

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БАРАНОВ ІГОР ОЛЕГОВИЧ

УДК 621.182.95

ДИСЕРТАЦІЯ
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТРАНСПОРТУВАННЯ
ВИСОКОКОНЦЕНТРОВАНОГО ВОДОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА
В ГІДРОТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМАХ ПРОМИСЛОВИХ
ПІДПРИЄМСТВ

Спеціальність 05.22.12 – промисловий транспорт
Галузь знань 027 – транспорт

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

І.О. Баранов

Науковий керівник:

Чернецька-Білецька Наталія Борисівна
доктор технічних наук, професор

Сєверодонецьк – 2018

АНОТАЦІЯ

Баранов І.О. Підвищення ефективності транспортування висококонцентрованого водовугільного палива в гідротранспортних системах промислових підприємств. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.22.12 – промисловий транспорт (275 – Транспортні технології). – Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, Сєверодонецьк.

Захист відбудеться у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту ім. В. Лазаряна, Дніпро, 2019.

Дисертація присвячена вирішенню наукового завдання підвищення ефективності транспортування висококонцентрованого водовугільного палива в гідротранспортних системах промислових підприємств за рахунок зниження енерговитрат на транспортування і матеріальних ресурсів на спорудження та функціонування промислової гідротранспортної системи.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у вирішенні актуального наукового завдання – підвищення ефективності транспортування висококонцентрованого водовугільного палива в гідротранспортних системах промислових підприємств за рахунок зниження енерговитрат на транспортування і матеріальних ресурсів на спорудження та функціонування промислової гідротранспортної системи на основі вибору раціонального гранулометричного складу водовугільного палива та оптимізації конфігурації трубопровідної мережі. Зокрема, наукова новизна роботи полягає у такому:

- вперше формалізована оптимізаційна модель вибору параметрів гідротранспортної системи промислового підприємства, що дозволяє вирішити задачу мінімізації енерговитрат на транспортування водовугільного палива та зменшити матеріальні ресурси на спорудження та функціонування транспортної трубопровідної мережі;

- удосконалено метод розрахунку масової та об'ємної концентрацій твердої компоненти водовугільного палива з урахуванням поглинання рідкої compone-

нти відкритими порами твердих частинок, що розкриває ефект підвищення енерговитрат на його транспортування у промислових гідротранспортних системах у діапазоні формальних концентрацій 60–65%;

- вдосконалені залежності гідравлічного опору різних композицій водовугільних суспензій, що дозволяють оцінити їх вплив на енерговитрати при транспортуванні водовугільного палива у промислових гідротранспортних системах;

- отримала подальший розвиток математична модель просторової тривимірної течії неньютонівської рідини, що дозволяє на відміну від існуючих моделей Менгера SST визначити енерговитрати на транспортування водовугільного палива в промислових гідротранспортних системах підприємств та оптимізувати конфігурацію транспортної мережі з урахуванням реологічних властивостей і режимів течії;

- отримали подальший розвиток методи визначення критерія бімодальності гранулометричного складу водовугільного палива, який становить відношення вмісту дрібної та відповідно великої фракцій до проміжної, що дозволяє на відміну від існуючих визначити його склад в суміші і визначити доцільне співвідношення вказаних фракцій, необхідне для мінімізації витрат енергії при його транспортуванні в промислових гідротранспортних системах.

Практичне значення отриманих результатів полягає у тому, що вони можуть бути використані при визначенні оптимальної кількості шарів дрібних і великої частки еквівалентного діаметра ВВП, що дозволяє мінімізувати витрати на його транспортування в гідротранспортній системі (ГТС) промислових підприємств. Встановлення факту відповідності двошарової структури змашування при раціональних значеннях критерію бімодальності дозволило обґрунтувати наднормативний ефект впливу вказаного критерію на питомі витрати енергії при його транспортуванні. Створені основи якісної структури водовугільного палива (ВВП) як змашування.

Результати роботи використані для удосконалення експериментальної установки і визначення енергетичних витрат на транспортування ВВП в ПГТС підприємств, що дозволяє для забезпечення заданої продуктивності ГТС розра-

хувати параметри трубопроводу й гідравлічні параметри транспортування. Основні результати досліджень використовуються в Східноукраїнському національному університеті імені Володимира Даля при підготовці бакалаврів і магістрів за напрямом «Транспортні технології».

Практичне впровадження результатів роботи підтверджується відповідними документами, що наведені в додатках до дисертації.

За результатами дисертації опублікована 21 наукова праця, з них 1 монографія, 4 статті у виданнях, які включені до наукометричних баз: Scopus, Index Copernicus, 6 статей в спеціалізованих видавництвах, рекомендованих МОН України, в тому числі 1 стаття без співавторів, 8 робіт в матеріалах конференцій, 2 патенти на корисну модель України.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовані цілі та завдання, визначені об'єкт, предмет і методи дослідження, сформульована наукова новизна й відображено практичне значення результатів, які виносяться на захист. Представлено особистий внесок здобувача, апробацію результатів досліджень, структуру та обсяг роботи.

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану проблеми, визначені мета і завдання дослідження.

У результаті виконання аналізу функціонування різних ГТС промислових підприємств України і розвинутих країн було встановлено, що існуючі технології транспортування ВКВВП не враховували особливості технології його приготування з точки зору властивостей вихідного вугілля й не передбачали дотримання раціональних пропорцій різних фракцій гранулометричного складу (ГМС) ВВП.

Відсутність досить точного методу й моделі визначення гідравлічних параметрів транспортування ВВП у ГТС промислових підприємств значно ускладнює процес транспортного обслуговування споживачів ВВП.

Таким чином, проблема підвищення ефективності транспортування високонцентрованого водовугільного палива (ВКВВП) у гідротранспортній системі промислового підприємства вимагає свого вирішення.

У другому розділі розроблена математична модель руху неньютонівських рідин, що дозволила визначити закономірності впливу параметрів гідротранспортної системи та режимів транспортування ВВП на його енергетичні показники в ПГТС і тим самим зменшити енерговитрати, оптимізувати конфігурацію транспортної мережі та підвищити ефективність транспортування.

Запропоновано методи уточнення критерію бімодальності ГМС, проведені лабораторні випробування, визначено вихідні реологічні властивості для математичного моделювання просторової тривимірної течії ВВП у системах промислового гідротранспорту з урахуванням параметрів бімодальності ГМС.

На підставі запропонованих параметрів з метою визначення реологічних властивостей, від яких залежать енерговитрати транспортування ВВП, проведені лабораторні випробування. Для цього залежно від параметрів помелу були підготовлені 6 варіантів ГМС.

Розроблено математичну модель просторової тривимірної течії ВВП на основі моделі турбулентності SST на основі вирішення рівняння Нав'є-Стокса. У результаті проведених розрахунків визначені значення втрат тиску, витрати й розподілу швидкості по перетину трубопроводу в прямій ділянці і у повороті, що дозволило визначити енерговитрати при транспортуванні ВВП в ПГТС. Виконані теоретичні дослідження дозволили уточнити математичну модель течії ВВП у ПГТС і таким чином удосконалити закономірності впливу схеми гідротранспортування та параметрів ВВП на енерговитрати постачання вугільного палива споживачам.

У третьому розділі представлені результати експериментальних досліджень закономірностей зміни параметрів течії водовугільного палива та енерговитрат на його транспортування. Основною метою лабораторних експериментальних досліджень було визначення реологічних властивостей, виду реологічної моделі й визначення питомих енерговитрат на транспортування заданої композиції ВВП.

В результаті циклу проведених експериментів підтверджено вплив фактора ГМС на величину питомого гідравлічного опору ВВП, що дозволяє визначити

його оптимальний розмір і таким чином суттєво (у 1,4 рази) зменшити енерговитрати на транспортування ПГТС.

На підставі виконаних досліджень було встановлено оптимальне число шарів у "змащенні" у водовугільній суспензії (ВВС) відповідної мінімуму втрат енергії при транспортуванні ВВП, що аналогічно зменшенню енерговитрат у середньому у 1,5 рази, підтвердило можливість вибору варіанта ГМС ВВП за критерієм бімодальності.

У четвертому розділі викладені результати впровадження запропонованих заходів щодо зниження енерговитрат на транспортування ВВП у ПГТС та зменшення матеріальних ресурсів на побудову трубопровідної мережі, а також визначена їх ефективність.

Визначена ефективність запропонованого критерію ГМС для ВВП, яка виражається у зниженні витрат електроенергії на його транспортування промисловим гідротранспортом. На основі оптимізації конфігурації трубопровідної мережі промислового підприємства визначені параметри ГТС, що дозволили мінімізувати енерговитрати на транспортування ВВП та зменшити матеріалоємність транспортної трубопровідної мережі.

Визначена оптимальна конфігурація трубопровідної мережі промислового підприємства, при цьому витрати на перевезення 1ткм вантажу при використанні послідовно-променевої схеми транспортування знизилися в порівнянні з автомобільним транспортом.

Ключові слова: гідротранспортна система, втрати тиску, водовугільне паливо, гранулометричний склад, енерговитрати транспортування, матеріальні витрати, конфігурація, транспортна мережа.

Список публікацій здобувача

Основні праці:

1. Забезпечення сталого розвитку регіону: економічні, управлінські, правові та інформаційно-технічні аспекти: колективна монографія / Н.Б. Чернецька-Білецька, І.О. Баранов, М.В. Мірошникова; за заг. ред. Ю. І. Ключ., Н. В.

Швець. – Сєверодонецк : вид-во СНУ ім. В. Даля, 2017. ISBN 978-617-11-0118-0 – С. 193-212.

2. Chernetskaya-Beletskaya N., Baranov I., Miroshnykova M. Technology of breakage of coal for the coal-water fuel production. TEKA. Commission of motorization and energetics in agriculture. 2015. Vol. 15, №.2, P. 63-68.

3. Chernetskaya-Beletskaya N. Improving industrial pipeline transport using research regularities of flow of mixtures in material pipeline / N. Chernetskaya-Beletskaya, O. Guschin, A. Shvornikova, I. Baranov, M. Miroshnikova // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 4/7, Iss. 88. – P. 38-44.

4. Chernetskaya-Beletskaya N., Baranov I., Miroshnykova M., Kravchenko S., Bragin M. Some aspects improvement of industrial pipeline transport. TEKA. Commission of motorization and energetics in agriculture. 2017. Vol. 17, №1, P. 33-40.

5. Study on the coal-water fuel pipeline transportation taking into account the granulometric composition parameters / N. Chernetskaya-Beletskaya, A. Rogovyi, A. Shvornikova, I. Baranov, M. Miroshnikova, N. Bragin // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Vol. 7, Iss.4.3. P. 240-245.

6. Чернецькая-Белецька Н.Б., Баранов І.О. Використання низкосортного твердого палива в енергетиці країни / Н.Б. Чернецька-Белецька, І.О. Баранов // Українські залізниці. – 2014. – №5(11). – С. 58-61.

7. Чернецька-Белецька Н.Б., Баранов І.О., Мірошнікова М.В. Удосконалення способу управління структурно-реологічними характеристиками водоугольного палива / Н.Б.Чернецька-Белецька, І.О. Баранов, М.В. Мірошнікова // Вісник СНУ ім. В.Далі. – 2016. – № 1 (225). – С. 221-226.

8. Чернецька-Белецька Н.Б., Баранов І.О., Остапенко В.Н., Мірошнікова М.В. Дослідження впливу гранулометричного складу водоугольного палива на його реологічні та гідродинамічні характеристики / Н.Б. Чернецька-Белецька, І.О. Баранов, В.Н. Остапенко, М.В. Мірошнікова // Вісник СНУ ім. В.Далі. – 2017. – №3 (233). – С. 117-125.

9. Чернецька-Білецька Н.Б. Математичне моделювання руху водовугільного палива в трубопроводі / Н.Б. Чернецька-Білецька, А.С. Роговий, І.О. Баранов, М.В. Мірошникова // Вісник СХУ ім. В.Даля. – 2017. – № 9 (239). – С. 85-90.

10. Чернецька-Білецька Н.Б. Математична модель просторової тривимірної течії водовугільного палива / Н.Б. Чернецька-Білецька, А.С. Роговий, І.О. Баранов, М.В. Мірошникова // Вісник СХУ ім. В.Даля. – 2018. – № 1 (242). – С. 159-164.

11. Баранов І.О. Формування оптимізаційної моделі вибору параметрів транспортування водовугільного палива промисловим гідротранспортом / І.О. Баранов // Вісник СХУ ім. В.Даля. – 2018. – № 3 (244). – С. 7-13.

12. Пристрій для вимірювання повного напору водовугільної суспензії (BBC): патент на корисну модель 85336 Україна. МПК(2013)F23K 1/02. G01F 1/46. №u201308542; заявл. 08.07.2013; опубл. 11.11.2013, Бюл.№ 21.

13. Пристрій для вимірювання швидкості потоку суспензії по перерізу трубопроводу: патент на корисну модель 87622 Україна. МПК(2013)F23K 1/02.G01F 1/46. №u201311292; заявл. 23.09.2013; опубл. 10.02.2014, Бюл.№ 3.

Праці апробаційного характеру:

14. Чернецкая-Белецкая Н.Б., Баранов И.О., Крайнюк А.А. Использование низкосортных твердых топлив в энергетике страны. Збірник наукових праць «Інноваційні технології на залізничному транспорті» IV науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. 19.09.2013р., м. Донецьк, 2013, С. 107-111.

15. Чернецкая-Белецкая Н.Б., Баранов И.О., Мирошникова М.В. Методы регулирования структурно-реологических характеристик водоугольных суспензий. Збірник наукових праць конференції «Логістичне управління та безпека руху на транспорті», 18-20 листопада 2015р., м. Харків, 2015, С. 142-144.

16. Чернецкая-Белецкая Н.Б., Баранов И.О., Мирошникова М.В. Экспериментальные исследования реологических характеристик и гидравлических

параметров транспортирования водоугольного топлива. International Scientific and Practical Conference World Science. 2015. Vol. 1, №12(28), P. 35-43.

17. Чернецкая-Белецкая Н.Б., Баранов И.О. Совершенствование технологического процесса гидротранспортирования водоугольного топлива. Матеріали XXI міжнародної науково-технічної конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці». 24-27 травня 2016 р., м. Київ, 2016. С. 59-61.

18. Чернецкая-Белецкая Н.Б., Баранов И.О., Мирошникова М.В. Влияние грануло-метрического состава водоугольного топлива на его реологические характеристики. Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми економіки транспорту» (20.04-21.04.2017). – Д.: ДНУЗТ, м. Дніпро, 2017, С. 63-64.

19. Чернецкая-Белецкая Н.Б., Баранов И.О., Мирошникова М.В., Баранова В.Н. Исследование влияния характеристик водоугольного топлива на удельные потери давления. Матеріали XXII міжнародної науково-практичної конференції «Гідроаеро-механіка в інженерній практиці». 23-26 травня 2017р. м. Черкаси, 2017. С. 53-56.

20. Чернецкая-Белецкая Н.Б., Баранов И.О., Мирошникова М.В. Повышение эффективности гидротранспортирования водоугольного топлива. Матеріали V міжнародної науково-практичної конференції «Людина, суспільство, комунікативні технології», 22-23 вересня 2017р., м. Лиман, 2017, С. 299-302.

21. Cherneckaya-Beleckaya N., Rogovyi A., Baranov I., Miroshnykova M. Mathematical model flow coal-water fuel. Globalization of scientific and educational space. Innovations of transport. Problems, experience, prospects: thesis, May 2018, Italy – Severodonetsk: Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 2018. P. 82-83.

ABSTRACT

Baranov I.O. Improving the highly loaded coal-water slurry fuel transportation efficiency in the hydro-transport systems of industrial enterprises. – Manuscript.

The dissertation for the scientific degree of the Candidate of Engineering Sciences (Doctor of Philosophy), speciality 05.22.12 – Industrial Transport (275 – Transport Technology). – V. Lazarian Dnipropetrovsk National University of Railway Transport, Dnipro, 2019.

The dissertation is devoted to solving a scientific problem of improving the highly loaded coal-water slurry fuel transportation efficiency in the hydro-transport systems of industrial enterprises due to the reduction of energy consumption for transportation and material resources for the construction and operation of an industrial hydro-transport system.

The scientific novelty of the results is in solving an urgent scientific problem – improving the highly loaded coal-water slurry fuel transportation efficiency in the hydro-transport systems of industrial enterprises due to the reduction of energy consumption for transportation and material resources for the construction and operation of an industrial hydro-transport system based on the choice of a rational granulometric composition of the coal-water slurry fuel and optimization of the configuration of the pipeline network. In particular, the scientific novelty of the work is as follows:

- first formalized a parameter design optimisation model for the hydro-transport system of the industrial enterprise, which allow solving the problem of minimising the energy consumption for the coal-water slurry fuel transportation and reduction of material resources for building and operation of an industrial hydro-transport system;
- improved method for calculating the mass and volume concentration of the solid component of the coal-water slurry fuel taking into account the absorption of the liquid component by the open pores of solid particles, that disclose the effect of energy consumption increase for its transportation in industrial hydro-transport systems in the range of formal concentrations of 60-65%;
- improved dependencies of hydraulic resistance of various compositions of the coal-water slurries, allowing to evaluate their impact on the energy consumption during transportation of the coal-water slurry fuel in the industrial hydro-transport systems;

- the mathematical model of the spatial three-dimensional flow of a non-Newtonian fluid was further developed, that allows, unlike the existing Menter's SST models, to determine the energy costs of transporting coal-water slurry fuel in the industrial hydro-transport systems of enterprises and to optimize the configuration of the transport network taking into account rheological properties and flow regimes;
- the methods for determining the bimodality criterion for the particle size distribution of coal-water slurry fuel were further developed, which is the ratio of the content of small and respectively large fractions to intermediate, that allows, unlike the existing ones, to determine its composition in the mixture and to determine the appropriate ratio of the specified fractions, which is necessary to minimize energy costs during its transportation in industrial hydro-transport systems.

The practical significance of the obtained results is that they can be used in determining the optimal number of layers of small and large fraction of the coal-water slurry fuel (CWSF) equivalent diameter, which allows minimizing the costs of its transportation in the hydro-transport system (HTS) of the industrial enterprises. The establishment of the fact of compliance of the two-layer lubrication structure at the rational values of the bimodality criterion made it possible to substantiate the influence of the above-standard effect of this criterion on the specific energy consumption during its transportation. The bases of the coal-water slurry fuel qualitative structure as a lubricant have been created.

The results of the work have been used to improve the experimental installation and determine the energy costs of CWSF transportation in the industrial hydro-transport systems, that allow to calculate the parameters of the pipeline and hydraulic parameters of transportation to ensure the desired performance of the hydro-transport systems. The main results of the research are used at Volodymyr Dahl East Ukrainian National University in training the bachelors and masters majoring "Transport Technologies".

The practical implementation of the results of the work is confirmed by the relevant documents, which are provided in the annexes to the dissertation.

According to the results of the dissertation, 21 scientific papers were published, including 1 monograph, 4 articles in publications included in the scientific databases: Scopus, Index Copernicus, 6 articles in specialized publishing houses recommended by the Ministry of Education and Science of Ukraine, including 1 article without co-authors, 8 scientific papers in the conference proceedings, 2 utility model patents of Ukraine.

The introduction substantiates the relevance of the topic of the dissertation, formulates the goals and objectives, defines the object, subject and methods of the research, formulates the scientific novelty and reflects the practical significance of the results that are presented for the defence. The personal contribution of the applicant, the approbation of the research results, the structure and the volume of work are presented.

The first chapter analyses the current state of the problem, defines the purpose and objectives of the study.

As a result of the analysis of the functioning of the various industrial HTS in Ukraine and developed countries, it was found that the existing technologies for the transportation of the highly loaded CWSF did not take into account the specifics of its preparation technology in terms of the properties of the original coal and did not assume observance of rational proportions of different fractions of the CWSF granulometric composition (GC).

The lack of a fairly accurate method and model for determining the hydraulic parameters of transporting CWSF in the industrial HTS greatly complicates the transport services process for consumers of the CWSF.

Thus, the problem of increasing the efficiency of highly loaded coal-water slurry fuel transportation (HL CWSF) in the hydro-transport system of an industrial enterprise requires its solution.

In the second section, a mathematical model of the motion of non-Newtonian fluids was developed. It allowed to determine the patterns of influence of the parameters of the hydro-transport system and the modes of transportation of CWSF on its energy indicators in the industrial hydro-transport system and thereby reduce energy

costs, improve the configuration of the transport network and improve transportation efficiency.

Methods of specification of the granulometric composition bimodality have been proposed, laboratory tests have been carried out, initial rheological properties for mathematical modelling of the spatial three-dimensional CWSF flow in the systems of industrial hydro-transport are determined taking into account the parameters of the bimodal granulometric composition.

Based on the proposed parameters, in order to determine the rheological properties on which the energy costs of the CWSF transportation depend, laboratory tests were carried out. For this, depending on the grinding parameters, 6 variants of the granulometric composition were prepared.

A mathematical model of the spatial three-dimensional flow of the CWSF was developed on the basis of the SST turbulence model based on the solution of the Navier-Stokes equation. As a result of the calculations, the values of pressure loss, flow rate and velocity distribution over the cross section of the pipeline in the straight section and in the turn were determined, which allowed to determine the energy consumption during the CWSF transportation in the industrial hydro-transport systems. Theoretical studies have been carried out to clarify the mathematical model of the flow of CWSF in industrial hydro-transport systems and thus improve the patterns of influence of the hydro-transport scheme and the CWSF parameters on the energy consumption of coal fuel supply to consumers.

The third section presents the results of the experimental studies of the patterns of changes in the parameters of the coal-water slurry fuel flow and the energy consumption for its transportation. The main objective of laboratory experimental studies was to determine the rheological properties, the type of rheological models and determine the specific energy consumption for the transportation of a given composition of the CWSF.

As a result of the cycle of the experiments carried out, the influence of the granulometric composition factor on the value of the specific hydraulic resistance of the

CWSF is confirmed, which allows determining its optimal size and thus significantly (by 1.4 times) reducing energy consumption for transportation by an industrial HTS.

On the basis of the performed research, the optimum number of layers in the “lubrication” in the coal-water slurry (CWS) was determined to be the corresponding minimum of energy losses during the transportation of the CWSF, which is similar to reducing energy consumption by an average of 1.5 times, confirmed the possibility of choosing the GC CWSF option according to the bimodality criterion.

The fourth section presents the results of the implementation of the proposed measures to minimise energy consumption for CWSF transportation in the industrial HTS and reduce material resources for the construction of a pipeline network, as well as their effectiveness was determined.

The effectiveness of the proposed GC criterion for CWSF, which is expressed in reducing the power consumption for its transportation by industrial hydro-transport, has been determined. Based on the optimization of the configuration of the pipeline network of an industrial enterprise, the parameters of the HTS were determined, which allowed minimizing the energy consumption for transporting CWSF and reducing the material consumption of the transport pipeline network.

The optimal configuration of the industrial enterprise pipeline network has been determined, while the cost of transporting 1 tkm of cargo when using a sequential-beam transport scheme has decreased compared to road transport.

Key words: hydro-transport system, pressure loss, coal-water slurry fuel, granulometric composition, transportation energy consumption, material consumption, configuration, transport network.

List of candidate’s publicatuons

References:

1. Chernetskaya-Biletska N., Baranov I., Miroshnikova M. Investigation rheological characteristics and hydraulic parameters transportation of water-coal fuel / Ensuring sustainable development region: economic, managerial, legal and informational-technical aspects: collective monograph / [P. Krivulia, N. Chernetskaya-

Beletskaya, S. Stapauk and others.]; per community Ed. Yu. Klyus., N. Shvets. - Severodonetsk: View SNU them. V. Dahl, 2017. ISBN 978-617-11-0118-0-193-212 p.

2. N. Chernetskaya-Beletskaya, O. Guschin, A. Shvornikova, I. Baranov, M. Miroshnikova. Improving industrial pipeline transport using research regularities of flow of mixtures in material pipeline. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies ISSN 1729-3774 "SCOPUS". DOI: 10.15587/1729-4061.2017.106790.

3. N. Chernetskaya-Beletskaya, A. Rogovyi, A. Shvornikova, I. Baranov, M. Miroshnikova, N. Bragin. Study on the coal-water fuel pipeline transportation taking into account the granulometric composition parameters. International Journal of Engineering & Technology, ISSN: 2227524X, 7 (4.3) (2018), pp. 240-245. "SCOPUS". DOI:10.14419 / ijet.v7i4.3.19794.

4. Baranov I. Formation an optimization model for selecting parameters transportation of water-coal fuel by industrial hydrotransport. Bulletin SNU them. V. Dahl - No. 3 (244) -2018, - P. 7-13.

5. Chernetskaya-Beletskaya N., Rogovyi A., Baranov I., Miroshnikova M. Mathematical modeling movement of water-coal fuel in pipeline. Bulletin SNU them. V.Dahl. - Severodonetsk: View of East nats un-th them V. Dahl - No. 9 (239) - 2017. - P. 85-90.

6. Chernetskaya-Beletskaya N., Rogovyi A, Baranov I., Miroshnikova M. Mathematical model spatial three-dimensional flow of water-coal fuel. Bulletin SNU them. V.Dahl. - Severodonetsk: View of East nats un-th them V. Dahl - No. 1 (242) - 2018, - P. 159-164.

7. Chernetskaya-Beletskaya N., Baranov I. Use low-grade solid fuel in energy sector country. Ukrainian Railways, No. 5 (11), 2014, 58-61c.

8. N. Chernetskaya-Beletskaya, I. Baranov, M. Miroshnykova. Technology of breakage of coal for the coal-water fuel production. TEKA. Commission of motorization and energetics in agriculture – 2015, Vol. 15, No.2, 63-68.

9. Chernetskaya-Beletskaya N., Baranov I., Miroshnikova M. "Improvement method managing structural and rheological characteristics of water-coal fuel". Bulletin Volodymyr Dahl East-Ukrainian National University № 1 (225) 2016, p. 221-226.

10. Chernetskaya-Beletskaya N., Baranov I., Ostapenko V., Miroshnikova M. Investigation influence granulometric composition of water-coal fuel on rheological and hydrodynamic characteristics. Bulletin East-Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl, No. 3 (233), 2017, p. 117-125.

11. N. Chernetskaya-Beletskaya, I. Baranov, M. Miroshnykova, S. Kravchenko, M. Bragin. Some aspects improvement of industrial pipeline transport. TEKA. Commission of motorization and energetics in agriculture – 2017, Vol. 17, No.1, 33-40.

12. Apparatus for measuring full pressure of coal-water suspension (Air Force). Chernetskaya-Beletskaya N. Baranov I., Kovalenko A. Shvornikova G., Pilavov M., Murshedi A. IPC (2013) F23K 1/02. G01F 1/46.

13. Apparatus for measuring flow rate suspension over section of pipeline. Chernetskaya-Beletskaya N., Kushchenko O., Kovalenko A., Shvornikova G., Kapustin D., Baranov I. IPC (2013) F23K 1 / 02.G01F 1/46.

Articles which demonsrtate approval of the thesis materials:

14. Chernetskaya-Beletskaya N., Baranov I., Miroshnikova M. Experimental research rheological characteristics and hydraulic parameters transportation of water-coal fuel. International Scientific and Practical Conference World Science / No. 12 (28), Vol. 1 December 2017 pp. 35-43.

15. Chernetskaya-Beletskaya N., Baranov I. Improvement technological process hydrotransport of water-coal fuel. Materials of XXI International Scientific and Technical Conference "Hydroaeromechanics in Engineering Practice" May 24-27, 2016, Kyiv, Ukraine. 59-61p.

16. Chernetskaya-Beletskaya N., Baranov I., Miroshnikova M., Baranova V. "Investigation influence characteristics of water-coal fuel on specific pressure losses". XXII International Scientific and Practical Conference "Hydroaeromechanics in Engineering Practice" Cherkasy-Kyiv, May 23-26, 2017: Conference materials - Kyiv. – 155p.

17. Cherneckaya-Beleckaya N., Rogovyi A., Baranov I., Miroshnykova M. Mathematical model flow coal-water fuel. Globalization of scientific and educational

space. Innovations of transport. Problems, experience, prospects: thesis, May 2018, Italy / Executive editor: Cherneckaya-Beleckaya N. – Severodonetsk: Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 2018. P. 82-83.

18. Chernetskaya-Beletskaya N., Baranov I., Kraynyuk A. The use low-grade solid fuels in country's energy sector. Collection scientific works "Innovative Technologies in Railway Transport" IV Scientific and Practical Conference Students, Postgraduates and Young Scientists September 19-21, 2013, Donetsk.

19. Chernetskaya-Beletskaya N., Baranov I., Miroshnikova M., Baranova V. Influence granulometric composition of water-coal fuel on its rheological characteristics". Materials XVII International Nuclear-Advent Conference "Problems of transport economy" (20.04 - 21.04.2017). Certificate state registration of UkrINTEI, No. 203 dated March 30, 2017 - D.: DNUZT, 2017, 63-64 p.

20. Chernetskaya-Beletskaya N., Baranov I., Miroshnikova M. Methods regulation structural-rheological characteristics of coal-water slurries. Collection of scientific papers, November 18-20, 2015, Kharkiv / Severodonetsk: SNU them. V. Dahl, 2015, 142-144p.

21. Chernetskaya-Beletskaya N., Baranov I., Miroshnikova M. Increasing efficiency hydrotransport of water-coal fuel. Materials V International Scientific and Practical Conference, September 22-23, 2017. Man, Society, Communication Technologies ". Kharkiv-Liman, 299-302p.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	21
ВСТУП.....	22
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ І ВИВЧЕНОСТІ ПИТАННЯ	
ТРАНСПОРТУВАННЯ ВОДОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА.....	28
1.1. Сфера застосування водовугільного палива (ВВП).....	28
1.2. Аналіз систем транспортування водовугільного палива промисловим транспортом.....	30
1.3. Аналіз існуючих технологій підготовки і транспортування водовугільного палива в промислових гідротранспортних системах..	35
1.4. Аналіз методик побудування схем транспортування водовугільного палива промисловим гідротранспортом.....	42
1.4.1 Маршрутизація транспортної мережі промислових підприємств.....	42
1.5. Оцінка впливу характеристик водовугільного палива на ефективність його транспортування.....	47
1.5.1 Вплив концентрації твердого компонента на реологічні властивості ВВП.....	47
1.5.2 Вплив ГМС на реологічні характеристики водовугільного палива....	52
1.5.3 Вплив реагентів-пластифікаторів на реологічні характеристики ВВП.....	57
1.5.4 Вплив зольності вихідного вугілля на реологічні характеристик ВВП.....	58
1.6. Висновки по розділу 1.....	60
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ	
ВОДОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА З УРАХУВАННЯМ	
ПАРАМЕТРІВ БІМОДАЛЬНОСТІ І ГРАНУЛОМЕТРИЧНОГО	
СКЛАДУ.....	
2.1. Визначення раціонального гранулометричного складу твердої фази водовугільного палива	62

		19
2.1.1	Результати дослідження гранулометричного складу продуктів помелу.....	63
2.1.2	Залежність дисперсного складу пилу від питомої поверхні подрібненого вугілля.....	68
2.2.	Методика визначення реологічних характеристик водовугільного палива	79
2.3.	Вплив кількості шарів дрібних частинок бімодального складу на питомі втрати тиску при транспортуванні водовугільного палива....	89
2.4.	Математична модель руху водовугільного палива	97
2.4.1	Числова реалізація математичної моделі.....	108
2.5.	Верифікація розрахунків течії водовугільного палива з урахуванням гранулометричного складу	114
2.6.	Оптимізація реологічних параметрів водовугільного палива під час течії прямим трубопроводом	120
2.7.	Розрахунок течії водовугільного палива у відводах.....	123
2.8.	Висновки по розділу 2	127
	РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК І ГІДРАВЛІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТРАНСПОРТУВАННЯ ВОДОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА.....	130
3.1.	Методика проведення експериментальних досліджень	130
3.2.	Робота експериментального стенду.....	130
3.2.1	Опис та принцип роботи експериментальної установки.....	131
3.2.2	Вимірювані параметри і вимірювальна апаратура.....	133
3.2.3	Оцінка похибки вимірювань.....	134
3.2.4	Методика проведення випробувань.....	136
3.2.5	Планування експерименту.....	140
3.3.	Результати експериментальних досліджень.....	149
3.4.	Висновки по розділу 3.....	156

РОЗДІЛ 4. ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ ЗАХОДІВ ЩОДО ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТ НА ТРАНСПОРТУВАННЯ І ЗМЕНШЕННЯ МАТЕРІАЛЬНИХ РЕСУРСІВ НА СПОРУДЖЕН- НЯ ТА ФУНКЦІОНУВАННЯ ТРУБОПРОВІДНОЇ МЕРЕЖІ.....	159
4.1. Вплив гранулометричного складу водовугільного палива на втрати тиску	159
4.2. Вплив пластифікуючої добавки на питомі витрати тиску при транспортуванні водовугільного палива	161
4.3. Результати впровадження запропонованих заходів щодо зниження енерговитрат на транспортування ВВП у ПГТС та зменшення матеріальних ресурсів на побудову трубопровідної мережі	163
4.3.1 Формалізація оптимізаційної моделі вибору параметрів гідротранспортної системи промислового підприємства.....	163
4.3.2 Методика вибору параметрів гідротранспортної системи промислового підприємства.....	172
4.4. Результати вирішення оптимізаційної задачі і вибору параметрів транспортування ВВП.....	181
4.5. Оцінка ефективності транспортування ВВП промисловим гідротранспортом.....	185
4.6. Висновки по розділу 4	189
ВИСНОВКИ	190
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	192
ДОДАТКИ.....	208
ДОДАТОК А. Програма алгоритму “Прима”.....	209
ДОДАТОК Б. Номограма визначення структурної характеристики потoku в залежності від критерія Сен-Венана.....	211
ДОДАТОК В. Блок-схема алгоритму вибору параметрів гідротранспортної системи промислового підприємства.....	212
ДОДАТОК Г. Акти реалізації результатів досліджень.....	213

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ВВП – водовугільне паливо;
ВВС – водовугільна суспензія;
ПГТС – промислова гідротранспортна система;
ГТС – гідротранспортна система;
ГМС – гранулометричний склад;
ВКВВП – висококонцентроване водовугільне паливо;
ВКВС – висококонцентрована водовугільна суспензія;
КБ – критерій бімодальності;
ПБ – параметри бімодальності;
ТК – твердий компонент;
ТЕС – теплоелектростанція;
ТЗ – транспортний засіб;
ЗК – завдання комівояжера;
ПАР - поверхнево активні речовини;
ЛСТ – реагент лігносульфонат;
ВЩР – вуглещолочний реагент;
С - концентрація твердого компонента водовугільного палива;
МШЦ – млин кульовий центробіжний.

ВСТУП

Розвиток енергетики, а також підвищення енергетичної безпеки України в значній мірі залежить від широкого і ефективного використання вугілля в якості енергетичного палива. Для цього виникає необхідність вдосконалення технологій його транспортування до енергетичних об'єктів підприємств з урахуванням споживчих властивостей вугілля як енергетичного палива, а також освоєння технології отримання на основі вугілля альтернативного палива при заміні дефіцитних природних ресурсів: газу і нафти.

В Україні і за кордоном для вирішення вищезазначеної проблеми активно використовуються перспективні технології приготування і транспортування водовугільного палива (ВВП), яке представляє собою композицію дисперсних систем, що складається з твердої фази у вигляді дрібнодисперсного вугілля і рідкого середовища.

Актуальність теми. Промислові підприємства теплової енергетики та вугледобувного комплексу України: шахти і збагачувальні фабрики – мають у своїй структурі котельні, що працюють на кам'яному вугіллі, із загальною річною потребою підприємства до 150 тис.т. Тим часом подальші перспективи використання вугільних палив в Україні нерозривно пов'язані з використанням водовугільного палива (ВВП).

Транспортування вугілля у вигляді ВВП на території підприємства здійснюється залізничним, автомобільним або трубопровідним транспортом. Експлуатаційні витрати на транспортування ВВП автомобільним або залізничним транспортом складають 1,1–1,5 млн.грн./рік, витрати трубопровідного гідротранспорту – 200 тис.грн./рік. При цьому собівартість перевезення 1 ткм ВВП трубопровідним транспортом у 5 разів менша ніж автомобільним.

Використання трубопровідного транспорту дозволяє виключити зливно-наливні операції, підвищити швидкість обертання, пропускну здатність і, тим самим, виключити простої транспортних засобів під вантажними операціями, які становлять для автомобільного транспорту не менше 3-х годин, для залізничного – не менше 6-ти годин. Підвищення ефективності транспортування ВВП

у промислових гідротранспортних системах (ПГТС) виражається в зниженні собівартості перевезення 1 ткм вантажу при постійній інтенсивності вантажо-поток, при цьому собівартість перевезення безпосередньо залежить від енерговитрат на транспортування. Недоліком трубопровідного гідротранспорту є підвищення енерговитрат залежно від пропорцій різних фракцій гранулометричного складу (ГМС) продукту транспортування, в результаті чого при не раціональному складі енерговитрати на транспортування ВВП зростають до 1,5–1,7 разів. Проблеми функціонування ПГТС полягають у відсутності певного критерію для оцінки ГМС висококонцентрованого ВВП (ВКВВП), рекомендацій з підготовки та дотримання раціональних пропорцій його різних фракцій, у результаті чого зростають енерговитрати при транспортуванні ВВП.

Відсутність оптимізованої за техніко-економічними показниками схеми транспортування ВВП і обґрунтованих з огляду на мінімізацію енерговитрат параметрів роботи гідротранспортної системи (ГТС) підприємства призводить до збільшення собівартості транспортування ВВП на 19%. Крім цього для оцінки енерговитрат на транспортування ВКВВП необхідне уточнення закономірностей течії по трубопроводу.

Вирішення вказаних вище завдань дозволить зокрема знизити енерговитрати на транспортування ВВП у ПГТС практично в 2 рази.

Перераховані вище недоліки існуючих ГТС підтверджують актуальність обраної теми досліджень і дозволяють підвищити ефективність транспортування ВКВВП гідротранспортною системою промислового підприємства.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дослідження, виконані в цій дисертаційній роботі, є частиною держбюджетної теми СНУ ім. В. Даля: №ДН-03-15 «Розробка теорії і підвищення ефективності енергетичних процесів у системах приготування, транспортування і спалювання водувугільного палива» (№ держреєстрації U0115U000646), співавтором звіту якої є автор.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є зниження енерговитрат на транспортування і матеріальних ресурсів на спорудження та функціонування

промислової гідротранспортної системи на основі вибору раціонального гранулометричного складу водовугільного палива та оптимізації конфігурації трубопровідної мережі.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення таких завдань:

- проведення аналізу існуючих технологій підготовки і схем транспортування водовугільного палива в промислових гідротранспортних системах і оцінка впливу характеристик твердої фази, зольності й показників якості вихідного вугілля, швидкості транспортування суспензії і властивостей пластифікуючих добавок на ефективність транспортування водовугільного палива;
- розробка математичної моделі руху неньютонівських рідин, що дозволяє визначити втрати енергії і структуру потоку при транспортуванні водовугільного палива у промислових гідротранспортних системах та оптимізувати конфігурацію транспортної мережі з урахуванням його реологічних властивостей, режимів руху й вмісту твердої компоненти;
- експериментальні дослідження закономірностей зміни параметрів течії водовугільного палива та енерговитрат на його транспортування від основних факторів впливу: концентрації твердого компонента, параметра, що характеризує ступінь бімодальності гранулометричного складу, швидкості транспортування і зольності вихідного вугілля;
- впровадження запропонованих заходів щодо зниження енерговитрат на транспортування і зменшення матеріальних ресурсів на спорудження та функціонування трубопровідної мережі, а також визначення їх ефективності.

Об'єкт дослідження – процеси транспортування водовугільного палива в системах промислового гідротранспорту.

Предмет дослідження – закономірності зміни енергетичних витрат на транспортування водовугільного палива залежно від схеми гідротранспортної системи і його реологічних властивостей.

Методи досліджень. Розрахунки втрат енергії і визначення структури потоку при транспортуванні ВВП у ПГТС здійснювалося з використанням моделі течії в'язкопластичної рідини Шведова-Бінгама. Розрахунок вмісту твердої фази

у ВВП здійснювався на основі розрахункових залежностей запропонованих автором. Закономірності зміни параметрів течії ВВП та енерговитрат на його транспортування від основних факторів впливу отримані в результаті проведення планованого експерименту за методикою Е.Е. Рафалеса-Ламарка. Впровадження запропонованих заходів щодо зниження енерговитрат на транспортування і зменшення матеріальних ресурсів на спорудження та функціонування трубопровідної мережі виконано за допомогою алгоритму Прима і методу "гілок і меж".

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше формалізована оптимізаційна модель вибору параметрів гідротранспортної системи промислового підприємства, що дозволяє вирішити задачу мінімізації енерговитрат на транспортування водовугільного палива та зменшити матеріальні ресурси на спорудження та функціонування транспортної трубопровідної мережі;

- удосконалено метод розрахунку масової та об'ємної концентрацій твердої компоненти водовугільного палива з урахуванням поглинання рідкої компоненти відкритими порами твердих частинок, що розкриває ефект підвищення енерговитрат на його транспортування у промислових гідротранспортних системах у діапазоні формальних концентрацій 60–65%;

- вдосконалені залежності гідравлічного опору різних композицій водовугільних суспензій, що дозволяють оцінити їх вплив на енерговитрати при транспортуванні водовугільного палива у промислових гідротранспортних системах;

- отримала подальший розвиток математична модель просторової тривимірної течії неньютонівської рідини, що дозволяє на відміну від існуючих моделей Менгера SST визначити енерговитрати на транспортування водовугільного палива в промислових гідротранспортних системах підприємств та оптимізувати конфігурацію транспортної мережі з урахуванням реологічних властивостей і режимів течії;

- отримали подальший розвиток методи визначення критерія бімодальності гранулометричного складу водовугільного палива, який становить відношення вмісту дрібної та відповідно великої фракції до проміжної, що дозволяє на відміну від існуючих визначити його склад в суміші і визначити доцільне співвідношення вказаних фракцій, необхідне для мінімізації витрат енергії при його транспортуванні в промислових гідротранспортних системах.

Практичне значення отриманих результатів:

- встановлення факту відповідності двошарової структури змащування при раціональних значеннях критерію бімодальності дозволило обґрунтувати наднормативний ефект впливу вказаного критерію на питомі витрати енергії при його транспортуванні. Створені основи якісної структури ВВП як змащування;

- розроблена методика визначення енергетичних витрат на транспортування ВВП в ПГТС підприємств, що дозволяє для забезпечення заданої продуктивності ГТС розрахувати параметри трубопроводу й гідравлічні параметри транспортування;

- удосконалена експериментальна установка для дослідження енерговитрат та гідродинамічних параметрів при транспортуванні ВВП по трубопроводу.

Основні результати досліджень використовуються в Східноукраїнському національному університеті імені Володимира Даля при підготовці бакалаврів і магістрів за напрямом «Транспортні технології».

Використання розроблених методик дозволяє отримати економічний ефект за рахунок зниження енергетичних витрат на транспортування ВВП і вдосконалення топології транспортної мережі в ГТС промислових підприємств теплової енергетики і вугледобувного комплексу України.

Особистий внесок здобувача. Основні положення і результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримані автором особисто. Статтю [11] підготовлено одноосібно. У спільних роботах особистий внесок автора полягає в такому: [3,4,5,9,10,14,21] – виконано аналіз технологій транспортування

ВВП у ПГТС, удосконалена математична модель течії ВВП; [1,7,8,15] – проведені експериментальні дослідження закономірностей зміни параметрів течії ВВП та енерговитрат на його транспортування від основних факторів впливу; [2,6–8] – удосконалено критерій бімодальності ГМС ВВП; [7,8,18,20] – розроблено метод визначення числа шарів дрібних часток еквівалентного діаметру; [12,13,16,17] – отримано рівняння регресії гідравлічного опору різних композицій ВВП; [1,17,19] – удосконалено методику розрахунку масової та об'ємної концентрацій твердої компоненти ВВП.

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи опубліковані в 21 науковій роботі. З них [1] монографія, [2,3,4,5] статті у виданнях, які включені до наукометричних баз: Scopus, Index Copernicus, [11,9,10,6,7,8] статті в спеціалізованих видавництвах, рекомендованих МОН України, в тому числі стаття [11] без співавторів, [14–21] роботи в матеріалах конференцій, [12,13] патенти на корисну модель України.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та п'яти додатків. Повний обсяг дисертації складає 217 сторінок, у тому числі: 63 рисунка за текстом, з них 1 на окремій сторінці, 20 таблиць за текстом, з них 1 на окремій сторінці, список використаних джерел з 146 найменувань на 16 сторінках, додатки на 11 сторінках. Основний текст роботи викладено на 190 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ І ВИВЧЕНОСТІ ПИТАННЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ ВОДОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА

1.1 Сфера застосування водовугільного палива

Сталий розвиток паливно-енергетичного комплексу України тісно пов'язаний з використанням альтернативних видів палива, які є найбільш доцільними і економічно ефективними для енергетики країни. Найбільш перспективним напрямком розвитку вугільних технологій в Україні, є використання водовугільних суспензій (ВВС) в якості альтернативного виду палива для потреб теплоенергетичного комплексу, яке неможливе без вдосконалення технологій його транспортування до енергетичних об'єктів підприємств.

Водовугільне паливо (ВВП) — це композиційне штучне рідке паливо на основі вугілля та води, за своєю структурою воно є різновидом висококонцентрованої водовугільної суспензії (ВКВС). В основу процесу його підготування покладено механохімічну активацію, в ході якої руйнується структура вугілля. Під час подрібнення вугілля збільшується його активна поверхня, а домішки видаляються. Подрібнене вугілля і воду, яка в цьому процесі відіграє важливу роль, змішують, додають реагенти-пластифікатори, в результаті чого утворюється специфічна дисперсна система, що має технологічно прийнятну текучість і стабільність. Масова концентрація ВВП — 60–80% вугілля, розмір часток не перевищує 250 мкм. Для отримання потрібної фракції вугілля використовують спеціальні подрібнювачі. Найкращі результати досягнено при отриманні бімодального розподілу часток за розмірами з певним співвідношенням великої (100–250 мкм) і дрібної (< 40 мкм) фракцій, що дає можливість без погіршення реологічних властивостей ВВП отримати ефект «максимального пакування» і значно підвищити концентрацію суспензії. Оскільки така суспензія досить швидко розшаровується з осадженням вугільних часток, до неї додають реагент-пластифікатор, масова частка якого у ВВП становить близько 1-2%. З

метою підготовки ВВП відповідно до вимог споживачів до нього можна додавати різні добавки і присадки, такі як інгібітори корозії, десульфуризатори, денітрифікатори, регулятори плавлення золи та інші.

ВВП можна приготувати майже з усіх марок вугілля, а також із відходів вуглезбагачення, проте необхідно виходити з найбільшого розповсюдження вугілля, що використовується, з метою зменшення собівартості ВВП. В'язкість кондиційних паливних ВВС, як правило, перебуває в межах 0,5–1,2 Па·с, седиментаційна стабільність — до 30 діб [1].

Транспортування такого палива, в тому числі й на відстані декількох десятків кілометрів на території підприємства, здійснюють за допомогою гідротранспортних систем (ГТС), а також у ємностях — автомобільних та залізничних цистернах [2,3]. ВВП можна застосовувати як заміник природного газу і мазуту в котлоагрегатах. Порівняно з традиційним спаленням пилоподібного вугілля (зокрема, на ТЕС) використання ВВП в теплоенергетиці дозволяє зменшити викиди в атмосферу оксидів азоту, сірки і чадного газу, а також забезпечує повноту вигорання органіки до 99%, що значно поліпшує екологічну ситуацію довкілля [4,5]. Про користь застосування ВВП в теплоенергетиці свідчать такі його переваги, як можливість найбільш повного використання інфраструктури енергетичних котлоагрегатів при мінімальній реконструкції пристроїв та систем паливоподачі, висока пакувальна щільність під час зберігання порівняно з штабелюванням сухого вугілля, повна вибухо- і пожежобезпечність, відсутність втрат при транспортуванні, можливість зберігання під землею.

Переведення енергетичних об'єктів із шаровим спалюванням вугілля марок Д, Г на спалювання ВВП дає змогу отримати економію за вартістю тепла у 1,6–2,1 рази і зменшити еколого-економічні збитки на 92%.

Промислові підприємства теплової енергетики та вугледобувного комплексу України: шахти і збагачувальні фабрики, мають у своїй структурі котельні, що працюють на кам'яному вугіллі, із загальною річною потребою підприємства до 150 тис.т.

Водовугільне паливо широко використовується в таких країнах як Китай, США, Росія, Італія, Швеція, Японія та Канада. Промислові ГТС (ПГТС) які використовуються для транспортування ВВП мають широкий спектр застосування: енергетика, металургія, виробництво будматеріалів, хімічна промисловість [4]. Споживачами ВВП можуть бути як малі, середні, так і великі промислові підприємства, підприємства теплової енергетики та вугледобувного комплексу: шахти і збагачувальні фабрики. ПГТС можуть бути транспортними артеріями паливно-енергетичних або паливно-металургійних комплексів, постачати ВВП на опалювальні, опалювально-виробничі та виробничі котельні на території підприємства [6].

1.2 Аналіз систем транспортування водовугільного палива промисловим транспортом

Перевезення ВВП на території підприємства може здійснюватись за допомогою цистерн та подібних їм резервуарів автомобільного або залізничного рухомого складу, а також засобами трубопровідного транспорту ПГТС. При перевезенні необхідно уточнювати особливі умови транспортування ВВП, так як це паливо є різновидом в'язких наливних вантажів, що застигають.

ВВП, що перевозиться в цистернах і бункерних напіввагонах, має підвищену в'язкість і згущується при зниженні температури. Ступінь в'язкості визначається в умовних одиницях – градусах.

Автомобільним транспортом ВВП перевозять в спеціалізованих автомобілях-автоцистернах або в автопоїздах, що складаються з тягача і напівпричепа-цистерни. Характеристика автопоїздів з напівпричепом-цистерною приведена в [7].

Витрати на перевезення ВВП залізницею визначені з умов специфіки роботи промислових підприємств. Питомі витрати на транспортування і початково-кінцеві операції прийняті середніми з урахуванням найбільш ймовірних маршрутів слідування, пунктів відправлення і прибуття. Ставки зборів за пода-

чу й забирання вагонів локомотивом залізниці на (з) під'їзні(их) колії(й) та інші місця незагального користування складають 2164,0 грн. за кожні 5 км відстані при загальній кількості вагонів, що подається і забирається: 26-50 вагонів за добу.

Як впливає з [8], при відстанях транспортування менш 100 км основні витрати припадають на початково-кінцеві та вантажно-розвантажувальні операції. При дальності транспортування 50 км наведені витрати складають лише 17%, при 100 км - 51%, а при відстані більше 100 км - 67%. Витрати на перевезення ВВП в загальній сумі витрат знижуються від 45% при відстані 50 км до 16% при відстані понад 100 км. Експлуатаційні витрати зі збільшенням відстані транспортування змінюються з урахуванням тарифів на перевезення вантажів залізничним транспортом у межах України [8]. Показники транспортування ВВП по маршрутах промислових підприємств можуть в кілька разів перевищувати показники для магістральної мережі залізниць.

Перевезення ВВП автомобільним транспортом, при відносно невеликих капіталовкладеннях вимагають більш високих експлуатаційних витрат в порівнянні з залізничним. Наведені витрати (для транспортної складової) приблизно в 1,6-2,0 рази перевищують аналогічні витрати на залізниці, якщо транспортування здійснюється на відстань більше 50 км. При малих обсягах перевезень, коли витрати залізничного транспорту вище зазначених в [9], переваги автомобільного транспорту зростають. Автомобільні розвезення мають також переваги на коротких (до 50 км) відстанях доставки, оскільки витрати на початково-кінцеві і вантажно-розвантажувальні операції на автомобільному транспорті помітно нижче, ніж на залізничному. Витрати враховують транспортно-експедиційне обслуговування, а також дорожню складову, обчислену за фактичними витратами на утримання і ремонт автомобілів. Питомі капітальні витрати крім вартості рухомого складу включають витрати на спорудження обслуговуючих підприємств. ВВП прийнято перевозити в автоцистернах об'ємом 12 тис.л.

Показники питомих приведених витрат на транспортування ВВП по трубопроводах приведені в [10]. Вони отримані з урахуванням питомих показників вартості будівництва лінійної частини і насосних станцій продуктопроводів. Для відстаней доставки менше 50 км прийнято, що перекачування ведеться по відводах, а при відстані більше 50 км - основними трубопроводами. Підвищення дальності транспортування також покращує питомі показники витрат, але починаючи з 50 - 100 км вплив цього фактора помітно зменшується.

Оскільки, як правило, головні споруди ГТС можуть бути об'єднані з відповідними спорудами підприємства, то фактичні показники витрат на трубопровідний транспорт будуть помітно менше зазначених в [10]. Незважаючи на це, представлена верхня оцінка витрат на трубопровідний транспорт виявилася нижче показників інших видів транспорту (рис. 1.1).

В [11] наведені основні співвіднесені витрати на перевезення ВВП різними видами транспорту. Показники відповідають вантажопотоку до 1 млн. т/рік. При такому обсязі транспортування поставки по трубопроводах вимагають значно менших витрат, ніж залізничним транспортом або автомобільним. При збільшенні відстані транспортування до 100 км і більше ефективність залізничних перевезень зростає. Для більших обсягів перевезення ВВП ефективність трубопровідного транспорту проявляється ще більш чітко.

Схематично доцільна область застосування різних видів транспорту ВВП показана на рис. 1.2. Залізничний транспорт має перевагу при дальності перевезень більше 100 км. Його ефективність підвищується при нерівномірному в річному розрізі графіку поставок ВВП і помітно залежить від вантажонапруженості залізничних мереж. Автомобільні перевезення доцільні при невеликих обсягах поставок і радіусі розвезення 40-60 км, причому зі зменшенням вантажопотоку гранична дальність перевезень підвищується. Трубопровідний транспорт ВВП ефективний при обсягах транспортування, як правило, більш 0,4-0,5 млн. т/рік. Виконані оцінки відображають середні умови. При дослідженні ефективності конкретних транспортних систем роль різних видів транспорту може змінюватися.

Розрахунки підтверджують ефективність подальшого розширення мережі трубопроводів на території підприємств. Оцінка такого приросту мережі трубопроводів по ефективній протяжності показує, що вона повинна збільшитися більш ніж на 50 км, що помітно більше, ніж просто фізичне збільшення мережі. Така відмінність пояснюється зростанням середнього діаметра і подальшої інтенсифікації транспортування ВВП.

Технічну основу ефективності трубопровідного транспорту складають: переміщення континууму, безперервний характер транспортування; об'єднання в одній транспортній структурі елементів шляху, рухомого складу і персоналу; переміщення здійснюється при стаціонарних двигунах, тарі і територіальному закріпленні обслуговуючого персоналу; можливість подачі продукту, що транспортується, безпосередньо на технологічні установки; відсутність перевалок і невеликі втрати; висока екологічна нейтральність; поліпшення споживчих властивостей продуктів в процесі їх транспортування та ін.

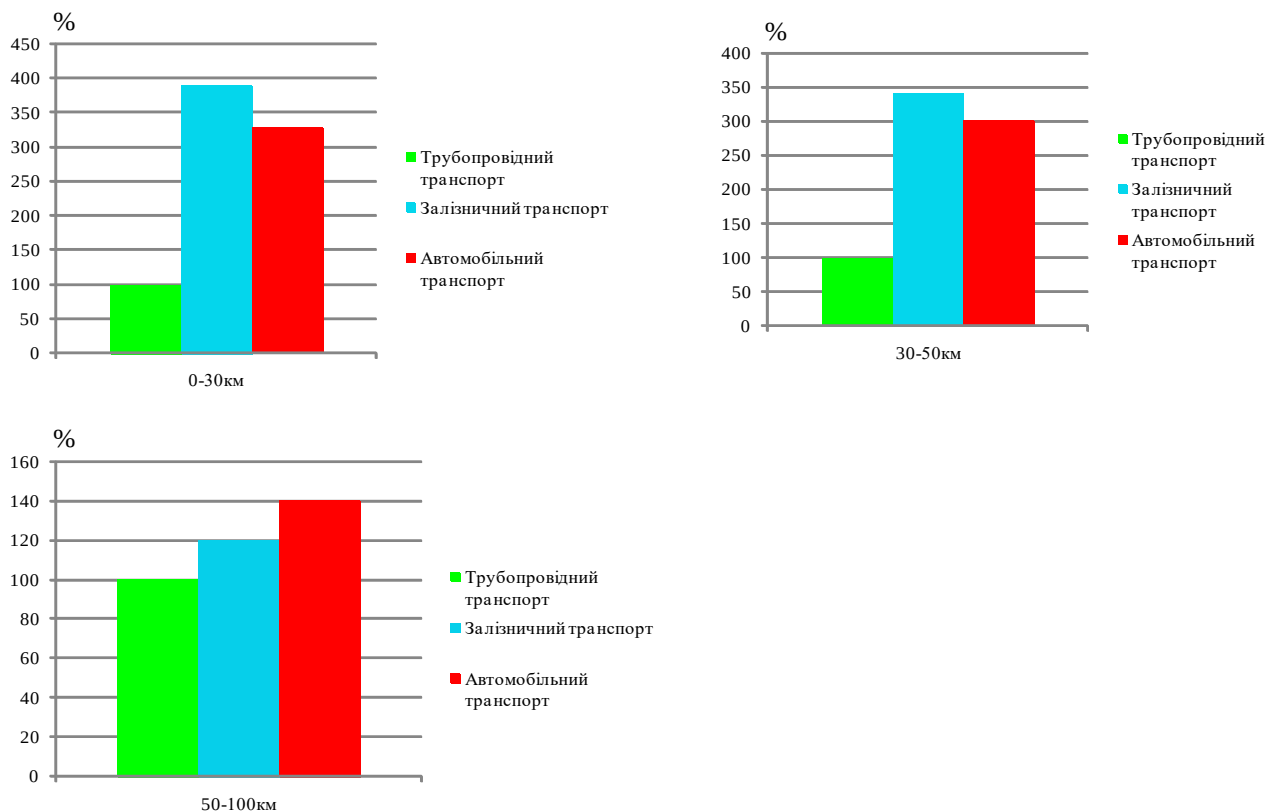


Рисунок 1.1 – Співвідношення витрат на перевезення ВВП різними видами транспорту

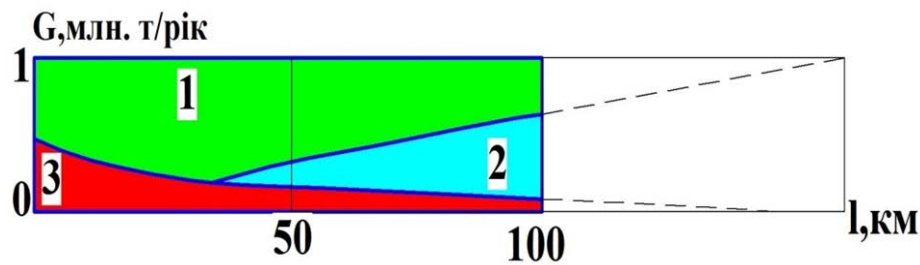


Рисунок 1.2 – Раціональна ділянка застосування різних видів транспорту для перевезення ВВП в залежності від обсягів вантажу та відстані перевезення:

1. Ділянка доцільного застосування трубопровідного транспорту (гідротранспортні системи); 2. Ділянка доцільного застосування залізничного транспорту; 3. Ділянка доцільного застосування автомобільного транспорту.

