фрезерного торфу, транспортером (4) надходять подрібнення молотковою дробаркою (5), після подрібнення транспортером (4) з магнітною пасткою (7) надходить на сита (6) для просіювання, після сит транспортером (4) подаються у бункер з дозатором для по-

передньо обробленого фрезерного торфу (9).

Біомаса надходить у приймальний бункер (3) для біомаси, транспортером (4) надходять подрібнення молотковою дробаркою (5), після подрібнення транспортером (4) надходить на сита (6) для просіювання, після сит транспортером (4) подаються у бункер з дозатором для попередньо обробленої біомаси (10).

З бункерів з дозатором попередньо підготовленої сировини (8, 9, 10) відбирається маса мулових відкладень, фрезерного торфу, біомаси та транспортером (4) подається до перемішуючого пристрою (11) з якірною мішалкою, після перемішування до однорідного стану суміш гранулюється на шнековому механічному пристрої (12). Транспортером (4) отримані гранули подаються до конвективної сушарки (13). Після сушіння гранули охолоджуються та транспортером (4) подаються до лінії фасування та пакування композитних гранул (14). За паковані гранули подаються до бункера готової продукції (15).

Біомаса та торф у їх природному стані є відносно складними видами для енергетичного використання та потребують подальшого створення технологій переробки їх на паливо.

За рахунок пресування і гранулювання збільшується об'ємна теплота згоряння палива, стає однорідним за розміром частинок, можливе транспортування і тривале зберігання.

Використання композиту різних видів біомаси і торфу дозволяє розширити сировинну базу біопаливного виробництва, та орієнтуватися на дешеву доступну сировину.

На рис. 5.3 представлено гістограму зольності та вартості одиниці енергії різних видів палива грн/ГДж. Як видно найменша зольність у пелет з деревини, яка становить 1,5%, але вартість одиниці енергії таких пелет складає 370 грн/ГДж. Найменша вартість одиниці енергії у мулових відкладень та становить 40 грн/ГДж, але вони мають перевищену зольність 47,3%. Створені дво- та трьохкомпонентні гранули в складі мають мулові відкладення, торф та біомасу. Вартість одиниці енергії фрезерного торфу становить 170 грн/ГДж (зольність 14,1%), лузги гречки – 110 грн/ГДж (зольність 3,1%), тирси деревини – 100 грн/ГДж (зольність 1,6%).

Приблизно вартість одиниці енергії двокомпонентних гранул на основі мулових відкладень та торфу буде становити 100 грн/ГДж, це менше у 3,7 разів за пелети деревини.

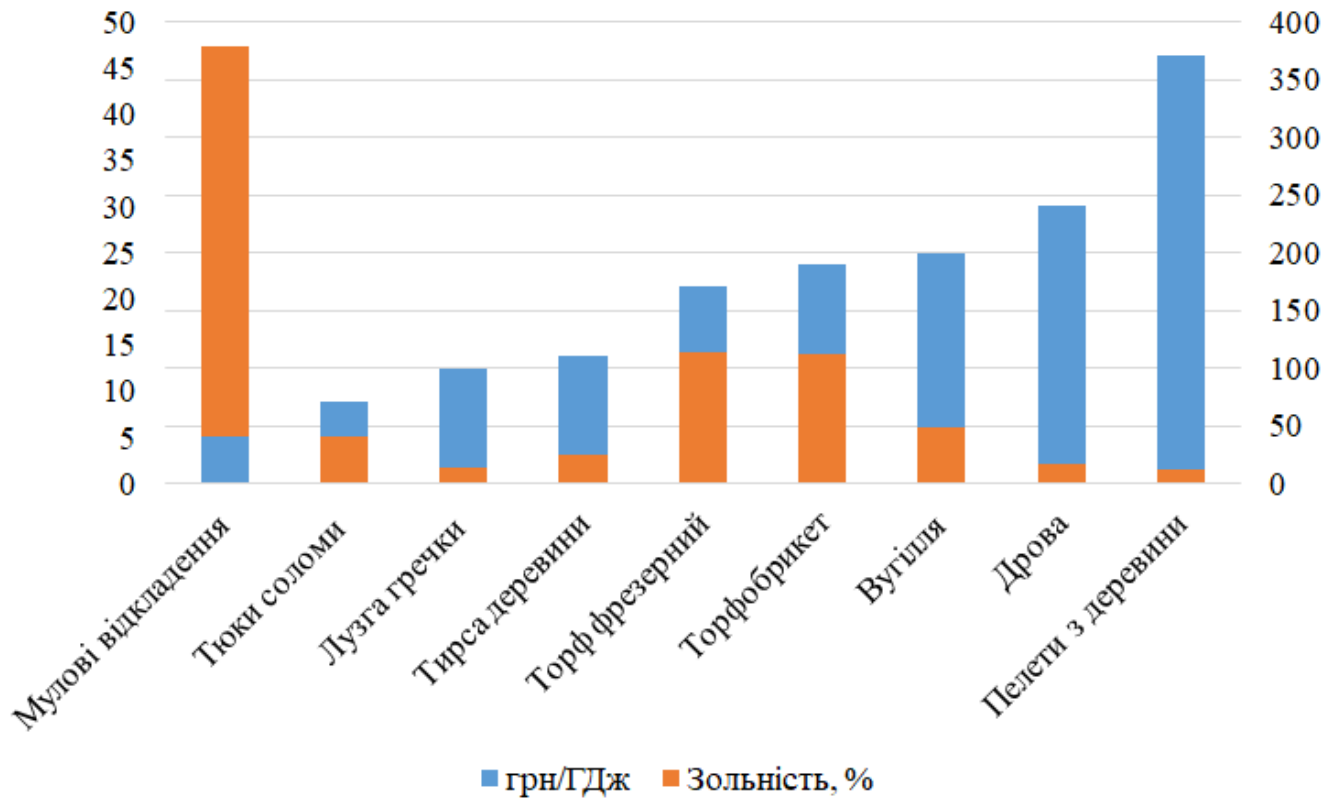


Рис. 5.3. Зольність і вартість одиниці енергії різних видів палива грн/ГДж

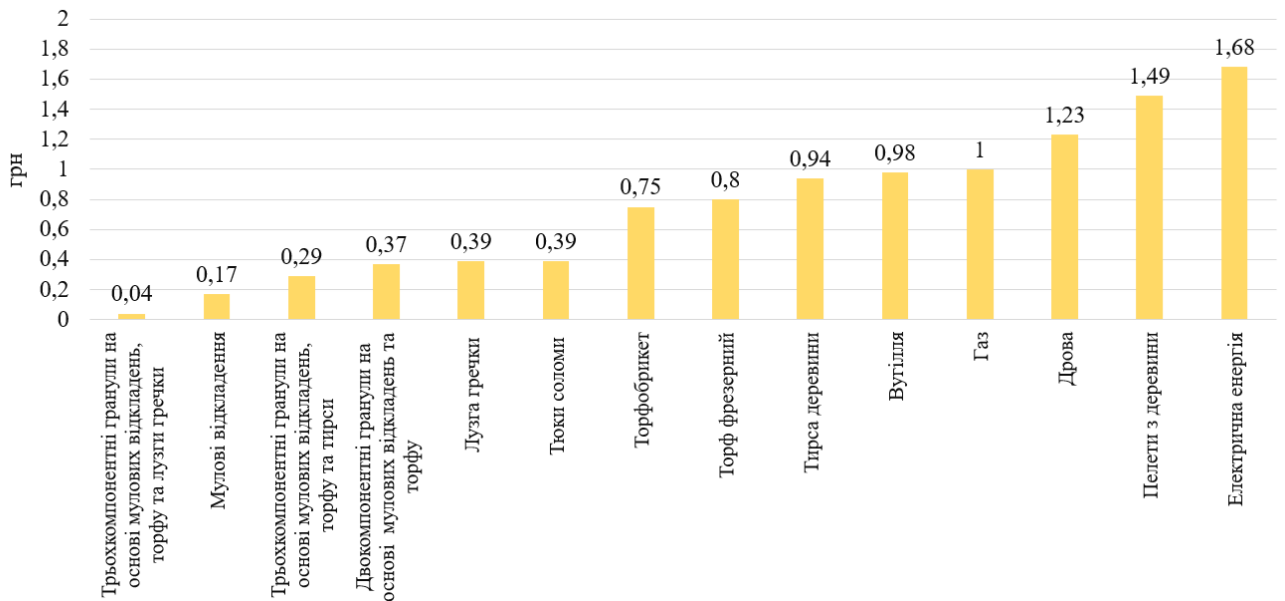


Рис. 5.4. Вартість отримання 1 кВт год теплоти при спалюванні в котлах

На рис. 5.4 гістограму вартості отримання 1 кВт год теплоти при спалюванні

в котлах. Як видно найвища вартість отримання 1 кВт год теплоти при спалюванні в котлах у електричної енергії і становить 1,68 грн та у пелет з деревини – 1,49 грн. У створених двокомпонентних гранул на основі мулових відкладень та торфу вартість отримання 1 кВт год теплоти складає 0,37 грн; у трьохкомпонентних гранул на основі мулових відкладень, торфу та тирси – 0,29 грн та у трьохкомпонентних гранул на основі мулових відкладень, торфу та лузги гречки – 0,04 грн.

5.3. Висновки до п'ятого розділу

1. Розроблено інноваційну теплотехнологію отримання переробки мулових відкладень, на яку подано патент України на винахід.

2. Розроблені композитні суміші у вигляді паливних гранул на основі застарілих мулових осадів, торфу та органічної сировини відповідають стандартам якісного палива.

3. За результатами проведених досліджень розроблено технологічну схему з підібраним обладнанням для отримання композитних гранул на основі мулових відкладень, торфу і біомаси.

Висновки

У дисертаційній роботі представлені результати дослідження переробки застарілих мулових відкладень та розробки теплотехнології з їх переробки на композитне паливо. Виконано огляд технологій з переробки мулових відкладень, проведено підготовку та створення композитних сумішей з мулових відкладень, торфу та біомаси з подальшим дослідженням їх сушіння та спалювання, що дало змогу отримати наступні результати:

1. Проведений огляд сучасних технологій очищення стічних вод та переробки мулу показує, що в світі немає технології переробки застарілих мулових відкладень, а в Україні ці технології наразі є недосконалими.
2. Визначені технічні властивості застарілих мулових відкладень виявили, велику кількість золи, яка потребує її зменшення для подальшого спалювання.
3. Підібрано оптимальне співвідношення компонентів композиту, з додаванням до мулових відкладень торфу та біомаси, яке підвищує якість та зменшує зольність.
4. Досліджено процес сушіння композитних гранул на основі застарілих мулових відкладень, торфу та біомаси при яких інтенсифікується процес порівняно з монокомпонентами.
5. Визначено та узагальнено кінетичні закономірності конвективного сушіння композитних гранул, з яких розраховані відносні та кінетичні коефіцієнти сушіння та отримані формули тривалості сушіння дво- та трьохкомпонентних гранул.
6. Проведено дослідження залежності числа Ребіндера від вологості матеріалу, що обґрунтовує ефективність вибраних режимів сушіння.
7. Виконане чисельне моделювання конвективного сушіння композитних гранул показало, що дана модель у цілому задовільно описує характер зміни у часі температури в центрі гранули і її вологості в процесі конвекційного сушіння.

8. Вперше визначені рівноважні вологості та оптимальні умови зберігання композитних гранул, що дозволяють не втрачати якісні показники цих гранул, як палива.
9. Вперше визначено питому теплоту згорання композитних гранул, яка перевищує торф у 1,2 рази, тому їх можливо використовувати як альтернативне паливо в побуті та комунальній енергетиці.
10. Вперше досліджено процес горіння композитних гранул який показав, що отримані результати можуть бути використанні при спалювання палива у різний спосіб: в факелі, у шарі та інш., або при створенні нових способів спалювання.
11. Проведені дослідження дали можливість знешкодження мулових відкладень та їх утилізації в якості альтернативного палива, з використанням золи для виробництва цегли, цементу та інших будівельних матеріалів.
12. Регресійний аналіз хімічного складу паливних гранул визначив значний вплив параметрів технологічного процесу згорання гранул та короткотривалість процесу утворення карбонатів кальцію і магнію в золі.
13. Розроблено інноваційну теплотехнологію отримання переробки застарілих мулових відкладень, на яку подано патент України на винахід.
14. Розроблені композитні суміші у вигляді паливних гранул на основі застарілих мулових осадів, торфу та органічної сировини відповідають стандартам якісного палива.
15. За результатами проведених досліджень розроблено технологічну схему з підібраним обладнанням для отримання композитних гранул на основі мулових відкладень, торфу і біомаси.