При розрахунках, обґрунтуваннях і аналізі враховуються такі форми прояву ефективності розвитку трубопровідного транспорту: поліпшення структури перевезень ВВП, вивільнення потужностей залізниць; підвищення надійності постачання споживачів ВВП; помітне збільшення продуктивності праці і вивільнення значної кількості працівників, в тому числі зайнятих на важких роботах (наприклад, на зливо-наливних операціях); висока енергетична ефективність; екологічна нейтральність; короткі терміни освоєння нових вантажопотоків; соціальні наслідки поліпшення умов праці і культури виробництва.

Ефективність трубопровідного транспорту ВВП визначається з урахуванням наступних найважливіших чинників: високої швидкості обертання та пропускної здатності; високої продуктивності праці і низької вартості перевезень; скорочення втрат і підвищення якості продукту, що транспортується; комплексування виробництва, постачання і споживання ВВП; застосування найбільш ефективної техніки і технології транспортування по трубопроводах, високої автоматизації та ін.

При визначенні ефективності поряд із загальним критерієм застосовуються також додаткові критерії і аналітичні показники - питомі капітальні вкладення і експлуатаційні витрати виробництва на обсяг транспортної роботи або в розрахунку на кінцеву продукцію, металоємність і енергоємність транспорту,

продуктивність праці, доходи і витрати транспортного підприємства, надійність транспортування, терміни будівництва трубопроводу.

Перераховані принципи єдині для всіх можливих типів завдань визначення ефективності трубопровідного транспорту ВВП: порівняння трубопровідного транспорту з іншими видами транспорту і визначення раціональної сфери його використання; визначення доцільної структури і умов розвитку мережі ГТС; визначення області застосування різних технологій трубопровідного транспорту ВВП; порівняння двох або кількох варіантів споруди ГТС; вибору з усіх можливих (або з досить великого числа варіантів) оптимальних технологічних, конструктивних параметрів і будівельних рішень ГТС; визначення величини прогнозованого, планованого або проектного ефекту експлуатації ГТС.

До складу поточних витрат включаються щорічні витрати на експлуатацію ГТС, в тому числі заробітна плата персоналу - основна і додаткова, витрати на паливо і електроенергію, вартість втрат продукту, що транспортується, плата відсотків за кредит, витрати на поточний ремонт, а також амортизаційні відрахування на повне відновлення і капітальний ремонт.

Абсолютний ефект за рік обчислюється як різниця вартості поставок (оцінок за замикаючим витрат) за вирахуванням всіх витрат на рік по всьому циклу виробництва і транспорту, а також витрат на виробництво продукції, що транспортується. Він коригується з урахуванням результатів і витрат на виробництво продукції в сполучених ланках виробництва.

1.3 Аналіз існуючих технологій підготовки і транспортування водовугільного палива в промислових гідротранспортних системах

Дослідженнями вітчизняних і зарубіжних фахівців доведена технічна можливість і економічна доцільність транспортування вугілля по трубопроводах. Вуглепровід, в порівнянні із залізничним транспортом, має ряд переваг: безперервність і рівномірність потоку, постійну (з усередненням) якість продукту, що транспортується, незалежність роботи від погодних умов, відсутність

негативного впливу на навколишнє середовище і втрат при транспортуванні. Крім того, ГТС мають значну пропускну спроможність при невеликій кількості обслуговуючого персоналу, і високий потенціал автоматизації транспортних і вантажно-розвантажувальних операцій.

Дослідженнями [12,13] встановлено вплив продуктивності і відстані транспортування на питомі експлуатаційні витрати. У цій же роботі показаний вплив дальності транспортування на капіталовкладення та експлуатаційні витрати в системах трубопровідного транспорту ВВС при пропускній спроможності млн.т на рік, концентрації вугілля - 70%, швидкості течії до 0,5 м/с і питомих втратах тиску по довжині - 64,26 кПа / км.

У світі накопичено значний практичний досвід експлуатації трубопровідного транспорту ВВС. Серед багатьох країн виділяються США, які мають у своєму розпорядженні практичний досвід спорудження та експлуатації вуглепроводів. У різних штатах США спроектовані ГТС загальною протяжністю близько 20 тис.км сумарною пропускнуою спроможністю 250 млн. т на рік [4]. Характеристика цих вуглепроводів приведена в табл. 1.2.

У Франції фірма "Nevtec" має намір проєктування углепроводу пропускнуою спроможністю 0,33 млн. т вугілля на рік і протяжністю в 7,2 км від заводу з підготовки вугілля в м. La Yauve до ТЕЦ в м. Emile. Німецькою фірмою Зальгіттер проєктується вуглепровід для сталеливарних заводів (пропускна здатність - 3-4 млн.т на рік).

Італійська фірма "Tesle Montalcone" брала участь в спорудженні ГТС з Польщі до Австрії. Його пропускна здатність - 5 млн.т на рік.

Таким чином, закордонний досвід проєктування, будівництва і експлуатації діючих ГТС показують, що в даний час виникла тенденція прискореного розвитку промислового гідротранспорту вугілля як в ще не розвинених районах, так і в районах з розвинутою інфраструктурою транспортних засобів.

За кордоном експлуатуються або знаходяться в стадії проєктування промислові трубопроводи для транспортування, як вугілля, так і інших насипних матеріалів, в основному продуктів переробки мінеральної сировини (концен-

тратів руд кольорових і чорних металів). [4,14]. Наприклад, гідротранспортна установка "Вуглепром" має наступні параметри: діаметр пульпопроводів - 244,5 мм; довжина - 5,3 км; годинна продуктивність - 280 м³/год; по твердому - 119 т/год; 3 відцентрових робочих насоса і 1 резервний; тиск - 13 бар; загальна потужність - 160 кВт; висота підйому - 12 м. Головні експлуатаційні витрати пов'язані з витратами енергії (питомі втрати тиску при транспортуванні), зі зносом труб і насосів.

Гідротранспорт вугілля з урахуванням умов фабрики "Нону" характеризується наступними техніко-економічними показниками: річний обсяг транспортування 460 тис.т, капіталовкладення 33,5 млн. франків, в тому числі вартість труб 3,5 млн. франків, насосів - 2,2 млн. франків. Вартість транспортування 1 тонни становить 12,4 фр./т, в тому числі витрати на електроенергію і поточне утримання 0,85 фр./т, зарплата персоналу (4 чол.) 1,5 фр./т (для порівняння показники вартості транспортування 1 т вугілля по залізниці -13,1 фр. / т, автомобільним транспортом - 16,3 фр. / т). Тобто, застосування гідротранспорту є економічно вигідним, у порівнянні з традиційними видами транспортування.

Водовугільна суспензія, поряд зі своїми енергетичними характеристиками, що визначають її як цінне енергетичне паливо, по суті, є гідросумішею, властивості якої впливають на параметри гідравлічного транспортування і визначають ефективність транспортування ВВП. Високі концентрації дрібнодисперсних вугільних часток надають цій гідросуміші особливі властивості, що відрізняють ВВС від звичайних однофазних гідросумішей. Дослідження цих властивостей і встановлення закономірності прояву тих чи інших особливостей є важливою технічною задачею.

Гідравлічний розрахунок трубопроводів для стабільних гідросумішей (суспензій) з найтонших фракцій (дт.ф. <50) полягає у визначенні гідравлічних втрат і продуктивності і повинен проводитися з урахуванням реологічних характеристик ВВС, які при високому вмісті в них вугілля майже завжди є неньютоновськими рідинами і, як правило, тиксотропні. Суспензії зазвичай описують

моделями псевдо пластичної рідини (статечна модель Оствальда) або в'язко-пластичні рідини (модель Бінгама-Шведова). Константи цих моделей визначаються з експериментальних даних, отриманих на трубчастих або ротаційних віскозиметрах. Вони повинні бути інваріантні щодо типорозмірів вимірювальних приладів. Однак, як показують дослідження, при визначенні реологічних характеристик вугільних суспензій спостерігається суттєва їх залежність від швидкості течії. Різниця може досягати 200%.

Таблиця 1.2 – Порівняння експлуатаційних показників промислових гідротранспортних систем розвинених країн

Гідро-транспортні системи підприємств	Країна	Довжина, км	Діаметр трубопроводу, мм	Загальна продуктивність, млн т/рік	Гранулометричний склад вантажу, мкм	Схема транспортування	Річні енерговитрати на транспортування, кВт/год.	Собівартість транспортування, грн./рік	Вартість перевезення 1ткм вантажу, грн.
“Хоумстейк”, “Маклафлін”	США	8	254	1,15	до 700	Променева	2110495,5	4917454,5	0,33
Пінто-Валлі, Арізона	США	17,6	202	0,5	0-50; 50 - 200	Послідовна	1662991,2	3874769,4	0,41
“Венг Фу”	Китай	45	260	1,25	до 250	Послідовно-променева	13149942,2	30639365,4	0,31
підприємство «Jiang CWM Corp.»	Китай	16,9	250	1,2	до 300	Послідовно-паралельна	5149782,9	11998994,1	0,41
Гуандунська ТЕЦ	Китай	47,6	240	0,9	0-60; 60 - 350	Послідовно-променева	8948901,7	20850941,1	0,27
Densecoal BASF AG» і «Salzgitter AG	Німеччина	15,4	260	0,8	до 400	Послідовно-променева	1740341	4054994,6	0,21
Co-Al	Велика Британія	23,1	240	0,85	0-40; 40 - 750	Променева	3844853,6	8958508,9	0,29
«Fluidcarbon International» (Carbogel)	Швеція	15,2	194	0,7	0-80; 80 - 300	Послідовна	3356105,4	7819725,5	0,51
ОГМК, Альматеа	Росія	26	305	2,6	0-80; 80 - 400	Послідовно-паралельна	21953023,5	51150544,6	0,47
Акіта	Японія	64	200	0,9	до 450	Послідовно-паралельна	22007492,1	51277456,6	0,56
“Вайпіпі”	Нова Зеландія	6,4	203	0,5	0-90; 90 - 600	Послідовно-променева	595187,9	1386787,7	0,22
Мерлебак, Лорейн	Франція	9	330	1,5	до 650	Променева	1779209,9	4145559,2	0,23
Ель-Сальвадор	Чилі	22,4	190	0,31	до 1000	Послідовно-променева	945029,5	2201918,8	0,20
Гладстон, Квінсленд	Австралія	24,2	243	0,6	0-70; 70 - 300	Променева	1855672	4323715,7	0,22
Сан-дерсвілл, Джорджія	США	45	200	0,4	0-80; 80 - 350	Послідовна	2746586,8	6399547,2	0,33

Інтенсивні наукові дослідження щодо підготовки та транспортування ВВП промисловим гідротранспортом розпочалися наприкінці 50-х років XX ст. в Японії, США, Італії, ФРН, Китаї та СРСР. Існують такі основні світові наукові центри, які виконували дослідження щодо цих проблем: • корпорація «Energy and Environmental Research Center» (EERC, США, шт. Огайо) — досліджує технологію транспортування ВВП Cofiring; • науковий центр Пенсильванського університету та фірма «Pennsylvania Electric Company» (PENELEC) — розробляють технології підготовки та транспортування ВВП на збагачувальній фабриці «Homer City», • фірма «Snamprogetti» (Італія) — здійснює транспортування комплексом «Porto Torres», транспортування ВВП обсягом 500 000 т/рік; • корпорація «Jiang CWF Co.» (Китай) — експлуатація в тому ж напрямі; • корпорація «Nissho Iwai Corp.» і об'єднання «JGC» (Японія) — використовують транспортний комплекс ВВП на фабриці «Yangji» в провінції Шаньдун (Китай), транспортують ВВП для використання на підприємствах хімічної компанії «Tausa Co.» (Окаяма), продуктивність 250 000 т/рік за ВВП; • компанія «Japan Coal Oil Mixture» (Японія) — використовує ГТС продуктивністю 600 000 т/рік, • корпорації «Nissho Iwai and Ube Industries » (Японія) та «Coal & Allied Industries Ltd.» (Австралія) — виконали новий проект транспортування ВВП у порту Ньюкасла продуктивністю 4 млн т/рік.

На території минулого СРСР транспортуванням ВВП займалися у «ВНИИПИ гидротрубопровод», Інституті фізичної хімії АН СРСР, Інституті гірничої справи ім. О.О. Скочинського, Інституті горючих копалин, «ВНИПИ гидроуголь». В Україні роботи даною тематикою тривають в Інституті гідромеханіки НАН України, Інституті колоїдної хімії та хімії води ім. А.В. Думанського НАН України, Інституті фізико-органічної хімії та вуглехімії ім. Л.М. Литвиненка НАН України, Інституті геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, у Науково-дослідному і проектно-конструкторському інституті «УкрНДІ гідровугілля» (нині НДПКІ «Вуглемеханізація»).

Серед значних світових лідерів у впровадженні технічних рішень транспортування ВВП можна назвати основні фірми США (Пенсильванський Уні-

верситет, корпорацію EERC, Університет Північної Дакоти), Канади («Cape Breton Development Corporation»), Італії («Snamprogetti»), Німеччини («Salzgitter»), Швеції («AB Carbogel»), Франції (Дослідницький центр «Elf solaise») [19]. В Україні — Донецьке відділення трубопровідного транспорту (нині — НВО «Хаймек»).

Загалом технологія підготовки ВВП передбачає стадії збагачення, послідовного подрібнення його до розмірів 0–100 (200–250) мкм, гомогенізації суспензії з пластифікаторами. Найбільш відомі зарубіжні технології підготовки ВВП: «Reocarb» (Італія, СРСР), «Carbogel» (Швеція, Канада), «Co-Al» (Велика Британія) [15,16,17].

В Україні запропоновано інноваційну технологію підготовки ВВП з урахуванням досвіду технологій «Reocarb». Помел вугілля здійснюють одностадійно в кульовому млині. Потрібного ГМС досягають зміною кількості й діаметра тіл, що мелють в кульовому млині. Запропоновано завчасне перемішування вугілля і води, після чого суміш надходить на помел. Запропонована технологія підготовки суміші до помелу дає змогу майже в 2 рази зекономити електроенергію у процесі приготування ВВП, а також істотно поліпшити його транспортні та споживчі властивості, зокрема підвищивши седиментаційну стійкість. Технологію використовують в Україні для отримання експериментальних партій ВВП (НВО «Вуглемеханізація»).

В Японії компаніями «JGC» і «Nissho Iwai Coal Corp.» спільно з Об'єднанням шахт Янчжоу (Китай) було засновано підприємство «Janri CWM Corp.», яке стало до ладу в 1992 р. і є прикладом організації транспортування ВВП в ПГТС. Ще одним японським лідером транспортування ВВП є компанія «Japan SOM», яка у співдружності з енергетичними компаніями «Tokio Electric Power Co.», «Tohoku Electric Power Co.» і «Joban Joint Power Co.» у 1993 р. експлуатує промисловий ГТС-комплекс в Онахамі продуктивністю 500 000 т/рік [18].

Російські (ЗАТ НВП «Сибэкотехника») і Українські (ІТМ НАН України) фахівці запропонували оновлену технологію транспортування ВВП, засновану

на принципі кавітації. При масовій концентрації вугілля до 70% ВВС на основі вугілля марки Д, Г залишається стабільною до 1 року.

У США, при підтримці компанії EERC, спроектовано оригінальну технологію транспортування ВВП «Hot Water Drying», що ґрунтується на гідротермообробленні ВВП.

Останнім часом процес транспортування ВВП значно активізувався в Україні. Перспективи подальших досліджень транспортування перебувають у площині зниження енерговитрат на його транспортування, забезпечення максимальної концентрації твердих часток, глибокого фундаментального вивчення реології і стабільності ВВП з позицій теорії стійкості ліофобних колоїдів.

У галузі теорії транспортування ВКВВС промисловим гідротранспортом можна підкреслити три підходи: класично-гідродинамічний, емпіричний і нетрадиційний — на основі фізичної теорії стійкості колоїдних систем (теорія ДЛФО) [19,20]. Академічні та відомчі установи України в цілому завершили етап розроблення фізико-технічних основ транспортування ВВП. На основі фундаментальних теоретичних і експериментальних досліджень отримано головні залежності, які характеризують ВВП. Загалом їх можна виразити за формулою:

$$\tau = f(\varepsilon', d_r, C, P_{\text{пласт}}, A^d, V^{daf}, pH, t^o, T) \quad (1.1)$$

$$\tau = f(\eta), \eta = f(\varepsilon')$$

де τ — напруженість зсуву; ε' — градієнт швидкості; d_r — ГМС; C — концентрація суспензії (масова); $P_{\text{пласт}}$ — пластифікатор; A^d — зольність (на суху масу); V^{daf} — вихід летючих речовин; pH — водневий показник води; t — температура зовнішнього середовища; T — тривалість зберігання.

В Україні існує підприємство з виробництва ,будматеріалів де застосовується ГТС для транспортування ВВП до котельних установок виробничого призначення (Завод теплоізоляційних матеріалів, м. Сінельникове). Реалізовано проект по переобладнанню шахтних котелень на використання ВВП (компанія “Українське тепло”). Технологія транспортування ВВП впроваджується на

державному рівні Державним підприємством «Уктеплоком», як складової національного проекту «Енергія природи». Підприємство реалізує проект гідротранспортування ВВП до комунальних котелень.

В результаті виконання аналізу функціонування різних ГТС промислових підприємств України і розвинутих країн було встановлено, що існуючі технології транспортування висококонцентрованого ВВП не враховували особливості технології його приготування з точки зору властивостей вихідного вугілля і не припускали дотримання раціональних пропорцій різних фракцій гранулометричного складу ВВП. Відсутність достатньо точного методу і моделі визначення гідравлічних параметрів транспортування ВВП в ГТС промислових підприємств значно ускладнює процес транспортного обслуговування споживачів ВВП.

1.4 Аналіз методик побудування схем транспортування водовугільного палива промисловим гідротранспортом

1.4.1 Маршрутизація транспортної мережі промислових підприємств

Завдання маршрутизації в широкому сенсі є завданням поточного планування, в процесі якого вибираються об'єкти і визначаються траєкторії і розклад їх руху. В умовах кожного завдання маршрутизації міститься опис мережі комунікацій, що визначає безліч можливих шляхів проходження до мети одного або декількох об'єктів. Як правило, структурні параметри мережі залишаються незмінними від початку і до закінчення процесу вирішення завдання.

Завдання маршрутизації на трубопровідному та інших видах транспорту і методи їх вирішення вивчаються в рамках наукового напрямку - транспортної логістики, математичний апарат якої представлений теорією графів і дослідженням операцій. Опис транспортної мережі містить один або кілька параметрів (відстань, пропускну здатність, обмеження на швидкість та ін.). Вартість перевезення може залежати як від протяжності, так і від завантаження транс-

портного засобу (ТЗ). Визначеність означає, що сформульовані в завданні умови переміщення замовлень не змінюються в процесі її вирішення. Такі завдання маршрутизації називаються статичними. Завдання з невизначеними розпливчастими умовами рішення відносяться до класу динамічних задач транспортної логістики [21,22].

Має місце певний набір інших властивостей, які доповнюють умови перевезення: характеристики пунктів виробництва і споживання, баз ТЗ, вид вантажу, обмеження на місткість ТС та інші обмеження, властиві реальному транспортному процесу.

Цільова функція задачі класу маршрутизації носить економічний сенс. Як правило, метою вирішення завдання є мінімізація вартісних або тимчасових витрат на перевезення вантажів або пасажирів.

Умови реального транспортного процесу, представлені системою обмежень завдання, істотно ускладнюють побудову її точного рішення. У переважній більшості завдання маршрутизації NP-повні [22].

Одним із завдань транспортної логістики прийнято вважати класичну задачу маршрутизації (VRP - Vehicle Routing Problem), поставлену Данцигом і Рамсер [23]. Вона полягає в тому, що кожному споживачеві i , $i = 1, n$, повинен бути доставлений однорідний вантаж в необхідній кількості d_i з єдиної бази $n + 1$ при використанні K ТЗ однакової місткості S . Вартість d_{ij} перевезення з пункту i в пункт j , $i, j \in N \cup \{n + 1\}$, $|N| = n$, не залежить від обсягу (ваги) вантажу, і $d_{ij} = d_{ji}$.

Також мають широке поширення завдання комівояжера, гамільтонове і загальне завдання комівояжера (ЗК) і завдання типу листоноші. У ЗК потрібно знайти циклічну перестановку τ^* номерів стовпців матриці вартості $[d_{ij}]_n$ з дійсними невід'ємними числами d_{ij} , $i \neq j$, $d_{ii} = \infty$, $i = \overline{1, n}$ що мінімізує цільовий функціонал:

$$D(\tau) = \sum_{i=1}^n d_{\tau[i]} \quad (1.2)$$

де $\tau = (\tau[1], \tau[2], \dots, \tau[n])$ - циклічна перестановка або обхід, якому відповідав би маршрут комівояжера $(\tau[1], \tau[2], \dots, \tau[n], \tau[1])$, де номери $\tau[1], \tau[2], \dots, \tau[n]$ з множини $(1, 2, \dots, n)$ пунктів різні.

Величину $D(\tau)$ називають вартістю обходу [24]. У ЗК перетворюються широко відомі завдання маршрутизації. Розглянута задача відома як множинна ЗК [25]. Пошук K_{opt} слід починати з вивчення властивостей вихідної матриці вартостей $[d_{ij}]_{n+1}$.

З опису базової моделі транспортної мережі слідують різні постановки практично важливих задач побудови маршрутів, які відповідають заданим обмеженням і оптимальних в сенсі певного критерію. Одним з обмежень, істотно ускладнює вирішення цих завдань, є вимога замкнутості маршрутів, яку висувають в тих випадках, коли ТЗ починає і закінчує переміщення в одному пункті [25,26]. Інше обмеження полягає в тому, що замкнутий маршрут руху ТЗ повинен включати задані пункти і ділянки транспортної мережі. Необхідно, щоб замкнутий маршрут проходив кожен зазначений пункт і кожен вказаний пункт точно один раз.

Замкнутий маршрут, що проходить по кожній зазначеній ділянці і пункту мережі в точності один раз, а за допомогою одного з пунктів, що залишилися не більше одного разу, називається кільцевим [22]. Маршрут вважається оптимальним, якщо він має мінімальну вартість (протяжність) серед всіх кільцевих маршрутів мережі.

Необхідність побудови замкнутих маршрутів, що проходять по всіх ділянках транспортної мережі, якій відповідає зв'язний граф H з непарними і парними ступенями вершин, викликає рішення відомої задачі про китайського листонашу (ЗКП).

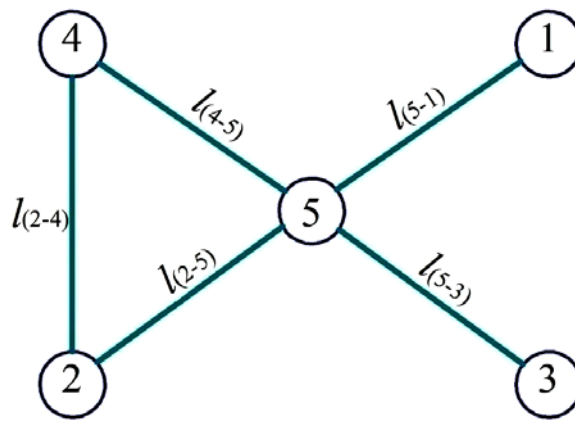


Рисунок 1.4 – Приклад вирішення множинної ЗК (транспортна мережа Гуандунської ТЕЦ (Китай)): 1-4 – пункти споживання ВВП 5 – пункт відправлення ВВП

Потрібно знайти в графі $H = (V, U)$, цикл, що включає всі вершини з N і все ребра з R і має мінімальну суму ваг входять до нього ребер. Очевидно, якщо цей цикл простий, то він є оптимальним кільцевим маршрутом на транспортній мережі (рис. 1.5.). Варіюючи вихідною інформацією представленої моделі, легко отримати формулювання відомих і нових завдань маршрутизації.

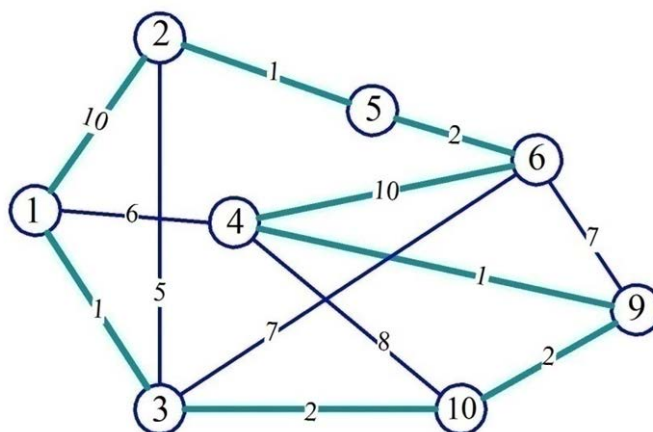


Рисунок 1.5 – Приклад транспортної мережі - Об'єднання вугільних шахт «Janri CWM Corp.» (Японія): оптимальний кільцевий маршрут (1,2,5,6,4,9,10,3,1)

У роботі [23,114] зроблено спробу оптимізувати наведені витрати на функціонування ГТС, які пропонувано обраховувати з виразу (який, вочевидь слугує при вирішенні даної задачі функцією цілі):

$$W = (a + E) \sum_{i=1}^m (c + bD_i^\alpha) l_i + B_l Q(H_0 + H_c),$$

де a — коефіцієнт відрахувань на амортизацію, капітальний і поточний ремонт і обслуговування трубопроводів; E — нормативний коефіцієнт окупності капітальних вкладень у транспортну мережу; m — кількість конструктивних ділянок; a , b і α — коефіцієнти і показник ступеня полінома, що апроксимує кошторисну вартість трубопроводів; D_i — діаметр труб на конструктивній ділянці; l_i — довжина конструктивної ділянки; B_l — коефіцієнт, величина якого для конкретних умов є постійною; Q — подача джерела живлення; H_0 — наведений напір у диктованій точці відносно рівня рідини в живлючому резервуарі насосної станції; H_c — втрати напору в транспортній мережі.

Однак відсутність певного алгоритму оптимізації топології (схеми взаєморозташування трубопроводів) ГТС, а також провідних співвідношень для визначення втрат тиску для конкретних гідросумішей зводить цю спробу у теоретичному сенсі нанівець. У такій постановці слід експериментально визначати гідродинамічні показники кожної з транспортованих речовин, включно з залежністю гідравлічного опору від швидкості транспортування, що унеможливило б реальне використання пропонованої автором методики розрахунку гідротранспортних систем таким чином.

На сьогоднішній час найбільш розповсюдженими варіантами побудови транспортних мереж на промисловому гідротранспорті є мережі з послідовно-променевим і променевим з'єднанням пунктів відправлення та споживання вантажу, тупикові, кільцеві та мережі з променевим з'єднанням.

Недоліком існуючих алгоритмів побудови транспортних мереж на промисловому гідротранспорті є відсутність раціонального оптимізаційного підходу до вирішення необхідних завдань з урахуванням специфіки експлуатації промислових ГТС [27]. Існуючі алгоритми не дозволяють визначати оптимальні схеми транспортування, оптимальні параметри роботи гідротранспортних сис-

тем підприємства (діаметри трубопроводів, параметри транспортних насосів, швидкості транспортування і втрат тиску на ділянках транспортної мережі).

Відсутність раціональної топології транспортної мережі роздачі по пунктах споживання вантажу, оптимізації наведених сумарних витрат на трубопроводи, насосне та інше обладнання, електричної енергії на транспортування і визначення діаметрів трубопроводів елементів ПГТС призводить до підвищення капітальних та експлуатаційних витрат на транспортування.

Тому актуальним питанням сьогодення, вирішенням якого займаються більшість вчених та наукових організацій [2,11,14,20,28], є формалізація оптимізаційної моделі вибору параметрів гідротранспортної системи промислового підприємства, що дозволить вирішити задачу мінімізації витрат на транспортування вантажів трубопровідним транспортом.

1.5 Оцінка впливу характеристик водовугільного палива на ефективність його транспортування

Підготовка ВВП обумовлена складом вихідних компонентів, типами обладнання, що використовується і режимами роботи обладнання.

Варіанти використання вихідних матеріалів:

1. вугілля;
2. шлами збагачувальних фабрик (хвости);

Основним матеріалом для підготовки суспензії є вугілля і добавки, що сприяють стабілізації суспензії і зниження в'язкості.

1.5.1 Вплив концентрації твердого компонента на реологічні властивості водовугільного палива

Характер залежності граничного напруження зсуву в залежності від масового вмісту твердого компонента має дві характерні межі - дві критичні концентрації - початкову (мінімальну) C_1 , відповідної початку структуроутворення, і C_2 , при якій починається різке зростання напруження $\tau_{\text{гп}}$ (рис. 1.6.). Для значно

стабілізованих ВВС значення $\tau_{гр}$, при $C < C_2$ незначне ($\tau_{гр} \rightarrow 0$). Однак при наближенні C до C_2 і особливо при $C > C_2$ виявляється різке зростання значень $\tau_{гр}$ навіть при відносно невеликих змінах C . Для ВКВВС найбільший інтерес представляє область $C_1 < C < C_2$. Ваговий вміст твердих частинок ВВП характеризується його концентрацією. В'язкість суспензії з великою концентрацією твердої речовини досить висока і, відповідно, суспензія стає менш текучою.

На рис. 1.6. показано вплив концентрації твердої фази на властивості суспензії (з вугілля марки Г). При цьому концентрація змінювалася від 60% до 65% [17].

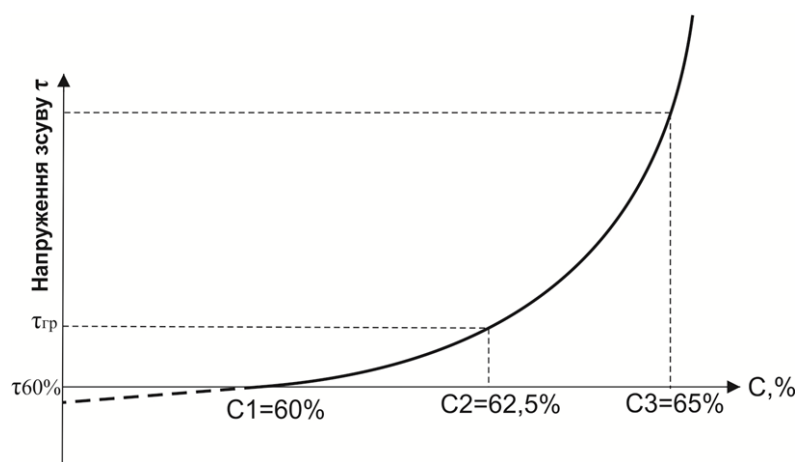


Рисунок 1.6 – Залежність граничного напруження зсуву ВВП від концентрації твердої фази

Для грубодисперсних ВВС при масовому вмісті твердої фази, близькою до 50%, зольність вугілля в межах 10-14% забезпечує практично ньютонівську в'язкість, і необхідність в модифікації дисперсної системи шляхом використання ПАР відпадає. Для ВКВВП присутність навіть незначної кількості глинистих речовин може служити причиною істотного зростання в'язкості суспензій і втрати ними плинності.

Таким чином отримання оптимального гранулометричного розподілу часток твердої фази є необхідною умовою підготовки прийнятного для гідротранспортування ВВП.

Великий внесок у розвиток технологій підготовки, вивчення структурно-реологічних характеристик ВВП в цей період внесли: Костовецький С.П., Хо-

даков Г.С., Чіненков І.А., Толасов Ю.А., Єрохін С.Ф., Світлого В. Г., Карліна Т.В., Олофінський Е.П., Кондратьєв А.С. та інші.

ВВС характеризуються такими основними параметрами і технологічними ознаками; ГМС, в тому числі максимальною крупністю вугільних частинок в суспензії, масовою часткою твердої фази, зольністю вугілля в суспензії, реологічними характеристиками, наявністю або відсутністю реагентів-пластифікаторів, здатність зберігати властивості при зберіганні та транспортуванні.

Відповідно до граничними значеннями діапазонів зміни максимальним розміром частинок і їх часткою в суспензії пропонується наступна класифікація ВВС по групах.

При гідравлічному і механогідравлічному видобутку вугілля утворюються низько концентровані вугільні пульпи з максимальною крупністю частинок до 100 мм. Гідротранспорт вугільних пульп здійснюється, як правило, на невеликі відстані (до 10-15 км) за допомогою високонапірних насосів по трубопроводах в турбулентному режимі.

Для гідротранспорту на відстань 30 км і далі найбільш прийнятними є Грубодисперсні середньо концентровані і тонкодисперсні висококонцентровані водовугільного суспензії.

Вода в суспензії є інертним матеріалом, що знижують теплотворну здатність палива. Тому в процесі приготування необхідно домагатися максимального значення масової концентрації твердої фази, при забезпеченні необхідної плинності суспензії. Ефективними способами для досягнення оптимального з точки зору теплотворних властивостей і транспортабельності водовугільних суспензій є управління гранулометрическим розподілом часток твердої фази і застосування реагентів-пластифікаторів.

Найважливішими характеристиками ВВС, як штучного енергетичного палива, що визначають теплотворну здатність і транспортабельність, є реологічні параметри і стабільність тобто здатність зберігати внутрішню структуру і тривалий час не розшаровуватися на рідку і тверду фази.

У роботах Брагіна Б.Ф., Мурко В.І., Урьєв Н.Б., Власова Ю.Ф., Білецького В.С., Світлого Ю.Г., Круть О.А. та ін. неодноразово говорилося про те, що реологічні і транспортні характеристики ВВП безпосередньо залежать від концентрації твердого компонента в суміші і його гранулометричного розподілу. Величина концентрації залежить від щільності упаковки, максимальне значення якої досягається шляхом змішування двох, трьох і більше класів крупності твердого компонента при відсутності в суміші проміжних класів.

В даний час відомо два способи підготовки ВВП. Як зазначалося раніше, традиційним є отримання бімодального складу вугілля шляхом його двухстадійного помелу в кульових і стрижневих млинах. Перша стадія помелу здійснюється шляхом мокрого помелу твердого компонента в кульових млинах. Подрібнення до розміру 40 мкм піддається тільки 30% вихідного матеріалу з розміром частинок 0 ... 3 мм [17].

На другій стадії подрібнення здійснюється в стрижневих млинах, в які подається 70% вихідного матеріалу (1 ... 3 мм), а також продукт помелу в кульових млинах і технічна вода. На цій стадії виконується остаточний помел, ретельне перемішування ВВС, фільтрація. Слід зазначити, що пластифікатор вводиться при здійсненні першої стадії помелу в кульових млинах [17].

Аналіз досліджень свідчить про можливість отримання необхідного бімодального гранулометричного розподілу часток при виконанні однієї стадії помелу в кульовому млині, шляхом зміни гранулометрії тіл, що мелють. [30].

Стабільність ВВП є основною вимогою, яка пред'являється до нього при зберіганні і транспортуванні. При цьому під стабільністю слід мати на увазі властивість суспензії зберігати початкові седиментаційних, реологічні та енергетичні характеристики при зупинці ПГТС, тривалому зберіганні або транспортуванні на значні відстані. Вона обумовлена присутністю певних коагуляційних структурних зв'язків між частинками, що є результатом дії молекулярних сил, здатних проявляти початкове напруження зсуву з пружинними деформаціями структурних зв'язків [29].

В окремих випадках можливі прояви седиментації, очевидним наслідком

якого є перерозподіл вугільних частинок тонкого помелу за обсягом суспензії, тобто спостерігається її розшарування.

Гідравлічні і кінематичні характеристики таких гідросумішей повністю визначаються розміром твердих частини і їх концентрацією в обсязі суміші. При русі гідросуміші тверді частинки під дією сили тяжіння прагнуть вниз, а при припиненні руху випадають на дно трубопроводу. Таким чином, гідросуміш існує тільки в процесі руху. Фізичні властивості гідросумішей обумовлюються властивостями її рідкої і твердої фаз. Наявність твердих частинок в гідросуміші вносить істотні зміни в структуру потоку в порівнянні з потоком чистої рідини. Різноманітність умов технологічних процесів переробки вихідної мінеральної сировини (вугілля) визначає склад твердих частинок по крупності, концентрації їх в потоці і інші характеристики.

Дослідження, проведені різними авторами [30–33], показали що для твердих частинок, що відносяться до кожного з зазначених вище видів гідросумішей, характерний певний гідродинамічний вплив при обтіканні їх потоком. Для структурних гідросумішей цей вплив визначається законом Стокса (область переважно впливу в'язкості), для неоднорідних грубодисперсних гідросумішей - квадратичною залежністю опору руху і швидкості, для грубодисперсних - опором певної в'язкості і турбулентності потоку. Гідродинамічний вплив рідини на тверді частинки в полідисперсних гідросумішей може мати одночасно всі зазначені особливості. Дослідження по транспортуванню в трубопроводах суспензій з вугілля при високих об'ємних концентраціях раніше майже повністю були відсутні.

Роботи з підготовки та транспортування ВВС передбачалося провести в два етапи. На першому, за технологічною схемою, наведеною на рис. 1.7 були отримані ВВС з задовільними для трубопровідного транспорту властивостями. При цьому в кульову млин 5 (рис. 1.7) подавали 350 кг/год вугілля кл. 0-3 мм із середньою вологістю 13,3%, 450 л води і 32 л/год 40%-ного розчину пластифікатора. В результаті тонкого подрібнення вугілля масова частка твердого складала 43,6%, а вихід фракцій класу $<0,025$ мм - 80,9%. У стержневий млин по-

давали 1900 кг/год вугілля із середньою вологістю 13,3%, 1,345 л/год суспензії з кульового млина та 600 л/год води.

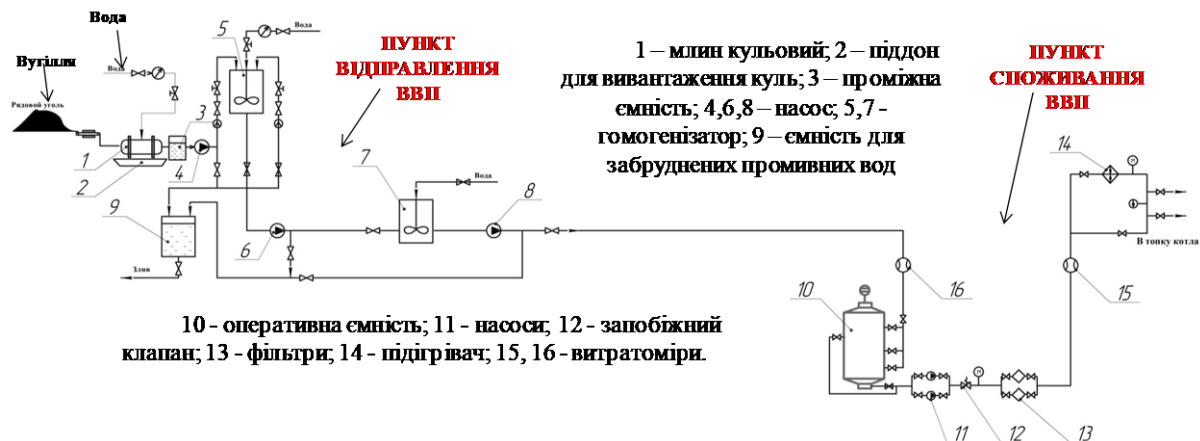


Рисунок 1.7 – Схема транспортування водовугільного палива промисловим гідротранспортом

Кінцева ефективна в'язкість ВВС при цьому становила 0,81-0,95 Па·с при швидкості зсуву 16,2 с⁻¹. Як вказується в [34], зміни в'язкості залежали від коливань масової частки твердої фази і зольності вихідного вугілля. Приготовану суспензію зберігали в акумулюючій ємності місткістю 450 м³ від 10 до 33 діб. За час зберігання вона не розшаровувалася і не втрачала плинності.

Експерименти, проведені на кільцевому гідродинамічному стенді, показали на деяку мінливість реологічних характеристик, особливо за величиною в'язкості суспензії [17,35], але при цьому зберігалася седиментаційна стійкість для ВВС. Відзначається утворення осаду в початковий період транспортування, що пояснювалося високою температурою приготовленої партії суспензії. Підвищення в'язкості на виході з кільцевого трубопроводу для ВВС (ЛСТ) в 6 разів, а для ВВС (ВЦР) в 2,1 рази могло бути викликано «старінням» суспензії при багаторазовому проходженні по кільцевому трубопроводу, що вказує на залежність реологічних характеристик даних ВВС від часу.

1.5.2 Вплив гранулометричного складу на реологічні характеристики водовугільного палива

Провідними зарубіжними і вітчизняними вченими виділено найваж-

ливіші технологічні чинники, які визначають властивості структурованих ВВС, найбільш значущим на їхню думку є ГМС вугілля, що отримується в результаті подрібнення різними млинами і пристроями. Результати досліджень провідних вітчизняних фахівців [4,6,34] і світовий досвід впровадження технологій підготовки ВВП [2,19,31,34,35,36] свідчать про те, що досягти максимальної концентрації, а, отже, енергетичного потенціалу палива можна тільки при бімодальному ГМС твердої фази, що забезпечує максимальну упаковку частинок [34,35,37,38]. При цьому ВВП, у якого склад твердої фази характеризується бімодальністю, володіє найбільш оптимальними, з точки зору рухливості і плинності, а отже і транспортування властивостями, статичної та динамічної седиментаційною стабільності, а також агрегативної стійкості [17].

З огляду на це найбільш раціональним напрямком оптимізації технологій приготування ВВП є вибір параметрів технології подрібнення вихідного вугілля, що забезпечують бімодальний ГМС твердої фази. На сьогоднішній день для подрібнення вугілля при приготуванні ВВП зазвичай використовуються барабанні і стрижневі млини [4,39], а також інші менш енерговитратні технології подрібнення і гомогенізації ВВП.

У роботах багатьох вчених на сьогоднішній день величезна увага зосереджена на технічних рішеннях, які забезпечують бімодальний ГМС твердої фази ВВП [4,38]. Вирішення цієї проблеми стримується відсутністю науково обґрунтованих параметрів ГМС, що характеризують його бімодальність, і забезпечують необхідні реологічні і седиментаційні властивості. В результаті вченими поставлені ключові питання [37,38]: - чому бімодальний ГМС твердої фази забезпечує такі ефекти; - яке співвідношення розмірів частинок забезпечує оптимальні властивості ВВП; - який розподіл фракцій за розмірами частинок є раціональним; - яким має бути вміст фракцій, які перебувають між модами діаметрів частинок.

Дослідження показали, що для приготування ВВП максимально можливої концентрації слід подрібнювати вугілля до ГМС максимальної упаковки, який в першому наближенні описується формулою Альфреда [17]. Найкращі результа-

ти по щільності упаковки для вугілля отримані при $n = 0,3 \dots 0,5$ і верхній межі крупності (0,25 - 0,35) мм. Гранулометричний розподіл за формулою Альфреда передбачає наявність у вугіллі від 5% до 20% колоїдних частинок, крупність яких не перевищує 0,003 мм, що знаходяться в дефлокулірованном стані і перешкоджають осіданню більших частинок при русі потоку в ламінарному режимі. У той же час, сприяючи підвищенню плинності суспензій і як наслідок зниження енерговитрат на транспортування ВВП, колоїдні частинки вимагають збільшення енерговитрат на їх отримання і збільшують вартість підготовки ВВП.

При проведенні досліджень в якості тіл, що мелють використовувалися сталеві кулі діаметром 10 мм, 20 мм і 40 мм і були прийняті варіанти завантаження млина.

Крім того в ВВП, призначеному для транспортування, вміст твердої фази вугілля має бути не менше 60%, максимальний розмір часток вугілля не повинен перевищувати 280 мкм, а ефективна в'язкість повинна бути такою, щоб втрати напору не перевищували 0,1 МПа / км протягом всього процесу транспортування [14]. Перші два із зазначених вимог обумовлені процесом його використання, а останнє - особливостями гідротранспортування.

В результаті виконання аналізу експериментальних даних, представлених у вигляді залежності дотичних напружі τ від градієнта швидкості $\dot{\epsilon}$ і ГМС подрібненого вихідного вугілля при різних масових концентраціях ВВП (рис.1.8), свідчать про те, що реологічні характеристики ВВП погіршуються при почерговому використанні варіантів закладки куль барабанного млина. При цьому незалежно від ГМС подрібненого вихідного вугілля і концентрації суспензії всі розглянуті криві вказують на псевдопластичні рідини характер перебігу (рис.1.8.) [14,17,31].

Дослідження залежності ефективної в'язкості суспензії від концентрації і ГМС показало, що найбільш переважними з точки зору структурно-реологічних характеристик і параметрів транспортування ВВП є технологічні варіанти 1 і 2. Зниження ефективної в'язкості ВВП, при відповідному підході управління її

найближчими днями, сприяє зниженню витрат енергії на його транспортування промисловим трубопровідним гідротранспортом.

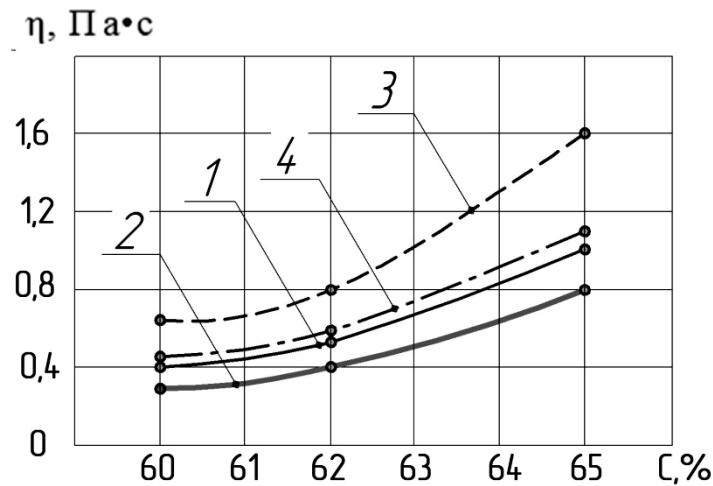


Рисунок 1.8 – Залежність ефективної в'язкості від масової концентрації і гранулометричного складу ВВП при постійній швидкості транспортування $\dot{\epsilon}=9\text{с}^{-1}$: 1, 2, 3, 4 – варіанти гранулометричного складу

Оцінка впливу гранулометричних характеристик вугілля на характеристики і енерговитрати транспортування ВВП проводилася на підставі седиментаційних і реологічних досліджень [28,34,36].

Настільки значна втрата седиментаційної стійкості при використанні завантаження млина за варіантом 1 пояснюється перенасиченням суспензії колоїдними частинками до такої міри, коли вони вже не можуть перебувати в дефлокульованому стані, що викликає різку зміну реологічних властивостей суспензії і призводить до зростання енерговитрат на транспортування в ГТС. Це підтверджується результатами досліджень ряду авторів, які вказують на те, що наявність в суспензії більше 30% дрібних часток викликає додаткову флокуляцію дисперсної системи, яка спричиняє різка зміна її реології в часі [40,41,42].

Запропонована порівняльна оцінка впливу ГМС тіл, що мелють на вихід класу крупності (0-0,02) мм в процесі подрібнення, виконана в залежності від середньозваженого діаметра куль, що завантажуються в млин носить експериментальний характер і не охоплює весь можливий діапазон розмірів завантаження куль в млин, що не дозволяє користуватися запропонованими залежно-

стями на інших типах млинів.

Виконаний аналіз даних досліджень дозволяє стверджувати, що в роботі не були запропоновані конкретні закономірності управління подрібненням вугілля для отримання ГМС максимальної упаковки, не освітлені питання перерахунку діаметра куль по закладці для інших типів барабанних млинів.

В роботі [20] встановлено, що тип тіл, що мелють надає неоднозначний вплив на кількість тонкої фракції. На початкових стадіях дроблення цей вплив помітніше. При збільшенні часу помелу різниця виходу тонкої фракції практично зникає і становить всього 1-3%. Бімодальний гранулометричний склад має місце бути, так як подрібнення здійснюється в кульової млині. Таким чином, кращі властивості ВВП з суміші кам'яного і бурого вугілля отримані в області формування бімодального гранулометричного складу і, отже, завдяки цьому ефекту.

В роботі [19] були визначені емпіричні дані і знайдена залежність, що дозволяє прогнозувати зміну якісних характеристик ВВП від фізико-хімічного складу вугілля: змісту твердої фази в суспензії від зольності, максимальної вологості, гігроскопічної вологи і вмісту кисню. На підставі методу кореляційного аналізу отримана залежність, що описується лінійним рівнянням множинної регресії:

$$C_{TB} = 62,0 - 0,284A^d + 0,093W^{\max} - 0,947W^{PI} - 0,0364O^{daf} \quad (1.3)$$

де C_{TB} – максимально досяжний вміст твердої фази в ВВС, %; A^d , $W^{\max}$, W^{PI} , O^{daf} – відповідно, зольність, максимальна вологості, гігроскопічна волога і вміст кисню, %.

Визначено, що зі збільшенням тривалості помелу вихід фракції вугілля менше 50 мкм (R50) зростає і в зв'язку з цим збільшується в'язкість ВВП і її стабільність. Встановлено, що суспензії, отримані з свіжо-видобутого вугілля (проба № 2), в порівнянні з суспензіями з вугілля зі складу (проба № 1) при порівнянних значеннях кількості твердої фази в ВВП і ступеня її подрібнення мають значно нижчі значення структурної в'язкості (практично в 2 рази) і по-

чаткового напруження зсуву (в 3-7 разів). Стабільність таких суспензій при рівних значеннях $\mu_{\text{стр}}$ і τ_0 так само вище через утворення більш стійкої структурованої системи.

1.5.3 Вплив реагентів-пластифікаторів на реологічні характеристики водувугільного палива

Більшість дослідників вважають, що найбільш зручним параметром для управління властивостями ВВП є дисперсність вугілля, його марка і концентрація хімічних добавок [43,44].

Для підвищення стійкості до ВВС додають невелику кількість різних речовин (стабілізаторів, пластифікаторів і т.д.), що зменшують злипання, або так звану коагуляцію (коалесценції), яка, природно, викликає укрупнення частинок, утворення грудок і випадання осаду. Численні досліді показують, що концентрація добавок в ВВП зазвичай знаходиться в інтервалі 0,5 - 1,5% [31].

Практично всі основні класи поверхнево-активних речовин (ПАР) і комплексні добавки можуть стабілізувати і знижувати в'язкість ВВП. Вплив кожної добавки на зміну в'язкості і стабільності можна визначити тільки досвідченим шляхом, варіюючи кількість добавок і їх комбінації. Слід так само відзначити, що добавки, значно знижують в'язкість ВВП, не завжди виключають їх розшарування. У ряді випадків виявляється доцільним застосування двох добавок [44].

Багатьма вченими і науково-дослідними організаціями виконувалися дослідження, метою яких було вивчення впливу різних хімічних добавок на реологічні характеристики, седиментаційну стабільність і енерговитрати транспортування ВВП в ПГТС. Різні джерела рекомендують використовувати хімічні добавки в розчині з концентрацією від 0,01 до 5% в кількості від 0,1 до 1,5%. на суху масу [2,45–49]. На підставі цього були проведені дослідження з оцінки впливу змісту хімічної добавки на реологічні характеристики ВВП.

Аналіз даних свідчить про істотний вплив хімічних добавок на реологічні

характеристики ВВП [17,34,44]. Різке зниження величини ефективної в'язкості спостерігається при збільшенні вмісту хімічної добавки від 0,3 до 0,9%. Надалі криві, що характеризують залежність ефективної в'язкості від змісту хімічної добавки при заданій швидкості зсуву змінюють характер, а вплив хімічної добавки на реологічні характеристики суспензії при утриманні її від 0,9 до 1,2% стає вельми незначним.

Оцінюючи існуючі пластифікатори з точки зору реологічного стану, відзначимо, що для даних умов і композицій гірші показники мають ВВПс хімічними добавками ВЦР і сульфогуматом натрію.

Кращі реологічні параметри ВВП отримані при використанні хімічної добавки «Дофен». Доцільність застосування в якості хімічних добавок НФУ і ЛСТ в будь-якому конкретному випадку повинна бути обґрунтована як в технічному, так і в економічному аспектах.

У дослідженнях [17,44] було зроблено висновок, що найбільш ефективною хімічною добавкою для підготовки ВВП з вугілля марки "Г" є пластифікатор «Дофен», який сприяє досягненню мінімальної в'язкості в умовах концентрації ВВП дорівнює не менше 60%, що дозволяє знизити енерговитрати на транспортування ВВП в ПГТС.

1.5.4 Вплив зольності вихідного вугілля на реологічні характеристики водовугільного палива

Однією з найважливіших характеристик ВВС є їх зольність, обумовлена змістом негорючих мінеральних компонентів в робочій масі водовугільній суспензії, а фактично в вихідному вугіллі. Підвищення зольності вугілля в водовугільній суспензії, також як і вологості призводить до зниження енергетичної цінності палива. Характеристики в'язкості і стабільність ВВС визначаються фізико-хімічними властивостями вугілля. Зольність вугілля має великий вплив на енерговитрати транспортування ВВП і його стабільність при зберіганні в статичних умовах протягом 30 і більше доби. Стійкість суспензій до розшарування падає при значеннях A^d менше 12 %. Швидке осадження частинок ву-

гілля з утворенням щільного осаду відбувається також в ВВС, що відрізняються більш високим вмістом гідроксидів заліза і магнію в хімічному складі золи вугілля.

Попередній аналіз продукції вуглезбагачувальних підприємств Луганської та Донецької областей показав, що найбільш прийнятними в якості сировини для композиції ВВП з урахуванням рекомендацій організацій, які проводять дослідження в цій області, є вугілля середньої і низької стадій метаморфізму марок Ж, Г, Д зольністю 8-14% , робочої вологістю не більше 8 ... 10%, теплою згоряння не менше 16 МДж/кг [50,51,52].

Донецькими вченими були проведені дослідження впливу зольності вихідного вугілля на реологічні характеристики ВВП і енерговитрати його транспортування в ПГТС, приготованого з використанням вугілля марок Г і Д з зольністю на суху масу від 10 до 60% при масовій концентрації твердого компонента 60 і 65% в діапазоні швидкостей зсуву 8-20 с⁻¹. З отриманих даних випливає, що збільшення зольності у всіх випадках веде до збільшення дотичних напружень зсуву і, відповідно, ефективної в'язкості ВВП, що найбільш ефективно проявляється при $A^d = 45\%$.

Залежність ефективної в'язкості від зольності вихідного вугілля при градієнті швидкості зсуву рівної 9 с⁻¹ представлена на рис. 1.9 [50].

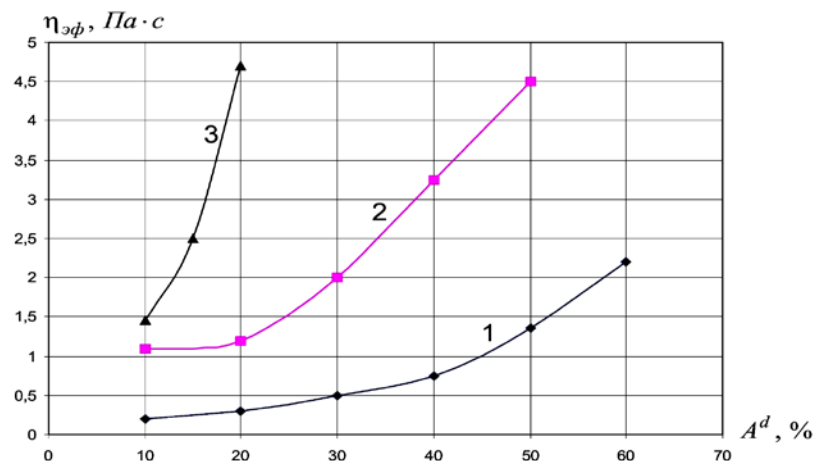


Рисунок 1.9 – Залежність ефективної в'язкості від зольності вихідного вугілля:

1,2 - вугілля марки «Д» (C=60%) з використанням пластифікаторів «Дофен» і НФУ відповідно; 3 - вугілля марки «Г» (C=65%), пластифікатор НФУ

Потік висококонцентрованою ВВС приготовленої на основі вугілля марки Г з зольністю на суху масу змінюється від 8,5 до 57,1% характеризується відносно невеликими значеннями напруження зсуву, що обумовлює незначну величину ефективної в'язкості і тим самим дає можливість дещо збільшити значення концентрації [53].

Таким чином, величина зольності вихідного вугілля впливає на реологічні характеристики ВВП, що дозволяє оцінити зміну кількості енергії витрачається на транспортування ВВП в ПГТС в залежності від обраної марки вантажу і типу добавок, що вводяться.