Список використаної літератури

1. Нездойминов, В. И., & Чернышева, А. В. (2010). Миграция ионов тяжелых металлов при использовании осадков городских сточных вод в качестве удобрения. *Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури*, 82 (2), 150 – 157.
2. Держспоживстандарт. (2017). *Осад стічних вод* (ДСТУ 8727:2017).
3. Снежкін, Ю. Ф., Петрова, Ж. О., Новікова, Ю. П., & Петров, А.І. (2022). Дослідження кінетики процесу сушіння композиційних гранул на конвективному сушильному стенді. *Збірник праць «Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики»* (С. 196 -203). Київ : ІВЦ АЛКОН НАН. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
4. *Державний водний кадастр за розділом: "Водокористування"*. (2020, 14 лютого). Державне агентство водних ресурсів України. <https://data.gov.ua/dataset/cadastre-water-use>
5. Міністерство з питань комунального господарства України. (2020). *Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання в Україні у 2019 році*.
6. Henze, M., Harremoës, P., Jansen, J. L. C., & Arvin, E. (2002). *Wastewater treatment. Biological and chemical processes* (3rd ed.). Berlin: Springer.
7. Forster, C. F., & Wase, D. A. John (1987). *Environmental biotechnology*. New York: Halsted Press.
8. Лихачев, Н.И., Ларин, И.И., Хаскин, С.А., Алферова, Л.А., Бердичевский, Д.А., Белостоцкий, М.Д. ... Самохина, В. Н. (Ред.). (1981). *Канализация населенных мест и промышленных предприятий* (2 изд.). Москва: Стройиздат.
9. Снежкін, Ю.Ф., Петрова, Ж.О., Пазюк, В.М., & Новікова, Ю.П. (2021). Стан технологій очищення стічних вод в Україні та світі. *Теплофізика та Теплоенергетика*, 43 (1), 5 -12.

10. Ahn, Y.H., & Choi, H.C. (2004). Municipal sludge management and disposal in South Korea: status and a new sustainable approach. *Water Science and Technology*, 50(9), 245–253.
11. Евилевич, А. З., & Евилевич, М. А. (1988). *Утилизация осадков сточных вод*. Ленинград: Стройиздат.
12. Пахненко, Е.П. (2015). *Осадки сточных вод и другие нетрадиционные органические удобрения: учебное пособие (3-е изд)*. Москва: Лаборатория знаний.
13. Ковальская, А.И. (2011). Обеспечение экологической безопасности утилизации иловых осадков. *Экология урбанизированных территорий*, 4, 70–72.
14. McClellan, K.R., & Halden, R.U. (2010). Pharmaceuticals and personal care products in archived U.S. biosolids from the 2001 EPA National Sewage Sludge Survey. *Water Research*, 44(2), 658–668.
15. Berbecea, A., Radulov, I., Sala, & F. Res. J. (2008). Agricultural use of sewage sludge pros and cons. *Agricult*, 40(2), 15–20.
16. Chang, A.C., & Page, A.L. (1995). *Developing human health-related chemical guidelines for reclaimed wastewater and sewage sludge applications in agriculture*. Geneva: World Health Organization.
17. Vesilind, P.A., & Spinoso, L. (2001). Part I: Sludge Production and Characterization. *Sludge into biosolids. Processing, disposal and utilization* (pp. 3-18). London: IWA Publishing.
18. Wang, J.Y., Stabnikova, O., Tay, S.T., Ivanov, V., & Tay, J. (2014). H. Biotechnology of intensive aerobic conversion of sewage sludge and food waste into fertilizer. *Water Science and Technology*, 49(10), 147–154.
19. Kelessidis, A., & Stasinakis, A. S. (2012). Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries. *Waste Management*, 32(6), 1186-1195. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.01.012>
20. Matsumiya, Y. (2014). *Green Energy Production from Municipal Sewage Sludge in Japan*. Japan Sewage Works Association.

21. Mininni, G., Blanch, A.R., Lucena, F. & Berselli, S. (2014). EU policy on sewage sludge utilization and perspectives on new approaches of sludge management. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(10), 7361–7374. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3132-0>
22. Zhen, G., Lu, X., Kato, H., Zhao, Y., & Li, Y.-Y. (2017). Overview of pretreatment strategies for enhancing sewage sludge disintegration and subsequent anaerobic digestion: Current advances, full-scale application and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 559–577. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.187>
23. Zhou, K., Barjenbruch, M., Kabbe, C., Inial, G., & Remy, C. (2017). Phosphorus recovery from municipal and fertilizer wastewater: China's potential and perspective. *Journal of Environmental Sciences*, 52, 151–159. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.04.010>
24. Kaletnik, H. M., & Honcharuk, T. V. (2016). Prospects of sewage water use in Vinnytsia to feed the field crops: domestic and foreign experience. *Balanced Natural Resources*, 6(3), 42–47.
25. Du, H., & Li, F. (2017). Characteristics of dissolved organic matter formed in aerobic and anaerobic digestion of excess activated sludge. *Chemosphere*, 168, 1022–1031.
26. Региональное Энергетическое Партнерство. (2005). *Европейская практика обращения с отходами: проблемы, решения, перспективы*. Санкт-Петербург.
27. Паёнк, Т. (2003). Законодательство Европейского Союза в области утилизации осадков. *Водоснабжение и санитарная техника*, 1, 37 – 41.
28. Свірідова, В.А., & Медведєва, О.В. (2013). Основні проблеми утилізації осадів стічних вод. *Наукові записки*, 14, 101 – 105.
29. Kalogo, Y., & Monteith, H. (2012). *Energy and Resource Recovery from Sludge*. IWA Publishing.
30. Tyagi, V. K., & Lo, S.-L. (2013). Sludge: A waste or renewable source for energy and resources recovery? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 708–728. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.029>

31. Yang, G., Zhang, G., & Wang, H. (2015). Current state of sludge production, management, treatment and disposal in China. *Water Research*, 78, 60–73. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.04.002>
32. Chen, H., Yan, S.-H., Ye, Z.-L., Meng, H.-J., & Zhu, Y.-G. (2012). Utilization of urban sewage sludge: Chinese perspectives. *Environmental Science and Pollution Research*, 19(5), 1454–1463. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-0706-0>
33. Paya, J., Monzo, J., Borrachero, M. V., & Soriano, L. (2018). Sewage sludge ash. *New trends in Eco-Efficient and Recycled Concrete*, 121–152. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102480-5.00005-1>
34. Пашутина, Е.Н., & Давыдов, С.И. (2010). Некоторые вопросы утилизации осадков сточных вод города Луганска. *Науковий вісник Луганського НАУ, Серія Біологічні науки*, №19, 84-87.
35. Благоразумова, А.М. (2014). *Обработка и обезвоживание осадков городских сточных вод* (2-е изд., испр. и доп.). Санкт-Петербург: Издательство «Лань».
36. Сучкова, Н. Г. (2007). Анализ состояния проблемы рекультивации иловых площадок очистных сооружений городов и перспективы для Харьковского региона. Збірник доповідей Міжнародного конгресу «ЕТЕВК-2007» – Екологія, технологія, економіка водопостачання та каналізації (с. 279–284). Київ: НДКТУУМГ.
37. Хисамеева, Л.Р., Селюгин, А.С., Абитов, Р.Н., Бусарев, А.В., & Урмитова, Н.С. (2016). *Обработка осадков городских сточных вод: учебное пособие*. Казань: Казанский государственный архитектурный строительный институт.
38. Яковлев, С.В., Карелин, Я.А., Жуков, А.И., & Колобанов, С.К. (1975). *Канализация* (5 изд., перер. и доп.). Москва: Стройиздат.
39. Яковлев, С.В., & Воронов, Ю.В. (2004). *Водоотведение и очистка сточных вод*. Москва: Ассоциации строительных вузов.
40. Жуков, Н.Н. (2002). Состояние и перспективы развития сооружений по обработке водопроводных и канализационных осадков в городах России. *Водоснабжение и санитарная техника*, 12(1), 3—6.