1.6 Висновки по розділу 1

Аналіз теоретичних і експериментальних досліджень транспортування ВВП промисловим трубопровідним транспортом довів, що традиційні підходи до вирішення проблеми зниження енерговитрат на транспортування даної композиції ВВП вичерпали свій потенціал. Встановлено, що подальше вирішення завдання зниження енерговитрат може бути здійснено шляхом створення оптимального складу ВВП з точки зору реологічних характеристик і його енергетичних показників.

Аналіз існуючих технологій підготовки і транспортування ВВП в ПГТС довів, що найбільший вплив на параметри транспортування надають властивості вихідного вугілля, концентрація, ГМС суспензії і швидкість транспортування, від яких безпосередньо залежать реологічні характеристики і, як наслідок, енерговитрати на транспортування. Виконано оцінку впливу характеристик твердої фази і показників якості вихідного вугілля і пластифікуючих добавок на енерговитрати транспортування ВВП в ГТС промислових підприємств. В результаті виконання аналізу функціонування різних ГТС промислових підприємств України і розвинутих країн було встановлено, що існуючі технології транспортування ВКВВП не передбачали дотримання раціональних пропорцій різних фракцій ГМС ВВП.

Порівняльний аналіз існуючих ГТС дозволяє стверджувати, що вибір схеми транспортування суттєво впливає на її функціональні якості, які всебічно віддзеркалюються показником питомих енерговитрат (E_{π}), кВт год/ткм та витрат на перевезення (C_{π}) грн./ткм. Вказані показники в залежності від обраної схеми гідротранспортування змінюються в діапазонах відповідно 0,085–0,24 кВт год/ткм та 20–56 коп/ткм, тобто майже у 3 рази. До того ж доцільними схемами транспортування є послідовно-променеві та променеві (відповідно $E_{\pi}=0,085\text{--}0,143$ кВт год/ткм $\in$ $C_{\pi}=20\text{--}33$ коп/ткм), це дозволило обрати вказані вище схеми для подальших досліджень при виконанні даної дисертаційної роботи при постановці та вирішенні оптимізаційної задачі.

Впровадження заходів, запропонованих в дисертаційній роботі, включно з раціоналізацією ГМС суміші та схеми транспортування забезпечує зниження його собівартості у розрахунку на 1 ткм ВВП в порівнянні з існуючими технологіями гідротранспортування на 28,5%.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ ВОДОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА З УРАХУВАННЯМ ПАРАМЕТРІВ БІМОДАЛЬНОСТІ І ГРАНУЛОМЕТРИЧНОГО СКЛАДУ

2.1 Визначення раціонального гранулометричного складу твердої фази водовугільного палива

Під бімодальністю меленого твердого компоненту ВВП (і в цілому - суспензії) розуміють залежність параметрів нормального розподілу його фракційного складу від величини відповідної сукупності частинок кожної окремої фракції, тому при нанесенні на вірогіднісну шкалу (квантіль) окремі фракції зображуються окремими відрізками прямих, характеризованих середьоваговим діаметром x_0 та кутом нахилу β , що є аналогами класичних параметрів, математичного очікування та, відповідно, середньоквадратичного відхилення. Тим часом інші речовини, наприклад, мелений кварцовий пил є мономодальними і не виявляють навіть тенденції до бімодальності.

Аналіз проведених досліджень дозволяє стверджувати, що виконання гранулометричного складу бімодальним, сприяє зниженню в'язкості суспензії.

У даній роботі було запропоновано задати критерій, що характеризує бімодальність гранулометричного складу ВВП ($\mathcal{E}$). При цьому встановлено, що найбільш важливими факторами, що впливають на ефективність гідротранспортування водовугільного палива є концентрація твердого компонента (C) і параметри, що характеризують бімодальність гранулометричного складу твердої фази ВВП в якості яких запропоновано Γ_1 і Γ_2 . Параметри Γ_1 і Γ_2 повністю визначають бімодальність довільного гранулометричного складу, з огляду на кількість як великої і дрібної так і проміжної фракції X_p .

$$\Gamma_1 = \frac{P_1}{P_2}; \quad \Gamma_2 = \frac{P_3}{P_2} \quad (2.1)$$

де P_1 - частка частинок дрібної фракції,%;

P_2 - частка частинок проміжної фракції,%;

P_3 - частка частинок великої фракції,%.

Це дозволяє в повній мірі визначити бімодальність гранулометричного складу. У роботі були досліджені три варіанти масової концентрації твердого компонента ($C = 60, 62,5, 65\%$) вугілля марки Г, а також параметр Γ_1 який виражає відношення дрібної фракції вугілля до його проміжної фракції за масою і по діаметру частинок і параметр Γ_2 який виражає відношення великої фракції до проміжної відповідно. Використання даних параметрів дозволяє найбільш точно оцінити вплив гранулометричного складу твердого компонента ВВП на його реологічні і гідродинамічні характеристики.

Слід зазначити, що параметри Γ_1 і Γ_2 повністю визначають бімодальність довільного гранулометричного складу, з огляду на кількість як великої і дрібної так і проміжної фракції:

$$X_{II} = \frac{1}{\Gamma_1 + \Gamma_2 + 1}; X_1 = \Gamma_1 \cdot X_{II}; X_2 = \Gamma_2 \cdot X_{II}, \quad (2.2)$$

де X_{II} – масова частка проміжної фракції; X_1 - масова частка дрібної фракції; X_2 - масова частка крупної фракції.

Такий підхід дозволяє отримувати строго зіставні результати по опору для різних варіантів бімодального складу. Це дає можливість відстежити вплив Γ_1 , Γ_2 при різних C на гідравлічні параметри ВВП, тобто в результаті аналізу визначити оптимальні по опору значення параметрів бімодальності.

2.1.1 Результати дослідження гранулометричного складу продуктів помелу

Численні дослідження показують, що помелу різних суцільних твердих речовин в кульових млинах відповідає нормальний розподіл еквівалентних діаметрів частинок продуктів помелу [54] (рис. 2.1).

Перевірка дисперсного складу кварцових пилей, отриманих помелом піску на вібромлині М-10, де процес помелу протікає в кілька сот разів інтенсивніше в порівнянні з дробленням в кульовому млині, показала, що і в цьому випадку дисперсний склад кварцових порошків підпорядковується нормальному розподілу [54].

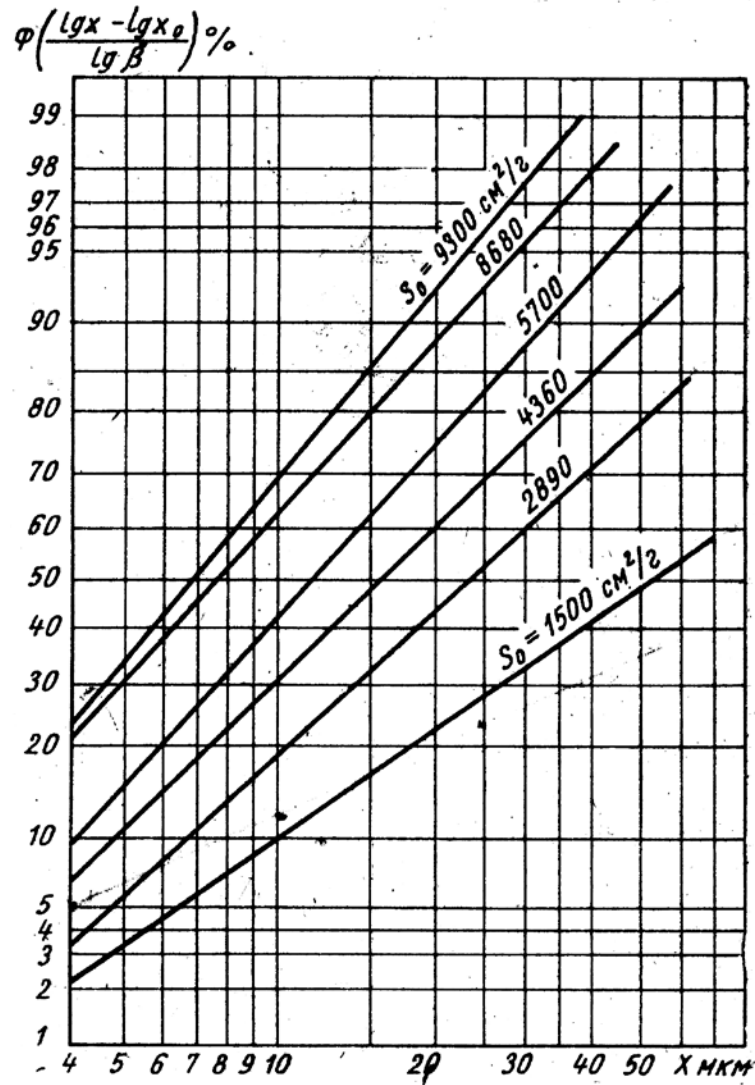


Рисунок 2.1 – Інтегральне розподілення в ймовірностно-логіарифмічних координатах кварцового пилю, подрібненого в кульовому млині

З даних, наведених на рис. 2.1, видно, що положення прямих, яке визначається параметрами нормального розподілу логарифмів діаметрів частинок ($\lg x_0$ і $\lg \beta$), змінюється в певній послідовності.

Побудувавши графік $\lg \beta = f(\lg x_0)$, отримаємо зв'язок параметрів нормального розподілу логарифмів діаметрів частинок при подрібненні кварцу, однакову при різних способах помелу. Кожній точці отриманої кривої буде відповідати тільки один пил, що має певний дисперсний склад і величину питомої поверхні.

Отже, однієї і тієї ж величині питомої поверхні подрібненого матеріалу незалежно від способу помелу буде відповідати певний дисперсний склад.

Параметри пилу, отриманого в результаті помелу, по осередненим даним (рис. 2.2), наведені в табл. 2.1

Таблиця 2.1 – Параметри оцінки гранулометричного складу пилу на різних стадіях помелу

Параметри	Питома поверхня S_0 пилу в $\text{см}^2/\text{г}$					
	1522	2468	3935	4850	6000	7074
$\lg x_0$	1,723	1,524	1,267	1,118	1,048	0,936
$\lg \beta \dots$	0,527	0,471	0,426	0,393	0,364	0,340

Зі збільшенням питомої поверхні матеріалу зменшується середній логарифм діаметра часток і їх дисперсія. Графічно це ілюструється на рис. 2.3, на якому зображені диференціальні криві нормального розподілу логарифмів діаметрів часток кварцового пилу, побудовані за параметрами, визначеними по рис. 2.1. У міру подрібнення кварцу максимум кривих зсувається вліво, а криві стають вище і звужуються, що відповідає зменшенню дисперсії розподілу.

Для кривої, представленої на рис. 2.2, була підібрана емпірична формула в формі показової функції, що не має розривів:

$$\lg \beta = ne^{m \lg x_0}$$

де m , n — дослідні коефіцієнти, в даному випадку $n = 0,1912$ і $m = -0,6175$.

Теоретично з точністю до постійних величин мають місце такі співвідношення [54]:

$$\begin{aligned} \lg x_0 &= At \\ \lg^2 \beta &= B^2 t \end{aligned} \quad (2.3)$$

де t — час подрібнення; A, B — константи даного процесу подрібнення.

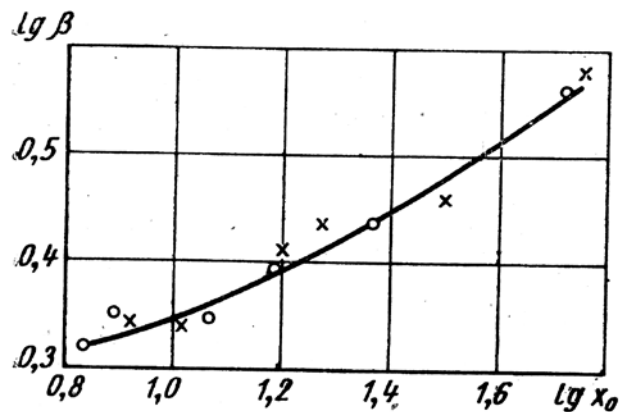


Рисунок 2.2 – Емпірична залежність між параметрами нормального розподілу логарифмів діаметрів частинок подрібненого кварцу: о - помел в кульовому млині; х - помел у вібраційному млині

Виключивши з цього вираження час отримаємо рівняння $\lg^2 \beta = \frac{B^2}{A} \lg x_0$, що зв'язує між собою параметри розподілу. Це рівняння підтверджує, що параметри логарифмічно нормального розподілу часток при дробленні не можуть змінюватися довільно. Для даного процесу дроблення між ними існує певний зв'язок.

Одним з параметрів нормального розподілу може бути час подрібнення (для даного типу млина), від якого залежать ці параметри, або ж, як це буде показано нижче, величина питомої поверхні матеріалу (рис. 2.3).

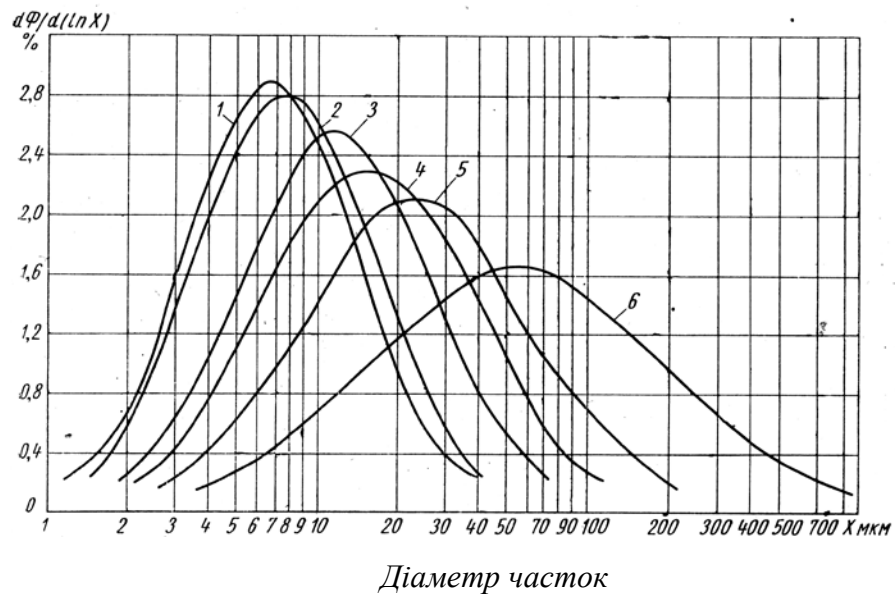


Рисунок 2.3 – Зміна диференціальних кривих нормального розподілу логарифмів діаметрів часток подрібненого кварцу для різних значень питомої поверхні пилу S_0 :

- 1 – $9300 \text{ см}^2 / \text{г}$; ($\lg x_0 = 0,835$; $\lg \beta = 0,321$); 2 – $8680 \text{ см}^2 / \text{г}$
 ($\lg x_0 = 0,888$; $\lg \beta = 0,325$); 3 – $5700 \text{ см}^2 / \text{г}$; ($\lg x_0 = 1,068$, $\lg \beta = 0,349$);
 4 – $4336 \text{ см}^2 / \text{г}$ ($\lg x_0 = 1,193$; $\lg \beta = 0,396$);
 5 – $2890 \text{ см}^2 / \text{г}$ ($\lg x_0 = 1,363$; $\lg \beta = 0,437$);
 6 – $1500 \text{ см}^2 / \text{г}$ ($\lg x_0 = 1,724$; $\lg \beta = 0,562$)

Як належить з результатів числених експериментів, для цілком адекватного визначення питомої поверхні продуктив помелу слід використовувати два ідентифікуючих нормальний розподіл параметра: x_0 і β , що є аналогами класичних параметрів – математичного очікування та середньоквадратичного відхилення.

Таким чином, за результатами аналізу можна зробити наступний висновок. У процесі подрібнення твердого матеріалу параметрами нормального розподілу логарифмів діаметрів часток можуть бути питома поверхня змеленого пилу, або час помелу.

2.1.2 Залежність дисперсного складу пилу від питомої поверхні подрібнених матеріалів

Виходячи з теоретично і експериментально встановленого в попередньому підрозділі закону нормального розподілу логарифмів діаметрів частинок в подрібненому матеріалі, знайдемо його питому поверхню в залежності від параметрів нормального розподілу логарифмів діаметрів частинок.

Теоретично при формі куль або кубічної форми часток питома поверхня полідисперсного подрібненого матеріалу може бути визначена [54] з виразу

$$S = \frac{6}{\rho_n} \int_0^{\infty} F(x) \frac{dx}{x}, \text{ см}^2 / \text{г}, \quad (2.4)$$

де $F(x)$ - диференціальна крива вагового розподілу часток за діаметрами (щільність розподілу), $1/\text{с}$; ρ - щільність матеріалу, $\text{г}/\text{см}^3$.

З урахуванням закону нормального розподілу часток ГМС знайдемо:

$$F(x) = \frac{d}{dx} \Phi \left(\frac{\ln x - \ln x_o}{\ln \beta} \right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \ln \beta}} \frac{1}{x} e^{-\frac{(\ln x - \ln x_o)^2}{2 \ln^2 \beta}} \quad (2.5)$$

В рівнянні (2.4) замінимо функцію $F(x)$ її значенням з виразу (2.5), і виконаємо заміну змінних в підінтегральному вираженні

$$\frac{dx}{x} = d(\ln x).$$

Позначимо

$$z = \frac{\ln x - \ln x_o}{\ln \beta}, \quad \omega = z + \ln \beta \quad \text{и} \quad d\omega = dz$$

При цьому відповідно змінюються і межі інтегрування:

$$S = \frac{6}{\sqrt{2\pi \ln \beta} \rho_n} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{x} e^{-\frac{(\ln x - \ln x_0)^2}{2 \ln^2 \beta}} d(\ln x) \quad (2.6)$$

і зробивши в рівнянні (2.6) заміну змінних, отримаємо

$$S = \frac{6e^{\frac{\ln^2 \beta}{2}}}{\rho_n x_0} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{\omega^2}{2}} d\omega.$$

Другий множник в рівнянні є інтеграл нормального розподілу, який в межах від $-\infty$ до $+\infty$ дорівнює 1.

Отже, остаточно питома поверхня подрібненої речовини, розподіл логарифмів діаметрів часток якої підлягають закону нормального розподілу:

$$S = \frac{6e^{\frac{\ln^2 \beta}{2}}}{\rho_n x_0} \quad (2.7)$$

Рівняння (2.7) встановлює зв'язок повної питомої поверхні з параметрами розподілу логарифмів діаметрів частинок подрібненої речовини. За цим рівнянням може бути також отримана питома поверхня частинок в діапазоні діаметрів від x_1 до x_2 .

За результатами помелу вугілля в кульовому млині МШЦ (рис.2.4.) отримано, що в результаті закладки куль однакового діаметра продукт помелу має нормальний розподіл за діаметрами [31]. У той же час для бімодального гранулометричного складу необхідно істотне відхилення від цієї закономірності розподілу діаметрів частинок, що має виражатися в наявності фракції, яка має суттєво меншу вагову частку в порівнянні з аналогічною (за діапазоном діаметрів частинок) в нормальному розподілі. Графічно це виражається зломом кута нахилу прямої на квантілі розподілу в локальній області проміжної фрак-

ції $X_{П1}$ - $X_{П2}$. У той же час закладка куль різних діаметрів під час помелу вугільної маси обумовлює якраз потрібний ефект. З'являються зони зі змінним кутом нахилу (це видно на всіх графіках гранулометричного складу).



Рисунок 2.4 – Кульовий млин тонкого помелу (МШЦ)

Є цілком очевидним, що першопричиною прояви бімодальності вугільним пилом є складність якостей вихідної вугільної маси, для якої характерною є тріщинкувато-пориста мінерало-органічна структура, що зовсім не властива більшості речовин, таких, як той же кварц. Це може обумовлювати не тільки кількісні - розміри часток), а й якісні - розміри окремих фракцій (кластерів), результатів руйнування вихідного вугільного пилу при співударі двох конкретних сталевих куль у млині. В залежності від типорозміру куль співудар реалізує на руйнування цілком певний діапазон енергій, характеристики якого залежать від розмірів та швидкості обертання млина та геометричних і масових параметрів вказаних тіл.

Співудар доцільно характеризувати такими показниками (табл.2.2.)

1. Умовна енергія удару $\epsilon_y = V^2 m_i / V^2 m_{10} = m_i / m_{10}$;

де V – швидкість падіння кулі у млині; m_i та m_{10} – маса поточної кулі, що б'є, та відповідно кулі мінімального розміру у закладці.

2. Умовна сума площин, $S_p = (S_i + S_j) / S_{10}$.

де S_i та S_j – площі Міделевого перетину поточних куль у співударі.

3. Коефіцієнт помелу $K_{п} = \epsilon_y \cdot S_p$.

4. Ймовірність співудару куль з розмірами d_i та d_j $P_y = \omega_i \cdot \omega_j$,
де $\omega_i \cdot \omega_j$ – питомий вміст куль розміром d_i та d_j у закладці.
5. Умовна енергія зіткнення, $\epsilon = K_{\pi} \cdot P_y$.

Гіпотеза цього дослідження полягає в тому, що існування різних зон (кластерів) гранулометричного складу може бути пояснено різною енергетикою (питомою потужністю) зіткнення тіл, що мелють, при помелі певної вугільної суміші. Розподіл потужності удару для різних варіантів зіткнення (що відповідає розподілу кластерів в гранскладі помелу) представлено в табл.2.2.

Таблиця 2.2 – Умовні енергії співудару куль

Склад співудару	Умовна енергія удару, ϵ_y	Умовна сума площин, S_p	Коефіцієнт помелу, K_{π}	Ймовірність удару великої кулі, P_y	Умовна енергія зіткнення, ϵ
К-К	64	32	2048	0,36	737,28
К-ПР	64	20	1280	0,12	153,6
К-М	64	17	1088	0,12	130,56
ПР-К	8	20	160	0,12	19,2
ПР-ПР	8	8	64	0,04	2,56
ПР-М	8	5	40	0,04	1,6
М-КР	1	17	17	0,12	2,04
М-ПР	1	5	5	0,04	0,2
М-М	1	2	2	0,04	0,08
сумма					1047,12

Згідно з «поверхневою» гіпотезою Риттінгера робота (енергія), затрачувана на здрібнювання часток речовини, пропорційна знову утвореній поверхні матеріалу. При цьому на утвір одиниці нової поверхні для конкретного матеріалу витрачається постійна робота, яка визначається дослідним шляхом і може бути названа питомою роботою подрібнювання. Загальна робота A_s , витрачувана на здрібнювання матеріалу, буде рівна [115]:

$$A_s = 6A_{num}D^2(i-1) \quad (2.8)$$

де A_{num} – питома робота подрібнювання;

D – вихідний розмір (ребра) тіла кубічної форми;

i – ступінь подрібнювання.

Тим часом більш коректне на перший погляд співвідношення $A = A_y + A_s$, запропоноване академіком П. А. Ребіндером, згідно з яким робота, затрачувана на здрібнювання матеріалу, являє собою суму робіт, що витрачаються на пружні деформації тіла й на утвор нових поверхонь [116] саме з огляду на тріщинкуватість (присутність безлічі концентраторів напруженості, ініціюючих відсутність пружних деформацій, $A_y \rightarrow 0$) в дійсності не є таким.

Оскільки для твердої компоненти вугілля для ВВП характерно $i \gg 1$ співвідношення (2.8) з заміною $6A_{num}D^2(i-1) = S_\Sigma$ для кінцевого етапу здрібнювання вугільної маси може бути записане у вигляді $A_s = A_{num}S_\Sigma$, а для окремого кластера

$$A_{si} = A_{num}S_i, \quad (2.9)$$

де A_{si} - робота (механічна енергія) подрібнювання вугілля парою куль i -го кластеру; A_{num} - питома робота подрібнювання в межах i -го кластеру; S_i - поверхня пилю у межах i -го кластеру

Припускаючи далі, що питома поверхня пилю в кластері пропорційна роботі зіткнення куль в різному поєднанні, а також використовуючи вираз для діапазону кожного з діаметрів кластерів, отримуємо розподіл питомої поверхні продуктів помелу, при цьому межі зон визначаються за результатами пробного помелу в млині (рис. 2.5).

Для визначення дискретної зміни розподілу питомої поверхні кожного з кластерів використанням поточних значень x_0 і β від часу помелу доцільно застосовувати співвідношення (2.3), які дозволяють, використовуючи отримані експериментальні дані, виконати апроксимації постійних A і B для кожного з них від зазначеного параметра.

Для можливості співставлення розподілу еквівалентних енергій згідно кластерної гіпотези ϵ_e з отриманими поверхнями пилю з урахуванням виразу (2.10), тобто, з наведеними до еквівалентних енергій ϵ_s , у межах кожної з фракцій розподілу, значення розрахованих умовних енергій ϵ_i були помножені на

нормуючий коефіцієнт $k_n = \sum S_{pi} / \sum \epsilon_i$, де $\sum S_{pi}$ – сумарна поверхня пилу у кінці помелу $\sum \epsilon_i$ – сумарна умовна енергія співударів при помелі.

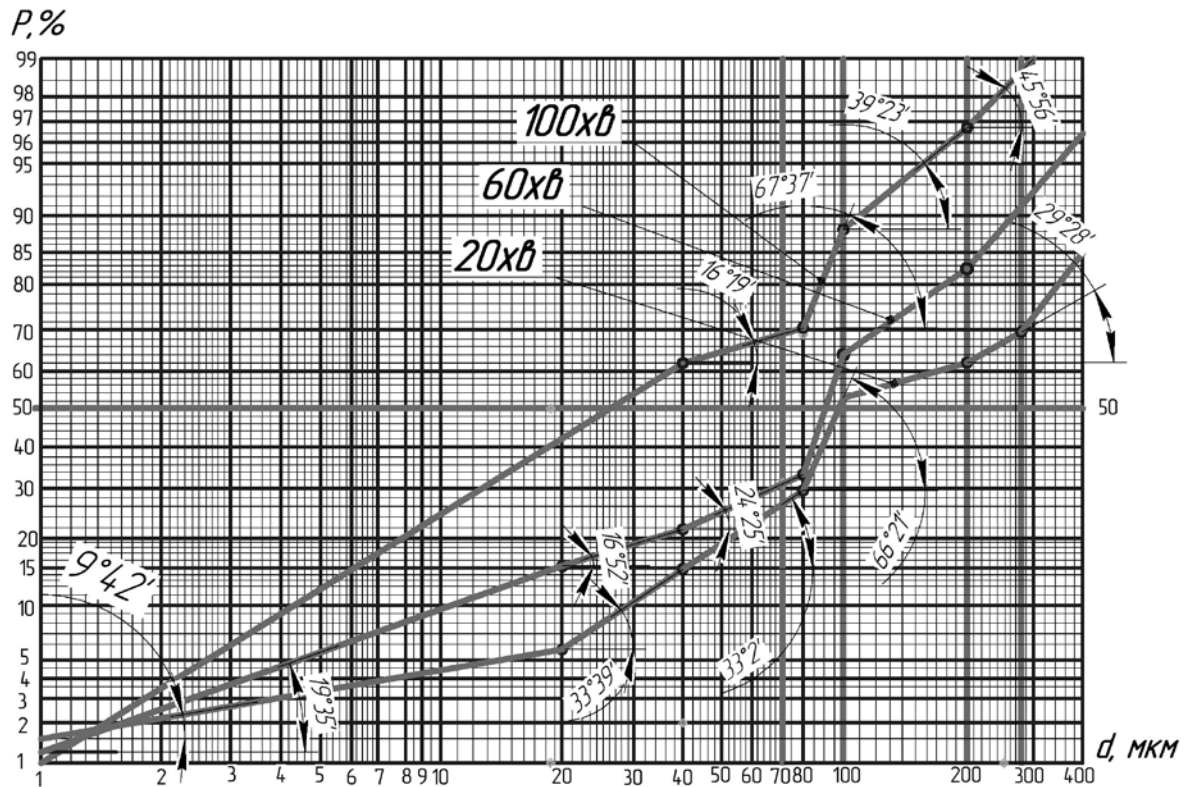


Рисунок 2.5 – Графіки залежності фракційного складу змеленого вугілля від часу помелу

Результати зіставлення отриманих даних: розрахункових (визначення енергій кластерів) та експериментальних (отримання величин поверхонь, що відповідають певному конкретному кластерові) наведені в табл. 2.3. Виконане у нижній частині даної таблиці об'єднання послідовно розташованих кластерів в цілому відповідає умовам коректності кластерної гіпотези, оскільки частинки пилу певного розміру частково утворюються при зіткненні куль, характеризованих ударами з рівнями енергій зіткнення співрозмірної величини.

Враховуючи також недостатню кількість факторів, що обмежують діапазони конкретних кластерів і співвідношення відповідних енергій та обмеженість даних щодо можливості прямого (без виправлень) використання в цьому випадку залежності Ритгінгера, а також недостатню проробленість кластерної гіпотези в межах даної роботи як у теоретичному, так і емпіричному відношен-

ні відносно неспівпадання розподілу еквівалентних енергій, обрахованих в межах цієї гіпотези та отриманих під час обмежених за обсягом дослідів, в межах 30% на нашу думку вказують на коректність її основних положень.

Таблиця 2.3 Співставлення розподілу еквівалентних енергій (кластерних та поверхневих)

№ кластерів↓		Еквівалентні енергії		Відхилення	
		ϵ_s	ϵ_e	Абсолютне	Відносне, %
За фракційним розподілом пилу	За кластерною гіпотезою				
1	1	468,5	420	48,5	
2	2	53,66	87,5	33,8	
3	3	44,58	74,4	29,8	
4	4	19,53	10,9	8,6	
5	5-9	10,2	3,6	6,6	
1+2	1+2	522,2	507,5	14,7	2,8
3+4	3	64,1	74,4	10,3	13,8
5	4+5	10,2	14,3	4,1	28,6

Слід також відмітити, що при подальшій розробці пропонованої гіпотези та подальшій деталізації, з її допомогою уявляється можливим теоретично прогнозувати результати помелу пилу довільним кульвим млином з конкретними геометричними та режимними характеристиками.

Проведені дослідження дозволяють стверджувати, що бімодальність гранулометричного складу сприяє зниженню в'язкості суспензії за рахунок ролі дрібної фракції твердого компонента ВВП, яка сприяє переміщенню великої фракції вугілля в складі ВВП з більш низькими показниками опору. В результаті проведення експериментальних досліджень були визначені реологічні і гідродинамічні характеристик ВВП, вивчені закономірності впливу гранулометричного складу твердого компонента ВВП на його характеристики.

Ряд вчених пояснюють можливість компактного розміщення частинок малого діаметра між частинками більшого діаметра за рахунок щільної упаковки частинок і оптимальних реологічних властивостей двофазної рідини з бімодальним гранулометричним складом, що утворюють в рідкій фазі певну структуру упаковки частинок [56], яку доцільно характеризувати як відповідне співвідношення діаметрів еквівалентних великих та дрібних частинок. Виходячи з аналізу отриманих результатів вказаного колективу вчених, вказане відношення для досягнення раціональної упаковки повинне складати 8 (табл. 2.4). У зв'язку з цим нами були виконані розрахунки кратності діаметрів дрібних і великих частинок еквівалентних діаметрів в складі твердої фази ВВП. Розрахунок виконувався для ГМС ВВП з мінімальними значеннями втрат тиску при транспортуванні і для цього варіанта отримано:

$$\delta = \frac{D_{\text{вел}}}{D_{\text{дріб}}} = \frac{0,1087}{0,017} = 6,39 \quad (2.10)$$

де $D_{\text{вел}}$ і $D_{\text{дріб}}$ - еквівалентний діаметр великої і дрібної частки відповідно.

Дані наведені в порівнянні з іншими типами двофазних рідин [56] (див. табл. 2.4).

Таким чином, пористість для бімодального гранулометричного складу ВВП склала 15,585% (що є цілком прийнятним і дозволяє отримувати щільну упаковку частинок у ВВП), при кратність діаметрів частинок 6,39 і $\delta=8$.

Таблиця 2.4 – Параметри структури твердої фази ВВП

Параметри структури	Відношення діаметрів еквівалентної дрібної і крупної частки твердої фази δ					
	1	0,41	0,23	0,18	0,215	0,12
Кратність діаметрів частинок	1	2,42	4,44	5,71	6,39	8,55
Кількість дрібних частинок в порах	0	1	2	8	8	8
Пористість, %	26,0	20,7	19,0	15,8	15,585	14,9

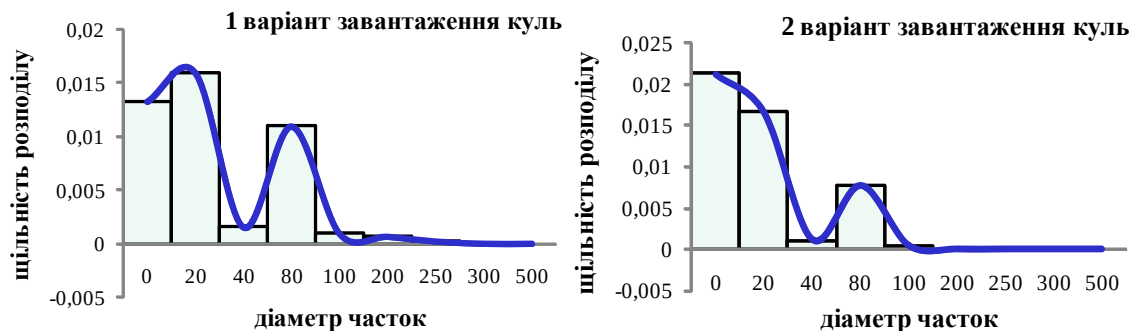
За результатами вказаних досліджень встановлено, що з'єднання сусідніх систем в коагуляційній структурі може бути класифіковане як: необоротне і оборотне [56]. Необоротна коагуляція, що зокрема характерна для сумішей, перенасичених дрібними (розміром 10 - 20 і менше мкм) призводить до порушення гомогенності, а також до різкого погіршення агрегативної стійкості і реологічних характеристик ВВП.

Таким чином, використовуючи різні закладки куль та різні терміни помелу можна домогтися необхідного бімодального гранулометричного складу для будь-якого кульового млина. Після процесу помелу визначення обсягу конкретних фракцій вугілля в залежності від розміру проводилося за допомогою ситового аналізатора (рис.2.6).



Рисунок 2.6 – Аналізатор ситовий вібраційний 236Б Гр

Для проведення експериментальних досліджень процесів транспортування були виготовлені зразки ВВП шести бімодальних гранулометричних складів з об'ємною концентрацією твердого компонента 60, 62,5 і 65% (рис. 2.7).



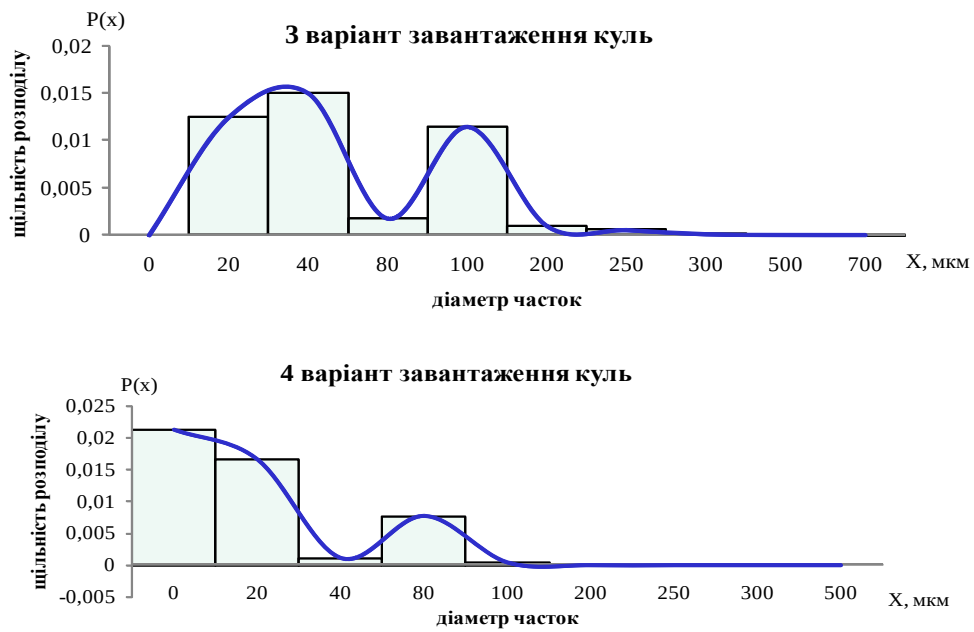


Рисунок 2.7 – Статистична щільність розподілу змеленого вугілля для приготування ВВП при різних варіантах завантаження кульового млина

В залежності від часу помелу були отримані питомі поверхні пилу для кожного з кластерів (рис.2.8).

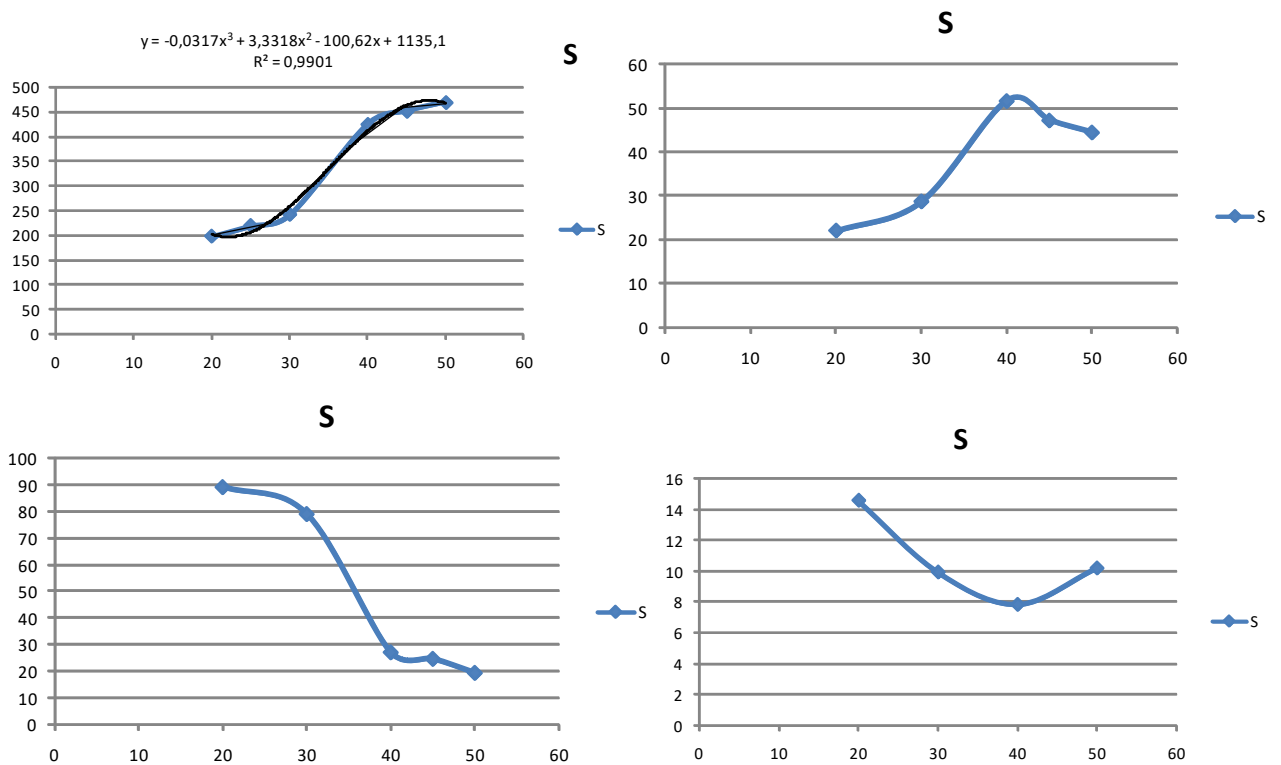


Рисунок 2.8 Залежності отриманих питомих поверхонь пилу для кожного з чотирьох кластерів від часу помелу в кульовому млині

В результаті виконання пробних помолів вугілля та виконня ситових аналізів отримані експериментальні залежності (рис. 2.9)

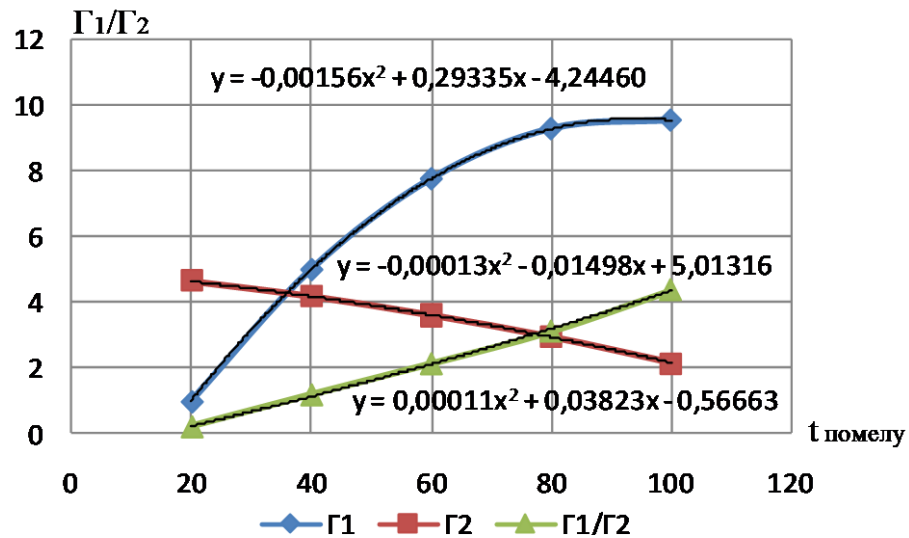


Рисунок 2.9 Залежність параметрів Γ_1 і Γ_2 та критерію бімодальності Γ_1/Γ_2 від часу помелу вугілля

В результаті апроксимації отриманих кривих для 3-го варіанту закладки куль стандартних типорозмірів [17,31], отримана залежність модифікованого критерія бімодальності Γ_1/Γ_2 від часу помелу для подальшого її використання при виконанні експериментальних досліджень в реалізації матриці планування експерименту (значення критерію Γ_1/Γ_2 для матриці склали: 1,08, 2,45 і 3,82 відповідно).

Характер отриманих кривих дозволяє стверджувати наступне: Для отримання ГМС з критерієм бімодальності $\Gamma_1/\Gamma_2 = 1,08$ необхідно здійснювати помел в кульовому млині впродовж 40хвилин; $\Gamma_1/\Gamma_2 = 3,82$ - 90 хвилин. Для отримання $\Gamma_1/\Gamma_2 = 2,45$ необхідно здійснювати помел при повній закладці млина впродовж 40 хвилин, після здійснити вивантаження 50% вугілля від первинного обсягу завантаженого вугілля в барабан і продовжити помел залишку впродовж 50 хвилин. Отримані частки необхідно змішати в рівних пропорціях.

Подрібнене в лабораторному кульовому млині вихідне рядове вугілля змішувалося з водою. Після змішування паливо витримувалося протягом 2-х годин, для активації вугільних частинок. Для проведення експериментальних

досліджень процесів транспортування були приготовлені зразки ВВП з об'ємною концентрацією твердого компонента 60, 62,5 і 65%.

2.2 Методика визначення реологічних характеристик водовугільного палива

Для визначення реологічних параметрів водовугільного палива був обраний ротаційний віскозиметр «Полімер РПЕ 1-М» (рис. 2.10). Цей тип віскозиметрів є найбільш раціональним для визначення параметрів реологічних моделей висококонцентрованих суспензій, так як при використанні капілярних віскозиметрів трубки приладів засмічуються великими частками вугілля, що призводить до значної похибки вимірювань.



Рисунок 2.10 – Ротаційний віскозиметр «Полімер РПЕ 1-М»

Якщо прийняти гіпотезу про існування ефекту ковзання і припустити, що швидкість ковзання u_c - функція, що залежить тільки від напруження зсуву, то на підставі загальних співвідношень для встановленої зсувної течії рідини в зазорі ротаційного віскозиметра можна отримати наступні співвідношення:

$$\omega = \omega_B + \omega_H + \int_{\tau_H}^{\tau_B} \frac{f(\tau) d\tau}{2\tau}, \quad (2.11)$$

де τ - напруження зсуву;

ω - кутова швидкість циліндра;

ω_B і ω_H - кутова швидкість на внутрішньому і зовнішньому циліндрі, що викликана ковзанням;

τ_B і τ_H - напруження зсуву на внутрішньому і зовнішньому циліндрах.

Значення ω_B і ω_H можна визначити експериментально на ротаційному віскозиметрі з двома коаксіальними зазорами. На підставі вираження (2.11) обчислюються швидкості ковзання при різній нарузі зсуву. За допомогою залежності $(\omega_B + \omega_H) = f(\tau_B)$ проводиться коригування вихідних даних шляхом зменшення дослідних значень ω на величину $(\omega_B + \omega_H)$ при відповідному значенні τ_B . Отримані таким чином дані використовуються для розрахунку дійсних значень параметрів реологічних моделей. Якщо через r позначити поточний радіус, який відраховується від осі обертання $R_H > r > R_B$ (де R_H і R_B - зовнішній і внутрішній радіуси циліндра, що обертається), то зв'язок між крутним моментом M і напруженням зсуву $\tau(r)$ виражається наступною залежністю

$$\tau(r) = \frac{M}{2\pi r^2}. \quad (2.12)$$

При рівномірному обертанні швидкість зсуву $\dot{\gamma}(r)$ можна представити у вигляді

$$\dot{\gamma} = r \frac{d\omega}{dr} = r \frac{d}{dr} \left(\frac{u}{r} \right), \quad (2.13)$$

де ω - кутова швидкість.

Якщо припустити, що ковзання на стінках відсутнє, то граничні умови на нерухомому і рухомому циліндрах можна записати у вигляді

$$r = R_B \text{ і } u = 0; \quad r = R_H \text{ і } u = \omega_0 R. \quad (2.14)$$

Підставивши вищевказані вираження в рівняння Шведова-Бінгама отримаємо

$$r \frac{d}{dr} \left(\frac{u}{r} \right) = f \left(\frac{M}{2\pi r^2} \right). \quad (2.15)$$

Після інтегрування вираження (2.15) і перетворення отриманих залежностей запишемо

$$\omega_0 = \int_{R_B}^{R_H} f \left(\frac{M}{2\pi r^2} \right) \frac{dr}{r}, \quad (2.16)$$

де ω_0 - кутова швидкість зовнішнього циліндра.

З урахуванням (3.9) і того, що $\frac{dr}{r} = -\frac{d\tau}{2\tau}$ і $s^2 = \frac{R_H^2}{R_B^2} = \frac{\tau_B}{\tau_H}$, вираження

(2.16) прийме вигляд

$$\omega = \frac{1}{2} \int_{\tau_H}^{\tau_B} \frac{f(\tau)}{\tau} d\tau = \frac{1}{2} \int_{\tau_H}^{s^2 \tau_H} \frac{f(\tau)}{\tau} d\tau = \frac{1}{2} \int_{s^2 \tau_B}^{\tau_B} \frac{f(\tau)}{\tau} d\tau. \quad (2.17)$$

Рішення отриманого інтегрального рівняння (2.17) може бути отримано для двох випадків: для малого і великого зазору між циліндрами.

Для малого зазору, тобто при $s \rightarrow 1$, отримаємо

$$\omega \approx f(\tau_B) \ln s \approx f \left[\tau_B \left(\frac{1+s^2}{2s^2} \right) \right] \left(\frac{s^2-1}{s^2+1} \right).$$

Звідси

$$f(\tau_B) \approx \frac{\omega}{\ln s} \approx \frac{\omega R_B}{R_H - R_B}. \quad (2.18)$$

Для великого зазору, де $R_H \rightarrow \infty$, $\tau_H \rightarrow 0$ рівняння (2.17) запишеться у вигляді

$$\omega = \frac{1}{2} \int_0^{\tau_B} \frac{f(\tau)}{\tau} d\tau.$$

Після диференціювання отримаємо

$$\frac{d\omega}{d\tau_B} = \frac{f(\tau_B)}{2\tau_B} \Rightarrow f(\tau_B) = 2 \frac{d\omega}{d \ln \tau_B}. \quad (2.19)$$

Використовуючи розкладання в ряд Ейлера і Маклорена, отримаємо асимптотичне рішення у вигляді ряду, що сходиться.

Розглянемо визначення реологічних характеристик статичної рідини. Підставивши реологічну модель псевдопластичної рідини в формулу (2.17), отримаємо:

$$\omega = \frac{1}{2} \int_{\tau_H}^{\tau_B} \left(\frac{\tau}{k} \right)^{1/n} \frac{d\tau}{\tau} = \frac{v}{2k^{1/n}} \left(\frac{M}{2\pi} \right)^{1/n} \left(R_B^{-2/n} - R_H^{-2/n} \right), \quad (2.20)$$

де v - швидкість обертання зовнішнього циліндра.

Отримане вираження (2.20) встановлює зв'язок між частотою обертання циліндра і моментом M . Цей зв'язок залежить від показників реологічної моделі, що характеризують середовище (n, k) , і дозволяє знайти їх значення.

Запишемо вираз для швидкості зсуву

$$\dot{\gamma} = \left(\frac{M}{2\pi r^2 k} \right)^{1/n} = \frac{2\omega}{v \left(R_B^{-2/n} - R_H^{-2/n} \right) r^{2/n}}. \quad (2.21)$$

З отриманого вираження (2.21) випливає, що якщо для ньютонівської рідини $(n=1)$ зміна швидкості зсуву мізерно мало, то в разі статичної рідини воно може бути досить істотно.

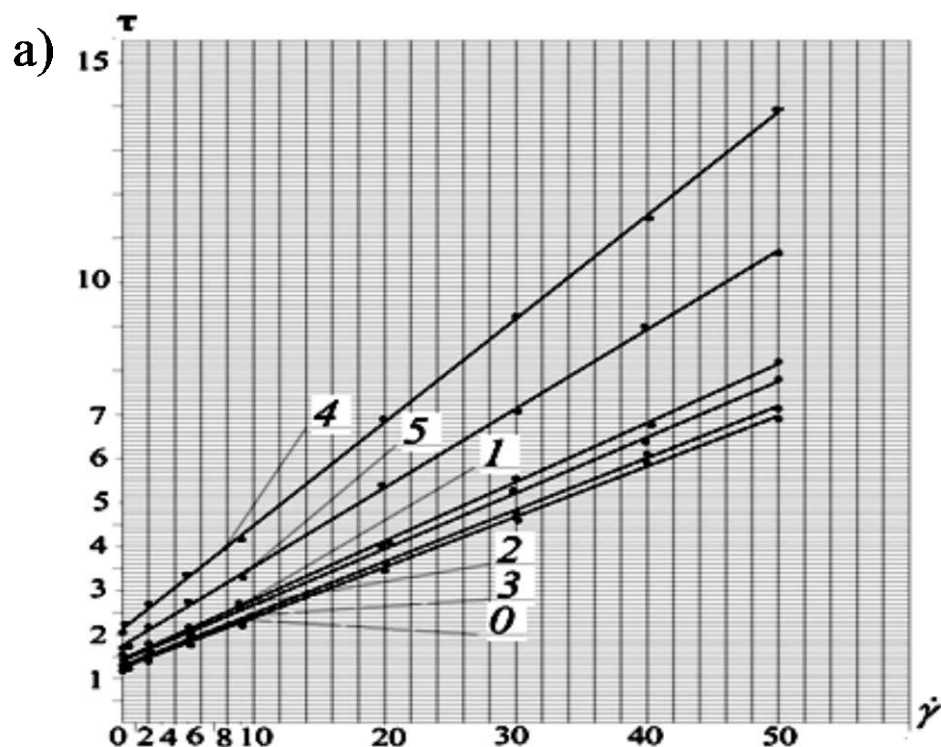
Тоді вираз для ефективної в'язкості може бути записано в наступному вигляді:

$$\mu_{\text{эф}} = \frac{\tau(r)}{\dot{\gamma}(r)} = \frac{M(R_B^{-2} - R_H^{-2})n[1 - (R_H/R_B)^{2/n}](r/R_B)^{2/n-2}}{4\pi\omega[1 - (R_B/R_H)^2]}. \quad (2.22)$$

Таким чином, за допомогою ротаційного віскозиметра і з використанням наведених вище залежностей можна визначити основні параметри, що характеризують реологічні властивості статечної рідини.

На підставі отриманих результатів були визначені значення реологічних параметрів ВВП, ефективної в'язкості і граничного напруження зсуву для різних гранулометричних складів і трьох варіантів концентрацій твердого компонента (60, 62,5 і 65%), (рис. 2.11) [57].

На підставі запропонованих параметрів Γ_1 і Γ_2 з метою визначення реологічних властивостей ВВП проведені лабораторні випробування. Для цього в залежності від параметрів помелу були підготовлені 6 варіантів гранулометричного складу Γ_1 (10,976, 7,76, 9,86, 9,12, 16,82, 7,2) і Γ_2 (4,48, 5,32, 4, 52, 4,59, 4,4, 6,5).



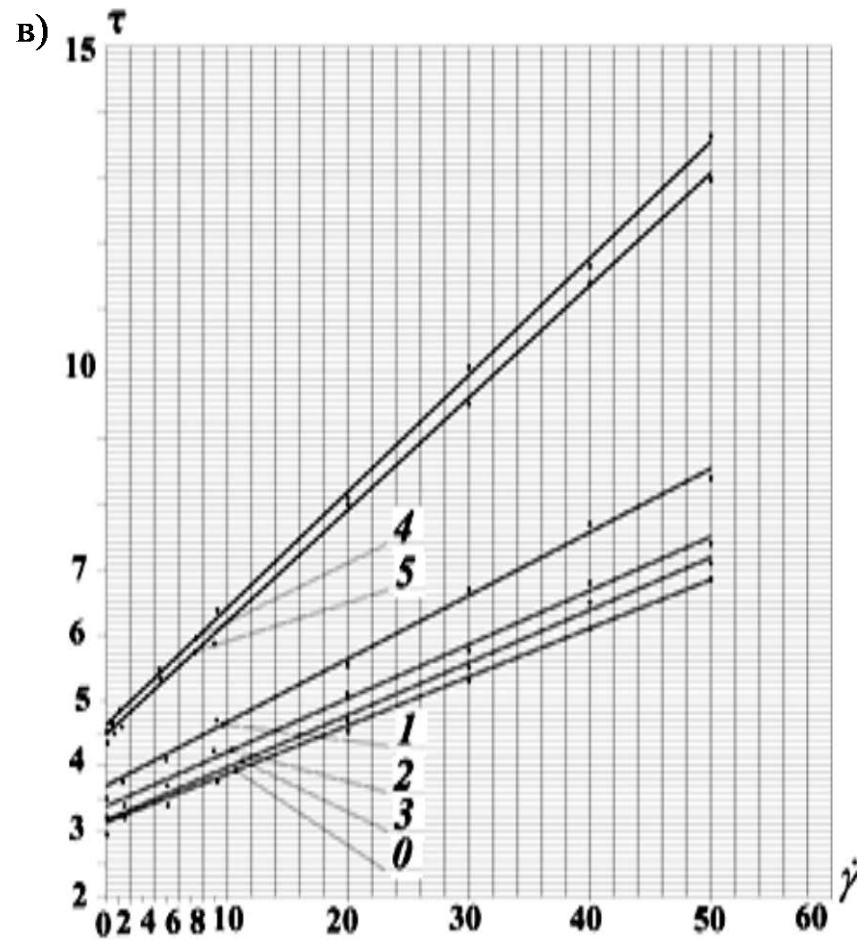
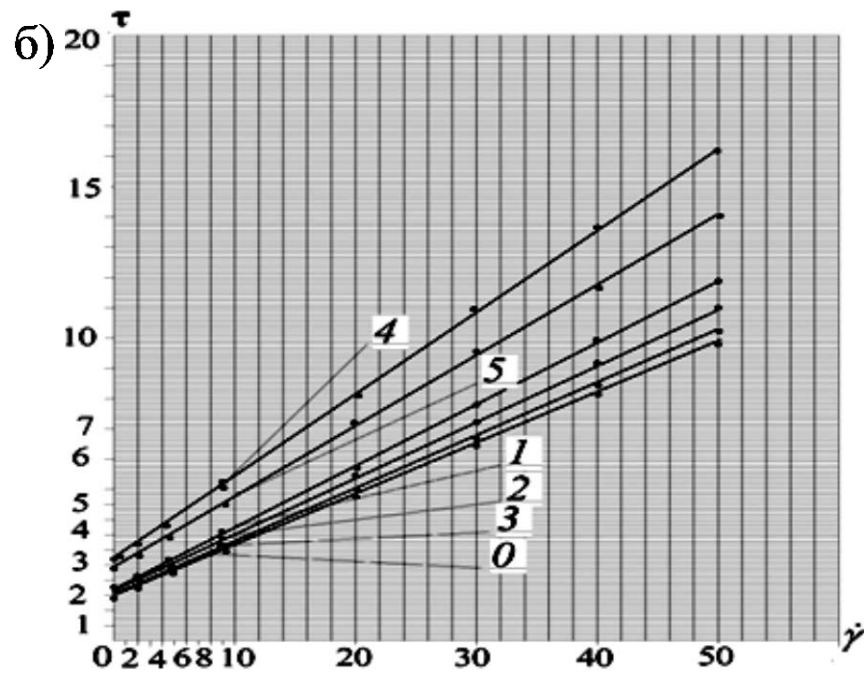


Рисунок 2.11 – Залежність дотичних напружень від градієнта швидкості і гранулометричного складу при масовій концентрації ВВП 60%, 62,5% і 65% – а, б, в відповідно: 0, 1, 2, 3, 4 і 5 – при завантаженні кульового млина за варіантами 0, 1, 2, 3, 4, 5 відповідно

Для визначення реологічних параметрів ВВП був обраний ротаційний віскозиметр «Полімер РПЕ 1-М». Таким чином, за допомогою ротаційного віскозиметра і з застосуванням наведених в роботі залежностей були визначені основні параметри, що відображають реологічні властивості ВВП. Це напруження має назву - динамічне граничне напруження зсуву. Його використовують в основному для гідродинамічного розрахунку транспортування висококонцентрованих ВВП [58].

Обробка отриманих експериментальних значень гранулометричного розподілу твердої фази ВВП з урахуванням C , параметрів Γ_1 і Γ_2 дозволила для обраної матриці планування (табл. 2.5) отримати рівняння регресії виду:

$$y(\eta) = 0,51438 + 0,08963x_1 + 0,13588x_2 + 0,07213x_3 - 0,00437x_1x_2 - 0,00463x_1x_3 - 0,01537x_2x_3 + 0,01838x_1x_2x_3 \quad (2.23)$$

де $y(\eta)$ - ефективна в'язкість ВВП для трьох варіантів концентрацій твердого компонента (60, 62,5 та 65%); X_1 - концентрація твердого компонента ВВП; X_2 , X_3 - параметри Γ_1 і Γ_2 , що характеризують бимодальність гранулометричного складу ВВП відповідно.

Таблиця 2.5 – Матриця планування експерименту

Y	X0	X1 (C)	X2 (Γ_1)	X3 (Γ_2)	X1X2	X1X3	X2X3	X1X2X3
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1

На підставі отриманих результатів були визначені значення реологічних параметрів ВВП, ефективної в'язкості і граничного напруження зсуву для трьох

варіантів концентрацій твердого компонента (60, 62,5 та 65%). Оптимальним гранулометричним складом вугілля, що дозволяє отримати ВВП з оптимальними характеристиками, є гранулометричний склад, при якому значення η складають 0,278, 0,342 і 0,438 Па с, для концентрацій 60, 62,5 і 65% відповідно. Значення τ_0 при цьому склали 1,3, 1,55 і 3,18 відповідно [59,60].

У подальших дослідженнях для опису залежності витрати ВВП від чинного перепаду тисків пропонується використовувати повне рівняння Букінгама, яке визначає залежність між гідравлічним ухилом і об'ємною витратою [61].

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8\eta L} \left[1 - \frac{4}{3} \frac{2\tau_0 L}{R \Delta P} + \frac{1}{3} \left(\frac{2\tau_0 L}{R \Delta P} \right)^2 \right] \quad (2.24)$$

де Q - об'ємна витрата ВВП; R - внутрішній радіус трубопроводу; ΔP - діючий перепад тисків; η - ефективна в'язкість ВВП; L - довжина трубопроводу; τ_0 - початкове дотичне напруження зсуву ВВП.

$$i = \frac{1}{A} \frac{2\tau_0}{\rho_0 g R} \quad (2.25)$$

де i - гідравлічний ухил; ρ_0 - щільність води; g - прискорення вільного падіння; A - параметр для вираження гідравлічного ухилу.

В дисертаційній роботі запропонована залежність, що дозволяє визначити щільність твердого компонента ВВП з урахуванням питомої щільності вугілля, його пористості і щільності води [60]:

$$\rho_{TB} = \rho_{\text{вуг}} + m \cdot \rho_B, \quad (2.26)$$

де $\rho_{\text{вуг}}$ - питома щільність вугілля, кг/м^3 ;

m - пористість вугілля або частка обсягу, яку займають пори;

ρ_B - щільність води.

а також залежність для визначення масової щільності ВВП, яка має вигляд [60]:

$$\rho_{ВВП} = \frac{\rho_{TB} \cdot \rho_B}{C \cdot \rho_B - C \cdot \rho_{TB} + \rho_{TB}}. \quad (2.27)$$

де C - концентрація ВВП, %.

Дана формула дозволяє в повній мірі врахувати всі чинники, які впливають на величину ρ ВВП і, як наслідок, підвищити достовірність розрахунку гідравлічного ухилу за формулою (2.24). Результати розрахунку представлені на рис. 2.12.

Отримані результати були розраховані для швидкості транспортування ВВП рівній 0,3 м/с. Запропонований критерій бімодальності гранулометричного складу ВВП склав в діапазонах 7,76–16,8 для Γ_1 ; 4,3–6,5 для Γ_2 і 1,1–3,8 для відношення Γ_1/Γ_2 відповідно (рис. 2.13, 2.14).

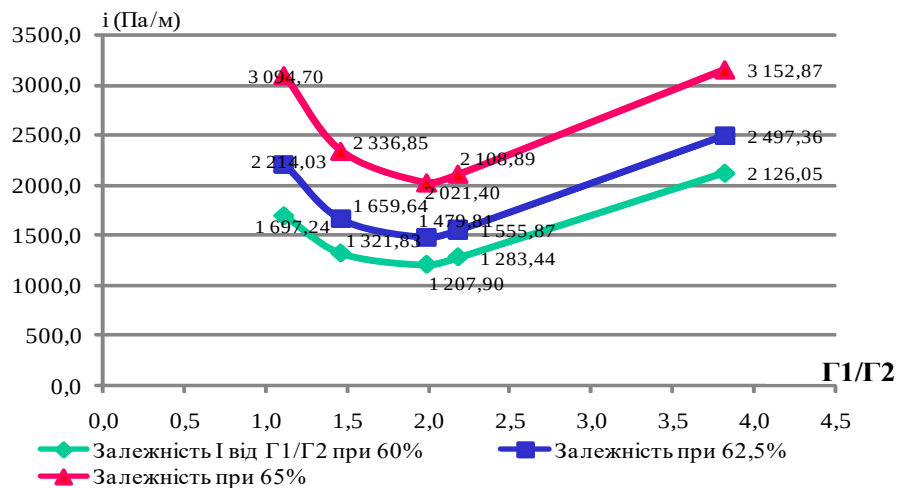


Рисунок 2.12 – Залежність питомих втрат тиску при гідротранспортуванні ВВП від параметра Γ_1/Γ_2 при різних концентраціях твердої фази (60, 62,5 і 65%)

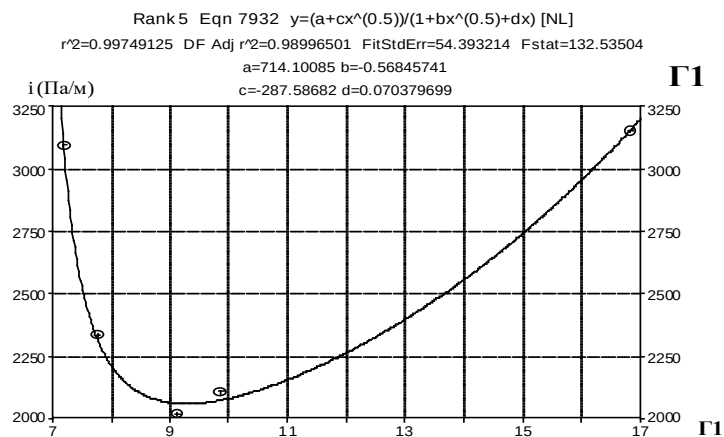


Рисунок 2.13 – Залежність питомих втрат тиску при гідротранспортуванні ВВП від параметра Γ_1 при швидкості транспортування 0,3 м/с ($C = 65\%$)

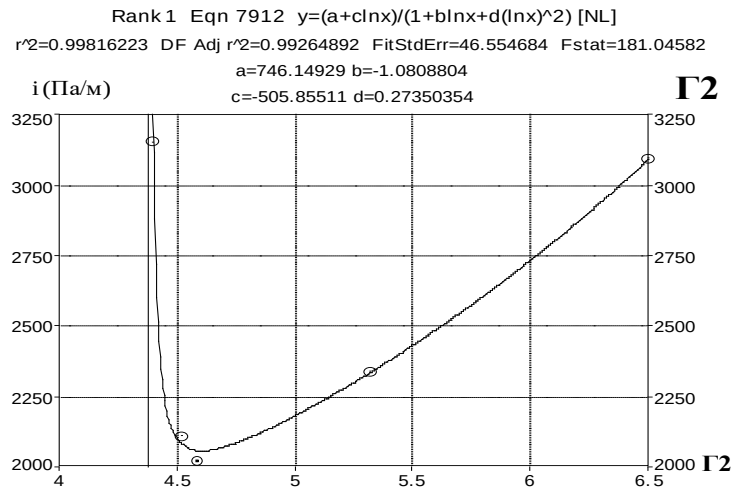


Рисунок 2.14 – Залежність питомих втрат тиску при гідротранспортуванні ВВП від параметрів Γ_2 при швидкості транспортування 0,3 м/с ($C = 65\%$)

Цей критерій повною мірою дозволив оцінити ступінь бімодальності гранулометричного складу ВВП, чим створюється передумова для об'єктивної оцінки даного показника і оптимізації варіантів сумішей за критерієм енерговитрат на транспортування.

Величина m в даному випадку – відношення об'єму порожнин до обсягу вугілля $V_{\text{вуг}}$. При цьому загальноприйнята масова концентрація ВВП (наприклад: $C=65\%$) – це концентрація при якій відбувається фактична упаковка, тобто збільшення граничної концентрації.

Для визначення об'єму ВВП існує залежність:

$$V_{\text{ВВП}} = \frac{m_{\text{вв}}}{\rho} = \frac{m_{\text{води}} + m_{\text{вуг}}}{1290,6} = 0,0775 \text{ м}^3;$$

Обсяг порожнин у вугіллі пропонується визначати залежністю:

$$V_{\text{пор.вуг}} = V_{\text{вуг}} \cdot m, \text{ м}^3;$$

Об'єм вугілля з урахуванням води у порожнинах:

$$V_{\text{вуг+вода}} = \frac{C + (m_{\text{води}} - m_{\text{зал.води}})}{\rho_{\text{ВВП}}} \text{ м}^3;$$

де $m_{води}, m_{вуг}, m_{зал.води}$ – маса води, вугілля, та залишкової води, яка не зайшла у порожнини, кг., або об'ємні параметри відповідно $V_{води}, V_{вуг}, V_{зал.води}$.

В результаті отримаємо: $V_{ВВП}^* = V_{зал.води} + V_{вуг.+вода}, м^3$.

Значення об'ємної концентрації C_v^* дорівнює відсотковому відношенню числа $V_{вуг.+вода}$ від числа $V_{ВВП}^*$, тобто від загального обсягу ВВП.

Результати розрахунків об'ємної концентрації ВВП представлені на рис. 2.15.

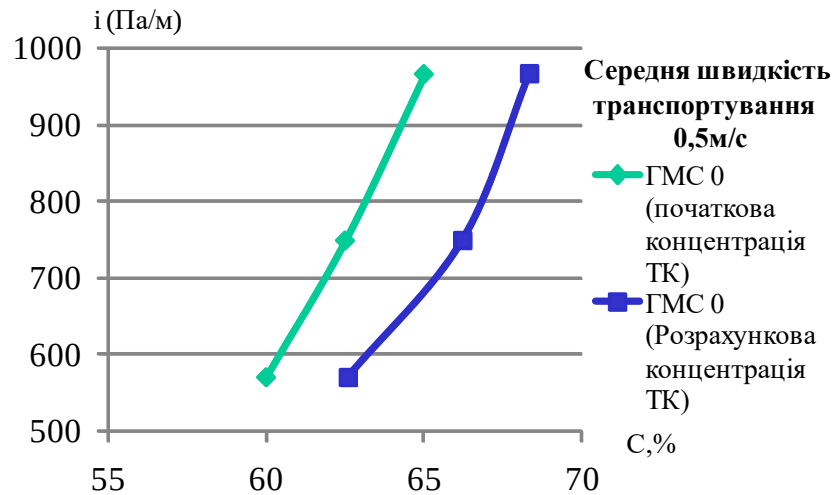


Рисунок 2.15 – Залежність питомих втрат тиску при транспортуванні ВВП від концентрації твердої фази

Запропонований метод розрахунку масової та об'ємної концентрацій твердої компоненти ВВП дозволив врахувати поглинання рідкої компоненти відкритими порами твердих частинок і розкрити ефект підвищення енерговитрат на його транспортування у промислових гідротранспортних системах у діапазоні формальних концентрацій 60–65%.

2.3 Вплив кількості шарів дрібних частинок бімодального складу на питомі втрати тиску при транспортуванні ВВП

За базу для побудови моделі ВВП покладено підхід, запропонований В.І. Мурко [2], який визначає водовугільну суспензію як стабілізовану дисперсну систему (СДС), в якій завдяки силам взаємодії між дрібними частинками утримуються великі частки.

З урахуванням різниці в хімічній природі великих і дрібних частинок вугілля і закономірностей, виявлених в процесі мокрого диспергування, можна стверджувати, що поверхня найбільш тонких частинок твердої фази ВВС є в максимальній мірі гідрофільною і, навпаки, поверхня більших частинок переважно гідрофобна. Різний механізм утворення структури в ВВС частинками твердої фази різної крупності знайшов відображення в роботі Н.Б.Урьєва [62].

Відомо, що для різних видів водних суспензій високодисперсних глин з різним діаметром частинок утворюються міцні коагуляційні просторові структури, в яких сили зчеплення стають порівнянними з їх ефективною вагою [29]. Для таких систем міжфазна поверхня, тобто поверхня розділу частка - рідке середовище, віднесена до одиниці об'єму або маси системи, стає досить значною (зазвичай від частки $\text{м}^2/\text{г}$ до декількох $\text{м}^2/\text{г}$, а при наявності частинок розміром менше 0,1 $\mu\text{м}$ до 5-10% - до декількох десятків $\text{м}^2/\text{г}$).

Мимовільне зчеплення частинок і утворення просторових структур з них при фіксації часток через найтонші прошарки рідкого середовища (води) є результат прояву поєднання сил тяжіння (Ван-Дер-Ваальсової молекулярної взаємодії) і електростатичного відштовхування частинок, а також прагнення системи зменшити величину надлишкової міжфазної енергії, пропорційної поверхні розділу фаз, шляхом зменшення поверхні розділу при виникненні контактів між частками. Цей процес термодинамічно виправданий, оскільки супроводжується зростанням ентропії системи. Характер сил взаємодії представлений на рис. 2.14. При цьому відомі дві характерні «енергетичні ями» - на відстані ближньої коагуляції НТТ і на відстані далекої коагуляції Н2. Частинки, що зблизилися на відстань Нз починають притягатися аж до відстані далекої коагуляції Н2, при подальшому зближенні на частинки починають діяти сили електростатичного відштовхування на відстані Н2 сила відштовхування максимальна, але при досить великих зовнішніх силах частки проходять цей енергетичний бар'єр і на відстані НТШ починають діяти сили іонoeлектростатичного тяжіння. Ці сили набагато більше сил Ван-Дер-Ваальсової взаємодії, при цьому утворюються дуже міцні структури, які володіють великою питомою щільністю. Під дією сил

тяжіння такі структури будуть швидко осідати, тобто в діапазоні відстаней від H_1 до H_3 сила взаємодії носить характер подібний пружині: пружина з початковим розміром H_2 при довжині H_1 намагається випрямитися, а при довжині H_3 намагається стиснутися. Для попадання в першу енергетичну яму досить броунівського руху частинок, щоб зблизившись до відстані H_3 , потрапити в зону впливу частки.

Розглянемо області графіка рис. 2.16, відповідні енергетичним ямам H_1 і H_3 при порівнянні цих областей з графіком зміни потенційної енергії, для пружини видно, що характер зміни енергії зв'язку в суспензії в областях ближньої і далекої коагуляційної взаємодії подібний до дії пружини.

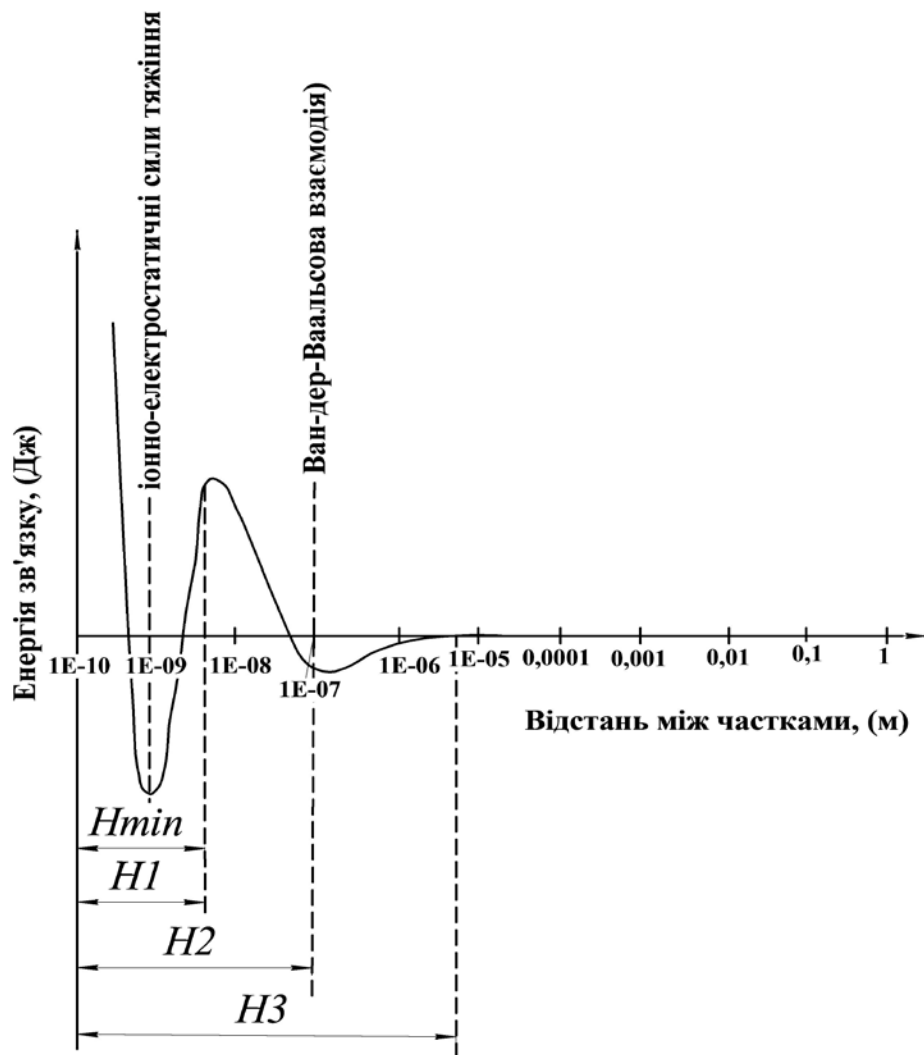


Рисунок 2.16 – Характер зміни енергії взаємодії між частинками H_1 - відстань ближньої коагуляції; H_{min} - відстань електростатичного відштовхування; H_2 - відстань далекої коагуляції; H_3 - відстань початку взаємодії

Це дає підставу припустити, що частинки знаходяться в суспензії на відстані далекої коагуляції один щодо одного, вступають в пружинну взаємодію (рис. 2.17), а маси взаємодіючих частинок формують в суспензії пружні властивості. Величина пружинної взаємодії і модуль пружності середовища будуть визначені нижче.

Такі в загальному вигляді загальновідомі в фізичній хімії дисперсних систем причини мимовільного утворення структури часток.

Відповідно до отриманих результатів і виконаного аналізу розглянемо висококонцентровану водовугільну суспензію, приготувану із застосуванням реагенту-пластифікатора, як складну дисперсну систему, що складається з стабілізованої системи (СДС), що включає рідку фазу з тонкодисперсними частками твердої фази з розміром менше 10мкм, представленими в основному мінеральними складовими вугілля, і сукупності великих часток твердої фази (> 10 мкм), утворених органічною частиною вугілля.



Рисунок 2.17 – Характер зміни потенційної енергії пружини

ВВП складається з часток вугілля, поміщених в воду тобто має корпускулярну природу, це вступає в протиріччя із записом рівнянь руху ВВП як суцільного середовища. Особливістю запропонованої моделі ВВП є поділ ВВП на дві частини - стабілізовану дисперсну систему і поміщені в неї великі частки. Необхідно запропонувати масштаб, що дозволяє класифікувати частки за розмірами на СДС і «великі», що буде зроблено нижче.

Як випливає з результатів поглиблених досліджень силової взаємодії великих і дрібних частинок в бімодальних сумішах [29] існують два роду сил: близькодійучі і далекодійучі. Відповідно оточуючі кожну з великих частинок дрібні фракції доцільно розділити на дві зони: що безпосередньо прилягають до макроповерхності і більш віддалені. Припустимо [63] для оцінки властивостей полідисперсного діапазону фракцій використовувати частки еквівалентного діаметру, які визначаються зі співвідношення

$$d_3 = \frac{1}{\frac{x_1}{d_1} + \frac{x_2}{d_2} + \dots} \quad (2.28)$$

де $x_1, x_2, \dots$ – масовий вміст окремих фракцій;

$d_1, d_2, \dots$ – еквівалентний діаметр окремих фракцій (мм або мк).

Еквівалентний діаметр, заснований на рівності сумарної поверхні частинок шару і сферичних частинок діаметром d_3 .

На підставі отриманих даних гранулометричного складу для приготування ВВП необхідно визначити співвідношення кількості дрібної і крупної фракції частинок еквівалентного діаметру в 1 см³ об'єму ВВП. Для цього складемо необхідну пропорцію співвідношення великої та дрібної фракції, віднісши проміжну фракцію до дрібної частинки:

$$\frac{\sum \partial_{дрібн.}}{\sum \partial_{велик.}} = \frac{\sum \partial_{ср\,дрібн.}}{\sum \partial_{ср\,велик.}}$$

де $\sum \partial_{ср\,дрібн.}$ – масова частка дрібних частинок еквівалентного діаметра, мм³;

$\sum \partial_{ср\,велик.}$ – масова частка великих часток еквівалентного діаметра мм³;

Далі необхідно визначити обсяг дрібної і крупної фракції (мм³) використовуючи запропоновану залежність:

$$V_{мелк.(кр.)} = 4 / 3\pi R^3 \quad (2.29)$$

або

$$V_{\text{мелк.}(кр.)} = 1/6\pi D^3$$

де D – еквівалентний діаметр великої або дрібної частки (d_s);

Для визначення абсолютної кількості дрібних і великих частинок застосуємо залежність:

$$n_{\text{мелк.}} = \frac{\sum \text{мелк.}}{V_{\text{мелк.}}}; \quad (2.30)$$

$$n_{кр.} = \frac{\sum \text{кр.}}{V_{кр.}} \quad (2.31)$$

При співвідношенні цих частинок, визначимо загальне число дрібних частинок на поверхні великої:

$$n_{\text{соотн}} = \frac{n_{\text{мелк.}}}{n_{кр.}} \quad (2.32)$$

Число частинок, які можуть розміститися на поверхні великої частки при гранично щільному заповненні навколишнього простору буде визначатися зі співвідношення поверхні великої частки πD^2 і площі перетину дрібної частинки однакового розміру $1/4\pi d^2$:

$$n_{\text{ч..слоя}} = \frac{4(d_{кр.} + d_{\text{мелк.}})^2}{d^2} \quad (2.33)$$

де $d_{кр.}$ – еквівалентний розмір великої частки, що утримується середовищем (мм, мкм);

$d_{\text{мелк.}}$ – діаметр дрібної частки (мм, мкм).

Дана залежність дозволить в результаті, визначити залишок кількості частинок після заповнення першого і подальших шарів дрібних частинок на поверхні великої:

$$n_{\text{ост}} = n_{\text{соотн}} - n_{\text{ч..слоя}} \quad (2.34)$$

За таким принципом знаходимо залишок дрібних частинок після формування наступних шарів. Після знаходження кількості всіх шарів і вичерпування усієї кількості дрібних частинок $n_{\text{состн}}$, визначаємо залишок на формування наступного (неповного) шару, шляхом знаходження відношення залишку від формування останнього (повного) шару і кількості частинок в наступному (не сформованому) шарі $n_{\text{ч.слоя}}$. Після складання обчислених значень кількості шарів і залишку формування неповного шару, отримаємо абсолютне значення кількості шарів дрібних частинок на поверхні великої (рис. 2.18–2.20).

Крім того, прилеглі частинки, утримувані силами адгезії і маючі дипольну природу, утворюють, очевидно, зовнішню оболонку великої частки, певним чином що вирівнює нерівності її поверхні і, тим самим, знижують втрати енергії при переміщенні бімодальної суміші (рис. 2.18).

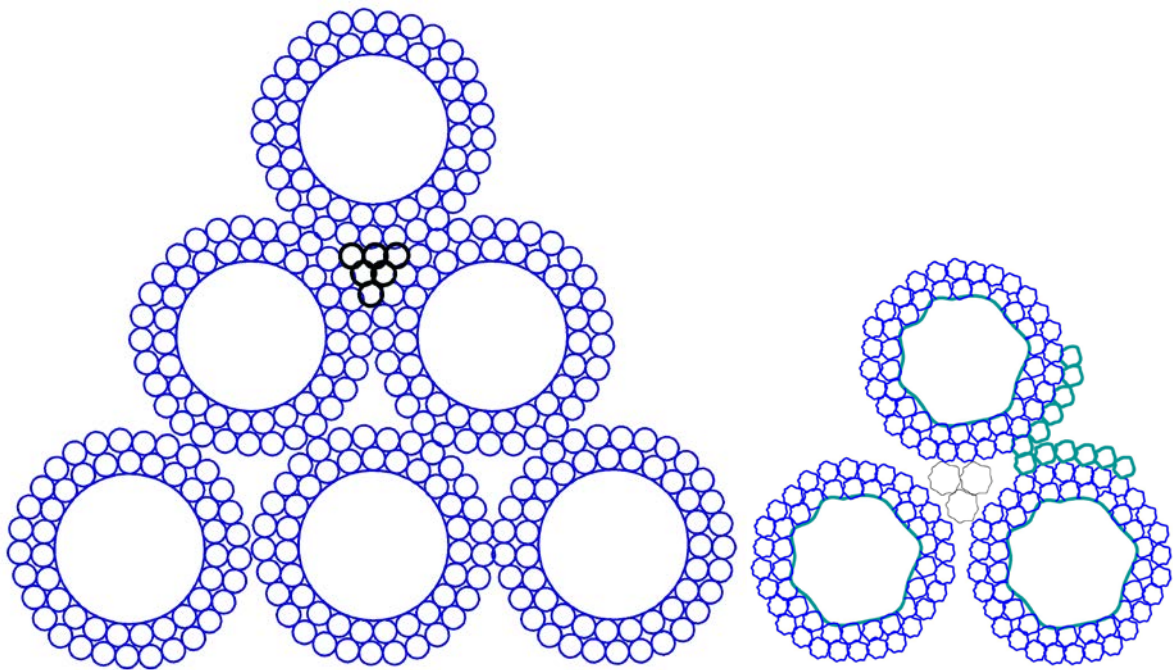


Рисунок 2.18 – Схема взаємодії великих і дрібних часток твердої фази в складі ВВП

При цьому перший шар має найбільший потенціал силової взаємодії з великою часткою - ядром і забезпечує обтічний профіль практично постійною конфігурації. Другий шар виконує роль власне змащення, що перешкоджає

«сухому тертю», тобто зіткненню великих часток між собою і інтенсифікації втрат енергії при їх руйнуванні. Недостатня кількість частинок другого і, тим більше, першого шару обумовлює можливість енерговитратних зіткнень великих фракцій, що викликає різке зростання питомих втрат тиску вліво від мінімуму на кривих (область досить повного заповнення двох шарів) (рис. 2.19). Підвищення опору вправо від зазначеної області обумовлено наявністю «зайвих» шарів-оболонок, тобто наявністю субстанції, що не утворює однорідної силової (силових) оболонок і виявляють себе тільки як безліч частинок, що перешкоджають досить упорядкованому переміщенню великих часток, які оточені двохшаровим змащенням з досить організованою структурою.

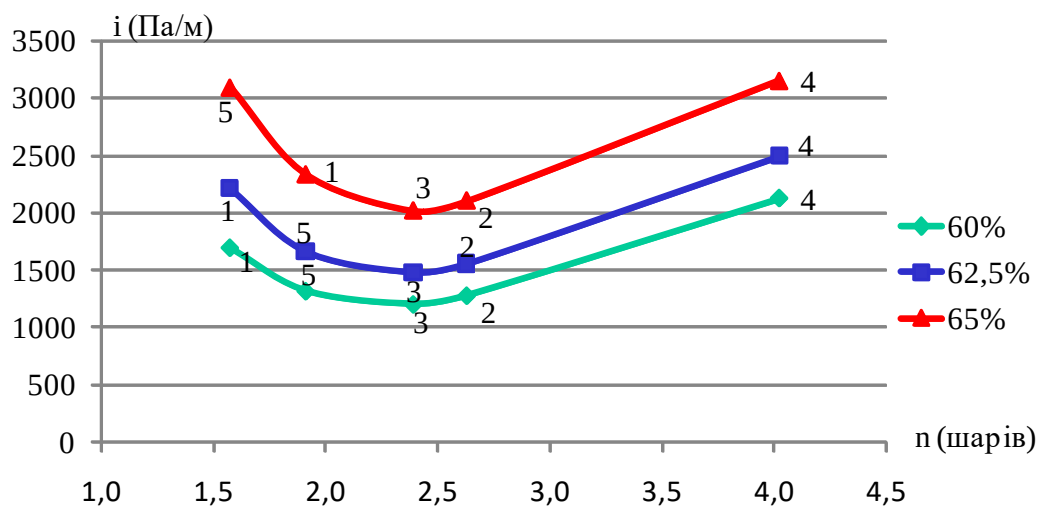


Рисунок 2.19 – Залежність питомих втрат тиску при транспортуванні ВВП від кількості шарів дрібних частинок бімодального складу при різних концентраціях твердої фази

Важливим аспектом формування структури ВВП є механізм щільності заповнення простору між великими і дрібними частинками (рис. 2.18). Відхилення від кількості шарів ($n = 2$) (рис. 2.19) в більшу сторону обумовлено тим, що розподіл часток в гранулометричному складі ВВП різний, присутні різні діаметри частинок в довільному співвідношенні, які заповнюють вільний простір між великими і дрібними частинками.



Рисунок 2.20 – Залежність критерію Γ_1/Γ_2 від числа шарів дрібної фракції

В результаті цього, в розрахунку був використаний еквівалентний діаметр частинок, що дозволяє врахувати тільки частинки двох діаметрів.

2.4 Математична модель руху водовугільного палива

Численні теоретичні та експериментальні дослідження транспортування водовугільних палив показали, що на параметри енергоефективності транспортування впливають досить багато чинників, з яких один з основних є гранулометричний склад палива. Дослідження впливу гранулометричного складу на параметри та енергоефективність транспортування потребує значної кількості експериментальних досліджень та постійного змінювання складу, який впливає на реологічні показники. На сьогоднішній день, широке розповсюдження отримало числове вирішення задач руху рідини при розумних витратах часу на розрахунок. Таким чином, з'явилася можливість зменшити кількість експериментальних досліджень за рахунок заміни частини найбільш коштовних експериментальних досліджень теоретичними числовими. Для цього необхідно, в першу чергу, провести валідацію математичних моделей з метою отримання як найменшого розходження між результатами математичного моделювання та експериментальних досліджень [64, 65]. Після отримання найменших похибок

розрахунку моделей течій необхідно вказати діапазон, в якому ці моделі мають достатню точність, та підкреслити в якому діапазоні параметрів отримані результати та висновки будуть мати чинність.

Для ньютонівських рідин за останні роки проведено велику кількість різноманітних досліджень щодо визначення найкращих, за помилками, моделей практично для усіх параметрів та геометрії течії, та ці роботи безупинно проводяться в даний час. На відміну від ньютонівських рідин для неньютонівських, визначення моделей значно більш складне за рахунок впливу додаткового чинника, такого як змінення в'язкості за реологічним законом. Для цих рідин проводиться значно менша кількість досліджень із допомогою програмних комплексів CFD, та наявність досить великої кількості реологічних моделей призводить до того, що для конкретної реологічної моделі та конкретних параметрів гранулометричного складу практично не проводилося досліджень числового вирішення рівнянь руху.

Розрахунки на математичних моделях процесів, що відбуваються під час транспортування водовугільного палива у трубопроводі та різноманітних елементах гідросистем дозволяють скоротити час на удосконалення методик розрахунку параметрів гідротранспортування та отримати найбільш точні характеристики систем із окресленням меж їх використання. Тому математичне моделювання є однією з найважливіших й актуальних задач дослідження руху високонцентрованого водовугільного палива [66].

Для опису поведінки рідини запишемо теорему про зміну головного вектора кількості руху системи. Ця теорема формулює зв'язок індивідуальної похідної від головного вектора кількості руху «рідкого» об'єму з головним вектором зовнішніх об'ємних та поверхневих сил, що прикладені до частинок рідини, які розташовані відповідно в об'ємі та на поверхні, що його обмежує [67]:

$$\frac{d\bar{V}}{dt} = \bar{F} + \frac{1}{\rho} \text{Div} T. \quad (2.35)$$

Де $\vec{V}$ – вектор швидкості; $\vec{F}$ – вектор масових сил; ρ – густина середовища; t – час.

Тензор напружень:

$$T \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{pmatrix}.$$

В декартових координатах система рівнянь записується в такий спосіб:

$$\begin{cases} \rho \left(\frac{\partial V_1}{\partial t} + V_1 \frac{\partial V_1}{\partial x_1} + V_2 \frac{\partial V_1}{\partial x_2} + V_3 \frac{\partial V_1}{\partial x_3} \right) = \rho F_1 + \frac{\partial p_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial p_{21}}{\partial x_2} + \frac{\partial p_{31}}{\partial x_3}, \\ \rho \left(\frac{\partial V_2}{\partial t} + V_1 \frac{\partial V_2}{\partial x_1} + V_2 \frac{\partial V_2}{\partial x_2} + V_3 \frac{\partial V_2}{\partial x_3} \right) = \rho F_2 + \frac{\partial p_{12}}{\partial x_1} + \frac{\partial p_{22}}{\partial x_2} + \frac{\partial p_{32}}{\partial x_3}, \\ \rho \left(\frac{\partial V_3}{\partial t} + V_1 \frac{\partial V_3}{\partial x_1} + V_2 \frac{\partial V_3}{\partial x_2} + V_3 \frac{\partial V_3}{\partial x_3} \right) = \rho F_3 + \frac{\partial p_{13}}{\partial x_1} + \frac{\partial p_{23}}{\partial x_2} + \frac{\partial p_{33}}{\partial x_3}. \end{cases} \quad (2.36)$$

Система рівнянь (2.36) у більш компактній індексній за правилом Ейнштейна, формі має наступний вигляд [67]:

$$\rho \left(\frac{\partial V_i}{\partial t} + V_k \frac{\partial V_i}{\partial x_k} \right) = \rho F_i + \frac{\partial p_{ki}}{\partial x_k} \quad (i, k = 1, 2, 3; \text{ підсумовування за } k), \quad (2.37)$$

де V_i, V_k – проекції складової вектора швидкості на осі координат; F_i – проекції вектора масових сил на осі координат; p_{ki} – елементи тензору напружень T .

Залежність між компонентами тензорів напружень та швидкостей деформації характеризує реологічний закон досліджуваної рідини. За результатами досліджень реологічного закону водовугільного палива [68] отримано, що воно, за відповідною концентрацією твердої фази, відноситься до в'язкопластичних

(Бінгамівських) рідин. Тоді, згідно з [67], компоненти тангенціальних напружень

$$p_{ik} = 2 \left(\eta + \frac{\tau_0}{H} \right) S_{ik}, i \neq k,$$

де

$$H = \left[\left(\frac{\partial V_1}{\partial x_2} + \frac{\partial V_2}{\partial x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_1}{\partial x_3} + \frac{\partial V_3}{\partial x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_2}{\partial x_3} + \frac{\partial V_3}{\partial x_2} \right)^2 + \right. \\ \left. + 2 \left(\frac{\partial V_1}{\partial x_1} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V_2}{\partial x_2} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V_3}{\partial x_3} \right)^2 \right]^{0,5}.$$

Складові тензора швидкостей деформацій S записуються наступним чином

$$S_{ik} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_k} + \frac{\partial V_k}{\partial x_i} \right).$$

З урахуванням реологічного закону для в'язкопластичних рідин, для тривимірного руху, залежність між елементами тензорів в узагальненому вигляді формулюється наступним чином:

$$p_{11} = -p + 2 \left(\eta + \frac{\tau_0}{H} \right) \frac{\partial V_1}{\partial x_1} - \frac{2}{3} \left(\eta + \frac{\tau_0}{H} \right) \operatorname{div} \bar{V};$$

$$p_{22} = -p + 2 \left(\eta + \frac{\tau_0}{H} \right) \frac{\partial V_2}{\partial x_2} - \frac{2}{3} \left(\eta + \frac{\tau_0}{H} \right) \operatorname{div} \bar{V};$$

$$p_{33} = -p + 2 \left(\eta + \frac{\tau_0}{H} \right) \frac{\partial V_3}{\partial x_3} - \frac{2}{3} \left(\eta + \frac{\tau_0}{H} \right) \operatorname{div} \bar{V};$$

$$p_{12} = p_{21} = \left(\eta + \frac{\tau_0}{H} \right) \left(\frac{\partial V_2}{\partial x_1} + \frac{\partial V_1}{\partial x_2} \right);$$

$$p_{13} = p_{31} = \left(\eta + \frac{\tau_o}{H} \right) \left(\frac{\partial V_3}{\partial x_1} + \frac{\partial V_1}{\partial x_3} \right);$$

$$p_{23} = p_{32} = \left(\eta + \frac{\tau_o}{H} \right) \left(\frac{\partial V_3}{\partial x_2} + \frac{\partial V_2}{\partial x_3} \right);$$

Для замикавання математичної моделі до рівнянь руху необхідно додати рівняння нерозривності.

Водовугільне паливо можна вважати нестисливою рідиною [67], тоді маємо

$$\operatorname{div} \bar{V} = 0,$$

або

$$\frac{\partial V_1}{\partial x_1} + \frac{\partial V_2}{\partial x_2} + \frac{\partial V_3}{\partial x_3} = 0. \quad (2.38)$$

Рівняння (2.38) з урахуванням зв'язку між компонентами тензорів напружень та швидкостей деформації, та (2.38) можна записати наступним чином:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial V_1}{\partial t} + V_1 \frac{\partial V_1}{\partial x_1} + V_2 \frac{\partial V_1}{\partial x_2} + V_3 \frac{\partial V_1}{\partial x_3} = F_1 - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_1} + \frac{1}{\rho} \left(\eta + \frac{\tau_o}{H} \right) \left(\frac{\partial^2 V_1}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 V_1}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 V_1}{\partial x_3^2} \right) \\ & \quad - \frac{\tau_o}{\rho H^2} \left(2 \frac{\partial H}{\partial x_1} \frac{\partial V_1}{\partial x_1} + \frac{\partial H}{\partial x_2} \left(\frac{\partial V_2}{\partial x_1} + \frac{\partial V_1}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial H}{\partial x_3} \left(\frac{\partial V_3}{\partial x_1} + \frac{\partial V_1}{\partial x_3} \right) \right); \\ & \frac{\partial V_2}{\partial t} + V_1 \frac{\partial V_2}{\partial x_1} + V_2 \frac{\partial V_2}{\partial x_2} + V_3 \frac{\partial V_2}{\partial x_3} = F_2 - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_2} + \frac{1}{\rho} \left(\eta + \frac{\tau_o}{H} \right) \left(\frac{\partial^2 V_2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 V_2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 V_2}{\partial x_3^2} \right) \\ & \quad - \frac{\tau_o}{\rho H^2} \left(\frac{\partial H}{\partial x_1} \left(\frac{\partial V_1}{\partial x_2} + \frac{\partial V_2}{\partial x_1} \right) + 2 \frac{\partial H}{\partial x_2} \frac{\partial V_2}{\partial x_2} + \frac{\partial H}{\partial x_3} \left(\frac{\partial V_3}{\partial x_2} + \frac{\partial V_2}{\partial x_3} \right) \right); \\ & \frac{\partial V_3}{\partial t} + V_1 \frac{\partial V_3}{\partial x_1} + V_2 \frac{\partial V_3}{\partial x_2} + V_3 \frac{\partial V_3}{\partial x_3} = F_3 - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_3} + \frac{1}{\rho} \left(\eta + \frac{\tau_o}{H} \right) \left(\frac{\partial^2 V_3}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 V_3}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 V_3}{\partial x_3^2} \right) \\ & \quad - \frac{\tau_o}{\rho H^2} \left(\frac{\partial H}{\partial x_1} \left(\frac{\partial V_1}{\partial x_3} + \frac{\partial V_3}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial H}{\partial x_2} \left(\frac{\partial V_2}{\partial x_3} + \frac{\partial V_3}{\partial x_2} \right) + 2 \frac{\partial H}{\partial x_3} \frac{\partial V_3}{\partial x_3} \right); \\ & \frac{\partial V_1}{\partial x_1} + \frac{\partial V_2}{\partial x_2} + \frac{\partial V_3}{\partial x_3} = 0. \end{aligned} \right.$$

Виконавши групування складових отримаємо:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial V_1}{\partial t} + V_1 \frac{\partial V_1}{\partial x_1} + V_2 \frac{\partial V_1}{\partial x_2} + V_3 \frac{\partial V_1}{\partial x_3} &= F_1 - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_1} + \frac{1}{\rho} \left(\eta + \frac{\tau_0}{H} \right) \left(\frac{\partial^2 V_1}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 V_1}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 V_1}{\partial x_3^2} \right) \\
 &\quad - \frac{\tau_0}{\rho H^2} \left(2 \frac{\partial H}{\partial x_1} \frac{\partial V_1}{\partial x_1} + \frac{\partial H}{\partial x_2} \left(\frac{\partial V_2}{\partial x_1} + \frac{\partial V_1}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial H}{\partial x_3} \left(\frac{\partial V_3}{\partial x_1} + \frac{\partial V_1}{\partial x_3} \right) \right) = \\
 &= F_1 - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_1} + \frac{1}{\rho} \left(\eta + \frac{\tau_0}{H} \right) \nabla^2 V_1 - \frac{\tau_0}{\rho H^2} \left(\frac{\partial H}{\partial x_1} \frac{\partial V_1}{\partial x_1} + \frac{\partial H}{\partial x_1} \frac{\partial V_1}{\partial x_1} + \frac{\partial H}{\partial x_2} \frac{\partial V_2}{\partial x_1} + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{\partial H}{\partial x_2} \frac{\partial V_1}{\partial x_2} + \frac{\partial H}{\partial x_3} \frac{\partial V_3}{\partial x_1} + \frac{\partial H}{\partial x_3} \frac{\partial V_1}{\partial x_3} \right) = F_1 - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_1} + \frac{1}{\rho} \left(\eta + \frac{\tau_0}{H} \right) \nabla^2 V_1 - \\
 &\quad - \frac{\tau_0}{\rho H^2} \left(\frac{\partial H}{\partial x_1} \frac{\partial V_1}{\partial x_1} + \frac{\partial H}{\partial x_2} \frac{\partial V_1}{\partial x_2} + \frac{\partial H}{\partial x_3} \frac{\partial V_1}{\partial x_3} + \frac{\partial H}{\partial x_1} \frac{\partial V_1}{\partial x_1} + \frac{\partial H}{\partial x_2} \frac{\partial V_2}{\partial x_1} + \frac{\partial H}{\partial x_3} \frac{\partial V_3}{\partial x_1} \right).
 \end{aligned}$$

Таким чином, система рівнянь може бути також записана наступним чином:

$$\begin{cases} \frac{\partial V_i}{\partial t} + V_k \frac{\partial V_i}{\partial x_k} = F_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \left(\eta + \frac{\tau_0}{H} \right) \nabla^2 V_i - \frac{\tau_0}{\rho H^2} \left(\frac{\partial H}{\partial x_k} \frac{\partial V_i}{\partial x_k} + \frac{\partial H}{\partial x_k} \frac{\partial V_k}{\partial x_i} \right); \\ \frac{\partial V_k}{\partial x_k} = 0; \end{cases} \quad (i, k = 1, 2, 3). \quad (2.39)$$

У найбільш поширеному, турбулентному русі рідини, на сьогоднішній день, за недостатністю комп'ютерних ресурсів для прямого моделювання рівнянь (2.39), які є нелінійними диференціальними рівняннями в частинних похідних другого порядку [67], використовують їх осереднення за Рейнольдсом [67-69]. Запишемо теорему про зміну головного вектора кількості руху системи враховуючи осереднення та опускаючи знаки осереднення в подальшому:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + (\bar{V} \cdot \bar{\nabla}) \bar{V} = \bar{F} - \frac{1}{\rho} \overline{grad p} + \frac{1}{\rho} \overline{Div(T_M + T_T)}; \\ div \bar{V} = 0. \end{cases} \quad (2.40)$$

де T_M и T_T – молекулярна та турбулентна складові тензору в'язких напружень.

Величини молекулярних складових тензору напружень визначають згідно реологічної моделі в'язкопластичної рідини:

$$T_M = 2 \left(\eta + \frac{\tau_0}{N} \right) S,$$

Система рівнянь (2.40) є незамкнутою оскільки зв'язок між турбулентними складовими тензора напружень T_T з параметрами осередненої течії невідома й повинна визначатися за допомогою додаткових співвідношень, тобто моделлю турбулентності. Якщо використовують лінійну модель турбулентності, наприклад SST-модель Ментера, припускають виконання узагальненої гіпотези Бусінеска [70]:

$$T_T = 2\mu_t S + \frac{2}{3}kE,$$

де μ_t – турбулентна в'язкість; k – кінетична енергія турбулентності,

$$k = \frac{1}{2}(V_1'^2 + V_2'^2 + V_3'^2), \quad (2.41)$$

$$E_{ij} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} - \text{тензорна одиниця.}$$

Наведені вище рівняння є загальними для розрахунку турбулентної течії. Якщо течія ламінарна, то ці рівняння значно спрощуються та немає необхідності розрахунку пульсаційних компонент або використання моделей турбулентності. Для визначення режиму руху в'язкопластичної рідини обчислюють відповідне число Рейнольдса за наступною формулою:

$$\text{Re}^* = \frac{\rho V d}{\eta \left(1 + \frac{\tau_0 d}{\eta V} \right)}. \quad (2.42)$$

У подальшому верхній індекс $*$ записувати не будемо, але мова буде йти саме про відповідне для в'язкопластичної рідини число Рейнольдса.

У більшості випадків геометрична форма проточної частини характеризується великою кількістю змінень площі поперечного перетину, і заздалегідь не відомо який тип течії існує. Особливо невизначеність проявляється під час поворотів та проходження елементів зі звуженням проточного перетину, де можуть локально з'являтися числа Рейнольдсу, що відповідають турбулентному рухові рідини. Таким чином, надалі будемо записувати рівняння, які відповідають загальному випадку турбулентної течії рідини.

Записуючи рівняння системи (2.40) на осі координат із урахуванням реологічної моделі бінгамівської рідини отримуємо [67, 70]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_1}{\partial t} + V_1 \frac{\partial V_1}{\partial x} + V_2 \frac{\partial V_1}{\partial y} + V_3 \frac{\partial V_1}{\partial z} &= F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\frac{\eta}{\rho} + \frac{\tau_0}{\rho H} + v_t \right) \frac{\partial V_1}{\partial x} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\frac{\eta}{\rho} + \frac{\tau_0}{\rho H} + v_t \right) \frac{\partial V_1}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\left(\frac{\eta}{\rho} + \frac{\tau_0}{\rho H} + v_t \right) \frac{\partial V_1}{\partial z} \right); \\ \frac{\partial V_2}{\partial t} + V_1 \frac{\partial V_2}{\partial x} + V_2 \frac{\partial V_2}{\partial y} + V_3 \frac{\partial V_2}{\partial z} &= F_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\frac{\eta}{\rho} + \frac{\tau_0}{\rho H} + v_t \right) \frac{\partial V_2}{\partial x} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\frac{\eta}{\rho} + \frac{\tau_0}{\rho H} + v_t \right) \frac{\partial V_2}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\left(\frac{\eta}{\rho} + \frac{\tau_0}{\rho H} + v_t \right) \frac{\partial V_2}{\partial z} \right); \quad (2.43) \\ \frac{\partial V_3}{\partial t} + V_1 \frac{\partial V_3}{\partial x} + V_2 \frac{\partial V_3}{\partial y} + V_3 \frac{\partial V_3}{\partial z} &= F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\frac{\eta}{\rho} + \frac{\tau_0}{\rho H} + v_t \right) \frac{\partial V_3}{\partial x} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\frac{\eta}{\rho} + \frac{\tau_0}{\rho H} + v_t \right) \frac{\partial V_3}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\left(\frac{\eta}{\rho} + \frac{\tau_0}{\rho H} + v_t \right) \frac{\partial V_3}{\partial z} \right) \end{aligned}$$

де ν_t – турбулентна кінематична в'язкість.

На сьогоднішній час існує досить велика кількість різних моделей турбулентності [71,72,73], які успішно використовують для розрахунків різних типів. В багатьох роботах проводять порівняння результатів [74, 75], отриманих за допомогою різних моделей турбулентності та приходять до висновку, що однією з універсальних моделей є модель Ментера SST [76]. Ця модель має перевагу при моделюванні примежових течій та дає добрі результати для розрахунків обмежених стінками потоків [77], оскільки немає негативних рис власних моделей Сафмена-Вілкокса (стандартна « $k - \omega$ » модель) і сімейству « $k - \varepsilon$ » моделей.

Осереднені характеристики турбулентності пов'язані з турбулентною в'язкістю наступним співвідношенням [78]:

$$\nu_T = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega F_2)}, \quad (2.44)$$

де k – кінетична енергія турбулентності; $a_1 = 0,31$ – емпіричний коефіцієнт; ω – питома (в одиниці об'єму) швидкість дисипації; Ω – абсолютна величина завихореності; F_2 – змішувальна функція:

$$F_2 = \tanh \left[\left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right],$$

де y – відстань від стінки; β^* – константа, яка дорівнює 0,075.

За допомогою рівнянь переносу характеристик турбулентності можливо описати зміну в часі й просторі кінетичної енергії турбулентності й питомої швидкості її дисипації [70]:

$$\begin{cases} \frac{\partial k}{\partial t} + V_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_{k1} v_\tau) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]; \\ \frac{\partial \omega}{\partial t} + V_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha \Omega^2 - \beta \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_{\omega 1} v_\tau) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, \end{cases} \quad (2.45)$$

де V_j – компоненти швидкості; $P_k = \min \left(\tau_{ij} \frac{\partial V_i}{\partial x_j}, 10\beta^* k \omega \right)$ – генераційний турбу-

лентний член; $F_1 = \tanh \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega} \right), \frac{4\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right]^4 \right\}$ – емпірична функція;

$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right)$ – позитивна частина перехресних дифузій-

них членів [78].

В роботі математичне моделювання проводилося при таких значеннях констант моделі: $\sigma_{k1} = 0,85$; $\sigma_{k2} = 1$; $\sigma_{\omega 1} = 0,5$; $\sigma_{\omega 2} = 0,856$; $\alpha_1 = 5/9$; $\alpha_2 = 0,44$; $\beta_1 = 3/40$; $\beta_2 = 0,0828$, обумовлених рівнянням $\phi = \phi_1 F_1 + \phi_2 (1 - F_1)$ [76].

Перевагами даної моделі турбулентності є нечутливість до граничних умов у зовнішньому потоці та врахування впливу структури турбулентності з боку шарів рідини, розташованих вище за течією [70].

Параметри τ_0, η – початкова напруга зсуву та структурна в'язкість за-
давалися програмно за результатами експериментальних досліджень щодо реологічних параметрів водовугільного палива.

Застосовувалися універсальні «жорсткі» граничні умови, що дозволяють розрахувати поле течії.

На твердих стінках, враховуючи прилипання рідини, приймалася наступна гранична умова:

$$\overline{V} \Big|_b = 0.$$

У вхідному перетині каналу задавалася вхідна швидкість:

$$V|_b = V_{\text{in}}.$$

У вихідному перетині каналу рівність нулю статичного тиску:

$$p|_b = 0.$$

Для характеристик турбулентності на твердій поверхні прийняті такі граничні умови [76]. Рівність нулю потоку кінетичної енергії турбулентності: $Fk = 0$.

Питома швидкість дисипації енергії турбулентності на твердій стінці розраховувалася за залежністю [76]:

$$\omega = 10 \frac{6\nu}{\beta_1 (\Delta y)^2},$$

де Δy – примежовий крок.

У вхідному перетині каналу питому швидкість дисипації розраховували за залежністю:

$$\omega_{\infty} = (1 \rightarrow 10) \frac{V}{L_{\infty}},$$

де L_{∞} – орієнтовна довжина розрахункової області.

У вхідному перетині кінетична енергія турбулентності розраховували на основі вихрової в'язкості:

$$k_{\infty} = \nu_{t\infty} \omega_{\infty},$$

де $\nu_{t\infty} = 10^{-(2 \rightarrow 5)} \nu$ – вихрова в'язкість у вхідному перетині.

Для кращого рішення малих деталей геометрії розрахункової області й в області високих градієнтів параметрів розрахункових змінних використана

адаптивна локально здрібнена сітка. Апроксимація розрахункової змінної виконана як схема реконструкції, що має підвищений порядок точності [79].

Розрахунок течії водовугільного палива каналом на запропонованій математичній моделі, займає тривалий проміжок часу, що становить приблизно 3 години при використанні персонального комп'ютера середньої потужності (CPU 5200 MHz, RAM 8192 Mb), що говорить про складність процесів, описуваних нею й необхідності використання потужної комп'ютерної техніки для розрахунку течії, особливо під час складних елементів звуження потоків або поворотів.

2.4.1 Числова реалізація математичної моделі

Для рішення поставленої задачі використано методи обчислювальної гідродинаміки – метод кінцевих об'ємів (FVM) [80]. Сутність метода складається з наступного: обирається деяка замкнута область течії рідини, для якої виробляється пошук полів макроскопічних величин (наприклад, швидкості, тиску), що описують стан середовища в часі й задовольняючих певним законам, сформульованим математично. Найбільш використовуваними є закони збереження в ейлерових змінних: для будь-якої величини ϕ , у кожній точці $O(x, y, z, t)$ простору, оточеного деяким замкнутим кінцевим об'ємом, у момент часу t існує наступна залежність: загальна кількість величини ϕ в об'ємі може змінюватися за рахунок наступних факторів [77]:

- транспорт кількості цієї величини через поверхню, що обмежує контрольний об'єм – потік;
- генерація (знищення) деякої кількості величини ϕ усередині контрольного об'єму – джерело (стік).

Під контрольним об'ємом розуміється деякий замкнутий елементарний об'єм dW , обмежений поверхнею dS .

У свою чергу, потік величини ϕ через границю dS може бути розбитий на дві складові [77]:

- конвекційна – рух разом із середовищем;
- дифузійна – обумовлена хаотичним рухом у середовищі (наприклад, турбулентним).

Математично це може бути представлено в такий спосіб:

$$\underbrace{\frac{\partial \rho \phi}{\partial t}}_{\text{похідна за часом}} + \underbrace{\bar{\nabla} \cdot (\rho \bar{V} \phi)}_{\text{конвекційний член}} - \underbrace{\bar{\nabla} \cdot (\Gamma \bar{\nabla} \phi)}_{\text{дифузійний член}} = \underbrace{S_\phi(\phi)}_{\text{джерело}} \quad (2.46)$$

Оскільки одержати точне рішення рівнянь гідромеханіки не завжди можливо, то використовується процедура дискретизації. Метою дискретизації є трансформація системи диференціальних рівнянь у частинних похідних у відповідну систему алгебраїчних рівнянь. Результатом рішення алгебраїчної системи є множина значень, що відповідає точному рішенню системи в деяких, наперед заданих, точках у просторі й часі. У результаті дискретизації розрахункової області виходить числовий опис простору, що моделюється – розрахункова сітка. Розрахункова сітка містить у собі точки, в яких виробляється пошук рішення та опис границь. У випадку нестационарних задач, часова вісь також розбивається на кінцеве число інтервалів. Під час використання методу кінцевих об'ємів розкладання основного рівняння виробляється на складові, що впливають на сумарний баланс деякої величини. Метод кінцевих об'ємів є найбільш поширеним та найбільш популярним внаслідок того, що він дозволяє суворо дотримуватися законів збереження та основні поняття методу прямо відповідають фізичним величинам.

Під час використання методу розрахункову область розбито на кінцеве число контрольних об'ємів, які не перекривають один одного, тобто не перетинаються і повністю заповнюють розрахункову область. Змінні, що визначаються в процесі розрахунку, обчислюються у центрах контрольних об'ємів за до-

помогі декартової системи координат. Набір використаних форм об'ємів обмежено гексаедрами, тетраедрами та призмами. Використано два набори елементів (об'ємів): на основі гексаедрів (гексагональна сітка) та на основі тетраедрів (тетрагональна сітка). Для обох сіток використано призми для моделювання примежового шару, тобто біля твердих стінок знаходяться виключно призми, імітуючи прикордонний шар. З літератури відомо [81], що використання гексагональних елементів призводить до зменшення необхідної кількості контрольних об'ємів при збереженні точності розрахунку. Тому, у більшості випадків розрахунку використано гексагональну сітку, за виключенням деяких розрахунків, в яких отримання якісної гексагональної сітки потребує затрат значного часу на побудову такої сітки, наприклад під час побудови сітки з поворотом на радіус, рівний радіусу труби [82].

Крім дискретизації розрахункової області необхідно також розглянути загальну методику дискретизації основних рівнянь. Тому що при побудові диференціального рівняння будь-якої величини використається єдина форма, то розглянемо процес дискретизації методом контрольних об'ємів на прикладі деякої величини ϕ (2.46) [77] в інтегральному виді:

$$\int_t^{t+\Delta t} \left[\int_{W_p} \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dW + \int_{W_p} \bar{\nabla} \cdot (\rho \bar{V} \phi) dW - \int_{W_p} \bar{\nabla} \cdot (\Gamma_\phi \bar{\nabla} \phi) dW \right] = \int_t^{t+\Delta t} \left[\int_{W_p} S_\phi(\phi) dW \right]. \quad (2.47)$$

Дискретизація даного рівняння має другий порядок. Відповідно до теореми Гауса,

$$\int_{W_p} \bar{\nabla} * \phi dW = \int_S \bar{dS} * \phi, \quad (2.48)$$

де $*$ - будь-який тензорний добуток (наприклад, скалярний або векторний).