41. Новикова, О.К. (2015). *Обработка осадков сточных вод: учебно-методическое пособие*. Гомель: БелГУТ.
42. *Прайс фірми TSK (Японія), електроний каталог*. (б.д.). TSK ENGINEERING CO., LTD. <http://www.tsk.co.th/en/service.php>
43. Исаева, А.М. (2013). *Обработка и утилизация осадков сточных вод: учебное пособие* (2Не изд., перераб. и доп). Пенза: ПГУАС.
44. Терещук, А.И., & Стецюк, А.В. (1976). *Сушка осадков сточных вод в сушилке с псевдооживленным слоем*. Львів: Вища школа.
45. Luuft, Y, Tuuli, O. ... Naumenko, L. (Eds.). (2012). *Sewage Sludge Treatment: Good Practices and Practical Tips*. Turku, Finland: Project on Urban Reduction of Eutrophication.
46. Карманов, А.П., & Полина, И.Н. (2015). *Технология очистки сточных вод: учебное пособие*. Сыктывкар: СЛИ
47. Благоразумова, А.М. (2010). *Обработка и обезвоживание осадков городских сточных вод: учебное пособие, часть 1*. Новокузнецк: Сиб-ГИУ.
48. Лобанов, Ф.И. (2018, апрель). *Мини ТЭЦ на модифицированном биошламе коммунальных очистных сооружений*. <http://www.infobio.ru/sites>.
49. Maurin, E., Plekhanov, A. V., & Lobanov F. I. (2017). Thermal treatment – a promising trend in wastewater sludge utilization. *Water supply and sanitary technique*, 6. 1 – 5.
50. Donatello, S., & Cheeseman, C. R. (2013). Recycling and recovery routes for incinerated sewage sludge ash (ISSA): A review. *Waste Management*, 33(11), 2328–2340.
51. Kopp, M., Kahlke, J., & Schulte, W. (1995). Mitverbrennung von Klarschlammen in Kohleversorgungsanlagen. *All gemeins. Part*, 119 (14), 297 – 299.
52. Bridgwater, A.V. (2003). Renewable fuels and chemical by thermal processing of biomass. *Chemical Engineering Journal*, 91, 87–102.
53. Sadaka, S. (2014). Pyrolysis. *Center for Sustainable Environmental Technologies*. Nevada: Iowa State University, 1521, 1–29.

54. Blagojevic, V. & Šušteršič, V. & Bozickovic, S. (2017). Pyrolysis and gasification in the process of sewage sludge treatment. *Zastita materijala*, 58 (3), 305-312. <https://doi.org/10.5937/ZasMat1703305B>.
55. Kosanić, T. (2015). *Uticao procesnih parametara na pirolizu drvne biomase* [Неопубл. doktorska disertacija]. Univerzitet U Novom Sadu, Novi Sad.
56. Ilić, M. (2003). *Energetski potencijal i karakteristike ostataka biomase i tehnologije za njenu pripremu i energetsko iskorišćenje u Srbiji, Studija* (Ev. broj projekta NP EE611–113A). Ministarstvo za nauku, tehnologije i razvoj Republike Srbije, Beograd.
57. *Каталог фірми BIOsmartex.* (б. д.). BIOsmartex. https://biosmartex.com/products_category/linii-briketuvannya
58. Ключ, В.П., Четверик, Г.О., & Маслюкова, З.В. (2018). Технології переробки осадів стічних вод каналізаційних очисних споруд. *Відновлювальна енергетика*, 1, 78-84.
59. Кретович, А. П. (2009). *Технические методы и средства подготовки полигонов депонирования иловых осадков для приготовления топливных брикетов* [Неопубл. автореф. диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук]. Северо-Западный государственный заочный технический университет, Санкт-Петербург.
60. Петрова, Ж.О., & Новікова, Ю.П. (2021, Березень 17). Підготовка сировини, створення композицій та гранулоутворення з застарілих мулових відкладень, торфу та біомаси. *Кераміка: наука і життя*, 1(50), 14-18. <https://doi.org/10.26909/csl.1.2021.2>
61. Petrova, Z., Sniezhkin, Y., Paziuk, V., Novikova, Y., Petrov, A. (2021). Investigation of the Kinetics of the Drying Process of Composite Pellets on a Convective Drying Stand. *Journal of Ecological Engineering*, 22(6), 159-166. <https://doi.org/10.12911/22998993/137676>
62. Держспоживстандарт. (1996). *Перетворювані термоелектричні. Загальні технічні умови* (ДСТУ 2857-94).

63. Петрова, Ж.О., & Снежкін, Ю.Ф. (2018). *Енергоєфективні теплотехнології переробки функціональної сировини*. Київ: Наукова думка.
64. Петрова, Ж.О., Самойленко, К.М., Новікова, Ю.П., & Вишнівська, Т.А. (2021, Червень 25). Адсорбція застарілих мулових відкладень, торфу, тирси та композицій з них. *Кераміка: наука і життя*, (2(51), 13-18. <https://doi.org/10.26909/csl.2.2021.2>.
65. Петрова, Ж.О., Самойленко, К.М., Новікова, Ю.П., & Вишнівська, Т.А. (2021). Адсорбція застарілих мулових відкладень, торфу, лузги гречки та композицій з них. *Теплофізика та Теплоенергетика*, 43(4), 92-97. <https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2021.11>
66. Buera, P., & Charle, G. (1994). Water activity, glass transition and microbial stability in concentrated/cemimoist food system. *Journal of food science*, 59, 921–927.
67. Чоманов, У.Ч. (1990). *Разработка термодинамических методов и средств анализа связи влаги в пищевых продуктах* [Неопубл. докторская диссертация]. Московский технологический институт мясной и молочной промышленности, Москва.
68. Ляйстнер, Л., & Гоулд, Г. (2006). *Барьерные технологии: комбинированные методы обработки, обеспечивающие стабильность, безопасность и качество продуктов питания*. Москва: ВНИИМП.
69. *Foodstuffs - Determination of water activity (ISO 18787:2017)*. (2017).
70. Баранов, Б.А. (2000). *Теоретические и прикладные аспекты показателя «активность воды» в технологии продуктов питания* [Неопубл. докторская диссертация]. Российская экономическая академия им. Г.В. Плеханова, Санкт-Петербург.
71. Scott, W.J. (1957). Water relations of food spoilage microorganisms. *Advances in Food Research*, 7, 83-127.
72. Rodel, W. (2001). Water activity and its measurement in food. In Kress-Rogers, E. & Brimelow, C.J.B. (Eds.), *Instrumentation and Sensors for the Food Industry* (2nd edition) (pp. 453-483). Cambridge: Wood head.