Конвекційний член

$$\int_{W_p} \bar{\nabla} \cdot (\rho \bar{V} \phi) dW = \sum_f F \phi_f, \quad (2.49)$$

де

$$F = (\bar{S}) \cdot (\rho \cdot \bar{V})_f; \quad (2.50)$$

дифузійний член

$$\int_{W_p} \bar{\nabla} \cdot (\Gamma_\phi \bar{\nabla} \phi) dW = \sum_f \Gamma_f \bar{S}_f \cdot (\bar{\nabla} \phi)_f, \quad (2.51)$$

джерело

$$\int_{W_p} S_\phi(\phi) dW = SuW_p + SpW_p \phi_p. \quad (2.52)$$

Похідна за часом: 1-й порядок точності

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{W_p} \rho \phi dW = \frac{(\rho_p \phi_p W)^n - (\rho_p \phi_p W)^0}{\Delta t}. \quad (2.53)$$

Похідна за часом (2-й порядок точності):

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{W_p} \rho \phi dW = \frac{3(\rho_p \phi_p W)^n - 4(\rho_p \phi_p W)^0 + (\rho_p \phi_p W)^{00}}{2\Delta t}. \quad (2.54)$$

Таким чином:

$$\sum_f F \phi_f - \sum_f \Gamma(S_f) \cdot (\nabla \phi)_f = SuW_p + SpW_p \phi_p. \quad (2.55)$$

У випадку одномірної стаціонарної задачі транспорту деякої скалярної величини рівняння перетвориться до виду [77]:

$$\frac{d}{dx}(\rho u A \phi) - \frac{d}{dx} \left(\Gamma A \frac{d}{dx} \phi \right) = S, \quad (2.56)$$

де u – швидкість; A – площа перетину контрольного об'єму в напрямку x (для одномірного випадку $A=1$), Γ – коефіцієнт дифузії.

Конвекційний член:

$$\frac{d}{dx}(\phi) = C_e \phi_e - C_w \phi_w, \quad (2.57)$$

де $C_e = (\rho u A)_e$ – вихідний потік, $C_w = (\rho u A)_w$ – вхідний потік.

Дифузійний член:

$$-\frac{d}{dx} \Gamma \frac{d}{dx} \phi = - \left[D_e (\phi_e - \phi_p) - D_w (\phi_p - \phi_w) \right], \quad (2.58)$$

де $D_e = \left(\frac{\Gamma A}{\Delta x} \right)_e$ та $D_w = \left(\frac{\Gamma A}{\Delta x} \right)_w$ – дифузійні коефіцієнти переносу.

Джерело розбивається на дві складові:

$$S = S_u W_p + S_p W_p \phi_p = b_p + s_p \phi_p. \quad (2.59)$$

Таким чином, підставляючи значення з рівнянь (2.56-2.58) одержуємо дискретний аналог рівняння (2.47):

$$C_e \phi_e - C_w \phi_w - \left[D_e (\phi_e - \phi_p) - D_w (\phi_p - \phi_w) \right] = b_p + s_p \phi_p. \quad (2.60)$$

Збираючи члени при ϕ_p, ϕ_e, ϕ_w , одержуємо:

$$\phi_p (D_e + D_w - s_p) - \phi_e D_e - \phi_w D_w + (C_e \phi_e - C_w \phi_w) = b_p. \quad (2.61)$$

Рівняння (2.61) представляється у вигляді:

$$a_p \phi_p - \sum_F a_F \phi_F = b_p; \quad F = \{E, W\} \quad (2.62)$$

При цьому в рівнянні (2.61) залишаються члени ϕ_e та ϕ_w , що відповідають значенням ϕ на границях контрольного об'єму (у тривимірному випадку – у центрах граней контрольного об'єму).

Для спрощення розглянемо систему рівнянь для нестисливої ньютонівської рідини. Для неньютонівської – змінюється визначення кінематичної в'язкості.

$$\bar{\nabla} \cdot (\bar{V}) = 0, \quad (2.63)$$

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (\bar{V} \bar{V}) - \bar{\nabla} \cdot (\nu \bar{\nabla} \bar{V}) = -\bar{\nabla} p. \quad (2.64)$$

$$a_p \bar{V}_p = \bar{H}(\bar{V}) - \bar{\nabla} p. \quad (2.65)$$

$$\bar{V}_p = \frac{\bar{H}(\bar{V})}{\bar{A}} - \frac{1}{\bar{A}} \bar{\nabla} p \quad (2.65)$$

при інтерполяції величин $\bar{V}$ і p на границях осередків рівняння (2.66) здобуває виду:

$$\bar{V}_f = \left(\frac{\bar{H}(\bar{V})}{\bar{A}} \right)_f - \left(\frac{1}{\bar{A}} \bar{\nabla} p \right)_f \quad (2.67)$$

$$\bar{\nabla} \cdot (\bar{V}_f) = \bar{\nabla} \cdot \left(\frac{\bar{H}(\bar{V})}{\bar{A}} \right)_f - \bar{\nabla} \cdot \left(\frac{1}{\bar{A}} \bar{\nabla} p \right)_f = 0 \quad (2.68)$$

Одержуємо, що

$$\bar{\nabla} \cdot \left(\frac{\bar{H}(\bar{V})}{\bar{A}} \right)_f = \bar{\nabla} \cdot \left(\frac{1}{\bar{A}} \bar{\nabla} p \right)_f \quad (2.69)$$

Рішення рівняння (2.68) забезпечує виконання закону збереження маси. Зробивши стандартну процедуру дискретизації рівнянь, одержуємо дискретний аналог системи Нав'є-Стокса [77]:

$$\begin{aligned} \bar{A} \bar{V}_p &= \bar{H}(\bar{V}) - \sum_f S(p)_f; \\ \sum_f S \left[\left(\frac{1}{\bar{A}} \right) (\bar{\nabla} p)_f \right] &= \sum_f S \left(\frac{\bar{H}(\bar{V})}{\bar{A}} \right)_f. \end{aligned} \quad (2.70)$$

Система рівнянь (2.70) може бути вирішена одночасно або ітераційно. У більшості програмних продуктів використовуються ітеративні методи, в основному – це SIMPLE (Semi-Implicit for Pressure-Linked Equations) для стаціонарних задач та PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators) для нестационарних. Суть всіх методів полягає в тім, що спочатку вирішують рівняння збереження імпульсу, користуючись старими значеннями тиску, вирішують рівняння для тиску та потім роблять корекцію поля швидкості відповідно до нових значень поля тиску [83, 84].

2.5 Верифікація розрахунків течії водовугільного палива з урахуванням гранулометричного складу

Використання вищенаведеної математичної моделі та числових засобів розрахунку можливе лише в спеціалізованому програмному забезпеченні внаслідок складності обчислювальних процедур виключно комп'ютерними засобами. На сьогоднішній день існують досить велика кількість програмних продуктів, що дають можливість розраховувати течії рідин та газів: OpenFoam, Ansys Fluent,

Cosmos FlowWorks, Ansys CFX, FlowVision та багато інших. Деякі з цих пакетів є виключно комерційними, деякі такі як OpenFoam є некомерційними з можливістю роботи за ліцензією GPL, що дозволяє вносити в них необхідні зміни (коректування математичних моделей) без втрати ліцензії, а значить і прав на використання (у тому числі, комерційне). Наприклад, програмний пакет Ansys дозволяє не комерційне використання програмних засобів CFX та Fluent при розрахунках течії рідин з обмеженням на число елементів (до 512 000). Тому що, Ansys є програмним продуктом, який використовують більшість підприємств світу та, внаслідок використання нами гексагональних сіток розміром до 500000 елементів в наших розрахунках течії водовугільного палива, в якості програмного продукту обрано – Ansys CFX з використанням безкоштовної ліцензії Student, чого було достатньо для отримання адекватних результатів.

Для верифікації числових розрахунків були зроблені експериментальні дослідження течії водовугільного палива прямим трубопроводом та знайдено витрати тиску для реалізації заданої витрати або швидкості суміші. Установка для фізичного дослідження описана в наступному розділі та включала вимірювальну апаратуру з точністю достатньою для проведення верифікації розрахунків, а потім і для перевірки адекватності. Для числових розрахунків було побудовано тривимірну модель дослідного стенду із дотриманням усіх розмірів (рис. 2.21).

В більшості розрахунків сітка складалася з 0,5 млн. елементів, і була побудована таким чином, щоб забезпечити параметр $Y^+ < 2$. Розрахунки проведено в стаціонарній постановці.

На рис. 2.22 наведено сіткову розбивку на гексагональні елементи моделі труби, в якій моделювалися втрати тиску. Для визначення необхідно кількості елементів було проведено чотири варіанти розрахунку при числі елементів 100 тис., 250 тис., 400 тис. та 500 тис. Було виявлено, що при числі елементів більше 400 тис. результати практично перестають змінюватися, що доводить достатність в наступному використанні для даної задачі сітки з 500 тис. елементів. Примежовий шар забезпечувався 15 елементами.

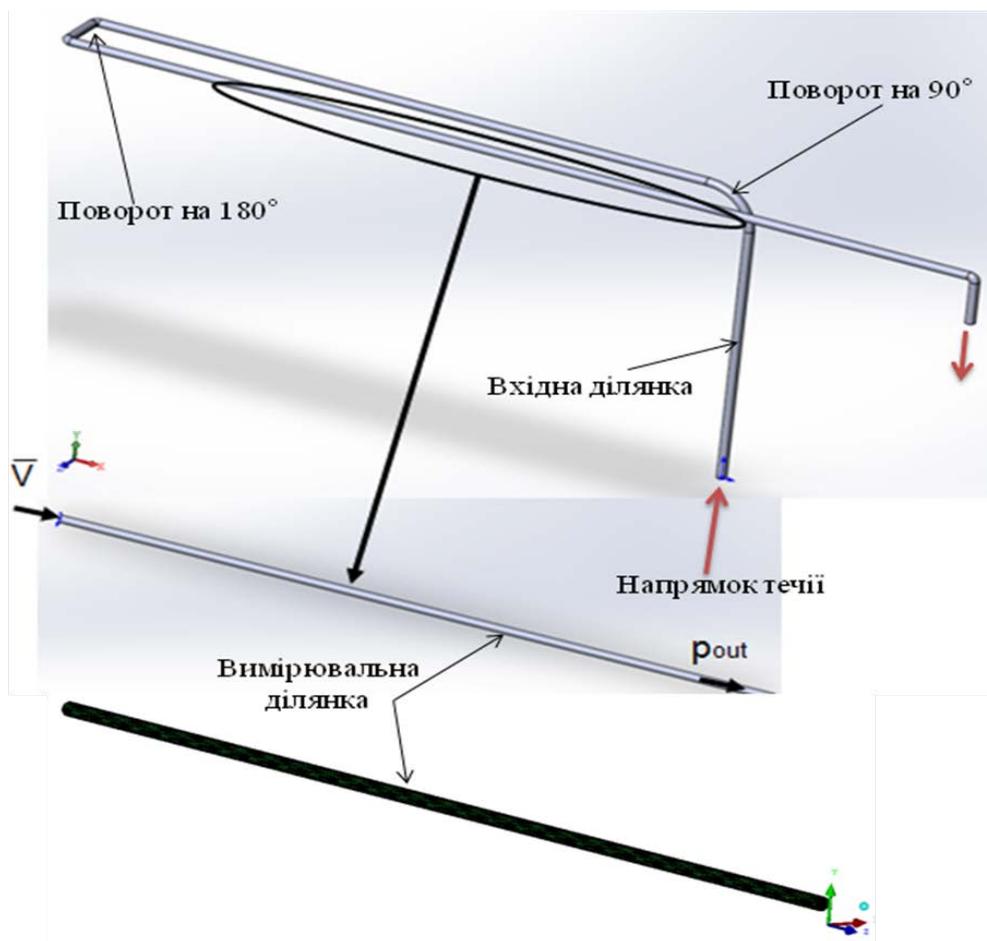


Рисунок 2.21 – Тривимірна модель експериментальної установки

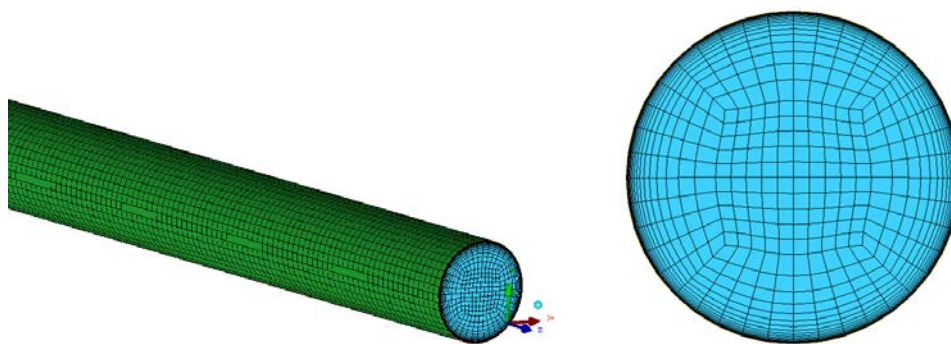


Рисунок 2.22 – Сіткова розбивка геометричної моделі трубопроводу

На рис. 2.23 наведено результати розрахунку течії водовугільного палива з наступними параметрами: $V = 0,5$ м/с, $\eta = 0,69$ Па·с, $\tau_0 = 4,63$ Па, $Re = 30$.

Як видно з рис. 2.23 біля осі труби є зона приблизно однакової швидкості, що якісно співпадає з результатами експериментальних досліджень. Ця зона є стрижневою течією, яка характерна для течії бінгамівських рідин. Таким чином, можна заключити, що результати числових розрахунків якісно добре збігаються з

аналітичним описом бінгамівської течії та з результатами експериментальних досліджень. Тому що лінії струму є прямі лінії, а також при перевірці чисел Рейнольдса, можна прийти висновку, що течія є ламінарною. Тому було проведено розрахунки та порівняння з експериментальними даними різних моделей: ламінарна, $k - \varepsilon$ та SST-модель. Результати розрахунків наведено на рис. 2.24. На рисунку показано похибку розрахунку втрат тиску у відсотках. Як видно з рисунку найбільшу помилку має розрахунок течії без урахування реологічного закону, тобто течії ньютонівської рідини з тією ж в'язкістю. Найменшу помилку мають ламінарна модель та SST-модель, з урахуванням реологічного закону.

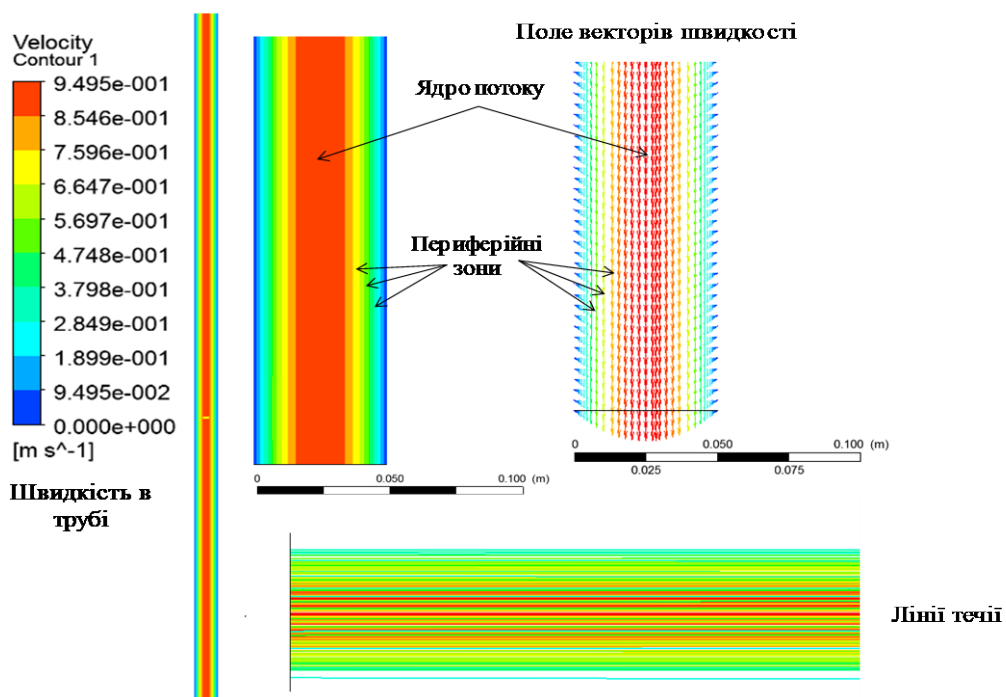


Рисунок 2.23 – Результати розрахунку течії водовугільного палива в трубі



Рисунок 2.24 – Порівняння точності визначення втрат тиску за різними моделями

Згідно порівняння точності розрахунку особливого значення не має яку саме модель обрати для розрахунку ламінарну чи модель Ментера, але щодо універсальності використання моделі, модель SST є більш універсальною та її можна використати для любых видів течій. Порівняння розрахунку профілю швидкості за ламінарною та SST-моделлю наведено на рис. 2.25 та рис. 2.26. Тут швидкість віднесена до максимальної швидкості біля осі, розрахованої для ньютонівської рідини.

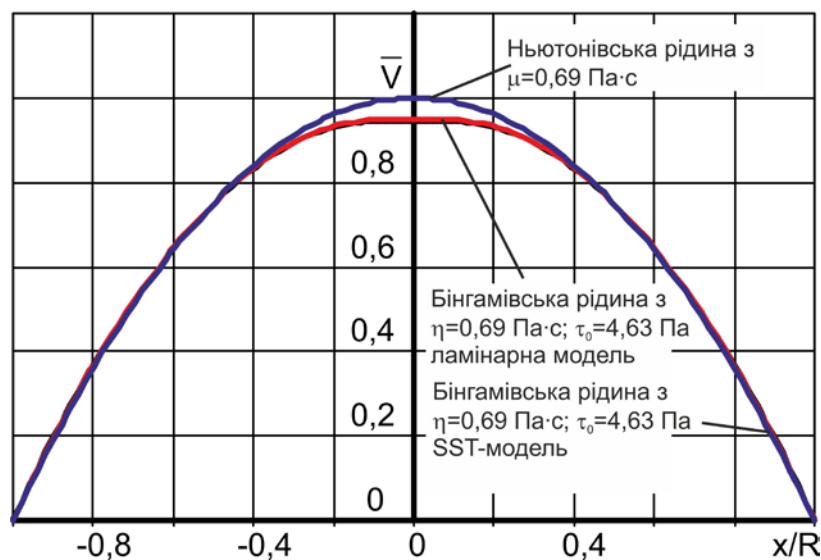


Рисунок 2.25 – Порівняння профілів швидкості під час розрахунку за різними моделями ($Re = 30$)

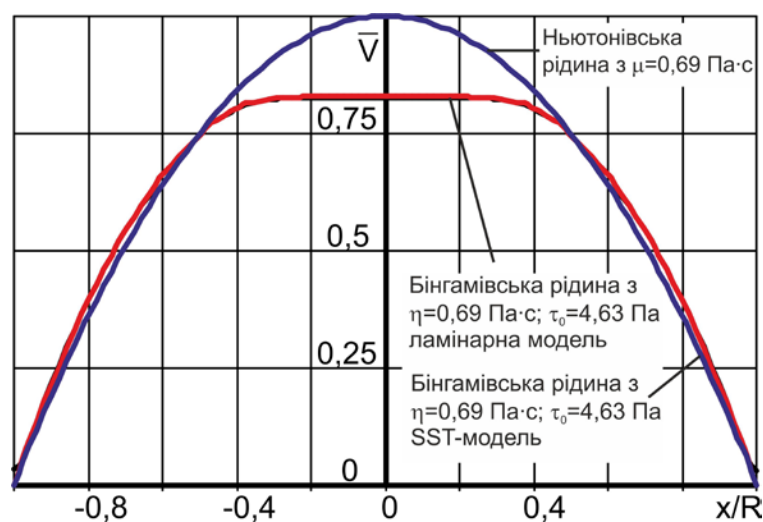


Рисунок 2.26 – Порівняння профілів швидкості під час розрахунку за різними моделями (середня швидкість $Re = 3$)

Як видно з рис. 2.25 та 2.26, використання моделі без урахування реологічного закону є неприпустимим, тому що похибка розрахунку профілю швидкості сягає значень до 40 % при $Re < 3$. Якщо середня швидкість течії рідини сягне значень, при яких число Рейнольдсу досягне критичних значень і відбудеться перехід до турбулентної течії моделлю розрахунку повинна бути обрана модель SST, але, навіть при менших швидкостях руху, при $Re < 30$, як проілюстровано на рис. 2.25, 2.26 використання SST-моделі майже не приводить до значних помилок, крім того профілі швидкості за ламінарною моделлю та моделлю SST майже співпадають.

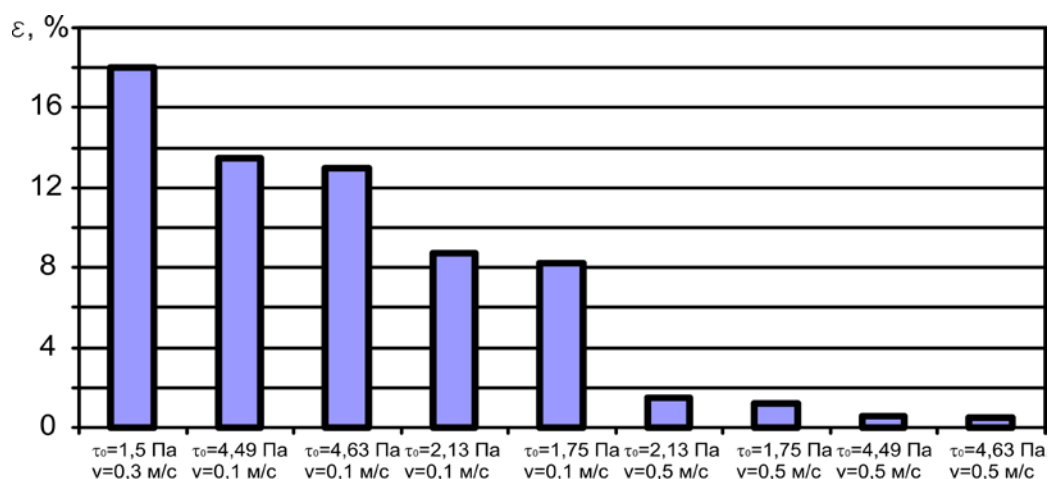


Рисунок 2.27 – Похибка розрахунку втрат тиску під час течії бінгамівської рідини за допомогою SST-моделі

Для верифікації обраної моделі проведено розрахунки течії бінгамівської рідини водовугільного палива з різними параметрами реологічної моделі, результати яких наведено на рис. 2.27. Тут представлено похибку розрахунку втрат тиску у трубі при різній середній швидкості руху. Похибка розраховано шляхом порівняння результатів теоретичних досліджень з експериментальними даними.

Як видно з рис. 2.27 найменшу помилку мають розрахунки течії з числами Рейнольдсу $Re > 30$, тобто чим більша швидкість руху бінгамівської рідини, тим менша похибка розрахунку за SST-моделлю турбулентності. Загалом, похибка не перевищує 20 %, а при збільшенні швидкості складає 0,5 %, що є прийнятним результатом, та говорить про те, що у подальшому можна використати програмний

комплекс та SST-модель під час розрахунків течії водовугільного палива та використати математичну модель для оптимізації гранулометричного складу палива.

Гранулометричний склад водовугільного палива впливає на значення в'язкості реологічної моделі, що в подальшому впливає на профіль швидкості та на втрати тиску під течії палива.

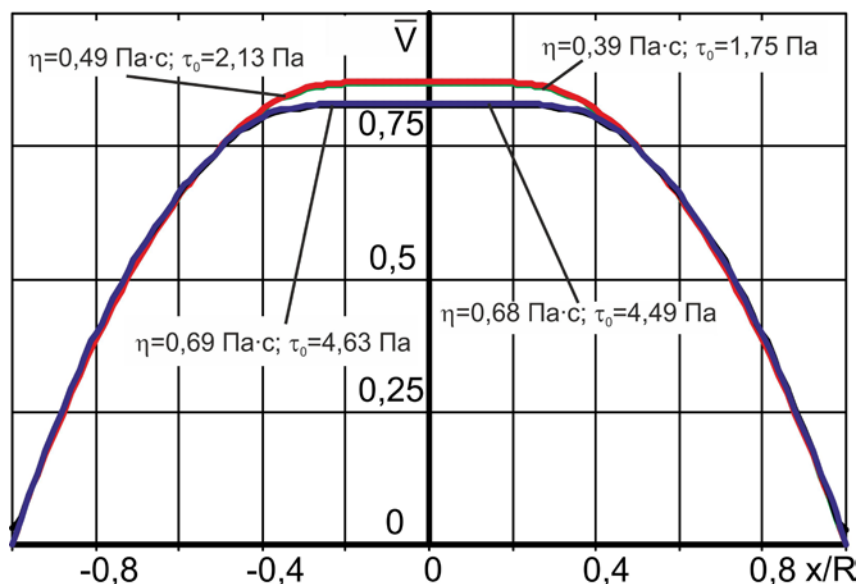


Рисунок 2.28 – Профілі швидкості для течії водовугільного палива різного гранулометричного складу

На рис. 2.28. наведено профілі швидкості, отримані під час розрахунків водовугільного палива різного гранулометричного складу. При збільшенні початкової напруги зсуву зменшується максимальна швидкість течії. На рис. 2.28 швидкість також, як і на рис. 2.26, віднесена до максимальної швидкості, розрахованої за моделлю ньютонівської рідини.

2.6 Оптимізація реологічних параметрів водовугільного палива під час течії прямим трубопроводом

Для знаходження оптимальних значень початкових напруг зсуву та структурної в'язкості проведено числовий експеримент на основі методів планування експерименту з метою зменшення втрат тиску. При проведенні числового експерименту було обрано фактори, які можуть істотно впливати на втрати тиску під

час течії водовугільного палива (τ_0, η). Інші геометричні та режимні параметри течії не варіювалися ($D = 50$ мм, $\rho = 1262$ кг/м³, $V = 0,5$ м/с, $c = 60$ %). За допомогою апріорної інформації про характеристики течії водовугільного палива визначено значення факторів, при яких виходять результати, близькі до оптимальних. Ці точки при плануванні розглядалися як нульовий (основний) рівень – $\tau_0 = 3$ Па, $\eta = 0,55$ Па·с. Нормування факторів представлено в табл. 2.5.

В результаті була отримана матриця планування (табл. 2.6), що містить дев'ять експериментальних точок. Розрахунковий розподіл профілю швидкості для експериментальних точок представлено на рис. 2.29. Як функція мети при плануванні була обрана втрата тиску.

Таблиця 2.5 – Нормування факторів

Значення	-1,41	-1,0	0	1,0	1,41
$\eta(x_1)$	0,339	0,4	0,55	0,7	0,76
$\tau_0(x_2)$	0,89	1,5	3	4,5	5,12

Відповідно до матриці планування проводилися числові експерименти за математичною моделлю (досліди 1..9), підставляючи в неї відповідні значення $\eta(x_1)$ й $\tau_0(x_2)$ за табл. 2.6

Таблиця 2.6 – Матриця планування експерименту

№ досліду	x_1	x_2	$x_1 x_2$	x_1^2	x_2^2	Δp
1	-1	-1	1	1	1	10740
2	-1	1	-1	1	1	11940
3	1	-1	-1	1	1	18100
4	1	1	1	1	1	19335
5	-1,41	0	0	2	0	9810
6	1,41	0	0	2	0	20200
7	0	-1,41	0	0	2	14150
8	0	1,41	0	0	2	15900
9	0	0	0	0	0	15000

Апроксимуємо втрати тиску квадратичними поліномами, використовуючи метод Паде апроксимації [86]. При цьому рівняння регресії має вигляд:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{12}x_1x_2. \quad (2.71)$$

З урахуванням критерію Кохрена визначалася значимість коефіцієнтів і знаходилися величини ординат характеристик

$$y_{on} = 15000 + 3690x_1 + 615x_2 + 5,47x_1^2 + 16,3x_2^2 + 8,75x_1x_2 \quad (2.72)$$

і вносилися у табл. 2.7.

Після підстановки замість кодованих значень реальних, поверхня відгуку може бути розрахована наступним чином [87]:

$$\Delta p = 442 + 24200\eta + 345\tau_0 + 243\eta^2 + 7,2\tau_0^2 + 39\eta\tau_0.$$

Таблиця 2.7 – Співставлення вихідних та перерахованих значень y

№ досліду	x_1	x_2	Δp_{exp}	Δp
1	-1	-1	10740	10730
2	-1	1	11940	11940
3	1	-1	18100	18090
4	1	1	19335	19330
5	-1,41	0	9810	9814
6	1,41	0	20200	20210
7	0	-1,41	14150	14165
8	0	1,41	15900	15900
9	0	0	15000	15000

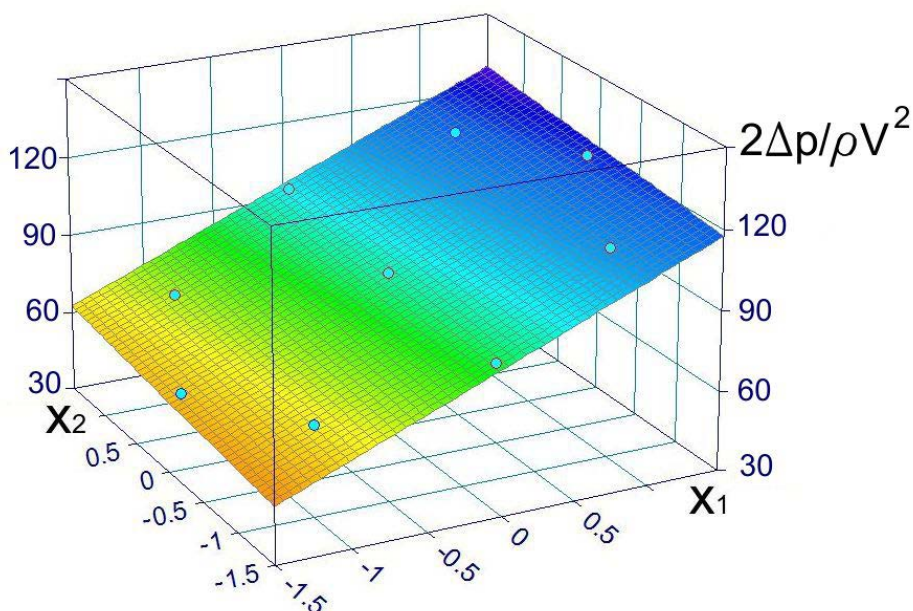


Рисунок 2.29 – Втрати тиску в залежності від реологічних параметрів водовугільного палива

Як видно з рис. 2.29 поверхня, що відповідає коефіцієнту втрат тиску має вигляд практично площини. Тобто зі зростанням початкової напружності зсуву та структурної в'язкості коефіцієнт втрат тиску зростає в розглянутому діапазоні чисел Рейнольдсу $Re < 50$ [88]. При ламінарній течії та розглянутих значеннях факторів мінімуму функції відгуку не знайдено.

2.7 Розрахунок течії водовугільного палива у відводах

У вигнутих трубах і каналах (колінах, відводах) внаслідок скривлення течії потоку з'являються відцентрові сили, спрямовані від центра кривизни до зовнішньої стінки труби. Цим обумовлюється підвищення тиску біля зовнішньої стінки й зниження його у внутрішній під час переходу потоку з прямолінійної ділянки трубопроводу у вигнуту. Під відводами маються на увазі вигнуті ділянки, в яких при рівності вхідного й вихідного перетину закруглення обох стінок (зовнішньої і внутрішньої) являють собою дуги концентричних окружностей [85]. При проектуванні й оптимізації течії водоугольного палива вкрай важливо знати значення втрат тиску при поворотах у відводах з радіусом кривизни різних значень.



Рисунок 2.30 – Розподіл швидкостей течії водовугільного палива під час повороту на 90° з радіусом скруглення $\bar{R} = 0$, $Re=30$

На рис. 2.30-2.32 наведено результати розрахунку течії водовугільного палива із різним радіусом скруглення. Радіус віднесено до діаметра трубопроводу. Усі три рисунки ілюструють розрахунки течії рідини з середньою швидкістю 0,5 м/с та з реологічними параметрами: $\eta = 0,68$ Па·с, $\tau_0 = 4,49$ Па.

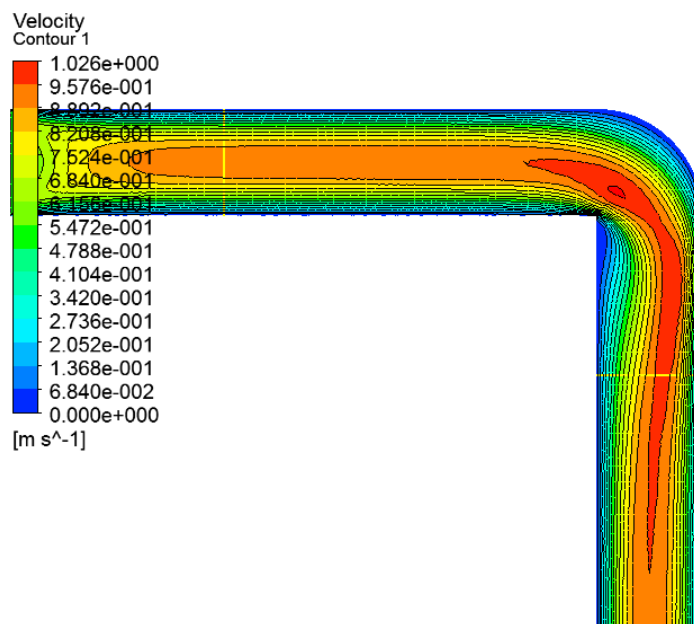


Рисунок 2.31 – Розподіл швидкостей течії водовугільного палива під час повороту на 90° з радіусом скруглення $\bar{R} = 0,5$, $Re=30$

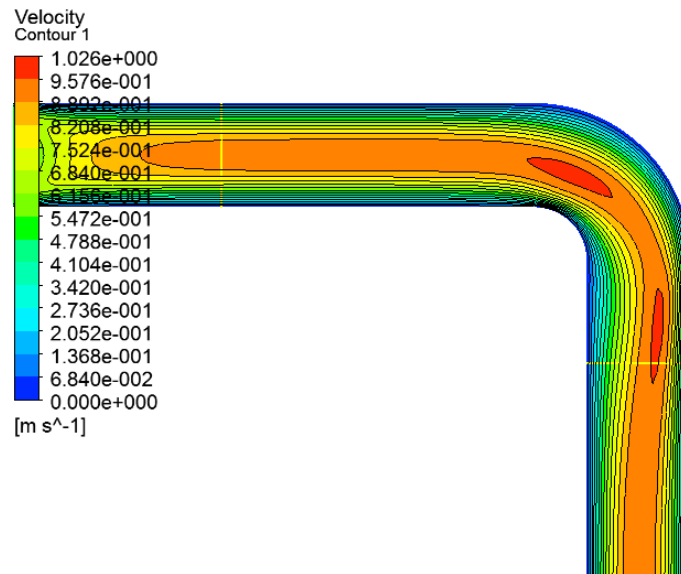


Рисунок 2.32 – Розподіл швидкостей течії водовугільного палива під час повороту на 90° з радіусом скруглення $\bar{R} = 1,0$, $Re = 30$.

Згідно розрахунків, найменші втрати тиску отримано для повороту з радіусом скруглення $\bar{R} = 1,0$.

На рис. 2.33-2.35 показано розподіл швидкостей течії водовугільного палива під час повороту з радіусом скруглення $\bar{R} = 1,0$ при різних числах Рейнольдсу.

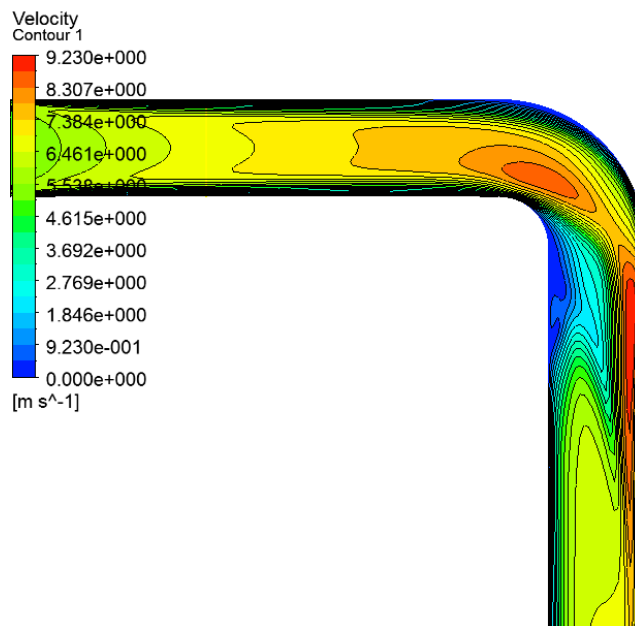


Рисунок 2.33 – Розподіл швидкостей течії водовугільного палива під час повороту на 90° з радіусом скруглення $\bar{R} = 1,0$, $Re = 440$.

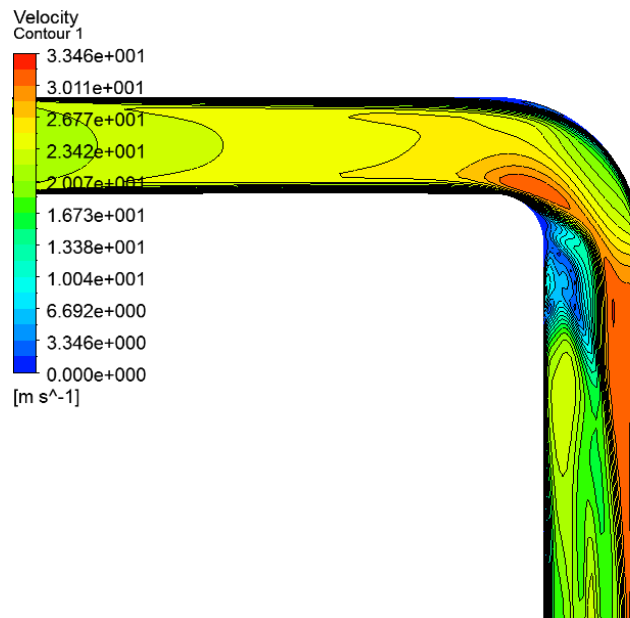


Рисунок 2.34 – Розподіл швидкостей течії водовугільного палива під час повороту на 90° з радіусом скруглення $\bar{R} = 1,0$, $Re = 1840$.

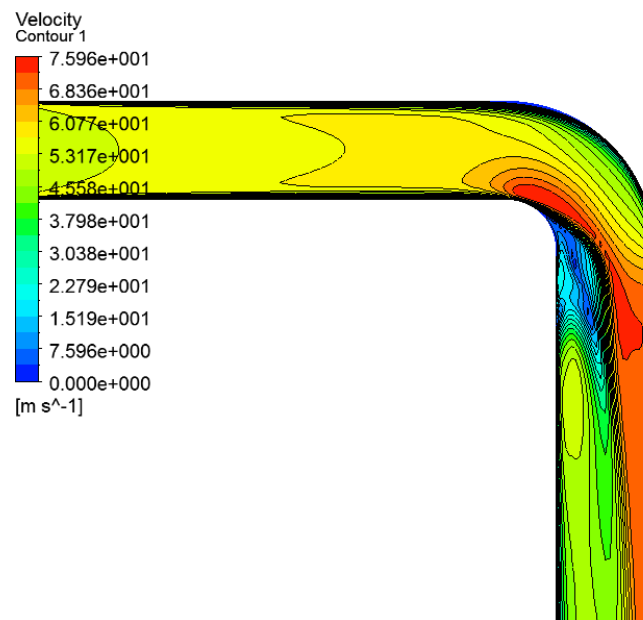


Рисунок 2.35 – Розподіл швидкостей течії водовугільного палива під час повороту на 90° з радіусом скруглення $\bar{R} = 1,0$, $Re = 4600$.

Зі збільшенням чисел Рейнольдсу спостерігається відрив потоку після повороту, та збільшення коефіцієнту гідравлічного спротиву [89].

На рис. 2.36 наведено залежність втрат тиску у відводі з радіусом скруглення $\bar{R} = 1,0$ в залежності від середньої швидкості руху водовугільного палива з реологічними параметрами: $\eta = 0,68$ Па·с, $\tau_0 = 4,49$ Па.

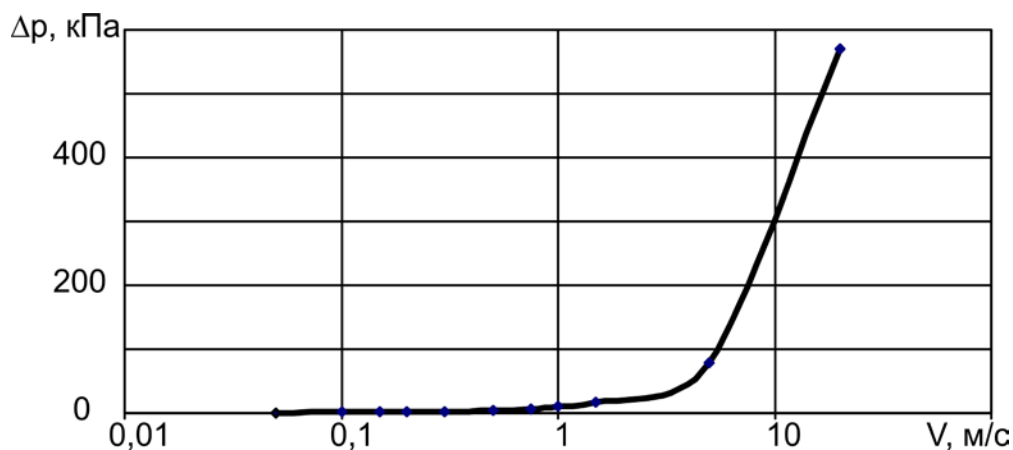


Рисунок 2.36 – Залежність втрат тиску у відводі з $\bar{R} = 1,0$ від середньої швидкості потоку

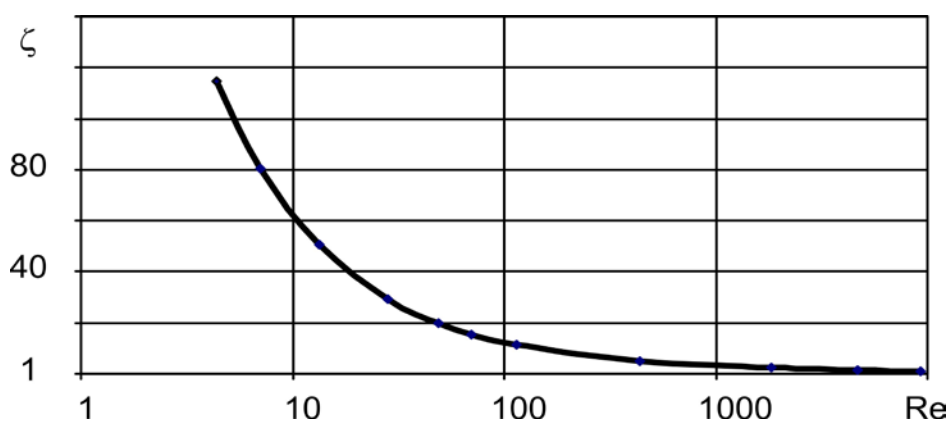


Рисунок 2.37 – Залежність коефіцієнту гідравлічного спротиву у відводі з $\bar{R} = 1,0$ від числа Рейнольдса

На рис. 2.37 видно монотонне зниження коефіцієнту гідравлічного спротиву $\zeta = 2\Delta p / \rho V^2$ відводу з $\bar{R} = 1,0$ зі збільшенням числа Рейнольдсу. Коефіцієнт ζ прагне до значення 1,0 при збільшенні числа Рейнольдса до значень $Re > 1000$ [90]. Для ньютонівської рідини коефіцієнт ζ такого відводу дорівнює значенню 0,21 для гладких стінок, що майже в п'ять разів менше, ніж для водовугільного палива з зазначеними реологічними характеристиками.

2.8 Висновки по розділу 2

В роботі було удосконалено критерій бімодальності гранулометричного складу твердої компоненти водовугільного палива виконанням у вигляді двох

компонент: відношення масових часток дрібних і великих фракцій до маси проміжної фракції, Γ_1 і Γ_2 , відповідно, який дозволив повністю визначити співвідношення дрібних, великих і проміжної фракцій в бімодальній суміші, який склав в діапазонах 7,76-16,8 і 1,1-3,8 відповідно. Цей критерій повною мірою дозволив оцінити ступінь бімодальності гранулометричного складу ВВП, чим створюється передумова для об'єктивної оцінки даного показника і оптимізації варіантів сумішей за критерієм енерговитрат на транспортування.

За результатами теоретичних досліджень руху водовугільного палива з урахуванням параметрів бімодальності та гранулометричного складу можна зробити висновки:

1. За результатами числових розрахунків течії, біля осі труби отримано зону приблизно однакової швидкості, що якісно співпадає з результатами експериментальних досліджень. Результати числових розрахунків якісно добре збігаються з аналітичним описом бінгамівської течії та з результатами експериментальних досліджень.

2. Використання моделі без урахування реологічного закону є неприпустимим, тому що похибка розрахунку профілю швидкості сягає значень майже 40 % під час розрахунку течії рідини з числами $Re < 5$. Згідно порівняння точності розрахунку особливого значення не має яку саме модель обрати для розрахунку: ламінарну чи модель Ментера SST, але щодо універсальності використання моделі, модель SST є більш універсальною та її можна використати для любых видів течій (ламінарних чи турбулентних).

3. Найменшу помилку мають розрахунки течії з числами $Re > 30$, тобто чим більша швидкість руху бінгамівської рідини та числа Рейнольдсу, тим менша похибка розрахунку за SST-моделлю турбулентністю. Загалом, похибка не перевищує 20 %, а при збільшенні чисел $Re > 30$ складає 0,5 %, що є прийнятним результатом, та говорить про те, що у подальшому можна використати програмний комплекс та SST-модель під час розрахунків течії водовугільного палива.

4. Криві втрат тиску в залежності від співвідношення Γ_1/Γ_2 мають чітко виражений мінімум в діапазоні 1,7...2,0. Розбіжність між даними експерименту та числовим розрахунком не перевищує 1,6 % для побудованих залежностей втрат від Γ_1/Γ_2 . Зі збільшенням концентрації, зростають відносні втрати тиску.

5. Коефіцієнт гідравлічного спротиву ζ відводу з $\bar{R}=1,0$ зі збільшенням числа Рейнольдсу монотонне знижується й прагне до значень 1,0 при збільшенні числа Рейнольдса до значень $Re > 1000$. Для ньютонівської рідини коефіцієнт ζ такого відводу дорівнює значенню 0,21 для гладких стінок, що майже в п'ять разів менше, ніж для водовугільного палива з зазначеними реологічними характеристиками.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРАВЛІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТРАНСПОРТУВАННЯ ВОДОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА

3.1 Методика проведення експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження реологічних і гідродинамічних характеристик при транспортуванні ВВП проводилися в лабораторії СНУ ім. В.Даля на гідравлічному стенді, метою яких було виконання верифікації розроблених математичних моделей.

Метою випробувань є експериментальне визначення реологічних характеристик, гідравлічних параметрів транспортування ВВП і отримання апроксимаційних закономірностей зміни енергетичних витрат в залежності від властивостей робочої рідини і режимів її транспортування.

3.2 Робота експериментального стенду

Гідравлічний транспорт різних насипних матеріалів являє собою сукупність багатьох факторів, взаємозв'язок яких обумовлений фізичною суттю процесу руху потоку. Існуючі теоретичні залежності описують цей процес в дость загальному вигляді, а визначення області їх використання і адаптація до можливостей практичної реалізації є однією з основних завдань масштабних експериментальних досліджень. В даному дослідженні використовувалися методи математичного планування експерименту при виборі найбільш істотних факторів впливу, що дозволило звести обсяг і тимчасову протяжність, а отже і економічні витрати на проведення даних досліджень до мінімуму.

Із багатьох параметрів, що впливають на процес гідротранспортування, найбільш значними є: концентрація твердого компонента C , його зольність A^d , і параметри, що характеризують ступінь бімодальності гранулометричного складу твердої фази в потоці суміші і, як наслідок, його в'язкість, Γ_1 і Γ_2 (або їх від-

ношення Γ_1/Γ_2) від величини яких залежать реологічні і енергетичні характеристики потоку, а також витратна швидкість потоку V .

В процесі виконання експериментів по визначенню залежності в'язкості від концентрації і розміру твердих часток необхідно враховувати, що в'язкість є непрямим параметром і може бути отримана тільки дослідним шляхом при вимірюванні значеннях напруження і градієнта швидкості зсуву. В сукупності такі параметри, як напруження зсуву, градієнт швидкості зсуву і ефективна в'язкість суміші є реологічними характеристиками і, отже, визначення їх є першочерговим завданням експериментальних досліджень. Від реологічних характеристик потоку залежать енергетичні характеристики процесу гідравлічного транспортування у вигляді втрат напору, які можуть бути виміряні безпосередньо в процесі експериментів. Однак з огляду на різноманіття реологічних моделей, які використовують [34, 61] для опису властивостей ВВП як рідини, можливу залежність його реологічної поведінки від режимів течії, як фізичних факторів впливу для матриці експерименту були обрані концентрації вугільних часток, показники гранулометричного складу суміші, а також зольність вихідного вугілля і швидкість транспортування ВВП.

В ході лабораторних експериментальних досліджень були визначені реологічні властивості і вид реологічної моделі вихідних варіантів ВВП, а також визначення питомих енерговитрат на транспортування заданої композиції ВВП при зміні наведених вище факторів.

Отримані таким чином втрати необхідно порівняти зі значеннями, розрахованими по теоретичним залежностям. По відповідності експериментальних і теоретичних результатів можна зробити висновок про ступінь адекватності математичної моделі реальним умовам гідравлічного транспортування.

3.2.1 Опис та принцип роботи експериментальної установки

Лабораторні дослідження параметрів гідротранспортування ВВП проводилися на експериментальній установці, гідравлічна схема та фотознімок якої представлені на рис. 3.1, 3.2.

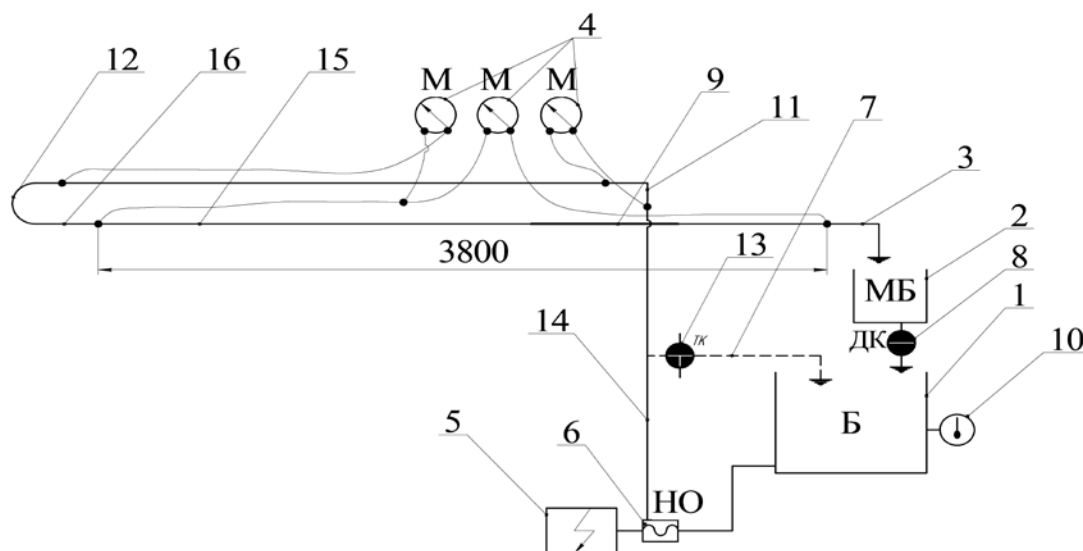


Рисунок 3.1 – Гідравлічна схема експериментальної установки для дослідження реологічних і гідродинамічних характеристик ВВП:

1 - ємність для ВВП; 2 - мірний бак; 3 - кільцевий трубопровід; 4 – диференціальні манометри; 5 - електропривод; 6 - одnogвинтової насос; 7 - перепуск; 8 - зливний патрубков з двухходовим краном; 9 - прозора ділянка трубопроводу; 10 - термометр; 11 - коліно на 90 °; 12 - коліно на 180 °; 13 - кран триходовий (трьохканальний); 14 - вхідна ділянка; 15 - вимірювальна ділянка; 16 - стабілізуюча ділянка

Експерименти на гідравлічному стенді полягали в прокачуванні підготовленого ВВП з різними варіантами ГМС, концентрації твердої фази і зольності вихідного вугілля при різних швидкостях транспортування по кільцевому трубопроводу внутрішнім діаметром $D_u = 50$ мм за допомогою одnogвинтового насоса 1В-10. Регулювання продуктивності насоса проводиться перепуском за допомогою триходового крану 13 на вході в трубопровід. У конструкцію вбудований мірний бак місткістю 35 л, який використовується для визначення дійсної продуктивності насоса, витрати і середньої швидкості потоку паливної суміші. Довжина прямолінійної вимірювальної ділянки 15 на трубопроводі становить 3800 мм із стабілізуючою вхідною ділянкою довжиною 20 калібрів (1000 мм).



Рисунок 3.2 – Фотознімок експериментальної установки для дослідження реологічних і гідродинамічних характеристик транспортування ВВП

Водовугільне паливо за допомогою одnogвинтового насоса 6, який приводиться в дію електродвигуном 5, з ємності 1 через входну ділянку 14 надходить в трубопровід 3, який забезпечений перепуском 7 для регулювання витрати і швидкості руху палива. З кільцевого трубопроводу 3 ВВП подається в мірний бак 2, паливо з якого надходить в ємність 1 при відкритті двухходового крана, розташованого в дні мірного бака 2, питомі величини гідравлічного опору на ділянках трубопроводу, в тому числі на вимірювальній ділянці 15 вимірюються манометрами 4.

3.2.2 Параметри, що вимірюються і вимірювальна апаратура

Як говорилося раніше основною метою проведення експериментальних досліджень було визначення реологічних характеристик ($\mu_{зф} \rightarrow n \rightarrow k$) і гідравлічних параметрів транспортування ($\Delta p = (p_1 - p_2) \rightarrow \frac{\Delta p}{L} \rightarrow \lambda \rightarrow \xi$) ВВП. Для цього використовувалися такі прилади і параметри (табл. 3.1):

$\mu_{эф}$ - ефективна в'язкість водовугільного палива, $Па \cdot с$;

t – час заповнення мірного бака 2, с ;

V –обсяг рідини що заповнює бак за час t , л;

T - температура робочої рідини;

p_1, p_2 - тиск на ділянках трубопроводу, Па.

Таблиця 3.1 – Прилади для вимірювання

Найменування вимірюваних параметрів	Засоби вимірювання			
	Найменування	Позначення, тип	Діапазон вимірювання	Похибка вимірювання
Ефективна в'язкість робочої суміші	Віскозиметр	Полімер РПЕ-1М	$1,8 \cdot 10^{-3} \div 3,75 \cdot 10^{-3}$	---
	Термометр	ТЛ-2 ДСТУ 215-73	-5-+255	$\pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$
Перепад тиску на ділянках трубопроводу	Манометр	М-1,6 ДСТУ 2405-72	0-0,16 МПа	$\pm 0,001 \text{ МПа}$
Час заповнення мірного бака	Секундомір	"Агат"4295Б ДСТУ 5072-79	Без обмеження	$\pm 1,9 \text{ с}$ за 60 хв
Обсяг рідини	Вказівник рівня мірного бака	—	0-35 л	$\pm 0,1 \text{ л}$

3.2.3 Оцінка похибки вимірювань

Для оцінки точності результатів експериментів на гідравлічному стенді визначалися похибки вимірювань величин. Визначення похибки прямих багаторазових вимірювань проводилося за існуючими рекомендаціями [86,91,92]. Знаходилося середньоквадратичне відхилення вибірки розміром n .

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (3.1)$$

де n – число вимірювань на даному режимі випробувань (в даному експерименті);

x_i – результат i -го вимірювання;

$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$ – середнє арифметичне значення величини, що вимірюється.

У випадку, якщо $x_i - \bar{x} \geq 3\sigma$ з вибірки виключався результат i -го експерименту і за формулою (3.1) перевизначалося значення σ .

Обчислювалося середнє арифметичне значення середньоквадратичного відхилення $\sigma_o = \sigma/\sqrt{n}$.

При заданій довірчій ймовірності $\alpha = 0,95$, знаходився коефіцієнт Стюдента t_α (з використанням довідкових даних [86, 92]) і визначався довірчий інтервал випадкової складової похибки $\Delta_{zc} = t_\alpha \sigma_o$.

Похибка засобів вимірювань B_{np} визначалася з використанням технічної документації на вимірювальну апаратуру, при цьому:

якщо $t_\alpha \sigma_o \leq 3B_{np}$, то межа довірчого інтервалу обчислювалася за формулою [93]

$$\Delta_z = \sqrt{(\Delta_{zc})^2 + \left(\frac{t_\alpha(\infty)}{3}\right)^2};$$

- якщо $t_\alpha \sigma_o > 3B_{np}$, то довірчий інтервал визначався з виразу (3.6).

У разі, коли необхідно знайти середньоквадратичне відхилення величини Y , що є функцією m параметрів x_j результатів прямих вимірювань, тобто яка визначається в результаті непрямих вимірювань $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$, використовувалася формула

$$\sigma_y = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \sigma_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \sigma_{x_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \sigma_{x_j}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_m} \sigma_{x_m}\right)^2}, \quad (3.2)$$

де $\frac{df}{dx_j}$ – приватні похідні функції $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ по параметру x_j ;

$\sigma \cdot x_j$ – середньоквадратичне відхилення кожного з параметрів.

3.2.4 Методика проведення випробувань

3.2.4.1 Приготування водовугільного палива

Для приготування ВВП використовувалося вугілля марки «Г» шахти «Білоріченська». Відповідно до розробленої технологічної схеми рядове вугілля завантажувалося в двокамерний кульовий млин грубого помелу. Отримання необхідного для приготування ВВП бімодального ГМС складу здійснювалося методом сухого помелу в кульовому млині тонкого помелу з використанням сталевих куль діаметром 10, 20 і 40 мм. Час помелу змінювалося в межах від 20 до 50 хв. [94,95].