73. Д'яконов, В.І., Дьяконов, О.В., Скрипник, О.С., & Нікітченко, О.Ю. (2016). Вплив вологості деревних відходів на фізико-механічні властивості біокомпозиції. *Комунальне господарство міст*, 128, 53-57.
74. Воробйов Л.Й. (2018). *Науково-практичні засади кондуктивної калориметрії* [Неопубл. Докторська дисертація]. Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ.
75. Воробьев, Л.И., Декуша, Л.В., Назаренко, О.А., & Грищенко, Т.Г. (2016). Усовершенствование методов измерения в бомбовых калориметрах теплового потока. *Наукові праці X Міжнародної науково-технічної конференції «Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія – 2016)»* (с. 138). Харків.
76. Воробйов, Л.Й., Декуша, Л.В., Назаренко, О.О., & Сергієнко, Р.В. (2016). Контроль палива за теплою згоряння з використанням бомбового квазидиференціального калориметру теплового потоку. *Збірник доповідей 8-ї Національної науково-технічної конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика – UkrNDT-2016»* (с. 89 – 94). Київ: УТ НКТД.
77. Воробьев, Л.И., Грабов, Л.Н., Декуша, Л.В., Назаренко, О.А., & Шматок, А.И. (2011). Определение теплотворной способности биотопливных смесей. *Промышленная теплотехника*, 33 (4), 87–93.
78. Держспоживстандарт. (2008). *Палива тверді мінеральні. Визначення найвищої теплоти згоряння методом спалювання в калориметричній бомбі та обчислення найнижчої теплоти згоряння* (ДСТУ ISO 1928:2006 (ISO 1928:1995, IDT)).
79. *Solid biofuels — Determination of calorific value* (ISO 18125:2017). (2017).
80. Скляр, М.Г., & Тютюнников, Ю.Б.(1985). *Химия твердых горючих ископаемых: лабораторный практикум* (2-изд.перераб. и доп.). Київ: Вища школа.
81. Белосельский, Б.С., & Соляков, В.К. (1980). *Энергетическое топливо*. Москва:Энергия.
82. Держспоживстандарт. (1997). *Камінь вапняковий для цукрової промисловості* (ДСТУ 1451:1996).

83. Petrova, Zh.O., Kremnov, V.O., Korbut. N.S., & Novikova, Yu.P. (2020). Granulation of mixtures of obsolete sludge and peat. *Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв : збірник тез доповідей XVIII міжнародної наукової конференції* (с. 14 –16). Одеса: ОНАХТ.
84. Petrova, Zh., Pazyuk, V., Novikova, Yu., & Stetsyuk, V. (2020). Granulation of compositions from obsolete sludge and peat. *Проблеми сучасної теплоенергетики : збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної конференції* (с. 109 – 111). Київ: НУБіП.
85. Петрова, Ж.О., & Новікова, Ю.П. (2020). Гранулювання композицій з застарілих мулових осадів та торфу (с. 54 – 55). *Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання : збірник тез доповідей XIX міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених*. Київ: «КПІ ім. Ігоря Сікорського».
86. Petrova, Zh., Novikova, Yu., & Petrov, A. (2021). Processing of granules based on peat and sludge. *Materials of the 3rd International Scientific Conference «Chemical Technology and Engineering»* (pp. 196-197). Lviv: Lviv Polytechnic National University. <https://doi.org/10.23939/cte2021.01.196>.
87. Новікова, Ю.П., & Петрова, Ж.О. (2020). Формування гранул з застарілих мулових осадів та торфу (с. 378 – 379). *Збірник тез доповідей IV Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Перспективи Розвитку Територій: Теорія і Практика»*. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова.
88. Петрова, Ж.О., & Новікова, Ю.П. (2021). Гранулювання трикомпонентних композицій із застарілих мулових осадів, торфу та біомаси. *Матеріали XXII Міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті»* (с. 893 – 896). Київ: Інтерсервіс.
89. Petrova, Zh., Novikova, Y., & Petrov, A. (2021). Technological research of biogranules on the basis of peat and sludge. *Збірник тез доповідей XX міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і*

- молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання" (с.19 – 21). Київ: «КПІ ім. Ігоря Сікорського».
90. Новікова, Ю.П., & Петров, А.І. (2021). Енергоефективне сушіння торф'яних гранул. *Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики: матеріали ХІХ Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених* (с. 86 – 87). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського.
 91. Petrova, Zh., & Novikova, Yu. (2021). Processing of obsolete sludge. *6-й Міжнародний молодіжний конгрес "Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування": збірник матеріалів* (с. 168). Львів: Західно-Український Консалтинг Центр. DOI: 10.23939/book.ecocongress.2021.
 92. Снежкін, Ю.Ф., Петрова, Ж.О., Новікова, Ю.П., & Петров, А.І. (2021). Шляхи утилізації застарілих мулових відкладень на паливо. *Збірник ІІ міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Ресурси. Енергія»* (с. 59-60). Київ.
 93. Novikova, Yu., & Petrov, A. (2021). Investigation of kinetics of drying of biogranules on the basis of peat, sludge and biomass. *Збірник тез доповідей ХХІ міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання"* (с. 77-79). Київ: «КПІ ім. Ігоря Сікорського».
 94. Petrova, Zh., Novikova, Yu., & Petrov A. (2021). Investigation of the kinetics of the drying process in different formation of peat- sludge granules. *Збірник тез доповідей VIII Міжнародна наукова конференція «Інноваційні енерготехнології»* (с. 22 – 23). Одеса: ОНАХТ.
 95. Novikova, Yu., & Petrov, A. (2021). Investigation of the influence of temperature on the drying kinetics of composite biogranules. *Збірник тез доповідей ХХІХ всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Обладнання хімічних виробництві підприємств будівельних матеріалів"* (с. 20-23). Київ: «КПІ ім. Ігоря Сікорського».
 96. Красников, В.В. (1973). *Кондуктивная сушка*. Москва: Энергия.

97. Снежкін, Ю.Ф., Пазюк, В.М., Петрова, Ж.О., & Чалаєв, Д.М. (2012). *Теплонасосна зерносушарка для насінневого зерна*. Київ: ТОВ «ПоліграфСервіс».
98. Снежкін, Ю.Ф., & Петрова, Ж.О. (2018). *Енергоефективні теплотехнології переробки функціональної сировини*: монографія. Київ: Наукова думка.
99. Филоненко, Г. К., & Лебедев, П. Д. (1952). *Сушильные установки*. Москва: Госэнергоиздат.
100. Михайлов, Ю.А. (1967). *Сушка перегретым паром*. Москва: Энергия.
101. Гухман, А. А. (1963). *Введение в теорию подобия*. Москва: Высшая школа.
102. Гухман, А. А. (1967). *Применение теории подобия к исследованию процессов тепло-массообмена*. Москва: Высшая школа.
103. Снежкин, Ю.Ф., & Коринчук, Д.Н. (2017). Моделирование высокотемпературной сушки торфа и биомассы в технологиях производства биотоплив. *Scientific Works*, 81 (1), 125-130.
104. Van Belleghem, M. (2013). *Modelling coupled heat and moisture transfer between air and porous materials for building applications*. Ghent University. Faculty of Engineering and Architecture, Ghent, Belgium.
105. Исаченко, В.П., Осипова, В.А., & Сукомел, А.С. (1981). *Теплопередача*. Москва: Энергоиздат.
106. Gregg, S.J., & Sing, K.S.W. (1982). *Adsorption, Surface Area and Porosity* (2nd Edition). London: Academic Press.
107. Снежкин, Ю.Ф., Боряк, Л.А., & Хавин, А.А. (2004). *Энергосберегающие теплотехнологии производства пищевых порошков из вторичных сырьевых ресурсов*: монографія. Київ: Наукова думка.
108. Кельцев, Н.В. (1984). *Основы адсорбционной техники* (2е изд., перераб. и доп). Москва: Химия.
109. Воробьев, Л. И., Грабов, Л. Н., Декуша, Л. В., Назаренко, О. А., & Шматок, А. И. (2011). Определение теплотворной способности биотопливных смесей. *Промышленная теплотехника*, 33 (4), 87–93.

110. Воробйов, Л.Й., Грабов, Л.М., Декуша, Л.В., Назаренко, О.О., & Шматок, О. І. (2011). Теплота згоряння біопалив та біопаливних сумішей. *Енергетика та електрифікація*, 7, 54–59.
111. Бутова, З. А., & Воробйов, Л. Й. (2016). Калориметричний аналіз твердого та рідкого біопалива. *Наукові труди Sword*, 1 (41), 2, 38–42.
112. Бутова, З. А., Воробйов, Л. Й., & Назаренко, О. О. (2016). Підвищення точності вимірювань теплоти згоряння палива. *Наукові труди Sword*, 3 (44), 1, 93–97.
113. Роман, Т. О., Іванченко, М.Г., Коломієць, Д.П., Мазуренко, О. Г., Долгоненко, І. В., Соя, Г.Р., Сидоренко, О.Г., Воробйов, Л. Й. (2016). Харчова цінність та результати визначення енергетичної цінності гриба шампінйона. *Харчова промисловість*, 19, 79–86.
114. Снежкін, Ю. Ф., Корінчук, Д. М., Воробйов, Л. Й., & Хавін, О. О. (2006). Розробка енергоефективного палива на торф'яній основі. *Промышленная теплотехника*, 28 (2), 41–45.
115. Чмель, В.М., & Новікова, І.П. (2006). Дослідження паливних характеристик відходів біомаси. *Відновлювана енергетика*, 4(7), 107 – 113.
116. Зельдович, Я.Б. (1949). К теории горения не перемешанных газов. *Журнал технической физики*, 5 (10), 260 – 272.
117. Гаусорн, В., Уидуел, Д., & Хоттел, Г. (1953). Смешение и горение в турбулентных газовых струях. В кн.: «Вопросы горения», Т.1 (с. 146-193). Москва: Издательство иностранной литературы.
118. Чмель, В.М., & Новікова, І.П. (2007). Брикетування біомаси. *Відновлювана енергетика*, 4(8). 98 – 103.
119. Koppejan, J., & Van Loo, S. (Eds.). (2007). The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781849773041>
120. Pastre, O. (2002). Analysis of the technical obstacles related to the production and utilisation of fuel pellets made from agricultural residues. *Eubia. Saatavilla*: <http://www.pelletcentre.info/resources/1093.pdf> [viitattu 9.11. 2009].
121. *Solid biofuels - Method for the determination of ash melting behaviour - Part 1: Characteristic temperatures method* (TS CEN/TS 15370-1:2006). (2006).

122. Standard Test Method for Fusibility of Coal and Coke Ash (ASTM D1857/D1857M). (2018).
123. Obernberger, I. (1997). *Nutzung fester Biomasse in Verbrennungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Verhaltens aschebildender Elemente*. (Thermische Biomassenutzung). dbv - Verlag der Technischen Universität Graz.
124. Miles, T. R., Miles Jr., T. R., Baxter, L. L., Bryers, R. W., Jenkins, B. M. & Oden, L. L. (1996). *Alkali Deposits Found in Biomass Power Plants: A Preliminary Investigation of Their Extent and Nature* (Volume 1, SAND96-8225 Volume 2, NRE1 TP-443-8142). Oakridge, USA: National Renewable Energy Laboratory.
125. Spiegel, M. (Mai, 2004). Salzschnmelzkorrosion an Uberhitzern und Verdampfern. In: Tagungsband zum VDI-Seminar 430504: "Belage und Korrosion in GroBfeuerungsanlagen", VDI Wissensforum (ed.). Dusseldorf, Germany.
126. *Формула регресії. Обчислення коефіцієнтів рівняння регресії.* (б. д.). Remontantenn. <https://remontantenn.ru/uk/technique/formula-regressii-vychislenie-koefficientov-uravneniya-regressii/>

Список опублікованих праць за темою дисертації***Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:***

1. Петрова, Ж.О., & Новікова, Ю.П. (2021, Березень 17). Підготовка сировини, створення композицій та гранулоутворення з застарілих мулових відкладень, торфу та біомаси. *Кераміка: наука і життя*, 1(50), 14-18. <https://doi.org/10.26909/csl.1.2021.2> [Google Scholar] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
2. Petrova, Z., Sniezhkin, Y., Paziuk, V., Novikova, Y., & Petrov, A. (2021). Investigation of the Kinetics of the Drying Process of Composite Pellets on a Convective Drying Stand. *Journal of Ecological Engineering*, 22(6), 159-166. <https://doi.org/10.12911/22998993/137676> [Іноземне видання наукометричної бази SCOPUS, Q3] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних)
3. Снежкін, Ю.Ф., Петрова, Ж.О., Пазюк, В.М., & Новікова, Ю.П. (2021). Стан технологій очищення стічних вод в Україні та світі. *Теплофізика та Теплоенергетика*, 43(1), 5-12. <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2021.1> [Фахове видання, Index Copernicus] (Внесок здобувача: проведення літературного огляду)
4. Петрова, Ж.О., Самойленко, К.М., Новікова, Ю.П., & Вишнівська, Т.А. (2021, Червень 25). Адсорбція застарілих мулових відкладень, торфу, тирси та композицій з них. *Кераміка: наука і життя*, 2(51), 13-18. <https://doi.org/10.26909/csl.2.2021.2> [Google Scholar] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
5. Петрова, Ж.О., Самойленко, К.М., Новікова, Ю.П., & Вишнівська, Т.А. (2021). Адсорбція застарілих мулових відкладень, торфу, лузги гречки та композицій з них. *Теплофізика та Теплоенергетика*, 43(4), 92-97. <https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2021.11> [Фахове видання, Index Copernicus] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