Аналіз гранулометричного складу проводився шляхом відбору проб, просушування і просіювання сухого матеріалу через набір сит з діаметром отворів 20, 40, 80, 100, 200, 250, 300 і 500 мкм. Визначення кількості матеріалу проводилося зважуванням окремих фракцій. Точність ситового аналізу на вібраційному аналізаторі становила 5%.

Подрібнене в лабораторному кульовому млині вихідне рядове вугілля змішувалося з водою. Після змішування рідка система витримувалася протягом 3-х годин, для активації вугільних частинок. У результаті виходила седиментаційно стійка водовугільна суспензія. Для проведення експериментальних досліджень процесів транспортування були виготовлені зразки ВВП шести бімодальних гранулометричних складів з об'ємною концентрацією твердого компонента 60, 62,5 і 65%.

Для визначення реологічних параметрів ВВП був обраний ротаційний віскозиметр «Полімер РПЕ 1-М». Цей тип віскозиметрів є найбільш раціональним для визначення параметрів реологічних моделей висококонцентрованих суспензій, так як при використанні капілярних віскозиметрів трубки приладів

засмічуються великими частками вугілля, що призводить до великої похибки вимірювань [95].

Таким чином, за допомогою ротаційного віскозиметра і з використанням наведених в роботі залежностей були визначені основні параметри, що характеризують реологічні властивості ВВП.

В результаті застосування запропонованої методики встановлені значення параметрів реологічної моделі ВВП, виготовленого з вугілля марки Г з різними варіантами бімодального ГМС, різною концентрацією і зольністю твердого компонента при градієнті швидкості зсуву від 0,5 до 50 с⁻¹.

Величина початкового напруження зсуву ВВП τ_0 визначалася за експериментальними точками, згідно яких побудовано графік (рис. 2.10) перетином продовження прямолінійної ділянки реологічних характеристик з віссю $\dot{\gamma} = 0$.

Водовугільне паливо відноситься до класу неньютонівських в'язкопластичних рідин, які підпорядковані реологічному закону Шведова-Бінгама. При малих швидкостях напруги зсуву ($\tau < \tau_0$) ВВП характеризується властивостями квазітвердого тіла і характер його течії близький до процесів зсуву [34] і реологічна характеристика для різних гранулометричних складів в тій чи іншій мірі відрізняється від лінійної. Для забезпечення руху ВВП як в'язкопластичної рідини необхідно подолати початковий опір руху τ_0 і зруйнувати його структуру, яка нагадує кристалічну решітку, утворену частинками твердої фази. При цьому режим течії нестабільний внаслідок пульсації величин напружень в часі, що посилюється зниженням точності вимірів на віскозиметрі при значеннях швидкості зсуву поблизу 0-ої позначки. Останні обставини обумовлюють при визначенні реологічних характеристик гранскладу доцільність обмежуватися ділянками зі стабільною закономірністю зміни напруження від швидкості зсуву.

При дотичному напруженні зсуву τ , яке спостерігається при градієнті швидкості зсуву $2 < \dot{\gamma} < 8 \text{ с}^{-1}$ в бік збільшення (рис. 2.10), відбувається стабілізація закономірності зміни швидкості і при значенні $\dot{\gamma} = 9 \text{ с}^{-1}$ для всіх гранулометричних складів остаточно стабілізується характер течії ВВП.

Це напруження називають динамічним граничним напруженням зсуву. Його використовують в більшості випадків для гідродинамічного розрахунку транспортування концентрованих водовугільних суспензій [56].

Отримані при випробуваннях на віскозиметрі закономірності підтверджують, що в подальших розрахунках раціонально використовувати параметр ефективної в'язкості η виходячи з величини τ при градієнті швидкості зсуву $\dot{\gamma} = 9\text{с}^{-1}$, так як стійкий, характерний для транспортування із заданою швидкістю, режим течії ВВП і відповідна йому в'язкість формується при досягненні даного градієнта швидкості. Залежність дотичних напружень зсуву від градієнта швидкості набуває лінійний характер (для течії Шведова-Бінгама) в області градієнта $\dot{\gamma} \geq 9\text{с}^{-1}$.

На підставі отриманих результатів були визначені значення реологічних параметрів ВВП, ефективної в'язкості і граничного напруження зсуву для різних гранулометричних складів і трьох варіантів концентрацій твердого компонента (60, 62,5 і 65%) [96,97,98,99].

3.2.4.2 Визначення стійкості водовугільного палива

Одним з найважливіших властивостей дисперсних систем є їх стійкість, тобто здатність зберігати свій первісний стан. Розрізняють седиментаційну і агрегативну стійкість системи.

Седиментаційна стійкість характеризує здатність системи до рівномірного розподілу часток по всьому об'єму системи. Ця стійкість залежить від інтенсивності теплового руху частинок, впливу на них гравітаційного поля і в'язкості дисперсійного середовища. Колоїдні системи, що мають частки малого розміру, мають досить високу седиментаційну стійкість.

Найбільше теоретичне і практичне значення має агрегативна стійкість колоїдних систем, тобто здатність часток не злипатися і зберігати первісний розмір. Агрегативна стійкість визначається властивостями поверхні або поверхневого шару на кордоні дисперсної фази і дисперсійного середовища, т. Е. Визна-

чається поверхневою енергією або силами, що діють між частинками в поверхневих (граничних) шарах.

Стійкість суспензії характеризується невинпаданню осаду протягом певного часу. Швидкість винпаданню (осіданню) частинок певного розміру (радіусом) в рідкому середовищі динамічною в'язкістю визначається відповідно до закону Стокса за такою формулою:

$$u = \frac{2}{9} \frac{r^2 (\rho - \rho_0) g}{\mu},$$

де u - швидкість осіданню частинок в рідкому середовищі;

r - радіус частки;

ρ і ρ_0 - щільності твердої фази і рідкого середовища;

g - прискорення сили тяжіння;

μ - динамічна в'язкість середовища.

Як видно з наведеної залежності, швидкість осіданню частинок, а отже, і стійкість суспензії дуже сильно залежать від дисперсності, тобто від розміру часток.

Цей закон справедливий теоретично для частинок сферичної форми і для суспензій малої концентрації. Практично на швидкість винпаданню часток і, отже, на стійкість суспензій впливають не тільки розмір часток, в'язкість дисперсного середовища, різниця щільності частинок і навколишнього їх рідини, але і концентрація частинок, а також поверхневі сили, що сприяють їх коагуляції.

Метою проведення досліджень було визначення граничного терміну збереження рівномірного розподілу твердої фази за обсягом ВВП.

Об'єкт випробувань: Об'єктом випробувань була проба ВВП із заданою масовою концентрацією вугільного пилу (60% по масі), рідини (вода 39% маси) і стабілізуючої добавки «Дофен» (1% по масі).

Вимірюваним параметром було визначення щільності проби з певного рівня наливої проби. Паралельно проводилися візуальні спостереження за станом проби ВВП.

В якості вимірювальної апаратури виступали:

- Ваги аналітичні ВЛА-200м з точністю вимірювання до 0,1 мг.
- Пробірка об'ємом 0,5 л з градуванням 10 мл.
- Шприци одноразові на 2, 5 і 20 мл.
- Полівінілові трубки діаметром 4 мм для забору проби.
- Піпетки, пробірки хімічні.

Методика проведення випробувань: Перед заливанням проби в пробірку об'ємом 0,5 л вона ретельно перемішувалася і заливалася в пробірку до позначки 350 мл. Перед випробуваннями проводилося зважування шприців об'ємом 2 і 5 мл і заносилося в журнал випробувань. Бралася проба об'ємом до 5 мл за допомогою полівінілових трубок з приєднанням до одного з вільних кінців шприцу на 20 мл з верхнього, середнього і нижнього шару пробірки. Потім досліджувана ємність з пробой герметично закривалася, щоб уникнути випаровування рідини. Заміри проводились через кожні 8 годин протягом двох діб.

Аналіз отриманих результатів показує, що перехід на новий рівень співвідношення щільності ВВП визначає тривалість седиментаційної стабільності даної композиції яка складає 72 години.

3.2.5 Планування експерименту

Наведені математичні моделі і структурні схеми досить складні і їх безпосереднє використання викликає певні труднощі. Тому в наведеному нижче пункті виконана їх адаптація до конкретних завдань, яке трапляється в інженерній практиці розрахунку і проектування промислових гідротранспортних систем. Адаптація виконана із застосуванням елементів планування чисельного експерименту.

У загальному випадку можна виділити три типові завдання планування експерименту [93]:

1. Розкриття механізму процесу, тобто знаходження такого аналітичного виразу $y = f(x_1, x_2, \dots, x_i)$, яке в області можливих значень факторів x_i осить точно збігається з невідомою залежністю $\varphi(x)$.
2. Визначення екстремуму функції в області її визначення.
3. Вибір відповідної моделі для опису об'єкта або визначення (уточнення) деяких параметрів відомої функціональної залежності.

Планування експерименту можна застосувати безпосередньо до фізичного об'єкту і по спеціально поставленій серії фізичних експериментів побудувати спрощену модель. При цьому повинен бути точно визначений критерій адаптації, незалежні змінні і діапазон їх зміни, а також ряд обмежень у вигляді залежностей і нерівностей, що і утворює спрощену модель даного об'єкту. Цей шлях досить часто використовується при дослідженнях порівняно простих об'єктів. Основним його недоліком є трудомісткість проведення фізичних експериментів, дорога вимірювальна апаратура, необхідність виготовлення декількох фізичних моделей об'єкта.

Дослідження можуть бути виконані на повній математичній моделі об'єкта, що досліджується, складеної з урахуванням всіх тих процесів, які лежать в основі його роботи. З розвитком ЕОМ і чисельних методів цей шлях набуває все більшого поширення. Однак навіть для порівняно простих фізичних об'єктів математична модель являє собою нелінійну систему диференціальних рівнянь, часто включає рівняння в приватних похідних, і пошук поєднання незалежних змінних, що забезпечує оптимальне значення критерію оптимізації вимагає, перш за все, перевірки адекватності моделі і, отже, досить значної кількості чисельних експериментів.

Поєднання першого і другого шляху дозволяє в більшості випадків побудувати спрощену модель при мінімальному числі фізичних і численних експериментів. Стратегія дослідження в цьому випадку полягає в наступному: будується по можливості повна математична модель і за результатами невеликого

числа фізичних експериментів визначають її адекватність, потім виконується планування експерименту, проводиться додаткова серія чисельних експериментів при певному поєднанні факторів, і з урахуванням першої та другої серії будується апроксимаційна модель об'єкта.

На апроксимаційній моделі після перевірки її адекватності виконуються оптимізаційні дослідження. Всі три можливі шляхи показані на рис.3.3

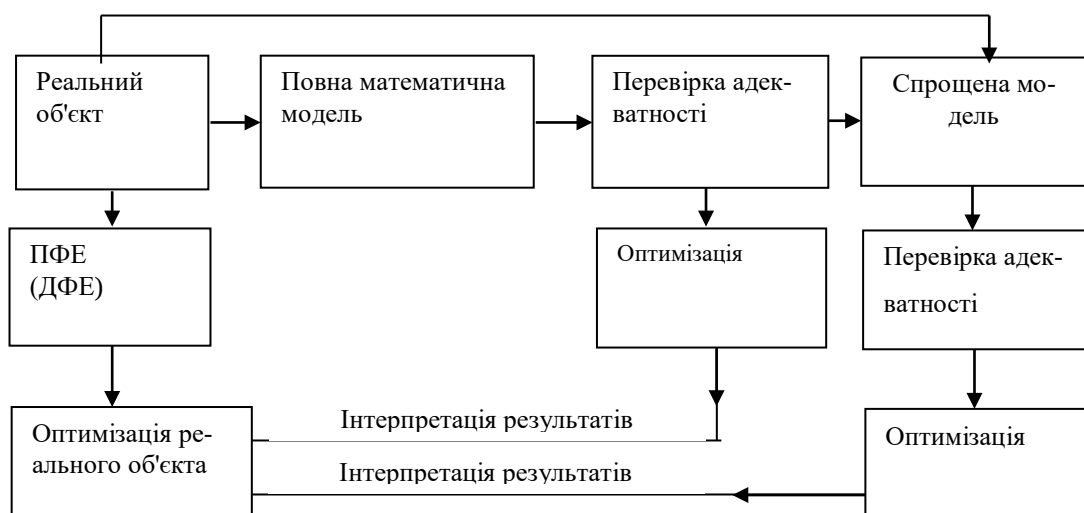


Рисунок 3.3 – Методика проведення експерименту

Процес оптимізації з використанням спрощеної моделі можна розглядати як метод пошуку оптимального рішення для реального об'єкта без безпосереднього експериментування з самим об'єктом. Як показано на рис. 3.3, «прямий шлях», що веде до оптимального вирішення, замінюється «обхідним», що включає побудову повної і спрощеної моделей і оптимізацію останньої, а також перетворення отриманих результатів в особливу реалізовану форму [91]. Очевидно, що такий підхід до оптимізації обов'язково вимагає використання деякого спрощеного уявлення реального об'єкта. При формуванні такого спрощеного уявлення слід враховувати тільки найважливіші характеристики об'єкта, які повинні бути відображені в моделі, а менш істотні особливості в модель можна не включати. Необхідно також сформулювати логічно обгрунтовані припущення, вибрати форму представлення моделі, рівень її деталізації.

Процес планування експерименту можна розбити на кілька етапів, частина з яких повністю представлена, а частина заснована на емпірико-інтуїтивному підході. Перед побудуванням плану експерименту необхідно пройти важливий етап прийняття саме інтуїтивних рішень по вибору факторів і області планування. В розгляд слід включити всі фактори, які можуть значним чином впливати на характеристики об'єкта.

Вибрані фактори повинні бути доступні вимірюванню або розрахунку з точністю приблизно на порядок більше, ніж вимірювання вихідної величини. Крім того, фактори повинні бути незалежними величинами.

При визначенні кордону області визначення факторів повинні враховуватися обмеження трьох типів: фізичні, техніко-економічні та технологічні.

Зазвичай процес дослідження починається в умовах, коли є деяка апріорна інформація про об'єкт. Її аналіз дозволяє визначити такі значення факторів, при яких виходять результати, близькі до оптимальних. Цю точку при плануванні розглядають як нульовий (основний) рівень. Побудова плану експерименту зводиться до вибору точок симетричних відносно нульового рівня.

На гідравлічному стенді [100,101,102] визначалися втрати напору по довжині трубопроводу в залежності від значень факторів впливу: концентрація твердого компонента (C); параметр, що характеризує ступінь бімодальності твердої фази ВВП (Ξ); швидкість транспортування (V); зольність вихідного вугілля (A^d). Серії експериментів проводилися відповідно до матриці планування [92] яка наведена в таблиці 3.2.

Для спрощення запису плану експерименту і обробки дослідних даних натуральні значення факторів кодують за допомогою перетворення

$$x_i = \frac{\tilde{x}_i - x_{i0}}{\Delta x_i}, \quad (3.3)$$

де x_i - кодоване значення i -го фактора;

$\tilde{x}_i$ - натуральне значення i -го фактора;

x_{i0} - основний рівень (натуральний) i -го фактора;

Δx_i - інтервал варіювання (натуральний) i -го фактора.

Рівняння регресії для плану обраного типу запишеться у вигляді

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k b_{ij} x_i x_j, \quad (3.4)$$

де b_0 - вільний коефіцієнт рівняння регресії;

b_j - коефіцієнт при лінійних складових рівняння регресії;

b_{ju} - коефіцієнт при змішаній комбінації чинників експерименту;

b_{jj} - коефіцієнт при квадратичних значеннях факторів.

Виходячи з умови ортогональності

$$\sum_{i=1}^N (x_j x_u) = 0, \quad j \neq u, \quad (3.5)$$

кожен коефіцієнт визначається незалежно від іншого зі свого рівняння системи [92,93].

Значення невідомих коефіцієнтів квадратів b_{ij} отримані за формулою

$$b_{ij} = \frac{\sum_{n=1}^{15} y_n a_{ijn}}{C_{ij}} \quad (3.6)$$

де значення y_n наведені в таблиці 3.2, а a_{ijn}, C_{ij} визначалися за методикою викладеною в [92].

Максимальна похибка середнього арифметичного не перевищила 6,6%.

Рівняння регресії в кодованих параметрах для даного типу плану запишеться в наступному вигляді

$$\begin{aligned}
y = & b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + \\
& + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{14} \cdot x_1 \cdot x_4 + \\
& + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{24} \cdot x_2 \cdot x_4 + b_{33} \cdot x_3^2 + b_{34} \cdot x_3 \cdot x_4 + b_{44} \cdot x_4^2
\end{aligned} \quad (3.7)$$

Для визначення значності коефіцієнтів регресії виходять з умови

$$|b_j| \geq t_\alpha(f_y) \frac{s_y}{\sqrt{N}}, \quad (3.8)$$

де $t_\alpha(f_y)$ - табличне значення коефіцієнта Стюдента;

f_y - число ступенів свободи дисперсії відтворюваності $f_y = N(n-1)$.

при $N = 9$ і $n = 3$, $t_\alpha(18) = 2,1$

$$|b_j| \geq 0,495 \cdot s_y. \quad (3.9)$$

Дисперсія відтворюваності s_y^2 визначається як результат усереднення дисперсій у всіх експериментах матриці планування відповідно до (3.7)

$$s_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N s_i^2}{N}, \quad (3.10)$$

де s_i^2 - дисперсія параметра оптимізації при i -й комбінації рівнів факторів, визначається за формулою

$$s_i^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{m=1}^n (y_m - \bar{y}_m)^2, \quad (3.11)$$

де n - число паралельних експериментів при i -й комбінації рівнів факторів;

Для визначення значущості коефіцієнтів регресії виходять з умови:

$$|b_j| \geq t_\alpha(f_y) \frac{s_y}{\sqrt{N}},$$

де $t_\alpha(f_y)$ – табличне значення коефіцієнта Стьюдента;

f_y – число ступенів свободи дисперсії відтворюваності $f_y = N(L - 1)$.

При $N = 25$ і $L = 3$, $t_\alpha(50) = 2,01$

$$|b_j| \geq 0,402 \cdot s_y.$$

Дисперсія відтворюваності s_y^2 визначається як результат усереднення дисперсій у всіх дослідах матриці планування відповідно до (3.7)

$$s_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N s_i^2}{N},$$

Таблиця 3.2 – Матриця планування експерименту

Фактори впливу (незалежні параметри)	C (%)	Ξ	V (м/с)	A ^d (%)	Питомі втрати тиску
					i, Па/м
Нульовий рівень	62,5	2,45	0,3	21,0	
Інтервал варіювання	2,5	1,37	0,2	10,0	
Верхній рівень	65	3,82	0,5	31,0	
Нижній рівень	60	1,08	0,1	11,0	
№ експерименту	X1	X2	X3	X4	
1	+1	+1	+1	+1	5959,92
2	+1	+1	+1	-1	5061,59
3	+1	+1	-1	+1	2644,76
4	+1	+1	-1	-1	1612,07
5	+1	-1	+1	+1	5862,99
6	+1	-1	+1	-1	4979,28
7	+1	-1	-1	+1	2601,75
8	+1	-1	-1	-1	1585,86
9	-1	+1	+1	+1	3849,52
10	-1	+1	+1	-1	3448,76
11	-1	+1	-1	+1	1423,92
12	-1	+1	-1	-1	957,69
13	-1	-1	+1	+1	3062,37
14	-1	-1	+1	-1	2743,55
15	-1	-1	-1	+1	1132,75
16	-1	-1	-1	-1	761,86
17	0	0	0	0	1931,35
18	+1	0	0	0	2575,64
19	-1	0	0	0	1538,51
20	0	+1	0	0	2816,55
21	0	-1	0	0	2549,9
22	0	0	+1	0	2958,1
23	0	0	-1	0	928,13
24	0	0	0	+1	2159,34
25	0	0	0	-1	1808,31

Дані для обчислення коефіцієнтів квадратик

№ Експерим.	a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₁₁	a ₂₂	a ₃₃	a ₄₄	a ₁₂	a ₁₃	a ₁₄	a ₂₃	a ₂₄	a ₃₄
	c _{ij}														
	59	18	18	18	18	354	354	354	354	16	16	16	16	16	16
	b _{ijn}														
1	-1	+1	+1	+1	+1	7	7	7	7	+1	+1	+1	+1	+1	+1
2	-1	+1	+1	+1	-1	7	7	7	7	+1	+1	-1	+1	-1	-1
3	-1	+1	+1	-1	+1	7	7	7	7	+1	-1	+1	-1	+1	-1
4	-1	+1	+1	-1	-1	7	7	7	7	+1	-1	-1	-1	-1	+1
5	-1	+1	-1	+1	+1	7	7	7	7	-1	+1	+1	-1	-1	+1
6	-1	+1	-1	+1	-1	7	7	7	7	-1	+1	-1	-1	+1	-1
7	-1	+1	-1	-1	+1	7	7	7	7	-1	-1	+1	+1	-1	-1
8	-1	+1	-1	-1	-1	7	7	7	7	-1	-1	-1	+1	+1	+1
9	-1	-1	+1	+1	+1	7	7	7	7	-1	-1	-1	+1	+1	+1
10	-1	-1	+1	+1	-1	7	7	7	7	-1	-1	+1	+1	-1	-1
11	-1	-1	+1	-1	+1	7	7	7	7	-1	+1	-1	-1	+1	-1
12	-1	-1	+1	-1	-1	7	7	7	7	-1	+1	+1	-1	-1	+1
13	-1	-1	-1	+1	+1	7	7	7	7	+1	-1	-1	-1	-1	+1
14	-1	-1	-1	+1	-1	7	7	7	7	+1	-1	+1	-1	+1	-1
15	-1	-1	-1	-1	+1	7	7	7	7	+1	+1	-1	+1	-1	-1
16	-1	-1	-1	-1	-1	7	7	7	7	+1	+1	+1	+1	+1	+1
17	11	0	0	0	0	-18	-18	-18	-18	0	0	0	0	0	0
18	8	+1	0	0	0	121	-56	-56	-56	0	0	0	0	0	0
19	8	-1	0	0	0	121	-56	-56	-56	0	0	0	0	0	0
20	8	0	+1	0	0	-56	121	-56	-56	0	0	0	0	0	0
21	8	0	-1	0	0	-56	121	-56	-56	0	0	0	0	0	0
22	8	0	0	+1	0	-56	-56	121	-56	0	0	0	0	0	0
23	8	0	0	-1	0	-56	-56	121	-56	0	0	0	0	0	0
24	8	0	0	0	+1	-56	-56	-56	121	0	0	0	0	0	0
25	8	0	0	0	-1	-56	-56	-56	121	0	0	0	0	0	0

де s_i^2 – дисперсія параметра оптимізації при i –й комбінації рівнів факторів, визначається за формулою

$$s_i^2 = \frac{1}{L-1} \sum_{m=1}^L (y_m - \bar{y}_m)^2,$$

де L – число паралельних досвідів при i –й комбінації рівнів факторів;

$\bar{y}$ – середнє арифметичне функції відгуку з паралельних експериментів, що визначається за формулою:

$$\bar{y}_m = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n y_m. \quad (3.12)$$

Адекватність моделі оцінювалася за допомогою F-критерію (критерію Фішера).

$$F_{on} = \frac{s_{ad}^2}{s_y^2}, \quad (3.13)$$

де s_{ad}^2 - дисперсія адекватності.

$$s_{ad}^2 = n \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - y_i)^2, \quad (3.14)$$

де $f_{ad} = N - k'$, $f_{ad} = 9 - k'$;

$k' = 6$ - число коефіцієнтів рівняння регресії.

Табличне значення критерію Фішера для довірчої ймовірності 0,05 при цьому склало $F_a = 2,04$. Для прямолінійної ділянки розрахункове значення критерію Фішера склало $F_{on} = 1,95$. Значення всіх розрахункових значень критерію менше табличного $F_{on} < F_a$, отже, отримана регресійна залежність адекватно описує процеси, що відбуваються при дослідному транспортуванні ВВП.

3.3 Результати експериментальних досліджень

Після аналізу отриманих експериментальних даних, представлених в таблиці 3.2, і проведення оцінки важливості коефіцієнтів рівняння регресії було встановлено, що значення коефіцієнтів повинні бути не менше ніж 13,0 відповідно для прямолінійної ділянки. У зв'язку з цим рівняння регресії для обраної матриці планування (табл. 3.2) запишеться у вигляді:

- в кодованих параметрах

$$y = 1902,238 + 775,83 \cdot x_1 + 138,58 \cdot x_2 + 1348,74 \cdot x_3 + 318,79 \cdot x_4 +$$

$$\begin{aligned}
 &+159,69 \cdot x_1^2 - 108,18 \cdot x_1 \cdot x_2 + 286,96 \cdot x_1 \cdot x_3 + 142,12 \cdot x_1 \cdot x_4 + \\
 &+ 785,84 \cdot x_2^2 + 69,71 \cdot x_2 \cdot x_3 + 13,04 \cdot x_2 \cdot x_4 + 45,73 \cdot x_3^2 - 24,0 \cdot x_3 \cdot x_4 + 86,44 \cdot x_4^2
 \end{aligned}
 \quad (3.15)$$

Вид поверхонь відгуку для різних інтервалів варіювання і комбінацій факторів представлені на рис. 3.4–3.6

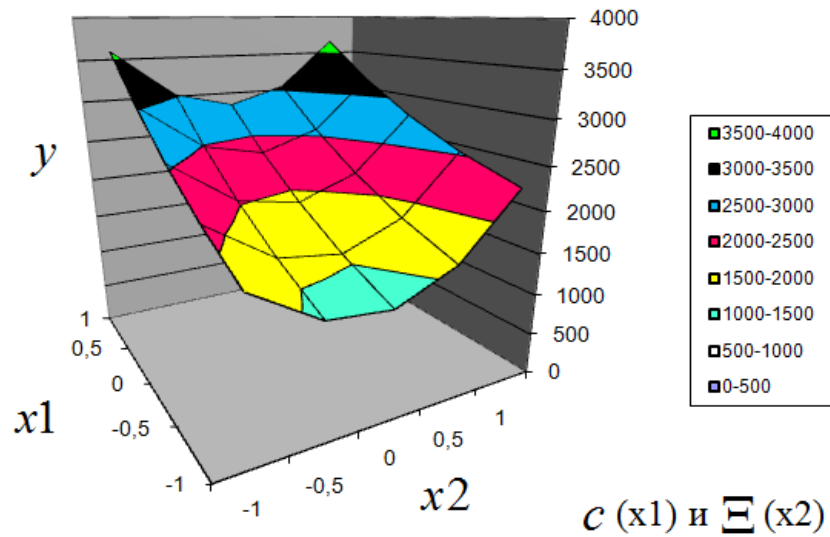


Рисунок 3.4 – Залежність питомого гідравлічного опору від концентрації твердого компонента і параметра Γ_1/Γ_2

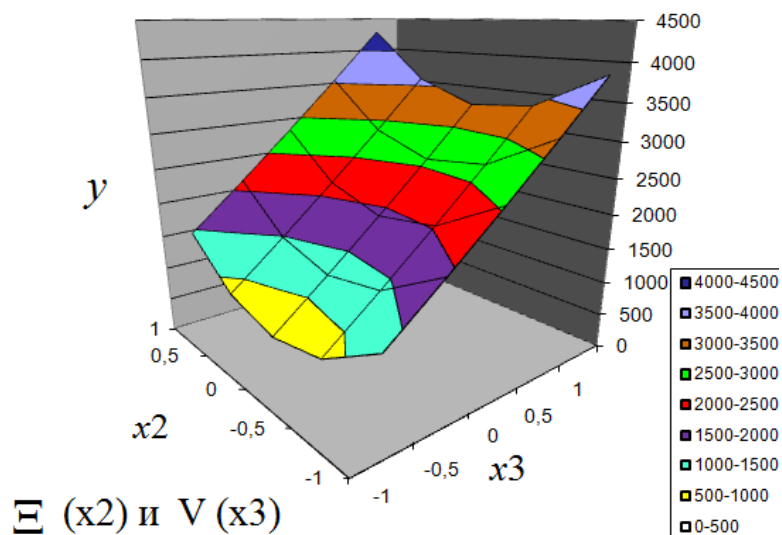


Рисунок 3.5 – Залежність питомого гідравлічного опору від параметра Γ_1/Γ_2 і швидкості транспортування ВВП

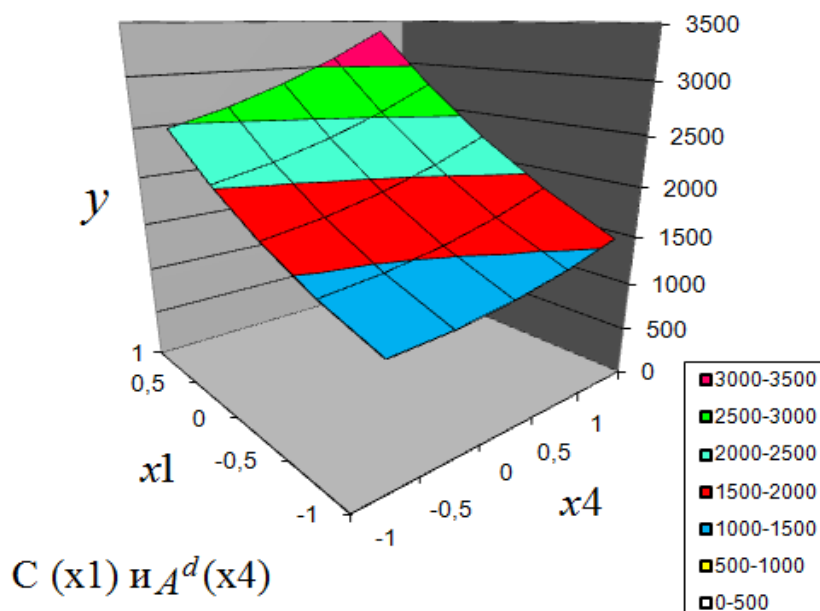


Рисунок 3.6 – Залежність питомого гідравлічного опору від концентрації ВВП і зольності вихідного вугілля

Приведення рівняння регресії для прямолінійної ділянки трубопроводу до канонічного вигляду і аналіз коефіцієнтів представленої залежності з урахуванням форми функції відгуку дозволяє констатувати наступне:

- при фіксованих на нульовому рівні значень зольності вихідного вугілля і швидкості транспортування ВВП зміна питомих втрат тиску від концентрації твердого компонента носить близький до параболічного характер з мінімумом при $X_1 = -1$ ($C = 60\%$), при цьому їх збільшення спостерігається на всій досліджуваній ділянці з максимумом $X_1 = 1$ ($C = 65$), а також зміна питомих втрат тиску від параметра Γ_1/Γ_2 носить складний характер з мінімумом в районі значення $X_2 = 0$ ($\Xi = 2,45$), при цьому їх збільшення спостерігається на ділянках $\Xi = 2,45 - 1,08$ ($X_2 = 0; -1$) і $\Xi = 2,45 - 3,82$ ($X_2 = 0; 1$) (рис.3.4).

- аналогічний характер носить залежність питомих втрат тиску від параметра Γ_1/Γ_2 і швидкості транспортування ВВП при фіксованих на нульовому рівні значень масової концентрації і зольності вихідного вугілля, однак зі збільшенням швидкості транспортування ВВП зростання втрат напору значно інтенсивніше, ніж зі збільшенням масової концентрації (рис. 3.5).

- при фіксованих на нульовому рівні значень параметра Γ_1/Γ_2 і швидкості транспортування ВВП зміна питомих втрат тиску від концентрації твердого компонента носить близький до лінійного характер з мінімумом при $X_1 = -1$ ($C = 60\%$), при цьому їх збільшення спостерігається на всій досліджуваній ділянці з максимумом $X_1 = 1$ ($C = 65$). Зміна питомих втрат тиску від зольності вихідного вугілля має зростаючий плавний характер, близький до лінійного, з мінімумом при $X_4 = -1$ ($A^d = 11\%$), при цьому їх збільшення спостерігається на всій досліджуваній ділянці з максимумом $X_4 = +1$ ($A^d = 31$), проте темп зростання питомих втрат тиску значно нижче ніж при збільшенні швидкості транспортування або масової концентрації.

Оскільки нетривіальний (в зоні визначення факторів впливу) мінімум питомих втрат тиску спостерігається тільки за критерієм гранулометричного складу $\Xi(x_2)$, його умовою є рівність нулю похідної виразу (3.13) по x_2 :

$$1571,7x_2 - 108,2x_1 + 69,7x_3 + 13,04x_4 + 138,6 = 0$$

або

$$x_2 = 0,0688x_1 - 0,0443x_3 - 0,0083x_4 - 0,0882 \quad (3.14)$$

Дані вирази просторово відповідають чотиривимірній площині, що є геометричним місцем точок мінімуму опору за критерієм гранулометричного складу Ξ . Таким чином, в області визначення факторів впливу їх мінімальних рівнів (-1), середнім (0) і максимальним (+1) відповідають кодовані значення Γ_1/Γ_2 , -0,1044, -0,0882 і -0,072, що в натуральних змінних: 2,31, 2,33 і 2,35 при середньому значенні 2,33.

Таким чином, в результаті циклу проведених експериментів підтверджено вплив фактора гранулометричного складу на величину питомого гідравлічного опору ВВП, причому стабільність критерію гранулометричного складу Ξ (відхилення від середнього значення не перевищує одного відсотка) в зоні оптимуму по опору означає правильність обрання та математичного визначення даного чинника в якості критерія (рис. 3.7, 3.8).

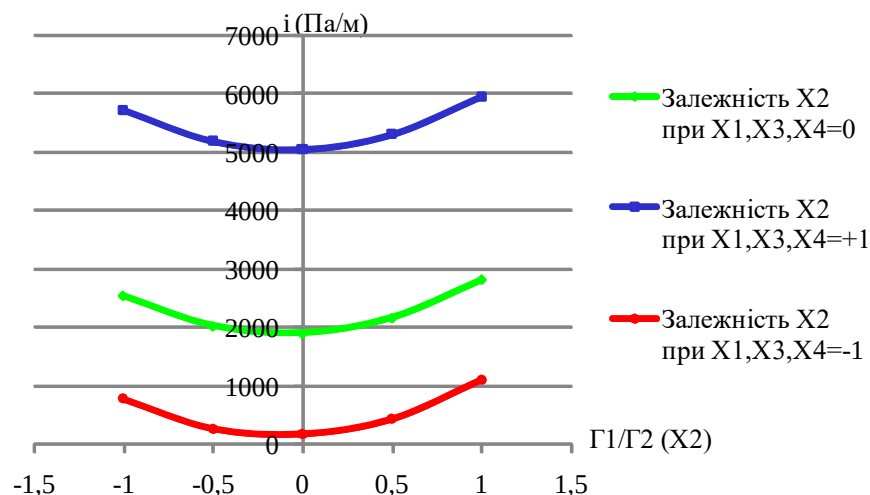


Рисунок 3.7 – Залежність питомого гідравлічного опору від параметра бімодальності Γ_1/Γ_2 при різних факторах впливу: X1 – концентрація ВВП; X2 – параметр бімодальності Γ_1/Γ_2 ; X3 – швидкість транспортування; X4 – зольність вихідного вугілля

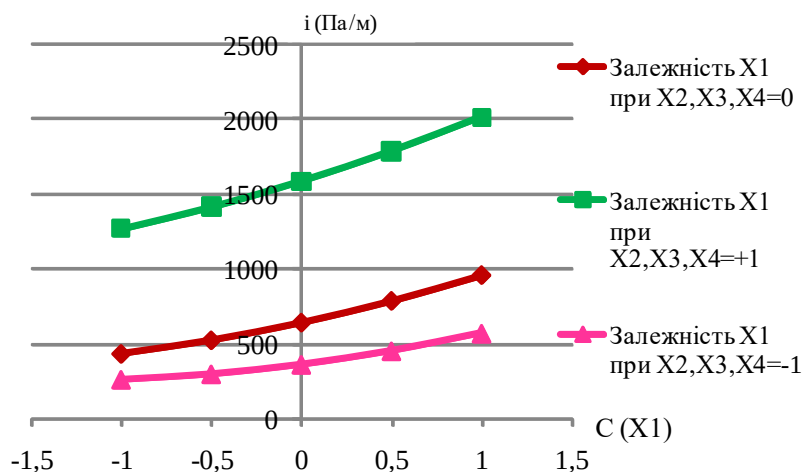


Рисунок 3.8 – Залежність питомого гідравлічного опору від концентрації ВВП (X1) при різних факторах впливу з використанням добавки «Дофен (1%)»

Проаналізувавши вид поверхонь відгуку та узагальнивши отримані результати, можна зробити наступні висновки:

- в залежності від швидкості транспортування ВВП втрати напору в трубопроводі збільшуються за законом близькому до лінійного паралельно зі збі-

льшенням швидкості течії для прямолінійної ділянки. Мінімальні втрати напору спостерігаються при досягненні параметра Γ_1/Γ_2 в межах 2,31–2,35 при середньому значенні 2,33, при цьому їх зростання відповідає як збільшенню, так і зменшенню даного параметра в більшу (з меншої) і меншу (з більшої) сторони інтенсивності. В цілому спостерігається область внесення суттєвих змін до втрат тиску.

- характер зміни втрат напору від швидкості транспортування ВВП також носить лінійний характер, але зростання втрат значно інтенсивніше в порівнянні з іншими факторами впливу.

- зміна втрат напору від концентрації ВВП носить яскраво виражений параболічний характер з максимумом при $X_1 = 1$ ($C = 65\%$); підвищення зольності вихідного вугілля призводить до плавного збільшення втрат напору з мінімальними їх значеннями при $X_4 = -1$ ($A^d = 11\%$).

Стабільність оптимального значення відношення Γ_1/Γ_2 (Ξ в області дослідження факторного простору змінюється в межах двох відсотків) підтверджує правильність вибору даної характеристики гранулометричного складу в якості критерію бімодальності.

Виконані дослідження дозволяють дати рекомендації щодо технології підготовки ВВП раціонального ГМС, яке забезпечує необхідну концентрацію твердого компонента і оптимальні параметри його транспортування трубопроводним транспортом. Отримані результати досліджень дають можливість найбільш ефективно використовувати ВВП в паливно-енергетичному комплексі України, що забезпечить його сталий розвиток і енергонезалежність в сучасних сировинних умовах.

Таким чином, в результаті циклу проведених експериментів підтверджено вплив фактора ГМС на величину питомого гідравлічного опору ВВП, причому стабільність критерію ГМС Ξ (відхилення від середнього значення не перевищує одного відсотка) в зоні оптимуму по опору означає правильність обрання та математичного визначення даного чинника в якості критерія.

Слід зазначити, що вираз для узагальненого критерію Рейнольдса Re^* є наближеним, оскільки воно отримано без урахування третього члена формули Букінгама (рис. 3.9, 3.10).

Існує вислів для Re^* дає більш точний результат. Таке було встановлено Е.3. Рабиновичем [103,104]:

$$Re^* = \frac{Re}{0,125Sen + 1,5/a + \sqrt{(1,5/a)^2 + 0,375Sen/a}}$$

Параметр a визначаємо по таблиці (Додаток Б)

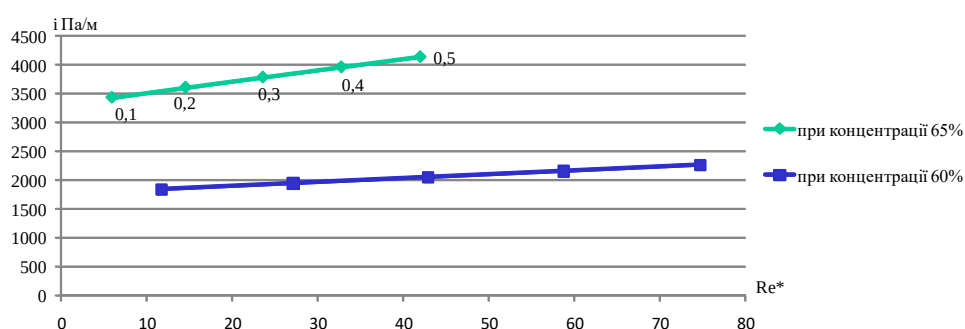


Рисунок 3.9 – Залежність питомих втрат тиску від узагальненого критерію Рейнольдса при швидкостях транспортування ВВП 0,1-0,5 м/с

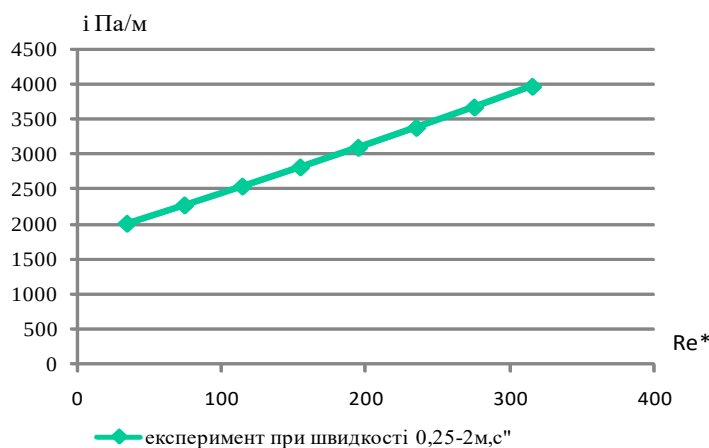


Рисунок 3.10 – Залежність питомих втрат тиску від узагальненого критерію Рейнольдса при швидкостях транспортування ВВП 0,25–2 м/с і концентрації твердого 60%

На підставі підстановки значень в запропоновані залежності [103–107] і маючи експериментальні дані визначення втрат тиску будуюмо графіки відно-

сини величини питомих втрат тиску від узагальненого критерію Рейнольдса при різних швидкостях і концентраціях твердого компонента ВВП. Характер графіків і дослідження критичного значення числа Re для ВВП показує, що режим течії палива є ламінарним.

3.4 Висновки по розділу 3

На основі результатів планованого експерименту уточнено рівняння регресії для питомого гідравлічного опору різних композицій ВВП в функції змінних: концентрація твердого, критерій бімодальності Γ_1 / Γ_2 , швидкість і зольність вихідного вугілля, що дозволяє оцінити їх вплив на енергетичні витрати гідротранспортування даної композиції ВВП.

На основі результатів виконаних експериментальних досліджень закономірностей зміни параметрів течії ВВП та енерговитрат на його транспортування від основних факторів впливу вдосконалено рівняння регресії гідравлічного опору різних композицій ВВП в функції змінних: концентрація твердого, критерій бімодальності Γ_1 / Γ_2 , швидкість і зольність вихідного вугілля, виконано оцінку їх впливу на енерговитрати при транспортуванні ВВП в ПГТС;

На основі результатів виконаних досліджень визначені енерговитрати при транспортування ВВП в ПГТС, мінімальні втрати тиску при цьому склали 761,86, 928,13 і 1585,86 Па/м, при $C=(60, 62,5, 65\%)$ відповідно, зниження енерговитрат на транспортування ВВП при виборі ГМС склало 46%.

Виконавши аналіз виду поверхонь відгуку та узагальнивши отримані результати, можна зробити наступні висновки:

- в залежності від швидкості транспортування ВВП втрати напору в трубопроводі збільшуються за законом близькому до лінійного паралельно зі збільшенням швидкості течії для прямолінійної ділянки. Мінімальні втрати напору спостерігаються при досягненні параметра Γ_1/Γ_2 в межах 2,31–2,35 при середньому значенні 2,33, при цьому їх зростання відповідає як збільшення, так і зменшення даного параметра в більшу (з меншою) і меншу (з більшою) сто-

рони інтенсивністю. В цілому спостерігається область внесення суттєвих змін до втрат тиску.

- характер зміни втрат напору від швидкості транспортування ВВП також носить лінійний характер, але зростання втрат значно інтенсивніше в порівнянні з іншими факторами впливу.

- зміна втрат напору від концентрації ВВП носить яскраво виражений параболічний характер з максимумом при $X_1 = 1$ ($C = 65\%$); підвищення зольності вихідного вугілля призводить до плавного збільшення втрат напору з мінімальними їх значеннями при $X_4 = -1$ ($A^d = 11\%$).

Стабільність оптимального значення відношення Γ_1/Γ_2 (Ξ в дослідженій області факторного простору змінюється в межах двох відсотків) підтверджує правильність вибору даної характеристики гранулометричного складу в якості критерію бімодальності.

Виконані експериментальні дослідження показали, що питомі втрати напору збільшуються зі збільшенням концентрації вугільних часток від 60% до 65% в діапазоні 1200-2000 Па/м. Залежно від параметра, що характеризує бімодальність гранулометричного розподілу, зміна втрат напору носить складний характер і досягає мінімуму при $\Gamma_1/\Gamma_2 = 1,98 - 2,2$. Мінімум втрат напору спостерігається при об'єднанні вказаного значення параметра Γ_1/Γ_2 зі значенням швидкості транспортування $v = 0,3$ м/с і зольності вугілля в межах від $A^d = 11...21\%$.

Дано рекомендації щодо отримання оптимального гранулометричного складу ВВП при використанні барабанних кульових млинів. Експериментально встановлені закономірності отримання твердої фази ВВП в залежності від параметрів млина, тіл що мелють і часу помелу.

Для оцінки показників дрібнодисперсного змащування для крупнодисперсних часток запропоновано умовне число шарів дрібних частинок еквівалентного діаметру, що оточують велику частку еквівалентного діаметру. Встановлено, що для мінімізації гідравлічного опору композиції ВВП необхідно за-

безпечити число даних шарів в діапазоні 2,2 – 2,6, що дозволяє забезпечити стійку структуру взаємозв'язку і передачі сил від дрібних частинок великим і, як наслідок, сприяє переміщенню великої фракції вугілля в складі ВВП з більш низькими показниками опору. Удосконалений метод розрахунку масової та об'ємної концентрацій ТК ВВП з урахуванням поглинання рідкої компоненти відкритими порами твердих частинок, дозволив розкрити ефект підвищення енерговитрат на його транспортування в ПГТС, при цьому максимальна доцільна концентрація становить 67%.

РОЗДІЛ 4

ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ ЗАХОДІВ ЩОДО ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТ НА ТРАНСПОРТУВАННЯ І ЗМЕНШЕННЯ МАТЕРІАЛЬНИХ РЕСУРСІВ НА СПОРУДЖЕННЯ ТА ФУНКЦІОНУВАННЯ ТРУБОПРОВІДНОЇ МЕРЕЖІ

4.1 Вплив гранулометричного складу водовугільного палива на втрати тиску

Для отримання залежностей, які виявляють вплив на втрати тиску під час транспортування водовугільного палива проведено серію розрахунків за допомогою запропонованої математичної моделі для різного гранулометричного складу. Встановлено, що найбільш важливими факторами, що впливають на параметри гідротранспортування водоугольного палива є концентрація твердого компонента (C) і параметри, що характеризують бімодальність гранулометричного складу твердої фази водовугільного палива. Такий підхід дозволяє порівняти втрати тиску для різних варіантів бімодального складу та дає можливість відстежити вплив Γ_1 , Γ_2 при різних концентраціях на гідравлічні параметри водовугільного палива.

Під час моделювання обрано наступні параметри: $D = 50$ мм, $V = 0,5$ м/с.

Для різних Γ_1 , Γ_2 на основі експериментальних досліджень були визначені реологічні показники η й τ_0 , та вносились в розрахунок математичної моделі.

З рис. 4.1 видно, що криві втрат тиску в залежності від співвідношення Γ_1/Γ_2 мають чітко виражений мінімум в діапазоні 1,7...2,0. Для підтвердження отриманих висновків щодо мінімуму гідравлічних втрат тиску під час транспортування ВВП трубопроводом проведено порівняння з експериментальними даними, що наведено на рис. 4.2

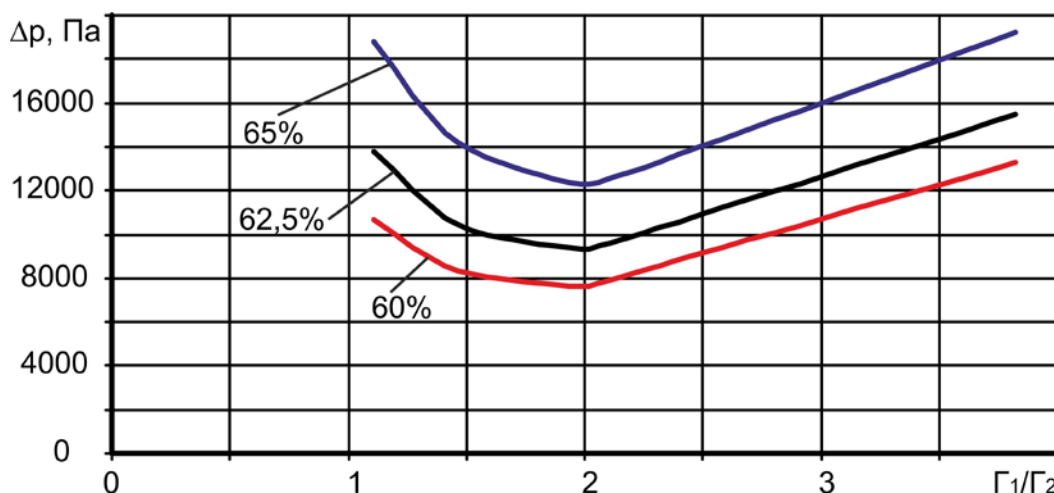


Рисунок 4.1 – Залежність втрат тиску від гранулометричного складу ВВП

Втрати тиску, наведені на рис. 4.2 віднесено до максимальних втрат тиску, що відповідають втратам під час транспортування рідини з гранулометричним складом, що має співвідношення $\Gamma_1/\Gamma_2 = 3,82$. Лінії відповідають даним числового розрахунку, точки – експериментальні дослідження. Розбіжність між даними експерименту та числовим розрахунком не перевищує 1,6 %.

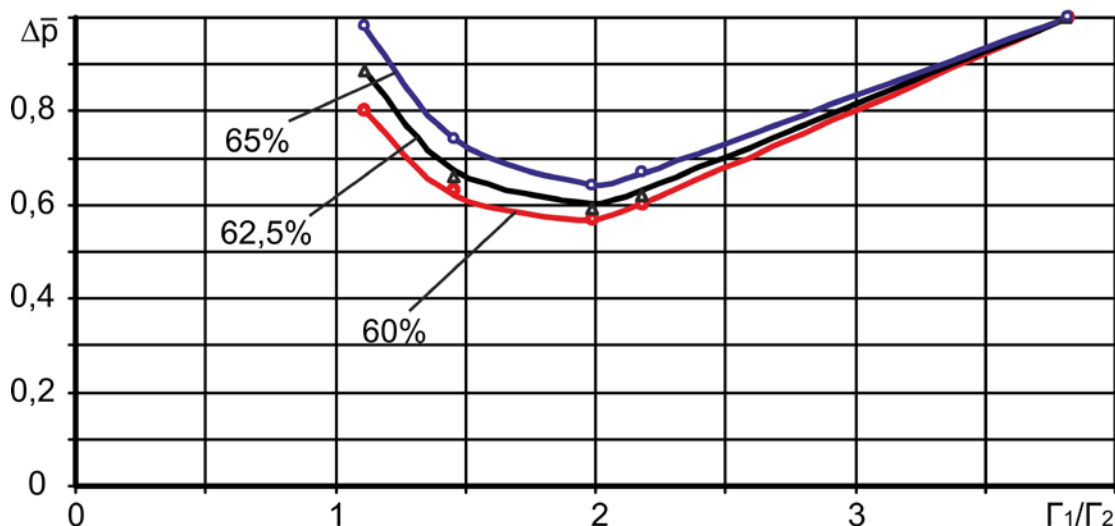


Рисунок 4.2 – Порівняння результатів числового розрахунку з результатами експерименту

Таким чином, як видно з рис. 4.2, зі збільшенням концентрації, зростають відносні втрати тиску. Мінімальні втрати відповідають гранулометричному складу з показником $\Gamma_1/\Gamma_2 = 1,7 \dots 2,0$.

4.2 Вплив пластифікуючої добавки на питомі витрати тиску при транспортуванні водовугільного палива

При дотриманні вимог гідротранспортування за рахунок пластифікаторів потрібно обґрунтувати концентрацію пластифікуючої добавки, що забезпечує виконання даної умови. Обробка результатів експериментів з вивчення впливу пластифікаторів на реологічні властивості ВВП (рис. 4.3, 4.4) дозволяє для умов вугільних басейнів України рекомендувати «Дофен» в якості добавки, для якого отримані наступні регресійні залежності [17]:

$$\frac{\tau}{\tau_0} = 1 - 0,857C_D;$$

$$\frac{\eta}{\eta_0} = 1 - 1,61C_D + 0,95C_D^2,$$

де τ – початкове напруження зсуву ВВП при концентрації пластифікатора «Дофен», рівній C_D ; τ_0 – початкове напруження зсуву ВВП без пластифікатора «Дофен»; C_D – концентрація пластифікатора «Дофен», %; η – ефективна в'язкість ВВП при концентрації пластифікатора «Дофен», рівній C_D ; η_0 – ефективна в'язкість ВВП без пластифікатора.

Після підстановки залежностей в нерівність, приведення подібних членів і виконання стандартних перетворень отримана наступна формула для визначення концентрації пластифікатора «Дофен»:

$$C_D = 0,845 + 1,458(\Theta \pm \sqrt{\Theta - e - 0,2205} \sqrt{\Theta + e - 0,2205});$$

$$e = 0,942\sqrt{0,234 - E};$$

$$E = \left(\frac{H_P}{L} - \frac{\rho}{\rho_0} \frac{Z}{L} \right) \frac{\rho_0 g R}{8,02 k_z \tau_0} \frac{\pi R^3 \tau_0}{\eta_0 Q_P};$$

$$\Theta = \frac{\pi R^3 \tau_0}{\eta_0 Q_P}.$$

Дана формула орієнтована на те, що концентрація пластифікатора не може перевищувати 1,0% [17].

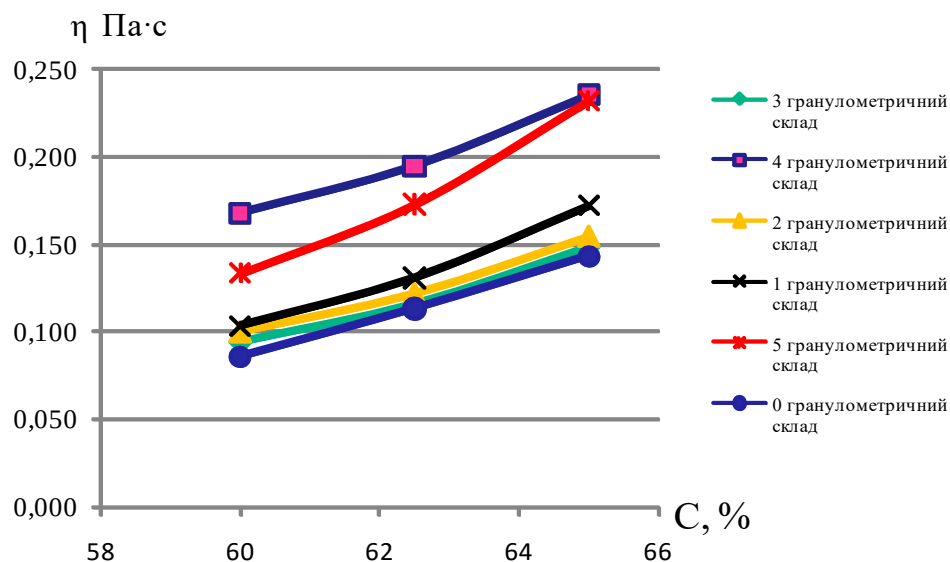


Рисунок 4.3 – Залежність ефективної в'язкості від концентрації твердого компонента при $\dot{\epsilon} = 9 \text{ с}^{-1}$, при використанні хімічної добавки «Дофен (1%)»

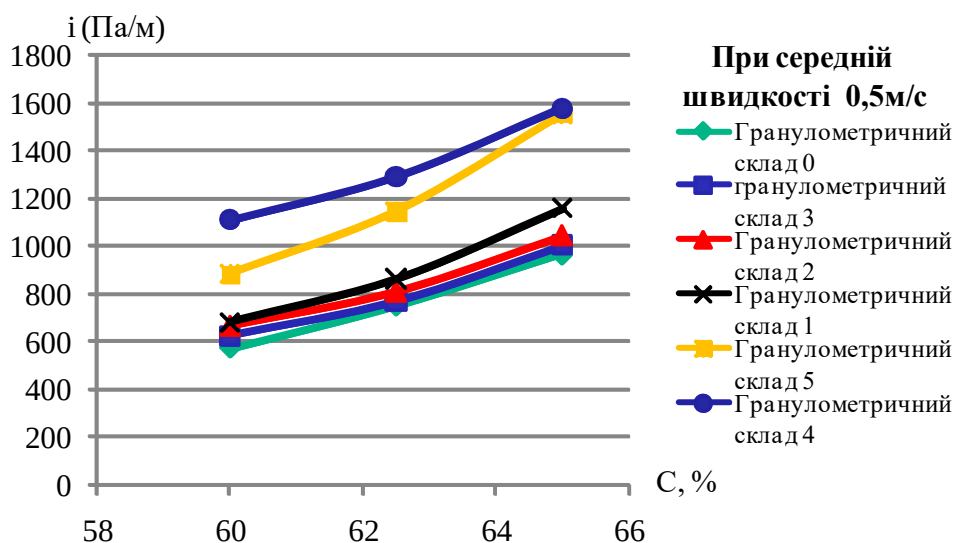


Рисунок 4.4 – Залежність питомого гідравлічного опору від концентрації твердого компонента при використанні хімічної добавки «Дофен (1%)»

4.3 Результати впровадження запропонованих заходів щодо зниження енерговитрат на транспортування ВВП у ПГТС та зменшення матеріальних ресурсів на побудову трубопровідної мережі

4.3.1 Формалізація оптимізаційної моделі вибору параметрів гідротранспортної системи промислового підприємства

Для вирішення економічно і екологічно привабливого проекту по переведенню необхідного обладнання на водовугільне паливо (ВВП) [108,109] в рамках підприємства «ДТЕК Добропільвугілля» необхідно організувати транспортування ВВП промисловим гідротранспортом від пункту відправлення до споживачів. З урахуванням результатів досліджень [110], було встановлено, що найбільш доцільно розмістити один пункт відправлення ВВП. Завдання зводиться до мінімізації витрат на транспортування.