6. Снежкін, Ю.Ф., Петрова, Ж.О., Новікова, Ю.П., & Петров, А.І. (2021). Шляхи утилізації застарілих мулових відкладень на паливо. *Екологічна безпека та природокористування*, 40(4), 21–31. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.4.21-31> [*Index Copernicus, Google Scholar*] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

7. Петрова, Ж.О., Кузнєцова, І.В., Миринін, А.І., & Новікова, Ю.П. (2022). Дослідження показника активності води для мулоторф'яних гранул. *Теплофізика та Теплоенергетика*, 44(1), 14-19. <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2022.2> [*Фахове видання, Index Copernicus*] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

8. Novikova, Yu., Petrova, Zh., Vorobiov, L., Chme,l V., Skliarenko, Ye., & Novikova, I. (2022). Investigation of the combustion process of the developed composite granules. *Paliva*, 14 (3), 124-130. <https://doi.org/10.35933/paliva.2022.03.03> [*Іноземне видання наукометричної бази SCOPUS, Q4*] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

9. Petrova, Zh.O., Kremnov, V.O., Korbut, N.S., & Novikova, Yu.P. (2020). Granulation of mixtures of obsolete sludge and peat. *Збірник тез доповідей XVIII Міжнародної наукової конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв»* (с. 14–16). Одеса: ОНАХТ. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

10. Новікова, Ю.П., & Петрова, Ж.О. (2020). Формування гранул з застарілих мулових осадів та торфу. *Збірник тез доповідей IV Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Перспективи Розвитку Територій: Теорія і Практика»* (с. 378-379). Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

11. Петрова, Ж.О., & Новікова, Ю.П. (2020). Гранулювання композицій з

застарілих мулових осадів та торфу. *Збірник тез доповідей XIX міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання"* (с. 54 – 55). Київ: «КПІ ім. Ігоря Сікорського». (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

12. Petrova, Zh., Pazyuk, V., Novikova, Yu., & Stetsyuk, V. (2020). Granulation of compositions from obsolete sludge and peat. *Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми Сучасної Теплоенергетики»* (с. 109–111). Київ: НУБіП. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

13. Petrova, Zh., & Novikova, Yu. (2021). Processing of obsolete sludge. *6-й Міжнародний молодіжний конгрес "Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування"*: збірник матеріалів (с. 168). Львів: Західно-Український Консалтинг Центр. DOI: 10.23939/book.ecocongress.2021. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

14. Petrova, Zh., Novikova, Y., & Petrov, A. (2021). Technological research of biogranules on the basis of peat and sludge. *Збірник тез доповідей XX міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання"* (с.19 – 21). Київ.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського». (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

15. Новікова, Ю.П., & Петров, А.І. (2021). Енергоефективне сушіння торф'яних гранул. *Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики: матеріали XIX Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених* (с. 86 – 87). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

16. Петрова, Ж.О., & Новікова, Ю.П. (2021). Гранулювання трикомпонентних композицій із застарілих мулових осадів, торфу та біомаси.

Матеріали XXII Міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (с. 893 – 896). Київ: Інтерсервіс. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

17. Petrova, Zh., Novikova, Yu., & Petrov, A. (2021). Processing of granules based on peat and sludge. *Materials of the 3rd International Scientific Conference «Chemical Technology and Engineering»* (p. 196-197). Lviv: Lviv Polytechnic National University. <https://doi.org/10.23939/cte2021.01.196> (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

18. Petrova, Zh., Novikova, Yu., & Petrov A. (2021). Investigation of the kinetics of the drying process in different formation of peat- sludge granules. *Збірник тез доповідей VIII Міжнародна наукова конференція «Інноваційні енерготехнології»* (с. 22 – 23). Одеса: ОНАХТ. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

19. Новікова, Ю.П. (2021). Дослідження показника активності води двокомпонентних гранул на основі мулових відкладень та торфу. *Матеріали XII Міжнародної онлайн-конференції: Проблеми теплофізики та теплоенергетики* (с. 53 – 54). Київ : Симоненко О. І.. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

20. Снежкін, Ю.Ф., Петрова, Ж.О., Новікова, Ю.П., & Петров, А.І. (2021). Шляхи утилізації застарілих мулових відкладень на паливо. *Збірник II міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Ресурси. Енергія»* (с. 59-60). Київ. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

21. Novikova, Yu., & Petrov, A. (2021). Investigation of kinetics of drying of biogranules on the basis of peat, sludge and biomass. *Збірник тез доповідей XXI міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання"* (с. 77-79). Київ: «КПІ ім. Ігоря Сікорського». (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

22. Novikova, Yu., & Petrov, A. (2021). Investigation of the influence of temperature on the drying kinetics of composite biogranules. *Збірник тез доповідей XXIX всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Обладнання хімічних виробництві підприємств будівельних матеріалів"* (с. 20-23). Київ: «КПІ ім. Ігоря Сікорського». (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

23. Novikova, Yu., & Petrov, A. (2022). Research of kinetics of drying of biogranules at the experimental-industrial installation. *Збірник тез доповідей XXII міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання"* (с. 22-24). Київ: «КПІ ім. Ігоря Сікорського». (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

24. Петрова, Ж. О., Самойленко, К. М., Новікова, Ю. П., & Вишнівська, Т. А. (2022). Адсорбція композицій та гранул на основі мулових відкладень та торфу. *Матеріали XXIII Міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті»* (с. 275-277). Київ: Інтерсервіс. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

25. Чмель, В.М., Новікова, І.П., & Новікова, Ю. П. (2022). Технічний аналіз застарілих мулових відкладень. *Матеріали XXIII Міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті»* (с. 277-279). Київ: Інтерсервіс. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

26. Петрова, Ж., Новікова, Ю., & Петров, А. (2022). Дослідження кінетики сушіння термолабільної композиційної суміші. *Збірник тез доповідей XXIII міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенерго-зберігаючі технології та обладнання"*, (с. 187 – 189). Київ: «КПІ ім. Ігоря Сікорського». (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

Наукові праці, що додатково відображають наукові результати дисертації:

27. Снежкін, Ю. Ф., Петрова, Ж. О., & Новікова, Ю. П. (2022). Способи переробки мулових відкладень. *Збірник праць «Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики»* (С. 192 -195). Київ : ІВЦ АЛКОН НАН. (Внесок здобувача: проведення досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

28. Снежкін, Ю. Ф., Петрова, Ж. О., & Новікова, Ю. П. (2022). Дослідження кінетики процесу сушіння композиційних гранул на конвективному сушильному стенді. *Збірник праць «Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики»* (С. 196-203). Київ : ІВЦ АЛКОН НАН. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

29. Петрова, Ж.О., Пазюк, В.М., Новікова, Ю.П., & Петров, А.І. (2022). Дослідження з переробки торфу на композиційне паливо. *Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування* : колективна монографія (93 -103). Київ: Яро́ченко Я. В. *Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних*).