При виборі варіанту транспортування ВВП між пунктом відправлення і споживачами підприємства, першим варіантом А1 є тільки променеве з'єднання пункту відправлення з кожним з пунктів споживання. Варіант А2 - це комбінація променевого з'єднання пункту відправлення з пунктом споживання і послідовного з'єднання. В результаті вирішення оптимізаційної задачі необхідно визначити оптимальну схему транспортування ВВП і визначити оптимальні параметри роботи гідротранспортної системи підприємства (діаметри трубопроводів, параметри транспортних насосів, швидкості транспортування і втрат тиску на ділянках транспортної мережі (рис. 4.5)).

На першому етапі необхідно визначити оптимальну схему транспортування ВВП (топологію транспортної мережі) з урахуванням розміщення пунктів споживання, відстаней і потреб підприємства. Оптимізувати наведені сумарні витрати на трубопроводи, насосне та інше обладнання, електричної енергії на транспортування і визначити діаметри трубопроводів елементів ПГТС.

Запропонований перелік споживачів ВВП наведено в таблиці 4.1: 1) Шахта Добропілля (ШД); 2) ЦЗФ Д (ЦБ); 3) Шахта Алмазна (ША); 4) Шахта Білецька (ШБ); 5) Шахта Водянська (ШВ); 6) ЦЗФ Б (ЦБ).

Таблиця 4.1 – Відстані між споживачами ВВП, м.

х	ШД	ЦД	ША	ШБ	ШВ	ЦБ
ШД	150	500	2500	6360	6240	6660
ЦД	500	150	2800	6100	6360	6500
ША	2500	2800	150	9000	8780	9340
ШБ	6360	6100	9000	150	2300	300
ШВ	6240	6320	8780	2300	150	2100
ЦБ	6660	6500	9340	300	2100	150

Необхідна витрата котлів, м³/год: 1) Шахта Добропілля (ШД) = $Q_1 = 8 * 2,1 = 16,8 \text{ м}^3 / \text{год}$; 2) ЦЗФ Д (ЦБ) = $Q_2 = 2 * 2,1 = 4,2 \text{ м}^3 / \text{год}$; 3) Шахта Алмазна (ША) = $Q_3 = 4 * 2,1 = 8,4 \text{ м}^3 / \text{год}$; 4) Шахта Білецька (ШБ) = $Q_4 = 6 * 2,1 = 12,6 \text{ м}^3 / \text{год}$; 5) Шахта Водянська (ШВ) = $Q_5 = 2 * 2,1 = 4,2 \text{ м}^3 / \text{год}$; 6) ЦЗФ Б (ЦБ) = $Q_6 = 2 * 2,1 = 4,2 \text{ м}^3 / \text{год}$. (табл. 4.2).

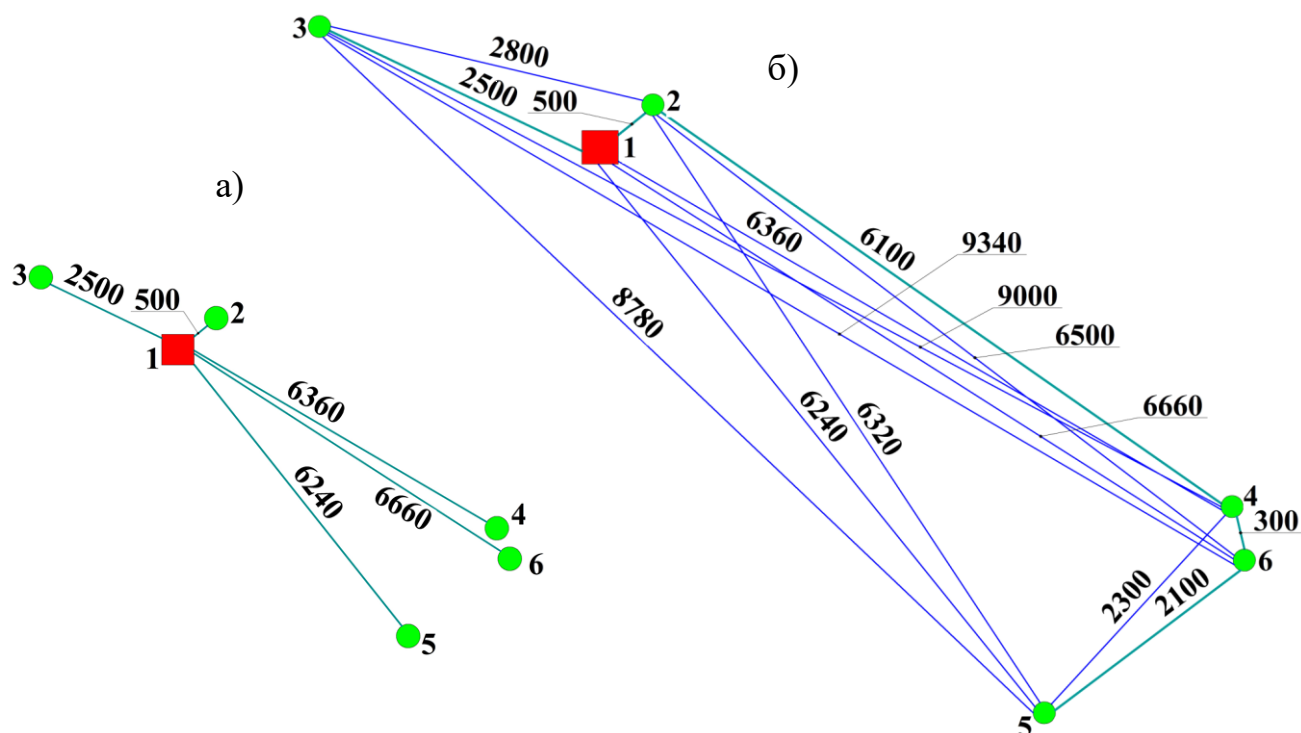


Рисунок 4.5 – Схема транспортної мережі підприємства: а) – променева; б) – послідовно-променева: 1–6 – споживачі ВВП; 1 – пункт відправлення ВВП

Таблиця 4.2 – Потреба споживачів (необхідна витрата котлів)

№ п.п.	Споживачі	Необхідна витрата котлів на ВВП, м ³ /год	Необхідна витрата котлів на вугіллі (твердий компонент ВВП), т/год
1	Шахта Добропілля (ШД)	16,8	13371,86

2	ЦЗФ Д (ЦБ)	4,2	3342,96
3	Шахта Алмазна (ША)	8,4	6685,93
4	Шахта Білецька (ШБ)	12,6	10028,89
5	Шахта Водянська (ШВ)	4,2	3342,96
6	ЦЗФ Б (ЦБ)	4,2	3342,96

Загалом обсяг ВВП для всіх підприємств $Q_{\sum \text{ВВП}} = 50,4 \text{ м}^3 / \text{год}$. Загалом обсяг вугілля (твердий компонент ВВП) для всіх підприємств $Q_{\sum \text{вугілля}} = 40,115 \text{ т} / \text{год}$. Всього 24 котла ДКВР-10 з потребою $Q_{\text{ВВП}} = 2,1 \text{ м}^3 / \text{год}$ кожний. Вартість переобладнання 1 котла без вартості млинів 1 млн.грн. Ємності для зберігання з гомогенізацією у відповідності з нумерацією споживачів (кількість) $n_{\text{ємн}} i$, де i - номер споживача.

Примітка: для 1-го котла рекомендовано 3-и ємності по 6 м^3 загальною вартістю 120 тис.грн. Монтаж всього обладнання (монтаж одного котла з обладнанням) = 109,1 тис.грн. Гомогенізатор - 1 на 1 котел, на 3 ємності; періодичність наповнення ємностей – 3 доби = 72 години. Приймаємо 1 гомогенізатор. Вартість 1 гомогенізатора = 40 тис.грн. Монтаж 1 гомогенізатора: 36,4 тис.грн.

Млини: На 1 котел 2 млина МШЦ – 900/1800 продуктивністю 1,1 т/год вартістю $2 \times 300 = 600$ тис.грн. Варіанти використання млинів іншого типорозміру [110] з відповідними цінами наведені в таблиці 4.3

Таблиця 4.3 – Варіанти кульових (барабанних) млинів

Типорозмір млинів	Продуктивність, т/год	Вартість, тис.грн
МШЦ-900х1800	0,7-2,0	261,4
МШЦ-1200х2400	1,8-5,0	522,8
МШЦ-1500х3000	4,2-12,0	784,1
МШЦ-2100х2200	7,5-22,0	1568,2

Доцільно варіювати типорозміри млинів [111] в залежності від годинного помелу, необхідного на кожному з пунктів приготування (1 або 2) з урахуван-

ням економічної доцільності. Сумарний помел 26,4 т/год. Кількість млинів на пункті приготування ВВП не повинна бути меншою за 2 одиниці.

Насоси: Сумарна подача на всі пункти споживання ВВП дорівнює 50,4 м³/год. Насоси встановлюються на пунктах приготування виходячи з економічної доцільності в залежності від потреб (сумарних, для кожного пункту) споживачів у відповідності з даними таблиці 4.2. Технічні характеристики насосів представлені в таблиці 4.4

Таблиця 4.4 – Технічні характеристики насосів для транспортування ВВП

Технічні характеристики	1. НП-25	2. НП-40	3. НП-50	4. НП-65	5. НП-100
● Продуктивність, м ³ /год	0 – 2,0	0 – 4,8	0 – 9,2	0 - 15	0-30
● Потужність, кВт	1,1 - 1,5	2,2 – 3,0	4,0 – 5,5	5,5 - 7,5	15
● Тиск, МПа	1,2	1,3	1,4	1,4	0,3-1,5
● Вартість з ПДВ, грн.	52320	72780	98256	140400	215000

При умові кількості насосів не менше 2 одиниць.

Діаметр трубопроводів:

Опір залежить від швидкості течії ВВП по наступній залежності:

- для гранулометричного складу ВВП №3

$$i_{50(3ep)} = 387,54v^2 + 2053,41v - 6,1 \text{ Па} / \text{м} \quad (4.1)$$

де i_{50} – питомий опір трубопроводу діаметром 50мм.;

Розрахунок швидкості течії ВВП:

$$v = \frac{Q_c}{F_c}, \text{ м/с}$$

$$\text{де } Q_c = \frac{Q}{3600} \text{ м}^3/\text{с}$$

де Q м³/год - необхідна витрата, м³/год.

Площа перетину визначається за формулою:

$$F_c = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

де D – внутрішній діаметр трубопроводу (варіюється по таблиці 4.5).

Діаметр трубопроводу обирається виходячи з економічної доцільності з урахуванням того, що питомий гідравлічний опір i_{50} (наведений до 1 п.м. трубопроводу). Опір трубопроводів інших діаметрів визначається по залежності:

$$i_D = i_{50} \cdot y(D)$$

де $y(D)$ для 3-го гранулометричного складу:

$$i(D) = a + \frac{b}{D} + \frac{c}{D^2} + \frac{d}{D^3} \text{ Па/м}; \quad (4.2)$$

$a = -0,00285$; $b = 0,01146$; $c = 0,0019096$; $d = 1,2167 \cdot 10^{-6}$. Сортамент трубопроводів різного діаметру представлено в таблиці 4.5, разом з вартістю.

Таблиця 4.5 – Параметри трубопроводів

Внутрішній діаметр труби (типорозмір труби згідно ДСТУ)	Наружний діаметр труби	Вартість труби, грн
121	133	173,4
140	152	257
147	159	287,8
207	219	551,7
261	273	795
300	312	985
344	356	1180
156	168	327,4
233	245	666,11
182	194	441,8
102	114	151,6

Таким чином, при збільшенні діаметра трубопроводу зменшується швидкість ВВП і знижується опір ділянки трубопроводу, яка з'єднує пункт приготування (ПП) і споживача (пункт спалювання) або двох споживачів.

Вартість подачі насосом по трубопроводу:

Витрати потужності (електричної) на прокачування по i -му трубопроводу:

$$N_{Tij} = \frac{l_{ij} \cdot i_{Dij} \cdot Q_{ij}}{3600 \cdot \eta_n}, \text{ Вт} \quad (4.3)$$

де l_{ij} - довжина з'єднувального трубопроводу (ділянки між споживачами або між ПВ і споживачем); i_{Dij} - опір трубопроводів різних діаметрів по ділянках ГТС; Q_{ij} - необхідна витрата ВВП, м³/год.; η_n - ККД насосу ($\eta_n=0,65$); $Q_{k,l}$ - подача 1-го насоса на $K(l)$ – ому ПВ ВВП.

Потужність насоса

$$N_H = \sum_{i=1}^m \frac{l_{ij} \cdot i_{Dij} \cdot Q_{ij}}{3600 \cdot \eta_H} \quad (4.4)$$

де i_{Dij} - опір (питомий) трубопроводу на ділянці $i - j$, який варіюється в залежності від швидкості в трубопроводі і від його діаметру D_{ij} по залежностям для i_{50} і i_D .

Капітальні витрати на переобладнання котлів, що наведені до 1 котла ДКВР-10 складають без транспортних насосів та млинів 800 тис.грн. Капітальні витрати з урахуванням млинів, насосів і витрат на монтаж складають для кожного ПП ВВП:

$$K_{\sum l,K} = n \cdot C_m + m \cdot C_n + k \cdot C_m + 800 \cdot k \quad (4.5)$$

де n - число млинів;

m - число транспортних насосів;

C_m - вартість монтажу. ($C_m = 800$ тис.грн.);

k - число котлів.

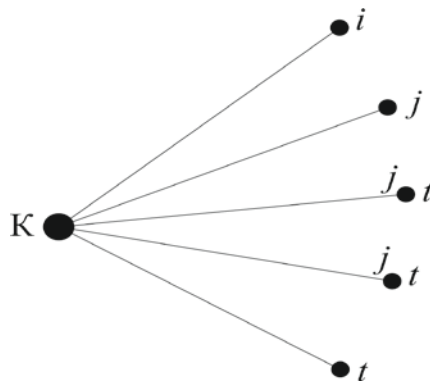


Рисунок 4.6 – Умовна схема системи по варіанту 1

Вихід ПП ВВП – індекс K . Трубопровід $K-i$ – з'єднання ПП ВВП з першим (або i -им) споживачем. i – індекс споживача, першого по ходу потоку ВВП після ПП ВВП. j – індекс поточного споживача, другого по ходу потоку ВВП після 1-го, i -го споживача. t – індекси будь-яких поточних споживачів.

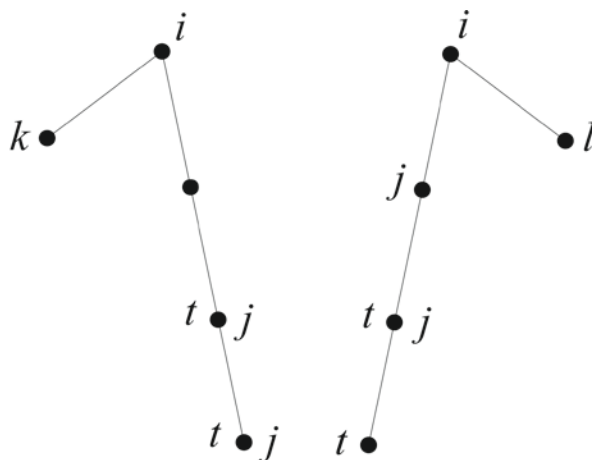


Рисунок 4.7 – Умовна схема системи по варіанту 2

Число котлів k в залежності від потреб споживачів, що знаходяться на даному ПП ВВП (його індекс K або l) при $\pi_{K,l}$ визначається:

$$k = \frac{\pi_{K,l}}{\Pi_{\text{ДКВР}}} \quad (4.6)$$

де $\Pi_{\text{ДКВР}}$ - теплопродуктивність 1 котла ДКВР-10, яка дорівнює 6,56 Гкал/год. Сумарна теплопродуктивність усіх 24 котлів на всіх споживачів 157,44 Гкал/год.

$\pi_{K,l}$ - потреба в теплоті для всіх споживачів, що знаходяться на даному ПП ВВП.

Число насосів m визначається в залежності від сумарної подачі g споживачам.

$$m = \frac{\sum_{i=1}^g Q_i}{Q_{K,l}}, \quad (4.7)$$

де $Q_{k,l}$ - подача 1-го насоса на $K(l)$ – ому ПП ВВП.

Число млинів n визначається від сумарної потреби g споживачів в твердому компоненті ВВП:

$$n = \frac{\sum^g}{P_{K,l}}, \quad (4.8)$$

де $P_{K,l}$ - продуктивність одного млина на $K(l)$ -ому ПП ВВП.

Питомі (річні) капітальні витрати на переобладнання l -го або Kl -го пункту, в розрахунку на 1 ДКВР-10 приведені до 1 року за допомогою нормативного коефіцієнта, прийнятого рівним 0,1 запишуться у вигляді

$$K_{\sum l,K} = 0,1 \cdot (k \cdot 800 + k \cdot C_m + n \cdot C_m + m \cdot C_H) \quad (4.9)$$

Питомі річні капітальні витрати на переобладнання для роботи на ВВП кожного i, j, t –го споживача складуть:

$$K_{\sum i,j,t} = 0,1 \cdot [k(800 + 800)] = 1600 \cdot k, \quad (4.10)$$

де $k = \frac{\pi_{i,j,t}}{\Pi_{\text{ДКВР}}}$

x, y - річні витрати електроенергії на подачу ВВП по трубопроводу.

Індекси x, y можуть приймати значення $K,i; l,i; i,j; j,t$ визначаються за формулою

$$E_{xy} = \frac{l_{xy} \cdot i_{Dxy} \cdot Q_{xy} \cdot 365 \cdot 24}{\eta_{HKI}} \quad (4.11)$$

де i_{Dxy} - питомий (приведений до 1 м. трубопроводу) опір трубопроводу на ділянці x,y , що має довжину, прийняту з таблиці 4.1 з варійованим діаметром D_{xy} , який обирається з умови мінімізації функції мети, яка для даного діаметра визначається по залежностях для i_{50} та i_D , при цьому швидкість ВВП обчислю-

ється по формулі $\frac{Q_{xy} \cdot 4}{\pi \cdot D_{xy}} = v_{xy}$. При цьому Q_{xy} дорівнює сумі подач Q_t для нижче

розташованих споживачів при послідовній подачі ВВП: $Q_{xy} = \sum_{t=1}^n Q_t$, де n - чис-

ло таких споживачів; η_{HKl} - ККД насоса на K, l - ому пункті ПП ВВП.

$$\text{Витрати на електроенергію } \sum C_E = C_{EL} \sum E_{xy},$$

де C_{EL} - ціна одного кВт·год електроенергії.

$$\text{Витрати на трубопровід: } \sum C_{mp} = \sum C'_{mpxy} \cdot l_{xy},$$

де C'_{mpxy} - ціна 1 п.м. трубопроводу обраного діаметру (таблиця 4.5).

Експлуатаційні витрати включають в себе:

- амортизаційні відрахування, які становлять 4% капітальних вкладень в лінійну частину;
- витрати на поточний ремонт - приблизно 0,5% від капітальних вкладень в лінійну частину;
- витрати на електроенергію - визначаються з урахуванням існуючого тарифу (вартості що витрачається на перекачування: електроенергії і плати за встановлену потужність);
- також інші витрати: зарплата обслуговуючого персоналу та ін.

Виходячи з потреби ВВП ($Q_{\sum_{ВВП}} = 50,4 \text{ м}^3 / \text{год}$) і параметрів транспортної мережі було обрано 2 транспортних насоса НП-100 з продуктивністю $30 \text{ м}^3 / \text{год}$ і граничним робочим тиском $P_{nac} = 1,5 \text{ МПа}$. загальною вартістю 430 тис.грн. Загальні експлуатаційні витрати становлять 7% від капітальних вкладень.

Функція мети складається з капітальних і експлуатаційних витрат [112]:

$$\begin{aligned} C(x, d, y) = & \sum_{i=1}^K \sum_{j=2}^K X_{ij} L_{ij} d_{ij} \cdot e(d_{ij}) + C_H(Q_{\max}, i \cdot L_{ij}) + \\ & + \sum_{i=1}^K \sum_{j=2}^K \frac{X_{ij} L_{ij} B(C, \Xi, V, A^d) \cdot Q_{ij}}{1000 \cdot \eta_n} \cdot n_{\text{дн}} \cdot 24 \cdot C_{el} \rightarrow \min \end{aligned} \quad (4.12)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^K \sum_{j=2}^K X_{ij} L_{ij} B(C^y, \Xi^y, V^y, A^{d^y}) \leq P_{\text{нас}}; \\ \sum_{i=1}^K Q_i \leq Q_{\text{нас}}. \end{cases}$$

де X_{ij} - топологія, отримана в результаті вирішення матриці суміжності графа (рис.4.5); L_{ij} - суміжна матриця довжин (розрахунків) між пунктами мережі; d_{ij} - діаметр сегмента (ребра); e - узагальнена функція вартості прокладки трубопроводу і вартості труби (до 1 м.п. труби) залежно від діаметра; $C_H(Q_{\text{max}}, i_{\text{max}})$ - функція вартості транспортного насоса в залежності від продуктивності та робочого тиску; $B(C, \Xi, V, A^d)$ - опір транспортної мережі (визначається за рівнянням регресії (3.15) [113] - варіюється в залежності від діаметру трубопроводу); K - кількість вершин споживачів ВВП; $Q_{\text{нас}}$ - обмеження по продуктивності насоса; $\sum_{i=1}^K Q_i$ - сумарна потреба в ВВП, м³/год.; $P_{\text{нас}}$ - граничний робочий тиск насоса, Па.; $C_{\text{ел}}$ - ціна одного кВт · год електроенергії.

4.3.2 Методика вибору параметрів гідротранспортної системи промислового підприємства

Визначення оптимального порядку транспортування ВВП до пунктів споживання на маршруті обраної транспортної мережі можливо виконати за допомогою алгоритму Прима і методу "гілок і меж", застосування якого дозволяє визначити найкоротші відстані між пунктами, що включаються в один маршрут (принцип мінімального остовного дерева) [117].

Представлення графа (рис. 4.5) реалізується за допомогою матриці суміжності:

$$1. \text{ Для незваженого графа: } \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

2. Для зваженого графа:

0	500	2500	6360	6240	6660
500	0	2800	6100	6320	6500
2500	2800	0	9000	8780	9340
6360	6100	9000	0	2300	300
6240	6320	8780	2300	0	2100
6660	6500	9340	300	2100	0

Алгоритм Прима - представляє собою алгоритм побудови мінімального остовного дерева зваженого зв'язного неорієнтованого графа [117–126]. На вхід алгоритму подається зв'язний неорієнтований граф. Для кожного ребра задається його вартість.

Спочатку береться довільна вершина і знаходиться ребро, інцидентне даній вершині яка має найменшу вартістю. Знайдене ребро і з'єднані їм дві вершини утворюють дерево. Потім, розглядаються ребра графа, один кінець яких – що належить дереву вершина, а інший - ні; з цих ребер вибирається ребро найменшої вартості. Обране на кожному кроку ребро приєднується до дерева. Зростання дерева відбувається до тих пір, поки не будуть вичерпані всі вершини вихідного графа. Результатом роботи алгоритму є дерево мінімальної вартості.

Матриця суміжності, що описує дуги графа представлена в таблиці 4.6

Таблиця 4.6 – Матриця суміжності

Вузли	1	2	3	4	5	6	У вигляді списку:			
Дуги							Дуги	Вузли	Булеві змінні (Т-направлена дуга; F-не направлена дуга)	Вага
1	1	1	0	0	0	0	1	1,2	F	500
2	0	1	1	0	0	0	2	2,3	F	2800
3	1	0	1	0	0	0	3	1,3	F	2500
4	0	1	0	1	0	0	4	2,4	F	6100
5	0	1	0	0	0	1	5	2,6	F	6500
6	1	0	0	1	0	0	6	1,4	F	6360
7	1	0	0	0	0	1	7	1,6	F	6660
8	0	0	1	0	0	1	8	3,6	F	9340
9	0	1	0	0	1	0	9	2,5	F	6320

10	1	0	0	0	1	0	10	1,5	F	6240
11	0	0	1	0	1	0	11	3,5	F	8780
12	0	0	0	1	0	1	12	4,6	F	300
13	0	0	0	1	1	0	13	4,5	F	2300
14	0	0	0	0	1	1	14	5,6	F	2100
15	0	0	1	1	0	0	15	3,4	F	9000

Даний метод побудови мінімального остовного дерева не вимагає ні сортування, ні перевірки на циклічність на кожному кроці. Побудова остовного дерева Γ_o починається з довільної вершини x_1 . Потім серед ребер, інцидентних x_1 , обираємо ребро (x_1, x_2) з найменшою вагою і включаємо його в дерево Γ_o . Повторюючи процес, виконуємо пошук найменшого за вагою ребра, що з'єднає вершини x_1 і x_2 з деякою іншою вершиною графа x_3 .

Процес включення ребер продовжуємо до тих пір, поки всі вершини вихідного графа Γ не будуть включені в дерево Γ_o . Побудоване дерево буде мінімальним остовним. Доказ того, що послідовність кроків 1-4 призводить до побудови мінімального остовного дерева. Реалізація схеми найближчого сусіда формування остовного дерева виконана в алгоритмі, де вихідний граф $\Gamma = (X, U, \Phi)$ являє собою таблицю ваг $w_e = [w_{ij}]$, ваги неіснуючих ребер вважаються рівними $+\infty$. Під вагами ребер розуміються їх довжини. Остовне дерево $\Gamma_o = (X_o, U_o, \Phi)$ формується за допомогою реберного списку U_o і зписку вершин X_o . В якості відміток встановлюються їх порядкові номери $X_i = \{1, 2, \dots, n\}$. Для кожної вершини $x \in X$ графа, ще не включеної в дерево, підтримується мінімальна відстань до безлічі раніше включених вершин в X_o . Це здійснюється за допомогою двох векторів $dist[x_i]$ і $prev[x_i]$; де $dist[x_i]$ дорівнює мінімальній відстані від $x \in X$ до вершини $prev[x_i] \in X_o$. Оновлення значень векторів $dist[x_i]$ і $prev[x_i]$ виконується на кожному кроці алгоритму при поповненні X_o новою вершиною.

Складність алгоритму найближчого сусіда визначається двома вкладеними циклами по числу вершин. У кожному з циклів виконується константне число операцій. Отже, складність становить $O(|X_i|^2)$.

Алгоритм найближчого сусіда для остовного дерева має вигляд:

```

 $X = \{1, 2, \dots, n_i\}; \{ \text{Мітки вершин графа} \}$ 
 $nX = |X_i|; \{ \text{Кількість вершин в графі} \}$ 
 $v = \text{rand}(1, |X_i|); \{ \text{Довільна вершина } v \in X \}$ 
 $X_0 = \{v\}; \{ \text{Вершини остовного дерева} \}$ 
 $X = X_i \setminus \{v\}; \{ \text{Видалити } v \text{ з } X \}$ 
 $U_0 = \emptyset; \{ \text{Ребра остовного дерева} \}$ 
 $W_T = 0; \{ \text{Вага остовного дерева} \}$ 
for  $x \in X_i$  do begin
 $\text{dist}[x] = \text{We}[x_i, v]; \{ \text{Мінімальна відстань від } x \text{ до } v \in X_0 \}$ 
 $\text{prev}[x] = v; \{ \text{Ребро}(v, x_i), \text{ довжина якого } \text{dist}[x_i] \}$ 
end;
while  $|X_0| \neq nX$  do begin
 $\text{dist}[v] = \min_{x \in X} \text{dist}[x_i]; \{ v \in X - \text{вершина для включення} \}$ 
 $X_0 = X_0 \cup \{v\}; \{ \text{Додати вершину} \}$ 
 $X = X_i \setminus \{v\}; \{ \text{Видалити вершину} \}$ 
 $U_0 = U_0 \cup \{ \text{prev}[v], v \}; \{ \text{Додати ребро} \}$ 
 $W_T = W_T + \text{dist}[v]; \{ \text{Виправити вагу дерева} \}$ 
 $\{ \text{Виправити } \text{dist}[x_i] - \text{вектор відстаней} \}$ 
for  $x \in X_i$  do if  $\text{dist}[x] > \text{We}[v, x_i]$  then begin
 $\text{dist}[x_i] = \text{We}[v, x_i];$ 
 $\text{prev}[x_i] = v;$ 
end;
end.
```

(4.13)

Вихідні дані графа представляються матрицею ваг його ребер в текстовому файлі Near.in. Програма алгоритму найближчого сусіда представлена в додатку А.

В результаті вирішення, топологія вершин, ребер і відстаней має вигляд:

$$\begin{aligned}
 V &= \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}; E_X = \{\{1, 2\}, \{1, 3\}, \{2, 4\}, \{4, 6\}, \{6, 5\}\}; \\
 E_L &= \{\{500\}, \{2500\}, \{6100\}, \{300\}, \{2100\}\},
 \end{aligned}
 \tag{4.14}$$

Загальна довжина маршруту складає 11500м. Опір залежить від швидкості транспортування ВВП по залежності (4.1).

Таким чином, при збільшенні діаметра трубопроводу зменшується швидкість транспортування ВВП і знижується опір ділянки трубопроводу, яка з'єднує пункт відправлення (ПВ) і споживача або двох споживачів.

Перевірка результатів знаходження оптимального порядку укладання трубопроводів на маршруті була виконана шляхом розрахунку даної мережі методом «гілок і меж» [126]. Для застосування якого визначені найкоротші відстані між пунктами, що включаються в один маршрут. Результати розрахунків свідчать про доцільність використання методу «гілок і меж» і алгоритму Прима, так як результати розрахунків повністю співпали.

Задача может включат 2 варианта решения А и Б.

I. А- 1 пункт приготовления водоугольного топлива (ВВП)

II. Б – 2 пункта приготовления ВВП

I.1. При виборі варіанту А, першим підваріант А1 є тільки променеве з'єднання пункту приготування з кожним з пунктів споживання (рис. 4.8). Маючи потребу кожного з пунктів споживання Q_i розраховуємо швидкість переміщення по трубопроводу ВВП в кожен з пунктів споживання $П_i$ для трубопроводу діаметром 50 мм. Після цього визначається опір кожного з трубопроводу за формулою (4.1).

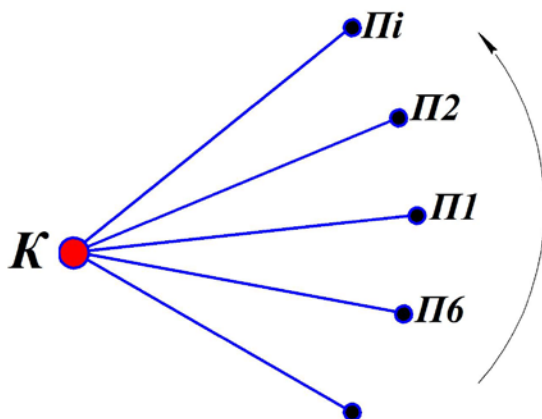


Рисунок 4.8 – Умовна схема системи по варіанту А1

Вихід ПП ВВП – індекс К;

Отже опір залежить від швидкості течії ВВП згідно з (4.1):

- для гранулометричного складу ВВП №5

$$i(D) = a + b \cdot D + \frac{c}{D} + \frac{d}{D^2} \frac{Pa}{m}; \quad (4.15)$$

$a = 0,000616$; $b = -0,005307$; $c = 0,011255$; $d = 0,0019364$

I.2. Методом Свіра [43] об'єднуємо промені, вибираючи той момент коли сумарна подача по ометеним променям максимально наблизиться до насоса першого (мінімального з подачі) в типорозмірному ряду (Таблиця 4.4). Після цього продовжуємо ометання променів методом Свіра вибираючи момент коли сумарна подача максимально наблизиться до другого, по типорозмірному ряду, насосу. Визначаємо, чи подача відповідна потребам наступних ометених споживачів подачі першого обраного насоса. У разі відповідності порівнюємо за вартістю варіант 2-х насосів з варіантом одного насоса. Після вибору кращого варіанту продовжуємо ометання в зазначеній послідовності з дотриманням тієї ж логіки з прорахунком всіх існуючих променів до кінця. Після цього вибираємо млини на необхідну подачу (один або два або три млини) підбираючи сумарну найменшу вартість млинів по таблицям 4.1 і 4.2.

I.3. Далее розраховуємо опір кожного з променів і за формулою (4.1) визначаємо втрати потужності в кожному з променів підваріанти А1 (зірка). Після цього за формулою (4.3) перевіряємо відповідність потужності обраних насосних агрегатів паспортними даними в таблиці 4.4. При не відповідності потужних параметрів замінюємо насосний агрегат на наступний по типорозміру.

Опір кожного з променів визначається за формулою:

$$\Delta p = i_{(50)i} \cdot l_i \text{ Па} \quad (4.16)$$

де l_i – довжина і-го променя.

I.4. Перевіряємо відповідність максимального опіру променів паспортним даним насосного агрегату. У разі невідповідності діємо за пунктом I.3.

I.5. Знаходимо з використанням формул (4.3) - (4.11) цільову функцію по (4.12) і фіксуємо знайдене значення (грн. В рік.). у вигляді $C1_{(50)}$.

I.6. Потім змінюємо діаметр променя обраного першим за методом Свіра з 50мм на 62 мм, (тобто наступний за послідовністю в таблиці 4.5), визначаємо опір $i_{(62)}$ по формулі (4.1 і 4.2).

I.7. Розраховуємо цільову функцію по (4.12) з урахуванням зміни діаметра (тобто опору трубопроводу в промені) і вартості трубопроводу по таблиці 4.5. Фіксуємо отримане значення і порівнюємо з першим варіантом розрахунку. Якщо другий варіант має меншу вартість в порівнянні з першим, то продовжуємо процес збільшення діаметра по пункт I.6. Збільшення продовжуємо до появи в наступному вигляді $j + 1$ значення цільової функції, більшого ніж в попередньому j -тому. Фіксуємо для i -го променя діаметр варіанту j . Далі переходимо до наступного діаметру по таблиці 4.5 і визначаємо цільову функцію. При повторному отриманні для діаметра $j + 2$ значення цільової функції, більшого ніж для варіанту j діаметра остаточно фіксуємо дане значення діаметра для i -го променя.

I.8. Переходимо, дотримуючись методу Свіра, до $i + 1$ -му променю і виконуємо дії по пункту I.7. Після закінчення дій за пунктом I.6, I.7 вибираємо мінімальну цільову функцію C_{A1} по (4.12), фіксуємо отримане значення n , m , D_i , l_i

Таким чином розрахунки за спрощеним варіантом A1 закінчені.

I.9. Варіант A2 - це комбінація променевого з'єднання пункту приготування з пунктом споживання і послідовного з'єднання. Починаємо з першого по методу Свіра променя $K-i$ і порівнюємо суму $l_{K-i} + l_{K-j-1}$ з сумою $l_{K-i} + l_{i-j-1}$ (рис. 4.9). I.9.1. У разі якщо перша сума менше другої переходимо до наступного, за методом Свіра, променю $K-П2$ і продовжуємо діяти в порядку зазначеному вище в даному пункті.

I.9.2. У разі якщо друга сума менше першої приєднуємо до променю $K-i$ трубопровід $i-j-1$ (рухаючись проти годинникової стрілки до найбільш близького споживача $j-1$).

Визначаємо опір (формули 4.1 і 4.2) променя $K-i$ з урахуванням того, що по ньому проходить витрата ВВП Q_{K-i} рівна сумі витрат $Q_i + Q_{j-1}$.

Визначаємо опір ділянки $i-j-1$ для трубопроводу діаметру $i_{(50)} \cdot l_{i-j-1}$. При цьому прибираємо промінь $K-j-1$. Це варіант A2,1.

I.10. Знаходимо з використанням формул (4.3) - (4.11) цільову функцію по (4.12) і фіксуємо знайдене значення (грн. В рік.) для варіанта A2,1 $C2_{(50)}$

I.11. Оцінимо вплив збільшення діаметра променя K -і на величину функції мети, для цього діємо за пунктом (I.6 і I.7). Повторюємо вказаний вище в даному пункті порядок дій щодо відрізка i_{j-1} і фіксуємо величини оптимальних діаметрів D_{K-i} D_{i-j1} . Фіксуємо величину функції мети відповідну оптимальним діаметрами.

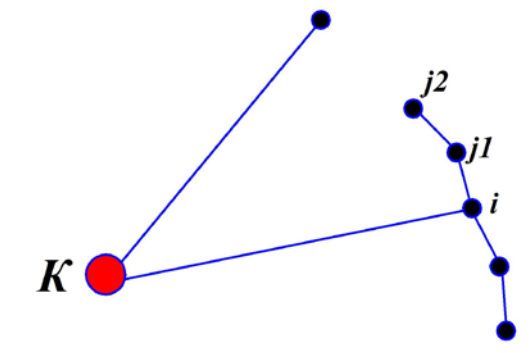


Рисунок 4.9 – Умовна схема системи по варіанту A2

I.12. Порівнюємо довжину відрізка $j1-j2$ з відстанню променя $K-j2$ і в разі меншої довжини відрізка $j1-j2$ включаємо його в послідовну схему $K-i-j1-j2$ при цьому враховуємо, що по ділянці $K-i$ проходить витрата Q_{K-i} рівна сумі витрат $Q_i + Q_{j1} + Q_{j2}$, а по відрізку $i-j1$ проходить витрата Q_{i-j1} рівна $Q_i + Q_{j1}$.

В іншому випадку повертаємося до пункту I.9.1. У разі меншої довжини відрізка $j1-j2$ повторюємо операції з діаметрами D_{K-i} , D_{i-j1} і застосовуємо вказаний вище в пункті I.11. алгоритм до діаметру D_{j1-j2} , після чого фіксуємо оптимальні значення цих діаметрів.

I.13. Продовжуємо алгоритм розрахунку аналогічний зазначеному в пункті I.12 до перевищення довжини подальшого відрізка в порівнянні з поточним променем, який оцінюється на предмет виключення зі схеми A2. Визначаємо сумарний опір всієї ділянки з послідовним з'єднанням споживачів при оптимальних значеннях діаметрів трубопроводів.

Таким чином в результаті отримаємо схему, що містить комбінацію променевих і послідовних з'єднань пункту приготування ВВП з пунктами споживання. Уточнюємо типорозміри обраних раніше для груп споживачів насосних агрегатів з урахуванням підвищення опору і діючи в порядку, зазначеному в пункті I.4.

Після закінчення дій за пунктом I.9, - I.13 вибираємо мінімальну цільову функцію $C_{A1,2}\uparrow$ по (4.12), фіксуємо отримані значення n, m, D_i, l_i .

Повторюємо алгоритм розрахунків по пунктам 1,9 - 1,13 при ометанні пунктів споживання за годинниковою стрілкою ($\downarrow$). В результаті отримуємо цільову функцію $C_{A1,2}\downarrow$ з фіксацією отриманих в даному пункті значень.

Таким чином розрахунки за спрощеним варіантом A1,2 закінчені.

I.14. Порівнюємо знайдені три локально-оптимальних значення функції мети $C_{A1}, C_{A1,2}\uparrow, C_{A1,2}\downarrow$ і вибираємо найменший з них з відповідним вибором схеми з'єднання і фіксуємо відповідні цим варіантом значення n, m, D_i, l_i .

I.15. Варіант A3 - це комбіноване променеве і послідовно-паралельне з'єднання пунктів приготування ВВП і споживання (рис. 4.10). При доцільності паралельної подачі, тобто одночасно менші за розміром відрізків, в порівнянні з відповідними променями $K-j+1$ і $Kj-1$ орієнтуючись щодо напрямку променя $K-i$ одночасно за і проти годинникової стрілки зберігаємо схему по оптимальному варіанту (див. п. I.14) за винятком ділянки $K(j-1)-i-(j+1)-K$. Далі повторюємо операції починаючи з пункту I.9.2. враховуючи, що по трубопроводу $K-i$ до пунктів споживання $j-1$ і $j+1$ проходить витрата, що дорівнює сумі їхніх потреб, а по трубопроводах $i-j-1$ і $i-j+1$ проходять витрати, рівні потреб споживачів відповідно Q_{j-1} і Q_{j+1} що зменшує швидкість в даних трубопроводах в порівнянні зі схемою A1,2.

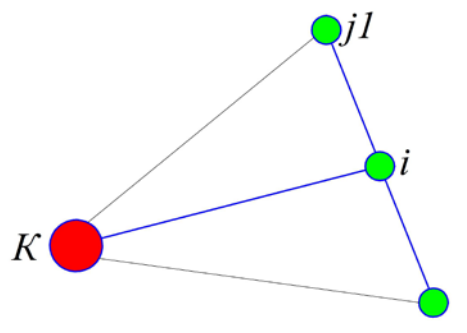


Рисунок 4.10 – Умовна схема системи по варіанту A3

У разі якщо після виконання, зазначеного вище в пункті 1.15 алгоритму, значення функції мети зменшаться в порівнянні зі знайденими за пунктом I.14 значеннями, включаємо дану ділянку в загальну схему розводки трубопроводів,

замінюючи або прибираючи відповідні елементи оптимізованої за пунктом I.14 схеми. Продовжуємо зазначені дії за схемою по відношенню до всіх варіантів її розгалуження з точки і. Закінчену відкориговану схему з фіксацією її конфігурації і, відповідно, значень n , m , D_i , l_i приймаємо за рішення поставленого завдання щодо одного пункту приготування (Додаток В).

II - Варіант Б. Призначаючи два пункти приготування: перший на шахті Добропілля (ШД), другий на шахті Білецька (ШБ), визначаємо споживачів для пункту роздачі 1: Шахта Добропілля (ШД), Шахта Алмазна (ША) і ЦЗФ Д (ЦБ), а 2-го: Шахта Білецька (ШБ), Шахта Водянська (ШВ) і ЦЗФ Б (ЦБ). Після цього проводимо розрахунок за алгоритмом, який викладений в підрозділі I. Особливості експлуатації існуючого насосного обладнання на підприємстві викладені у [127–130].

4.4 Результати вирішення оптимізаційної задачі і вибору параметрів транспортування ВВП

В результаті вирішення транспортної задачі і формування оптимізаційної моделі вибору параметрів транспортування ВВП до пунктів споживання підприємства «ДТЕК Добропіллявугілля» була оптимізована топологія транспортної мережі роздачі по пунктам споживання ВВП і оптимізацією наведених сумарних витрат на трубопроводи, насосне та інше обладнання, електричної енергії на транспортування визначені діаметри трубопроводів елементів ПГТС. Результати оптимізації представлені на рис. 4.11– 4.12

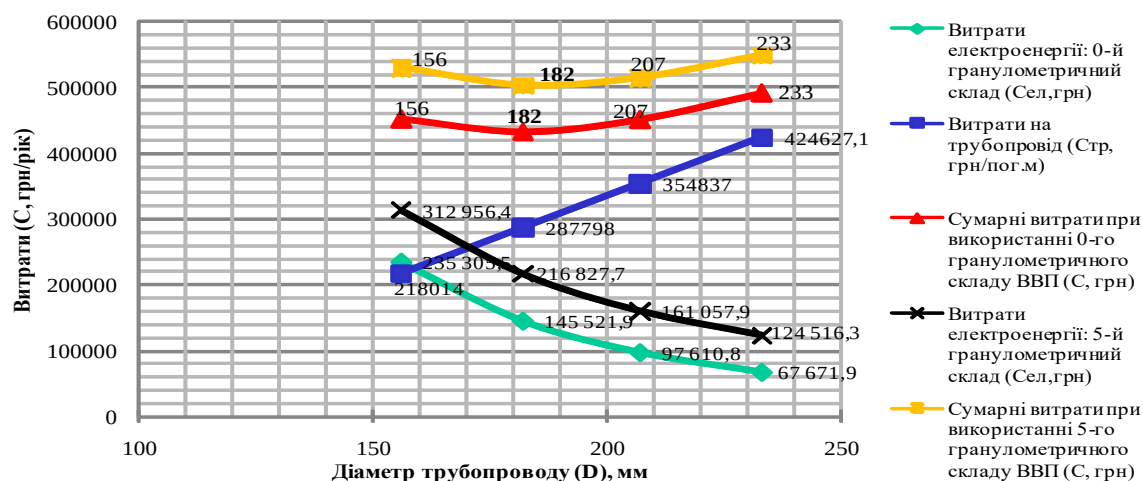


Рисунок 4.11 – Залежність витрат на спорудження трубопроводу і транспортування ВВП від діаметра трубопроводу і варіанту гранулометричного складу

В якості прикладу на рис.4.12. представлені результати визначення оптимального діаметра трубопроводу, на ділянці 2–4, протяжністю 6100м, при порівнянні сумарних витрат на його спорудження і витрат електроенергії на транспортування ВВП.

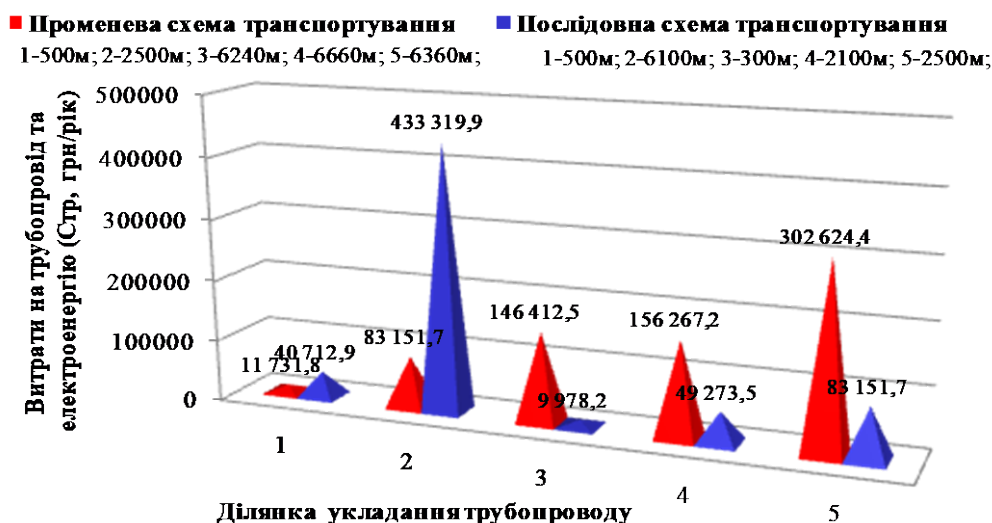


Рисунок 4.12 – Порівняння витрат при визначенні оптимальної схеми транспортування ВВП (грн./рік.): 1-5 - ділянки укладання трубопроводу

Оптимальний діаметр трубопроводу склав 182мм. з урахуванням існуючих ДСТУ на сортамент сталевих труб з товщиною стінок 6мм. Оптимальні діаметри трубопроводу склали: на ділянках 1-2 = 207мм; 1-3 = 121мм; 2-4 = 182мм; 4-6 = 121мм; 6-5 = 121мм.

Оптимізація проводилася з урахуванням зниження загальної витрати потоку ВВП в процесі його транспортування між пунктом відправлення і всіма пунктами споживання по черзі, по загальному трубопроводу, зменшуючи діаметри труб по ділянках мережі.

Як показують результати дослідження (рис.4.13, табл. 4.7) використання гранулометричного складу ВВП № 0, запропонованого в роботі (з критерієм бімодальності $G1/G2=2,45$), дозволяє знизити витрати електроенергії на його транспортування в ГТС підприємства на 86,13 тис.грн/рік. в порівнянні з гранулометричним складом №5, який був обраний довільно як вихідний. При цьому топологія транспортної мережі включає ребра $X = 1-2; 1-3; 2-4; 4-6; 6-5$, загальна протяжність транспортної мережі складає 11500м. (рис.4.5)

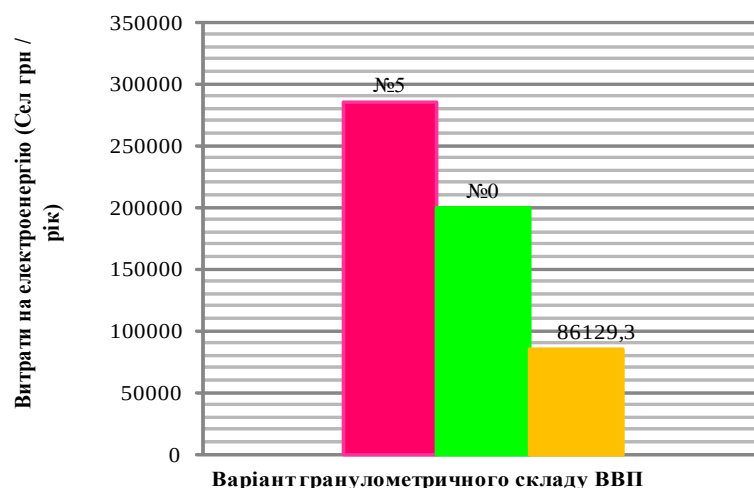


Рисунок 4.13 – Порівняння витрат на електроенергію при транспортуванні ВВП в залежності від обраного гранулометричного складу (№5, №0)

В результаті використання послідовно-променевої схеми транспортування ВВП, загальна вартість укладання трубопроводу знизилася на 893,89 тис.грн. в порівнянні з променевою схемою.

Як видно з діаграми (рис.4.14), використання послідовно-променевої схеми укладання трубопроводів ПГТС і транспортування ВВП дозволяє знизити загальні капітальні та експлуатаційні витрати на 183,75 тис.грн/рік.

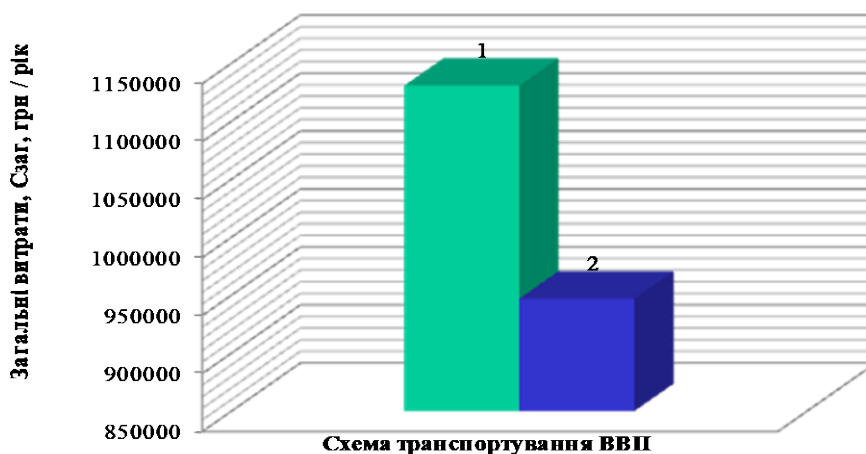


Рисунок 4.14 – Порівняння загальних капітальних та експлуатаційних витрат на транспортування ВВП в залежності від обраної схеми транспортування (Сзаг, грн./рік.): 1 – послідовно-променева схема; 2 – послідовна схема

Для запропонованої ГТС промислового підприємства обсяг капітальних вкладень складається з: 1) вартості трубопроводу; 2) вартості монтажних робіт;

3) вартості насосного та іншого обладнання. Експлуатаційні витрати складаються з вартості електроенергії на прокачування ВВП, вартості обслуговування і експлуатації ПГТС протягом сезону.

Загальний обсяг капітальних вкладень в проект запропонованої ГТС склав 7,47 млн.грн, річні експлуатаційні витрати складуть 199,89 тис.грн. Загальний економічний ефект від впровадження ПГТС замість автомобільного транспорту складе 4,08 млн.грн / рік., термін окупності проекту 1,83 року.

Таблиця 4.7 – Порівняння витрат промислової ГТС до і після впровадження результатів дослідження (на прикладі підприємства ТОВ «ДТЕКДобропільвугілля»)

Витрати на електроенергію, грн./рік., (%)		Капітальні і експлуатаційні витрати на транспортування грн/рік., (%)		Вартість перевезення 1 ткм вантажу, коп.		Капітальні і експлуатаційні витрати при використанні автомобільного транспорту для доставки ВВП, грн/рік
При використанні гранскладу ВВП №5 (до впровадження)	При використанні гранскладу ВВП №0 (запропонований)	При використанні променевої схеми транспортування (до впровадження)	При використанні послідовно-променевої схеми транспортування	Автотранспорт	ПГТС	
286016,5 143,1%	199887,3 100%	1130687,7 119,4%	946936,3 100%	67	19	5032920

Ефект від оптимізації топології транспортної мережі роздачі по пунктам споживання ВВП, оптимізації наведених сумарних витрат на трубопроводи, обладнання та електричної енергії на транспортування і вибору гранулометричного складу ВВП склав 183,75 тис. грн./рік.

В результаті порівнянні трубопровідного та автомобільного транспорту при реалізації перевезень ВВП від пункту відправлення до споживачів на території підприємства ТОВ «ДТЕК Добропільвугілля» було встановлено, що загальні капітальні витрати на інфраструктуру і транспортні засоби для автомобільного транспорту склали 7,13 млн.грн., а експлуатаційні витрати 4,3 млн.грн./рік. Використання трубопровідного транспорту, в якості ГТС підприємства, для транспортування ВВП дозволяє знизити капітальні витрати на 0,34 млн.грн і експлуатаційні витрати на 4,1млн.грн/рік. в порівнянні з автомобільним транспортом.

4.5 Оцінка ефективності транспортування ВВП промисловим гідротранспортом

До основних показників оцінки ефективності інвестиційного проекту, яким є застосування ПГТС для транспортування ВВП, відносяться: - чистий дисконтований дохід (NPV); - індекс прибутковості (PI); - внутрішня норма прибутковості (IRR,%); - модифікована внутрішня ставка прибутковості (MIRR,%); - період окупності початкових витрат (PP); - період окупності початкових витрат, розрахований з урахуванням дисконтування грошових потоків (DPP); - середньозважена (бухгалтерська) ставка рентабельності (ARR) [131–140].

Метод чистої дисконтованої доходності заснований на зіставленні дисконтованої вартості грошових надходжень (інвестицій), що генеруються підприємством протягом прогнозованого періоду. Метою даного методу є виявлення реального розміру прибутку, який може бути отриманий підприємством внаслідок реалізації проекту впровадження ГТС та транспортування ВВП між споживачами на території підприємства.

Чиста поточна вартість (Profitability Index - PI) кількісно визначається декількома способами: - поточна вартість грошових доходів мінус поточна вартість грошових витрат (за винятком витрат на фінансування), дисконтованих за середньозважену ціну позикового і власного капіталу; - поточна вартість грошових надходжень до акціонерів мінус поточна вартість грошових відтоків від акціонерів, дисконтованих за ставкою, що дорівнює витратам втрачених можливостей; - поточна вартість економічного прибутку, дисконтованою за ставкою, що дорівнює витратам втрачених можливостей.

Запропоновані три підходи розкривають економічну сутність чистої поточної вартості. Показник чистої приведеної вартості розраховується залежністю:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} - IC,$$

де CF — дисконтований потік коштів; IC - початкові інвестиції (в нульовий період); t - рік розрахунку; r - ставка дисконтування, що дорівнює середньозважених вартості капіталу ($WACC$); n - період дисконтування.

Дана модель передбачає наявність умов: - обсяг інвестицій приймається як завершений; - обсяг інвестицій приймається в оцінці на момент проведення аналізу; - процес віддачі починається після завершення інвестицій.

В якості ставки дисконтування r може використовуватися: - кредитна ставка банку; - середньозважена вартість капіталу; - альтернативна вартість капіталу; - внутрішня норма прибутковості.

Якщо аналіз проводиться до початку інвестицій, то розмір інвестиційних витрат також повинен бути приведений до дійсного моменту. Модель розрахунку чистого наведеного має вигляд:

$$NPV = \sum_{i=1}^{n_2} \frac{R_i}{(1+r)^{i+n_1}} - \sum_{t=1}^n \frac{IC_t}{(1+r)^t},$$

де IC_t — інвестиційні витрати в періоді t ; R_i - прибуток у періоді i ; n_1 - тривалість періоду інвестицій; n_2 - тривалість періоду віддачі від інвестицій.

Показник NPV відображує прогнозну оцінку зміни економічного потенціалу комерційної організації у разі прийняття даного проекту.

Якщо $NPV > 0$, то проект є прибутковим, та збільшує на величину NPV фактичну вартість організації.

Індекс прибутковості інвестицій ($Profitability\ Index - PI$) - це дохід на одиницю вкладених коштів. Він визначається як відношення поточної вартості грошового потоку доходів до поточної вартості інвестиційних витрат:

$$PI = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} : IC = 1 + NPV : IC.$$

На відміну від чистої поточної вартості індекс рентабельності є відносний показник: він характеризує рівень доходів на одиницю витрат, тобто. Е. Ефективність вкладень - чим більше значення цього показника, тим вище віддача

кожної гривні, інвестованої в даний проект. Чим вище показник прибутковості, тим краще проект. Якщо індекс дорівнює 1 і нижче, то проект навряд чи відповідає або навіть не відповідає мінімальній ставці прибутковості (на практиці індекс, близький до одиниці, в деяких випадках прийнятний). Індекс, рівний 1, відповідає нульовій чистій поточної вартості. Внутрішня норма прибутковості характеризує максимальну вартість капіталу для фінансування інвестиційного проекту. Розрахована в процесі аналізу ефективності планованих інвестицій внутрішня норма прибутку IRR показує очікувану прибутковість проекту. Цей показник є дуже цінним для аналізу і може трактуватися з різних точок зору.

Зокрема, економічний сенс критерію IRR полягає в тому, що підприємство може приймати будь-які інвестиційні рішення, рентабельність яких не нижче поточного значення показника "вартість капіталу" (CC). Останній означає всю сукупність вартостей наявних джерел фінансування проекту [140–146].

Ухвалення рішення щодо інвестиційного проекту за критерієм IRR ґрунтується на правилі: якщо значення IRR більше ставки фінансування проекту, то даний проект слід прийняти, і навпаки.

Внутрішня ставка прибутковості визначається за формулою:

$$IRR = r_1 + \frac{f(r_1)}{f(r_1) - f(r_2)} \cdot (r_2 - r_1),$$

де r_1 – значення табульованого коефіцієнта дисконтування, при якому $f(r_1) > 0$;
 r_2 – значення табульованого коефіцієнта дисконтування, при якому $f(r_2) < 0$.