30. Петрова, Ж.О., Снежкін, Ю.Ф., Пазюк, В.М., Кремньов, В.О., Новікова, Ю.П., & Петров, А.І. (2021). Спосіб одержання паливних гранул із застарілих мулових відкладень (Заявка №а 2021 04081). Національний Орган Інтелектуальної Власності Державне підприємство «Український інститут інтелектуальної власності». (Внесок здобувача: розробка та створення способу отримання паливних гранул, проведення досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних та патентний пошук).

31. Снежкін, Ю.Ф., Петрова, Ж.О., Новікова, Ю.П., & Петров, А.І. (2022). Лінія для сушіння термолабільних матеріалів (Патент України на винахід № 125421). Національний Орган Інтелектуальної Власності Державне підприємство «Український інститут інтелектуальної власності». (Внесок здобувача: розробка та створення лінії для сушіння термолабільних матеріалів, проведення досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних та патентний пошук)

Відомості про апробацію результатів дисертації.

Основні положення роботи викладено та обговорено на конференціях різного рівня:

1. XVIII Міжнародній науковій конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв» (Одеса, 2020, форма участі – дистанційна доповідь у ZOOM).
2. IV Всеукраїнській науково-практичній конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТЕРИТОРІЙ: ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА» (Харків, 2020, форма участі – дистанційна доповідь у ZOOM).
3. XIX міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання" (Київ, 2020).
4. XXX конференції «Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики» (Київ, 2020, форма участі – дистанційна доповідь у ZOOM).
5. Міжнародній науково-практичній конференції «ПРОБЛЕМИ СУЧАСНОЇ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ», присвячується 100-річчю професора Драганова Бориса Харлампійовича (Київ, 2020, форма участі – дистанційна доповідь у Cisco Webex Meetings).
6. Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми Сучасної Теплоенергетики» (Львів, 2021).
7. XX міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання" (Київ, 2021).
8. XIX Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики: матеріали» (Київ, 2021, форма участі – дистанційна доповідь у ZOOM).

9. XXII Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (Київ, 2021).
10. 3rd International Scientific Conference «Chemical Technology and Engineering» (Lviv, 2021).
11. VIII Міжнародна наукова конференція «Інноваційні енерготехнології» (Одеса, 2021, форма участі – дистанційна доповідь у ZOOM).
12. XXXI Міжнародній конференції «ПРОБЛЕМИ ЕКОЛОГІЇ І ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ ЕНЕРГЕТИКИ» (Київ, 2021, форма участі – дистанційна доповідь у ZOOM).
13. XII Міжнародній онлайн-конференції: Проблеми теплофізики та теплоенергетики (Київ, 2021, форма участі – дистанційна доповідь у ZOOM)
14. II міжнародна науково-практична конференція «Екологія. Ресурси. Енергія» (Київ, 2021).
15. XXI міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання" (Київ, 2021).
16. XXIX всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених "Обладнання хімічних виробництві підприємств будівельних матеріалів" (Київ, 2021).
17. XXII міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання" (Київ, 2022).
18. XXIII Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (Київ, 2022).
19. XXIII міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенерго-зберігаючі технології та обладнання" (Київ, 2022).



(11) **125421**(19) **UA**(51) МПК
F26B 15/16 (2006.01)
A23L 3/40 (2006.01)

(21) Номер заявки:	а 2020 03508	(72) Винахідники:	Снежкін Юрій Федорович, UA, Петрова Жанна Олександрівна, UA, Новікова Юлія Петрівна, UA, Петров Антон Іванович, UA
(22) Дата подання заявки:	10.06.2020	(73) Володілець:	ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ НАН УКРАЇНИ, вул. Марії Капніст, 2-а, м. Київ, 03057, UA
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності:	03.03.2022		
(41) Дата публікації відомостей про заявку та номер Бюлетеня:	15.12.2021, Бюл. № 50		
(46) Дата публікації відомостей про державну реєстрацію та номер Бюлетеня:	02.03.2022, Бюл. № 9		

(54) Назва винаходу:

ЛІНІЯ ДЛЯ СУШІННЯ ТЕРМОЛАБІЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

(57) Формула винаходу:

Лінія для сушіння термолабільних матеріалів, до складу якої входять дві ділянки підготовки сировини до сушіння, які оснащені двома бункерами для прийому сировини, двома елеваторними транспортерами, миючою барабанною машиною, двома транспортерами з магнітним сепаратором, машиною для очищення сировини, машиною для нарізання сировини, двома ваговими дозаторами, до складу лінії також входять ємність з лопатевим змішувачем, шнековий роздавач сировини, стрічковий конвеєр для завантаження піддонів, візок з піддонами, двозонна сушарка з теплогенератором в першій зоні, тепловою насосною установкою в другій зоні та повітропроводами, яка встановлена за ділянками підготовки сировини і з'єднана з ними колією, по якій рухається візок з сировиною, а також елеватор, мікромлин, вибросита і пристрій для зашивання мішків, яка відрізняється тим, що другу зону сушарки додатково оснащено конденсатором теплового насоса для нагрівання та осушення теплоносія, випарником-рекуператором та повітропроводами, по яких циркулює теплоносіє, за другою зоною сушарки розміщена зона охолодження, що є камерою, в якій сировина охолоджується до 20-25 °С, камера має повітропроводи, які з'єднують зону охолодження з другою зоною сушарки та допоміжним рекуператором.

16.01.2023, 12:24

Детальна інформація по об'єкту

Опубліковано 18.01.2023, бюл. № 3/2023

(21) Номер заявки	a202104081
(22) Дата подання заявки	13.07.2021
(41) Дата публікації заявки	18.01.2023
(51) Індекс МПК	C10L5/00
(54) Назва винаходу (корисної моделі)	СПОСІБ ОДЕРЖАННЯ ПАЛИВНИХ ГРАНУЛ ІЗ ЗАСТАРІЛИХ МУЛОВИХ ВІДКЛАДЕНЬ [UA]
(71) Заявник	ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ НАН УКРАЇНИ [UA]
(72) Винахідник	Петрова Жанна Олександрівна [UA] Снежкін Юрій Федорович [UA] Пазюк Вадим Михайлович [UA] Кремньов В'ячеслав Олегович [UA] Новікова Юлія Петрівна [UA] Петров Антон Іванович [UA]
(98) Адреса для листування	вул. Марії Капніст, 2-а, м. Київ, 03057