Результати розрахунків заносимо в табл.4.8 і 4.9

Таблиця 4.8 – Показники ефективності інвестиційного проекту

Період (рік), T	Капітальні вкладення (IC), млн,грн	Грошовий прибуток (CI), млн.грн	Грошові витрати (CO), (експлуатаційні витрати), млн,грн	Грошовий потік (CF), млн,грн
0	7,47			-7,47
1		4,08	0,21	3,87
2		4,1	0,19	3,91
3		4,05	0,2	3,85

4		4,03	0,2	3,83
5		4,15	0,21	3,94
6		4,2	0,19	4,01
7		4,08	0,18	3,9
8		4	0,21	3,79
9		4,02	0,22	3,8
10		4,01	0,21	3,8

Таблиця 4.9 – Показники ефективності інвестиційного проекту

Ставка дисконтування	Чистий дисконтований прибуток (NPV), млн.грн	Індекс прибутковості (PI)	Внутрішня норма прибутковості (IRR)	Термін окупності проекту (PP), років	Вартість перевезення 1ткм вантажу, коп	
					При використанні променевої схеми транспортування (до впровадження)	При використанні послідовно-променевої схеми транспортування
17%	10,60	141,9%	51%	1,83	21	19

Алгоритм розрахунку терміну окупності (Payback Period, PP) залежить від рівномірності розподілу прогнозованих доходів від інвестицій. Якщо розмір очікуваного доходу рівномірно розподілений по роках (періодах), то термін окупності розраховується за наведеною нижче формулою.

Показник окупності (PP) дорівнює відношенню вихідних інвестицій (IC) до величини річного припливу (CF_t) готівки за період відшкодування t:

$$PP = IC : CF_t = \frac{IC}{CF_t},$$

Якщо розрахований період окупності менше максимально прийняттого, то проект приймається, якщо немає - відкладається. При порівнянні інвестиційних проектів найкращим вважається варіант з найменшим строком окупності інвестицій.

4.6 Висновки по розділу 4

Порівняння теоретичних та експериментальних даних дозволяє зробити такі висновки:

- при максимальній швидкості транспортування ВВП ($v=0,5$ м/с), похибка практично відсутня ($\varepsilon = 1\%$), що дозволяє використовувати цю математичну модель Менстера SST для розрахунків різних систем транспортування ВВП.

- при малих швидкостях транспортування ВВП ($v=0,1$ м/с) відхилення теоретичних і експериментальних даних становить ($\varepsilon=13\%$), що говорить про недостатню розвиненість турбулентності в потоці з малими швидкостями транспортування ВВП.

Визначена ефективність впровадження запропонованих заходів щодо зниження енерговитрат на транспортування ВВП, запропоновані критерії ГМС для ВВП дозволяють знизити витрати електроенергії на його транспортування промисловим гідротранспортом на 86,13 тис. грн/рік.

На основі формалізації оптимізаційної моделі вибору параметрів ГТС промислового підприємства визначена топологія транспортної мережі роздачі по пунктам споживання ВВП, виконана оптимізація наведених сумарних витрат на трубопроводи, насосне та інше обладнання, електричної енергії на транспортування і визначення діаметрів трубопроводів елементів ПГТС, що дозволило знизити капітальні та експлуатаційні витрати на транспортування на 183,75 тис. грн/рік. Термін окупності проекту склав 1,83 року.

На основі результатів виконаних досліджень визначена оптимальна схема транспортування ВВП споживачам, витрати на перевезення 1 ткм вантажу при використанні послідовно-променевої схеми транспортування становили 19 коп/ткм, що в 3,5 рази менше в порівнянні з автомобільним транспортом, витрати якого складають 67 коп/ткм.

ВИСНОВКИ

У дисертації вирішена науково-технічна задача зниження енерговитрат і матеріальних ресурсів промислових гідротранспортних систем.

Основні результати досліджень дозволили зробити такі висновки.

1. Аналіз існуючих технологій підготовки, впливу показників ГМС та режимів транспортування ВВП, а також конфігурації трубопровідної мережі показав, що існуючі науково-технічні концепції щодо названих факторів не враховували значення КБ та необхідності дотримання раціональних пропорцій різних фракцій ГМС ВВП, крім того не визначена науково обґрунтована методика визначення оптимальної топології трубопровідної системи.

2. Розроблена математична модель руху неньютонівських рідин дозволила визначити структуру потоку і втрати енергії при транспортуванні ВВП у ПГТС та оптимізувати конфігурацію транспортної мережі з урахуванням закономірностей впливу параметрів ГТС, реологічних властивостей і режимів транспортування на енерговитрати транспортування. При цьому запропоновано КБ ГМС ВВП представляти у вигляді двох компонент: відношень масових часток дрібних і великих фракцій до маси проміжної фракції, G_1 і G_2 , (7,76–16,8 і 4,3–6,5), а також для відношення G_1/G_2 1,1–3,8 відповідно, що дозволяє визначати доцільне співвідношення фракцій за рахунок повного врахування їх складу в суміші для ідентифікації сполучності параметрів течії, відповідних мінімізації витрат енергії при його транспортуванні у промислових ГТС. Удосконалений метод розрахунку масової та об'ємної концентрацій ТК ВВП з урахуванням поглинання рідкої компоненти відкритими порами твердих частинок, дозволив розкрити ефект підвищення енерговитрат на його транспортування в ПГТС, при цьому максимальна доцільна концентрація становить 67%.

3. На основі експериментальних досліджень закономірностей зміни параметрів течії ВВП та енерговитрат на його транспортування отримано рівняння регресії гідравлічного опору різних композицій ВВС у функції змінних: концентрації ТК, параметра, що характеризує ступінь бімодальності ГМС, швидкості транспортування і зольності вихідного вугілля, що дозволило вдосконалити математичну модель за рахунок більш детального визначення впливу

вказаних вище факторів на реологічні показники та визначити ступінь адекватності математичної моделі. Визначені енерговитрати при транспортування ВВП в ПГТС, мінімальні втрати тиску при цьому склали 761,86, 928,13 і 1585,86 Па/м, при $C=(60, 62,5, 65\%)$ відповідно, зниження енерговитрат на транспортування ВВП за рахунок раціонального вибору складу ГМС склало 46%.

4. На основі розрахунку числа дрібних часток ВВП еквівалентного діаметра, що відповідає раціональному значенню КБ по кількості відносно однієї великої частки, що склала з округленням 2, підтверджено двостадійний механізм силової взаємодії дрібних та великих часток вугільної суміші, а саме: близькодійучі сили формують, налипаючи, обтічну поверхню останніх, а другий зовнішній шар створює саме “рідке” змащування. Проміжні частки розміщуються, у порожнинах між великими, утворюють каркас консистентного змащення і забезпечують його структуру при переміщенні ВВП трубопроводом. На основі розробленої моделі змащення визначено раціональний масовий вміст проміжної фази, що складає 6–7%. Це підтверджує синергетичний характер ефекту впливу КБ на питомі витрати енергії внутрішньої течії ВВС.

5. Визначено ефективність раціонального значення запропонованого критерію КБ ГМС для ВВП: для обраного підприємства зниження витрат електроенергії на його транспортування промисловим гідротранспортом становить 86,13 тис. грн/рік. На основі оптимізації конфігурації трубопровідної мережі промислового підприємства визначені параметри ГТС, що дозволили мінімізувати енерговитрати на транспортування ВВП та зменшити витрати на матеріали і супутні витрати транспортної мережі на 183,75 тис. грн/рік.

Порівняння запропонованої ГТС з існуючим варіантом постачання ВВП автомобільним транспортом показало, що витрати на перевезення 1 ткм вантажу при використанні послідовно-променевої схеми транспортування становлять 19 коп/ткм, а автомобільними цистернами 67 коп/ткм, що в 3,5 рази більше. Загальний економічний ефект від впровадження ПГТС замість автомобільного транспорту склав 4,08 млн.грн/рік., термін окупності проекту 1,83 року.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Білецький В.С. Дослідження характеристик водовугільного палива залежно від властивостей вихідного вугілля / В.С. Білецький, О.А. Круть, Ю.Ф. Власов // Науковий вісник Національного гірничого університету. – Дніпропетровськ, 2006. - №6. – С. 46-49.
2. Мурко В.И. Научные основы процессов получения и эффективного применения водоугольных суспензий: автореф. дис. на соискание уч. степени д-ра техн. наук : 05.17.07 «Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ» / В.И. Мурко. – М.: ИГИ, 1999. – 48с.
3. Pan, F., Zhu, Y., Zhang, X. (2011). Full process control strategy of fuel based on water-coal ratio of ultra supercritical units. International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC), 3750—3753.
4. Круть О.А. Водовугільне паливо / Круть О.А. – Київ: Наук. Думка, 2002–172 с.
5. Білецький В.С. Утилізація вугільних шламів шляхом виготовлення водовугільного палива / В.С. Білецький, О.А. Круть, Ю.Г. Світлий // Збірник «Збагачення корисних копалин». – Дніпропетровськ, 2005. - №24(63). – С. 111-118.
6. Брагін Б.Ф. Пульпи та суспензії (технології, устаткування, розрахунки) : [навч. посібник] / Б.Ф. Брагін, О.С. Коломієць. – К.: ІСДО, 1995. – 464 с
7. Грифф М. И. Специализированный автотранспорт на пороге XXI века. Аналитический обзор. – М.: ЦНИИОМТП, 1999. – 103 с.
8. В.И. Дмитриев. Сопоставимые издержки разных видов транспорта при перевозке грузов. М.Транспорт, 1972.
9. Наказ Міністерства транспорту та зв'язку України від 26 березня 2009 року N 317. Про затвердження Збірника тарифів на перевезення вантажів залізничним транспортом у межах України та пов'язані з ними послуги та коефіцієнтів, що застосовуються до збірника тарифів на перевезення вантажів залізничним транспортом у межах України та пов'язані з ними послуги.

10. Агапкин В.М. Трубопроводный транспорт мазута. – М.: Недра, 1986. 140с.
11. Берестовой А.М. Стратегия логистики транспорта затвердевающих жидкостей / А.М. Берестовой, А.Д. Омельченко, А.Н. Гавва // Упаковка. №1. – Киев, 2005. - С. 52-65.
12. Башкатова И.Н. Некоторые особенности реологии высококонцентрированных водоугольных суспензий / Ю.Ф. Власов, В.В. Филатов, Н.Б. Чернецкая // Вісник Східноукраїнського державного університету. – 2000. - №1(23). – С. 139-145.
13. Власов Ю.Ф. Экспериментальные исследования параметров гидротранспорта водоугольного топлива / Ю.Ф. Власов, Ю.Г. Свитлый, А.Ю. Макаревич // Вісник Східноукраїнського Державного Університету. – Луганськ, 2000. - №1(23). - С. 135-139.
14. Білецький В.С. Особливості гідравлічного транспортування водовугільного палива / В.С. Білецький, О.А. Круть, Ю.Г. Світлий // Форум гірників. Матеріали міжнародної конференції. – Дніпропетровськ, 2008.
15. Карпов Е.В. Водоугольное топливо – технология будущего / Е.В. Карпов // Энергетика и промышленность России. - 2007. – №5(81).
16. Cherneckaya N. Mixing of water-coal fuel compositions with rational rheological and energy performances on a basis of Donbass coal-field / Natalia Cherneckaya, Anna Shvornikova // Motrol. Motorization and power industry in agriculture. - Lublin, 2008. - volume 10A. – P. 18-24.
17. Круть А.А. Развитие физико-технических основ технологий приготовления и гидротранспортирования водоугольных суспензий высокой концентрации. 05.15.09 – геотехническая и горная механика. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Днепропетровск – 2011, 278с.
18. Круть О., Білецький В. Водовугільне паливо: стан проблеми і перспективи використання // Вісник НАН України. – 2013. – № 8. – С. 62–63.

19. Баранова М.П. Технология получения и использования топливных водоугольных суспензий из углей различной степени метаморфизма: диссертация доктора технических наук: 05.14.01 / Баранова М. П.; – Москва, 2014.- 275 с.
20. Баранова М. П. Комплексная технология получения и транспорта водоугольных топливных суспензий из углей разной степени метаморфизма / М. П. Баранова // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, 6 (2011 4) 613 619;
21. Семериков, А. В. Решение транспортных задач [Текст] - ISBN 978-5-88179-781-2 : учеб. пособие / А. В. Семериков. – Ухта : УГТУ, 2013. – 58 с.
22. А.В. Морозов. Математические модели задач построения замкнутых маршрутов на транспортной сети / Штучний інтелект – ISSN 1561 – 5359, 2015, № 1-2, – С.157-169.
23. Bronshtein E. M/ Deterministic optimization problems of transport logistics / E. M Bronshtein, T. A Zayko // Automation and Remote Control. – 2010. – №10. – P. 133–147.
24. Zabinyako G. I Organization of parallel calculations in some problems of discrete optimization / G. I. Zabinyako, E. A. Kotelnikov // Siberian Journal of Computational Mathematics. – 2008. – V. 11, № 4. – P. 414–422.
25. Orlovich Y. L. Hamiltonian cycles in graphs triangulated lattice / Y. L. Orlovich, V. S. Gordon, F. Werner // Reports of the National Academy of Sciences of Belarus. – 2005. – V. 49, № 5. – P. 21–25. Morozov A. V. Branch and bound method in the Hamiltonian Rural Postman Problem / A. V. Morozov, A. V. Panishev // System Research and Information Technologies. – 2012. – №2. – P. 57–66.
26. Turpak S.M., Taran I.O., Fomin O.V., Tretiak O.O. Logistic technology to deliver raw material for metallurgical production. Scientific Bulletin of National Mining University. – 2018, Issue 1, P.162-169.
27. Лашеных А.А., Турпак С.Н., Грицай С.В. Логистическое представление процессов движения материальных ресурсов. Национальная ассоциация ученых. – 2015. – №2(7). – С.91-95.

28. Taimoor, A., Rakesh, M. (2016). Optimal design of hydraulic capsule pipelines transporting spherical capsules. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 94, 5, 966—979.
29. Юдин Б. В. Разработка геомеханической модели высококонцентрированных водоугольных дисперсных систем / Б.В. Юдин. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук // Кемерово–2001. 167С.
30. Яхно О.М. Гідравліка неньютонівських рідин: Навч. посібник. / О.М. Яхно, В.І. Желяк – К.: Вища шк., 1995. – 199 с.
31. Шворнікова Г.М. Дослідження закономірностей впливу властивостей вихідного вугілля на реологічні характеристики водовугільного палива / Г.М. Шворнікова., Н.Б. Чернецька, О.В. Кущенко // Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2009. - №2(132). – С. 447 – 451.
32. Шворнікова Г.М. Математична модель плину водовугільного палива у промислових гідротранспортних системах / Г.М. Шворнікова // Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2010. - №1(143). – С. 254 – 259.
33. Cherneckaya Natalia. Ecological aspects of transportation and application of water coal fuel / Natalia Cherneckaya, Anna Shvornikova, Inna Ovsepyan // Современные достижения в науке и образовании: III междунар. науч. конф., 16-23 сент. 2009 г.: тезисы докл. - Тель-Авив (Израиль), 2009. - С. 75-78. - (англ.).
34. Білецький В.С. Реологічні характеристики водовугільних суспензій у залежності від якості вихідного вугілля / В.С. Білецький, О.А. Круть, Ю.Ф. Власов // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг, 2006. - №121 – С. 49-55.
35. Круть О.А. Підвищення концентрації водовугільного палива при зменшенні енергоємності виготовлення / О.А. Круть, Ф.О. Папаяні, Л.Н. Козиряцький // Збірка наукових праць ДонНТУ, серія «Електротехніка та енергетика». – Донецьк, 2005.

36. Водоугольное топливо. Анализ результатов исследования характеристик ВВП, полученного на ОПУ ООО «Енисейский ЦБК» ОАО «Новосибирсктеплоэнергопроект» (на правах рукописи). – Новосибирск, 2004. - С.– 26.
37. Є.В. Семененко , В.Д. Рубан, К.К. Подоляк . Предельная концентрация во-
лоугольных структурированных суспензий. Наук.-техн. зб. Збагачення ко-
рисних копалин. – Дніпропетровськ, 2015. – Вип. 60(101).
38. Є.В. Семененко, В.Д. Рубан, К.К. Подоляк. Обоснование параметров би-
модального гранулометрического состава твердой фазы структурирован-
ных суспензий. Межвед. сб. науч. тр. «Геотехническая механика», Днепро-
петровск, 2017, №.134.
39. Bruce, G. (2011). Introduction to coal utilization technologies. Clean coal
engineering technology, 5, 133—217.
40. Ercolani D. Activitie of Porto Torres integrated plant for production and utiliza-
tion of beneficiated coal-water fuels / D. Ercolani, U. Tiberio, B.Fabbri // IEA-
CLM Workshop '94, NEDO and IEA-CLM. – Tsukuba City, Japan, 1994.
41. Белецкий В.С. Электрокинетические свойства гидравлически транспорти-
руемого угля / Белецкий В.С., Бореико М.К., Сергеев П.В., Зозуля И.Д. //
ХТТ. - 1989. - №5. - С.121-124.
42. Бибик Е.Е. Реология дисперсных систем / Бибик Е.Е. – Л.: Изд-во Ленин-
градского ун-та, 1981. –172 с.
43. Методы снижения энергозатрат при гидравлическом транспортировании
смесей высокой концентрации. - Санкт – Петербург: СПГГИ(ТУ), 2000. -
117 с.
44. Круть А.А. Повышение энергетического потенциала водоугольного топли-
ва за счет рационального выбора пластифицирующих химических добавок
/ А.А. Круть, Ф.А. Папаяни // Вісник Східноукраїнського національного
університету. – 2000. - №2.
45. Vasilevich, J., Vihrenko, V., Zhuravkov, M. (2010). Teoreticheskaja i prikladna-
ja mehanika. Mezhdunarodnyj nauchno-tehnicheskij zhurnal, 25, 178—185.

46. Thompson, A. (2013). Basic hydrodynamics. Elsevier Science. Library of Congress Cataloging in Publication Data, 177.
47. Hervé, C. (2014). The basics of plant hydraulics. The Journal of plant hydraulics, 1, 178—188.
48. Vostrikov, A., Fedyaeva, O., Dubov, D., Psarov, S., Sokol, M. (2011). Conversion of brown coal in supercritical water without and with addition of oxygen at continuous supply of coal-water slurry. Energy, 36, 4, 1948—1955.
49. Chernetskaya-Beletskaya, N., Kushchenko, A., Varakuta, E., Shvornikova, A., Kapustin, D. (2014). Define the operational hydro-solid waste handling system. ТЕКА. Commission of motorization and energetics in agriculture, 14(1), 10—17.
50. Шворникова А.М. Исследование влияния зольности исходного угля на реологические характеристики водоугольного топлива/ А.М. Шворникова, Н.Б. Чернецкая, О.В. Кущенко, Е.А. Варакута // Политранспортные системы: VI Всерос. науч.-техн. конф., 21-23 апреля 2009 г.: тезисы докл. - Ч.2. - Новосибирск, 2009. - С. 362-366.
51. Коваленко А.А. Расчет вязкости водоугольного топлива / А.А. Коваленко, Л.И. Рисухин, А.М. Шворникова, Е.С. Гусенцова // Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля. Науковий журнал – електронне наукове фахове видання. – 2009. - № 3Е.
52. Чернецкая Н.Б. Исследование седиментационной стабильности водоугольных суспензий / Н.Б. Чернецкая, А.М. Шворникова, А.В. Кущенко // Вісник Інженерної академії України. - Київ, 2007. –Вип. 2-3. – С. 101-104.
53. Fjodorov, E. (2015). Metody izmerenija urovnja i granic razdela mnogofaznyh zhidkih sred. Materialy VI nauchno-prakticheskoy konferencii 27—30 maja 2015 g. — Tomsk, 65.
54. В.Е. Маев, Н.Н. Пономарев. Воздухоочистители автомобильных и тракторных двигателей / Маев В.Е., Пономарев Н.Н. // М., – «Машиностроение», 1971, 171с.
55. Е.В. Семененко, В.Д. Рубан, К.К. Подоляк. Факторы, определяющие оптимальный гранулометрический состав твердой фазы структурированных

- суспензий / Матеріали міжнародної конференції „Форум гірників 2014”, 1-4 жовтня 2014р., // „Національний гірничий університет”. Дніпропетровськ – 2005/4/22. С.162–168.
56. Світлий, Ю.Г. Гідравлічний транспорт / Ю.Г. Світлий, В.С. Білецький. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2009. – 436 с.
 57. Чернецкая-Белецкая Н.Б., Баранов И.О., Мирошникова М.В. Усовершенствование способа управления структурно-реологическими характеристиками водоугольного топлива / Н.Б.Чернецкая-Белецкая, И.О. Баранов, М.В. Мирошникова // Вісник СХУ ім. В.Даля. – 2016. – № 1 (225). – С. 221-226.
 58. Чернецкая-Белецкая Н.Б., Баранов И.О., Остапенко В.Н., Мирошникова М.В. Исследование влияния гранулометрического состава водоугольного топлива на его реологические и гидродинамические характеристики / Н.Б. Чернецкая-Белецкая, И.О. Баранов, В.Н. Остапенко, М.В. Мирошникова // Вісник СХУ ім. В.Даля. – 2017. – №3 (233). – С. 117-125.
 59. Чернецкая-Белецкая Н.Б., Баранов И.О., Мирошникова М.В. Влияние гранулометрического состава водоугольного топлива на его реологические характеристики. Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми економіки транспорту» (20.04-21.04.2017). – Д.: ДНУЗТ, м. Дніпро, 2017, С. 63-64.
 60. Чернецкая-Белецкая Н.Б., Баранов И.О., Мирошникова М.В., Баранова В.Н. Исследование влияния характеристик водоугольного топлива на удельные потери давления. Матеріали XXII міжнародної науково-практичної конференції «Гідроаеро-механіка в інженерній практиці». 23-26 травня 2017р. м. Черкаси, 2017. С. 53-56.
 61. Семененко Е.В., Кириченко С.Н. Обоснование методики расчета гидравлического уклона при течении пульпы с концентрацией пасты / Е.В. Семененко, С.Н. Кириченко // Геотехнічна механіка: Межвед. сб. науч. тр. — Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2013. — Вип. 110. — Бібліогр.: 10 назв. — рос.

62. Урьев Н.Б. Высококонцентрированные дисперсные системы. – М.: Химия, 1980. – 320с.
63. Гаврилова Н. Н. Микроскопические методы определения размеров частиц дисперсных материалов: учеб. пособие / Н. Н. Гаврилова, В. В. Назаров, О.В. Яровая. – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2012. ISBN 978-5-7237-1055-9. – 52 с.
64. Rogovyi A.S. Verification of Fluid Flow Calculation in Vortex Chamber Superchargers/ A.S. Rogovyi // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. / МОН Украины, ХНАДУ. – Харьков, 2016. – Вып. 39. – С. 39-46.
65. Сёмин Д.А. Верификация расчетов течений в вихрекамерных устройствах. / Сёмин Д.А., Роговой А.С., Левашов А.М., Левашов Я.М. // Вісник НТУУ "КПІ". Сер. Машинобудування, 2016. – № 2 (77). – С. 71-78.
66. Роуч П. Вычислительная гидродинамика: Пер. с англ. /П. Роуч. – М.: Мир, 1981.- 612 с.
67. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. /Л.Г. Лойцянский. – М.:Наука, 1978. – 736 с.
68. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика. /Б.Т. Емцев. – М.: Машиностроение, 1987. - 440 с.
69. Андерсон Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен: В 2-х т. Т. 1: Пер. с англ. / Д. Андерсон, Дж. Таннехилл, Р. Плетчер. – М.: Мир, 1990.- 384 с.
70. Гарбарук А.В. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учебное пособие / А.В. Гарбарук, М.Х. Стрелец, М.Л. Шур – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 88 с.
71. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: Пер. с англ. /С. Патанкар. – М.: Энергоатомиздат, 1984.- 152 с.
72. Shur, M. L. A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modelled LES capabilities /Shur, M. L., Spalart, P. R., Strelets, M. K., & Travin, A. K.// International Journal of Heat and Fluid Flow, 2008. – 29(6), – P. 1638-1649.

73. Rogovyi A. Use of detached-eddy simulation method (DES) in calculations of the swirled flows in vortex apparatuses /A.Rogovyi// Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa. – 2016. – Vol. 16, No. 3. – P. 57-62.
74. Stephens D.W. Turbulence model analysis of flow inside a hydrocyclone /Stephens D. W., Mohanaragam K.//Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal. – 2010. – Vol. 10. – №. 5-6. – P. 366-373.
75. Nazukin V. A. CFD Analysis of Swirling Flows in Premixers /V. Nazukin, V.Avgustinovich//ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition. – American Society of Mechanical Engineers, 2014. – P. V04AT04A051-V04AT04A051.
76. Menter F. R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications /F.R. Menter // AIAA Journal – 1994.– Vol. 32. – no 8. – P. 1598-1605.
77. Роговий А. С. Розробка теорії та методів розрахунку вихорокамерних нагнітачів : дис. ... д-ра техн. наук : спец. 05.05.17 / Андрій Сергійович Роговий ; Харківський нац. автомобільно-дорожній ун-т. – Харків, 2017. – 364 с.
78. Menter F. R. Zonal Two Equation $k-\omega$ Turbulence Models for Aerodynamic Flows / F.R. Menter // AIAA Paper, – 1993. – P.2906-2920.
79. Плетчер Р. Расчет несжимаемого турбулентного отрывного течения. Теоретические основы инженерных расчетов /Р. Плетчер// Труды американского общества инженеров-механиков. – 1978. – Т. 100, № 4. – С.139-146.
80. Крапошин М. В. Пакет OpenFoam: численное моделирование задач МСС /М.В. Крапошин, О.И. Самоваров, С.В. Стрижак //Материалы школы-семинара «Основы использования OpenFoam, Salome, ParaView», https://unihub.Ru/tools/unicfdc1/svn/trunk/Version2/Pdf/day1_2_4-OpenFOAM-Base.pdf.
81. Солодов В.Г. Моделирование турбулентных течений. Расчет больших вихрей / В.Г. Солодов. – Харків: ХНАДУ, 2011. – 167 с.

82. Сёмин Д.А. Влияние типа и размера расчетных сеток на точность расчета течений в вихрекамерных нагнетателях / Д.А. Сёмин, А.С. Роговой // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 41 (1213) – С. 70-77.
83. Мальцев Я.И. Совершенствование гидравлических характеристик вихревых регулирующих органов струйных исполнительных устройств Дис...канд. техн. наук: 05.05.17 / Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля. — Луганск, 2004. — 184с.
84. Мочалин Е.В. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил. Т. 8. Гидродинамика закрученного потока в ротационных фильтрах / Е.В. Мочалин, А.А. Халатов. – К.: Изд. ИТТФ НАН Украины.– 2010.– 427 с.
85. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1975. – 560с.
86. Коваленко А.А. Основы научных исследований (планирование экспериментов): монография / А.А. Коваленко, А.С. Роговой, Д.А. Сёмин. – Луганск: изд-во ВНУ им. В. Даля, 2010. – 210 с.
87. Study on the coal-water fuel pipeline transportation taking into account the granulometric composition parameters / N. Chernetskaya-Beletskaya, A. Rogovyi, A. Shvornikova, I. Baranov, M. Miroshnikova, N. Bragin // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Vol. 7, Iss.4.3. P. 240-245.
88. Чернецька-Білецька Н.Б. Математичне моделювання руху водовугільного палива в трубопроводі / Н.Б. Чернецька-Білецька, А.С. Роговий, І.О. Баранов, М.В. Мірошникова // Вісник СНУ ім. В.Даля. – 2017. – № 9 (239). – С. 85-90.
89. Чернецька-Білецька Н.Б. Математична модель просторової тривимірної течії водовугільного палива / Н.Б. Чернецька-Білецька, А.С. Роговий, І.О. Ба-

- ранов, М.В. Мірошникова // Вісник СХУ ім. В.Даля. – 2018. – № 1 (242). – С. 159-164.
90. Cherneckaya-Beleckaya N., Rogovyi A., Baranov I., Miroshnykova M. Mathematical model flow coal-water fuel. Globalization of scientific and educational space. Innovations of transport. Problems, experience, prospects: thesis, May 2018, Italy – Severodonetsk: Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 2018. P. 82-83.
 91. Глущенко И.М. Основы научных исследований / Глущенко И.М., Пинскер А.Е., Полянчиков О.И., Трикило А.И. – К.: Вища школа. Головное изд-во, 1983. – 158 с.
 92. Рафалес-Ламарка Э.Э. Инструкция по планированию эксперимента / Э.Э. Рафалес-Ламарка - Луганск: УКРНИИУглеобогащение, 1969. – 120 с.
 93. Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Издание 2-е переработанное и дополненное // издательство «Наука», – Москва, 1976, 279 с.
 94. Chernetskaya-Beletskaya N. Improving industrial pipeline transport using research regularities of flow of mixtures in material pipeline / N. Chernetskaya-Beletskaya, O. Guschin, A. Shvornikova, I. Baranov, M. Miroshnikova // East-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 4/7, Iss. 88. – P. 38-44.
 95. Chernetskaya-Beletskaya N., Baranov I., Miroshnykova M., Kravchenko S., Bragin M. Some aspects improvement of industrial pipeline transport. ТЕКА. Commission of motorization and energetics in agriculture. 2017. Vol. 17, №1, P. 33-40.
 96. Чернецкая-Белецкая Н.Б., Баранов И.О., Мирошникова М.В. Методы регулирования структурно-реологических характеристик водоугольных суспензий. Збірник наукових праць конференції «Логістичне управління та безпека руху на транспорті», 18-20 листопада 2015р., м. Харків, 2015, С. 142-144.

97. Чернецкая-Белецкая Н.Б., Баранов И.О., Мирошникова М.В. Экспериментальные исследования реологических характеристик и гидравлических параметров транспортирования водоугольного топлива. *International Scientific and Practical Conference World Science*. 2015. Vol. 1, №12(28), P. 35-43.
98. Чернецкая-Белецкая Н.Б., Баранов И.О. Совершенствование технологического процесса гидротранспортирования водоугольного топлива. Матеріали XXI міжнародної науково-технічної конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці». 24-27 травня 2016 р., м. Київ, 2016. С. 59-61.
99. Чернецкая-Белецкая Н.Б., Баранов И.О., Мирошникова М.В. Повышение эффективности гидротранспортирования водоугольного топлива. Матеріали V міжнародної науково-практичної конференції «Людина, суспільство, комунікативні технології», 22-23 вересня 2017р., м. Лиман, 2017, С. 299-302.
100. Забезпечення сталого розвитку регіону: економічні, управлінські, правові та інформаційно-технічні аспекти: колективна монографія / Н.Б. Чернецька-Білецька, І.О. Баранов, М.В. Мірошникова; за заг. ред. Ю. І. Ключ., Н. В. Швець. – Сєвєродонецьк : вид-во СНУ ім. В. Даля, 2017. ISBN 978-617-11-0118-0 – С. 193-212.
101. Пристрій для вимірювання повного напору водовугільної суспензії (BBC): патент на корисну модель 85336 Україна. МПК(2013)F23K 1/02. G01F 1/46. №u2013 08542; заявл. 08.07.2013; опубл. 11.11.2013, Бюл.№ 21.
102. Пристрій для вимірювання швидкості потоку суспензії по перерізу трубопроводу: патент на корисну модель 87622 Україна. МПК(2013)F23K 1/02.G01F 1/46. №u2013 11292; заявл. 23.09.2013; опубл. 10.02.2014, Бюл.№ 3.
103. Е.З. Рабинович. Гидравлика / Москва. – «Недра», 1980, 278 с.
104. Agnieszka, K. (2011). Combustion of coal–water suspensions. Institute of thermal machinery, department of boilers and thermodynamics, technical university of Czestochowa, 90, 2, 865—877.

105. Lenich, S. (2015). Jeksperimentalnoe issledovanie vlijaniya osnovnyh faktorov na process izmelcheniya antracita pri pnevmotransportirovanii. Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta, 4—3, (64), 164—167.
106. Mart'janova, A. (2015). Chislennoe modelirovanie vozdeystviya vozdušnogo potoka na sharoobraznye chasticy v vozduhovode kruglogo secheniya. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya, 2, (2), 107—112.
107. Pavlinova, I., Andrijushin, A. (2008). Gidrodinamika trehfaznyh psevdoozhizhennyh sloev. Obshchestvo s ogranichennoï otvetstvennost'ju, Redakcija zhurnala "Dostizheniya nauki i tehniki APK", 12, 63—64.
108. Чернецкая-Белецкая Н.Б., Баранов И.О. Использование низкосортного твердого топлива в энергетике страны / Н.Б. Чернецкая-Белецкая, И.О. Баранов // Українські залізниці. – 2014. – №5(11). – С. 58-61.
109. Чернецкая-Белецкая Н.Б., Баранов И.О., Крайнюк А.А. Использование низкосортных твердых топлив в энергетике страны. Збірник наукових праць «Інноваційні технології на залізничному транспорті» IV науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. 19.09.2013р., м. Донецьк, 2013, С. 107-111.
110. Турпак С.М. Оптимізація транспортно-технологічних процесів при змерзанні вантажів. Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – №3, 2014. – С.262-268.
111. Chernetskaya-Beletskaya N., Baranov I., Miroshnykova M. Technology of breakage of coal for the coal-water fuel production. ТЕКА. Commission of motorization and energetics in agriculture. 2015. Vol. 15, №.2, P. 63-68.
112. Баранов І.О. Формування оптимізаційної моделі вибору параметрів транспортування водовугільного палива промисловим гідротранспортом / І.О. Баранов // Вісник СХУ ім. В.Даля. – 2018. – № 3 (244). – С. 7-13.
113. Чернецкая-Белецкая Н.Б. Исследование влияния гранулометрического состава водоугольного топлива на его реологические и гидродинамические характеристики / Н.Б Чернецкая-Белецкая., И.О Баранов., В.Н Остапенко,

- М.В Мирошникова. // Вісник СНУ ім. В.Даля, – №3 (233), 2017 – С. 117-125.
114. Пілавов, М.В. Підвищення ефективності промислових гідротранспортних систем на основі розвитку методів розрахунку їх характеристик [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.12 / Пілавов Маноліс Васильович ; Східноукр. нац. ун-т ім. Володимира Даля. - Луганськ, 2013. - 22 с.
115. Гельперин Н. И. Основные процессы и аппараты химической технологии / Н. И. Гельперин. – М.: Химия, 1981. – 812 с.
116. Горобец Л. Ж. Развитие научных основ измельчения твердых полезных ископаемых: дис. ... докт. техн. наук: 05.15.08 / Горобец Лариса Жановна. – Д.: НГУ, 2004. – 412 с.
117. Бронштейн Е. М. Детерминированные оптимизационные задачи транспортной логистики / Е. М. Бронштейн, Т. А. Зайко // Автоматика и телемеханика. – 2010. – №10. – С. 133–147.
118. Гэри М. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи / М. Гэри, Д. Джонсон. – М.: Мир, 1982. – 416 с.
119. Меламед И. И. Задача коммивояжера. Вопросы теории / И. И. Меламед, С. И. Сергеев, И. Х. Сигал // Автоматика и телемеханика. – 1989. – № 9. – С. 3–33.
120. Пападимитриу Х. Комбинаторная оптимизация. Алгоритмы и сложность / Х. Пападимитриу, К. Стайглиц. – М.: Мир, 1985. – 510 с.
121. Въялицин А. А. О перечислении гамильтоновых циклов / А. А. Въялицин // Дискретная математика. – 1991. – Т. 3, вып. 3. – С. 46–49.
122. Забиняко Г. И. Организация параллельных вычислений в некоторых задачах дискретной оптимизации / Г. И. Забиняко, Е. А. Котельников // Сибирский журнал вычислительной математики. – 2008. – Т. 11, № 4. – С. 414–422.
123. Орлович Ю. Л. Гамильтоновы циклы в графах триангулированной решетки / Ю. Л. Орлович, В. С. Гордон, Ф. Вернер // Доклады Национальной академии наук Белоруссии. – 2005. – Т. 49, № 5. – С. 21–25.

124. Майника Э. Алгоритмы оптимизации на сетях и графах / Э. Майника – М.: Мир, 1981. – 323 с.
125. Панов С. А. Модели маршрутизации на автомобильном транспорте / С. А. Панов. – М.: Транспорт, 1974. – 152 с.
126. Морозов А. В. Метод гілок та меж у гамільтоновій задачі про сільського листоношу / А. В. Морозов, А. В. Панішев // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2012. – №2. – С. 57–66.
127. Ашуров Ф.М. Экспериментальные исследования винтового насоса при перекачивании высококонцентрированной водоугольной смеси / Ф.М. Ашу-ров, Н.Н. Скрыпник // Проблемы аксиоматики в гидро-газодинамике. – 2000. - Вып.8. - С.10-13.
128. Дмитриев Г.П. Гидротранспорт руд и концентратов / Г.П. Дмитриев, А.Е. Смолдырев. – М.: Цветметинформация, 1966. – 198 с.
129. Дмитриев Г.П. Напорные гидротранспортные системы / Г.П. Дмитриев, Л.И. Махарадзе, Т.Ш. Гочиташвили. – М.: Недра, 1991. – 304 с.
130. Обоснование параметров и режимов работы систем гидротранспорта гор-ных предприятий / [Ю.Д. Баранов, Б.А. Блюсс, Е.В. Семененко, В.Д. Шу-рыгин]. – Днепропетровск: «Новая идеология», 2006. – 416 с.
131. Олофинский Е.П. Вопросы использования водоугольного топлива на теп-ловых электростанциях / Е.П. Олофинский // Теплоэнергетика. – 1989. - №12. – С. 64-66.
132. Carniani E. Coal-water slurry: oxidation and rheology / E. Carniani, G.Gabrielli // 10th International Conference on Hydraulic Transport of Solids in Pipes. – Innsbruck, Austria, 1986.
133. Carniani E. Influence of mineral matter on CWF characteristics / E. Carniani, E.Donati, D.Ercolani, G.Gabrielli, E.Ferroni // 14th International Conference on Coal and Slurry Technolodgy. – Clearwater, Florida, USA, 1993.
134. Casassa E. Z. Rheology of Coal/Water Slurries / E. Z. Casassa, G. D. Parfitt, A. S. Rao, E. W. Toor // Proceedings. Fifth International Symposium on Coal Slur-ry Combustion. – 1983. - P. 1205-1227.

135. Ercolani D. Experience with coal water fuels. Production, transportation and utilization systems for multiple applications / Ercolani D. // IEA-CLM Workshop; Near Term Commercial Coal Liquid Mixture Applications Clearwater. - Florida, USA, 1993.
136. Ferrini F. Optimization of particle grading for high concentration coal slurry / F. Ferrini, V. Battarra, E. Donati, C. Piccinini // 9th International Conference on Hydraulic Transport of Solids in Pipes. – Rome, Italy, 1984.
137. Ferrini F. Shear Viscosity of Settling Suspensions / Ferrini F., Ercolani D., DeCindio B., Nicodemo, L. Nicolais, L. Ranaudo S. // Proceedings. 3rd International Technical Conference on Slurry Transportation. – 1978. - P. 195-204.
138. Gottlieb D. Numerical Analysis of Spectral Methods: Theory and Applications / D. Gottlieb, S.A. Orszag. - Philadelphia: SIAM, 1977.
139. Kaji R. Effects of Coal Type, Surfactant, and Coal Cleaning on the Rheological Properties of Coal Water Mixture / R. Kaji // Proceedings. Fifth International Symposium on Coal Slurry Combustion. – 1983. – P. 151-175.
140. Krieger D. Rheology of Monodisperse Latices / D. Krieger, M. Irvin // Advances in Colloid and Interface Science. – 1972. - volume 3. - P. 111-136.
141. Maude A. D. Generalized Theory of Sedimentation / A. D. Maude, R. L. Whitmore // British Journal of Applied Physics. – 1958. - volume 9. - P. 477-480.
142. Mooney M. Viscosity of a Concentrated Suspension of Spherical Particles / M. Mooney // Journal of Colloid Science. – 1951. - volume 6. P. 162-170.
143. Sherman P. Industrial Rheology / Sherman P. - New York City: Academic Press, 1970.
144. Savitskii, D., Egurnov, A., Makarov, A., Zavgorodnii, V. (2009). Liquid fuel based on coal slurries and brown coal. *Énergotekhnol. Resursosber*, 1, 13—17.
145. Mills, D. (2016). Introduction to pneumatic conveying and the guide. *Pneumatic conveying design guide (Third Edition)*, 1, 3—32.
146. Haken, H., Portugali, J. (2017). Heuristic approach to understanding the accumulation process in hydrothermal pores. *Information and self-organization. Entropy*, 19(1), 18—26.

ДОДАТКИ

Програма алгоритму “Прима”

```

Program NearOstov; {Остовное дерево.
                      Метод ближайшего соседа}
uses CRT,DOS;
Const
  nVertex=50; {Максимальное количество вершин}
  nRib=1000; {Максимальное количество ребер}
Type
  TypeVertex=array[1..nVertex] of Integer;
  TypeRib=array[1..nRib] of Integer;
  TypeWeight=array[1..nVertex,1..nVertex] of Integer;
Var
  f      :Text;      { Текстовый файл }
  nX      :Integer;   { Количество вершин в графе }
  nXo     :Integer;   { Количество вершин в остовном дереве }
  nUo     :Integer;   { Количество ребер в остовном дереве }
  X       :TypeVertex; { Список вершин графа }
  Xo      :TypeVertex; { Список вершин остовного дерева }
  Uo      :TypeRib;   { Ребра остовного дерева }
  Prev    :TypeVertex; { Список ближайших вершин }
  Dist    :TypeRib;   { Расстояния до ближайших вершин }
  We      :TypeWeight; { Матрица весов ребер графа }
  Wt      :LongInt;   { Вес минимального остовного дерева }

Procedure minDist( Var v :Integer );{Поиск v - ближайшего
                                      соседа}

Var i,d :Integer;
begin
  v:=X[1];

  d:=Dist[v];
  for i:=2 to nX do
    if d>Dist[X[i]] then begin
      v:=X[i];
      d:=Dist[v];
    end;
  end;

Procedure newDist( v :Integer );{Обновить dist[] -
                                   минимальные расстояния}

Var i :Integer;
begin
  for i:=1 to nX do
    if Dist[X[i]]>We[X[i],v] then begin
      Dist[X[i]]:=We[X[i],v];
      Prev[X[i]]:=v;
    end;
  end;

Procedure Ostov; {Построение остовного дерева}
Var i,nStop,v :Integer;
begin
  nStop:=nX;
  for i:=1 to nX do X[i]:=i;
  v:=1;
  for i:=1 to nX do begin
    Dist[i]:=We[i,v];
    Prev[i]:=v;
  end;
  nXo:=0; { Xo - пустое множество }
  nUo:=0; { Uo - пустое множество }

  nXo:=nXo+1;
  Xo[nXo]:=X[v]; {Xo=Xo+v - добавить вершину v к остову}
  X[v]:=X[nX]; nX:=nX-1; { X=X\v - удалить v из X }

  Wt:=0;
  while nXo<>nStop do begin
    minDist(v);
    nXo:=nXo+1;
    Xo[nXo]:=v; {Xo=Xo+v - добавить вершину v к остову}
    for i:=1 to nX do { X=X\v - удалить v из X }
      if X[i]=v then begin X[i]:=X[nX]; break; end;
    nX:=nX-1;
    nUo:=nUo+1;
    Uo[2*nUo-1]:=Prev[v];{ Uo=Uo+(Prev[v],v) -
                          добавить ребро к остову}
  end;

```

```

    Uo[2*nUo]:=v;
    Wt:=Wt+Dist[v]; { Обновить вес остоного дерева }
    newDist(v);
end;
end;

Var {Main}
  i,j :Integer;
begin {Main}
  Assign(f,'Near.in');
  Reset(f);{Файл открыт для чтения}
  Read(f,nX); {Количество вершин в графе}
  for i:=1 to nX do begin
    for j:=i to nX do begin
      Read(f,We[i,j]); { Ввод матрицы весов }
      if We[i,j]=0 then We[i,j]:=$7fff; {+бесконечность}
      We[j,i]:=We[i,j];
    end;
  end;
  Close(f);
  Assign(f,'Near.out');
  Rewrite(f); {Файл открыт для записи}
  nUo:=0;{Выделение реберного списка графа для печати}
  for i:=1 to nX do
    for j:=i+1 to nX do begin
      if We[i,j]=$7fff then continue;
      nUo:=nUo+1;
      Uo[2*nUo-1]:=i;
      Uo[2*nUo]:=j;
    end;
  WriteLn(f,'nU =' ,nUo:3);
  WriteLn(f,'nX =' ,nX:3);
  Write(f,'X = ');for i:=1 to nX do Write(f,i:3);
  WriteLn(f); Write(f,'u1 = ');
  for i:=1 to nUo do Write(f,Uo[2*i-1]:3);
  WriteLn(f); Write(f,'u2 = ');
  for i:=1 to nUo do Write(f,Uo[2*i]:3);
  WriteLn(f); Write(f,'We = ');
  for i:=1 to nUo do Write(f,We[Uo[2*i-1],Uo[2*i]]:3);
  WriteLn(f);
  Ostov;
  Write(f,'uol=');
  for i:=1 to nUo do Write(f,Uo[2*i-1]:3);
  WriteLn(f); Write(f,'uo2=');
  for i:=1 to nUo do Write(f,Uo[2*i]:3);WriteLn(f);

  Write(f,'Woe=');
  for i:=1 to nUo do Write(f,We[Uo[2*i-1],Uo[2*i]]:3);
  WriteLn(f); Wt:=0;
  for i:=1 to nUo do Wt:=Wt+We[Uo[2*i-1],Uo[2*i]];
  Write(f,'Bec=' ,Wt:3);
  Close(f);
end. {Main}

```

c	$\frac{Z}{Sen}$	a	c	$\frac{Z}{Sen}$	a	c	$\frac{Z}{Sen}$	a	c	$\frac{Z}{Sen}$	a	c	$\frac{Z}{Sen}$	a
0,001	250	3,002	0,040	6,0	3,08	0,155	0,95	3,43	0,660	0,07	4,75	0,980	0,0002	5,920
	240					0,200	0,90	3,45	0,670	0,065	4,80			
	230						0,90	3,45	0,680	0,060	4,85		0,0005	5,920
0,0012	220	3,0025		5,5	3,085	0,210	0,85	3,47			4,85			
	210					0,220	0,80	3,49	0,690	0,055	4,90	0,985	0,001	5,940
0,0014	200		0,045		3,09	0,230	0,75	3,51	0,700	0,050	4,95			5,950
0,0016	190	3,003		5,0	3,095	0,240	0,70	3,53	0,720	0,045	5,00	0,990	0,0005	5,960
	180					0,250	0,65	3,55			5,05			5,970
	170					0,260	0,60	3,60	0,740	0,040	5,10	0,995	0,0001	5,980
0,002	160	3,0035	0,050		3,100		0,55	3,65	0,750	0,035	5,15	0,996	0,00005	5,985
	150			4,5	3,105	0,280	0,50	3,70	0,760	0,030	5,20	0,997	0,00005	5,990
0,0025	140	3,004				0,300	0,45	3,75	0,780	0,025	5,25	0,998	0,00002	5,995
0,003	130	3,005	0,055		3,115	0,320	0,40	3,80	0,800	0,022	5,30	0,999	0,00002	5,996
	120			4,0		0,350	0,35	3,85	0,820	0,015	5,35	1,0	0,0	6,0
0,005	110	3,007	0,060		3,125		0,30	4,00	0,850	0,010	5,45			
0,01	100	3,01				0,400	0,25	4,07	0,865	0,009	5,50			
	90		0,065		3,135	0,430	0,20	4,10			5,55			
0,0105	80	3,021				0,440	0,15	4,15	0,875	0,008	5,60			
0,011	70	3,022	0,070		3,145	0,450	0,10	4,20	0,885	0,007	5,65			
	60		0,075		3,155	0,460	0,05	4,25	0,890	0,006	5,70			
0,012	50	3,023				0,470	0,02	4,30	0,905	0,005	5,75			
	40		0,080		3,165	0,480	0,01	4,35	0,915	0,004	5,80			
0,013	30	3,025	0,085		3,175	0,490	0,00	4,40	0,920	0,003	5,85			
	20		0,090		3,185	0,500		4,45	0,925	0,002	5,90			
0,014	19	3,027	0,095		3,195	0,510		4,50	0,930	0,001	5,95			
	18		0,100		3,205	0,520		4,55	0,945	0,000	6,00			
0,015	17	3,029				0,530		4,60	0,950					
	16		0,105		3,22	0,540		4,65	0,960					
0,016	15	3,035	0,110		3,23	0,550		4,70	0,970					
	14				3,24	0,560		4,75	0,975					
0,017	13	3,035	0,120		3,25	0,570		4,80	0,980					
	12				3,26	0,580		4,85						
0,018	11	3,040	0,130		3,27	0,590		4,90						
	10				3,28	0,600		4,95						
0,02	9	3,045	0,140		3,31	0,610								

Блок-схема алгоритму вибору параметрів гідротранспортної системи промислового підприємства

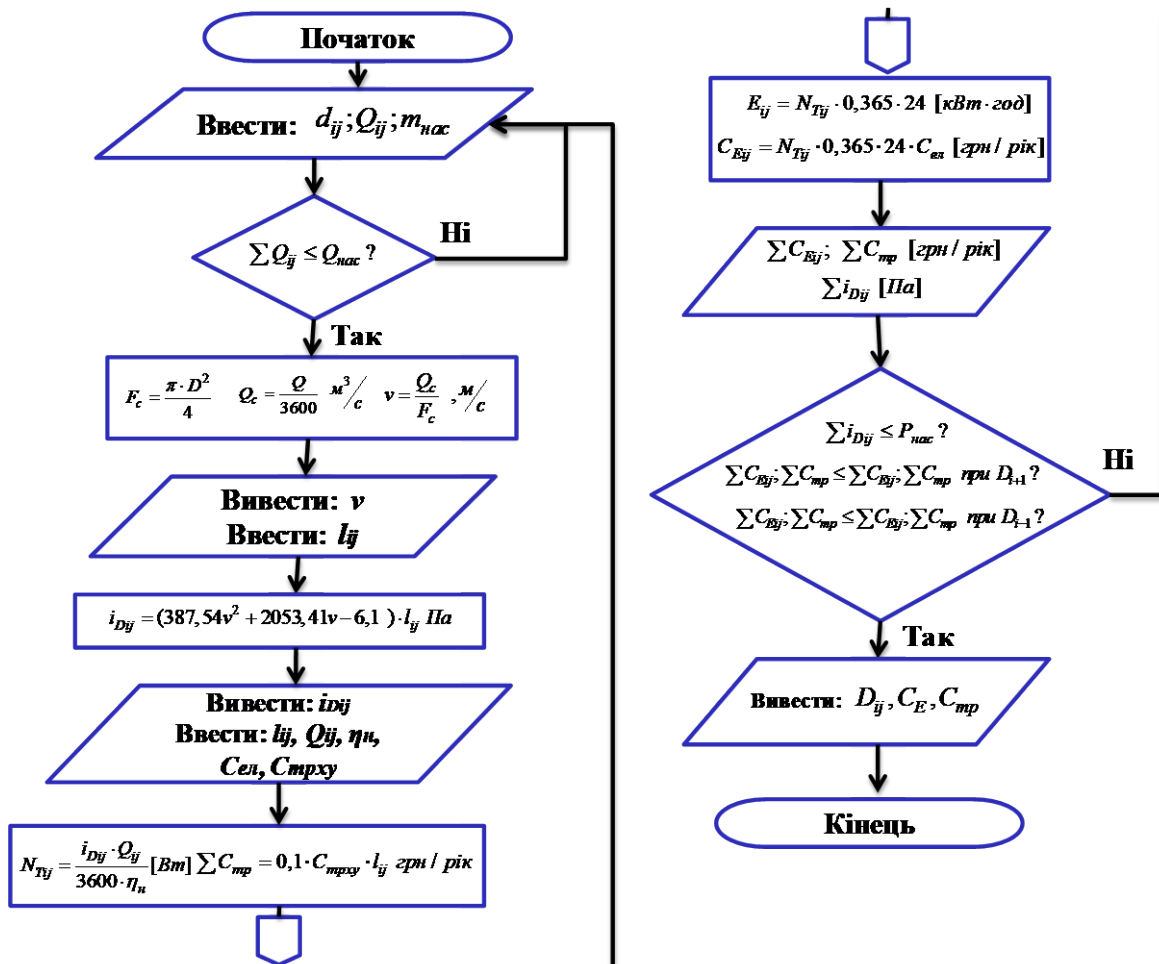
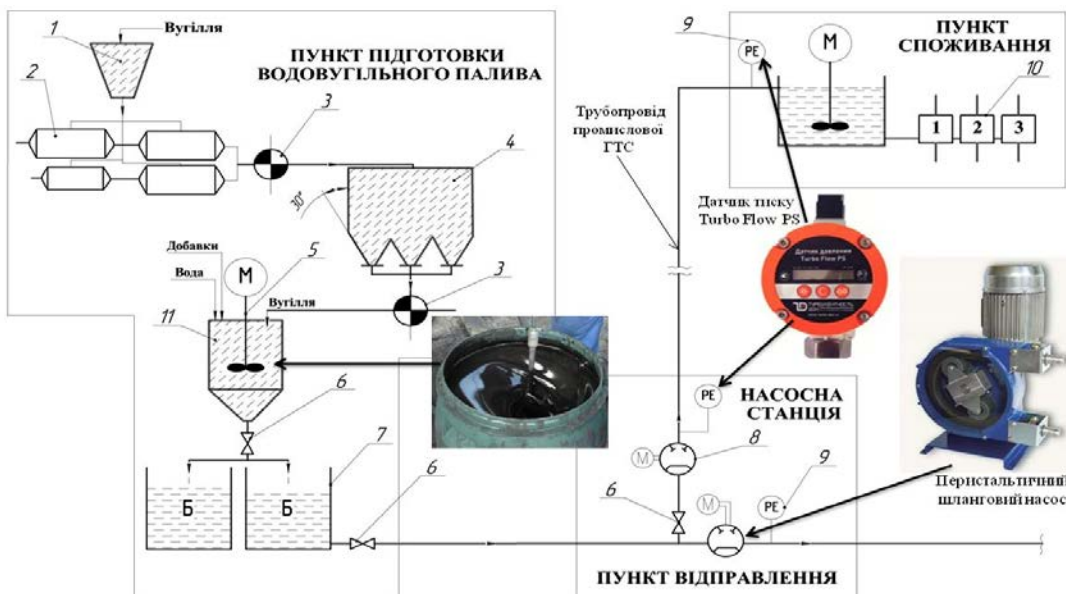


Схема технологічного обладнання пункту відправлення водовугільного палива



- 1- бункер кускового палива; 2- млин кульовий барабанний; 3- живильник гвинтовий (шнек); 4- бункер пилоподібного палива; 5- мішалка з механічним перемішуванням; 6- кульовий запірний вентиль; 7- бак з водовугільним паливом; 8- насос-дозатор з електродвигуном; 9- датчик тиску; 10- споживачі водовугільного палива (котли на рідкому паливі); 11- змішувач



53200, г. Никополь
ул. Каштановая 53 кв. 23
тел. +380502342604

Р/р 26000471057 Банк АТ "Райффайзен Банк Аваль",
МФО 380805, код ЄДРПОУ 31501417
Св-во 07295389, ІНН 315014105620

исх. №17/04/01 от 17.04.2018г.

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Директор «РМНП

«ДОНТЕПЛОСЕРВИС», ТОВ

Михайлов А.В.

2018 р.

м. Нікополь



АКТ РЕАЛІЗАЦІЇ

**результатів і висновків дисертаційної роботи Баранова І.О.
представленої на здобуття вченого ступення кандидата технічних наук**

Комісія у складі:

Голови – директора «РМНП ДОНТЕПЛОСЕРВИС» А.В. Михайлова і членів комісії: г
інженера «РМНП ДОНТЕПЛОСЕРВИС» В.М. Остапенко, інженера «РМНП
ДОНТЕПЛОСЕРВИС» А.С. Шевченко, розглянувши дисертаційну роботу І.О. Баранова,
встановила:

1. Представлена дисертаційна робота Баранова І.О. присвячена вирішенню
актуальної задачі підвищення ефективності транспортування висококонцентрованого
водовугільного палива в гідротранспортних системах промислових підприємств, в рамках
якої розроблені науково-обґрунтовані рекомендації вибору параметрів гідротранспортної
системи промислового підприємства та зниження енерговитрат на транспортування
водовугільного палива в промислових гідротранспортних системах.

2. Практичну цінність представляє реалізація запропонованих рішень вибору
раціонального гранулометричного складу водовугільного палива і визначення
оптимальної кількості парів дрібних і великої частки еквівалентного діаметра
водовугільного палива, що дозволяє мінімізувати витрати електроенергії на його
транспортування в гідротранспортній системі підприємства.

3. На базі технічного рішення: патент № 13122 «Спосіб виготовлення
водовугільного палива», вдосконалено спосіб виготовлення водовугільного палива
п шляхом того, що концентрація води у паливі визначається в залежності від вихідного
вмісту вуглецю в вихідному вугіллі, загальної вологості вугілля та коефіцієнта газифікації
незв'язаного вуглецю, що забезпечує оптимальну концентрацію палива та підвищення
ефективності його транспортування на 40%.

4. Розробленими в представленій дисертаційній роботі методами підвищення ефективності транспортування висококонцентрованого водовугільного палива є:

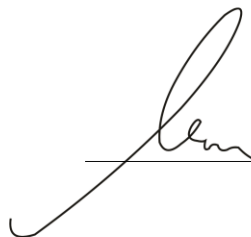
- удосконалення математичної моделі просторової тривимірної течії неньютонівської рідини, на підставі якої визначаються енерговитрати на транспортування водовугільного палива в промисловій гідротранспортній системі підприємства з урахуванням реологічних властивостей, режимів течії і гранулометричного складу.

- розробка топології транспортної мережі роздачі по пунктам споживання водовугільного палива і оптимізація наведених сумарних витрат на трубопроводи, насосне та інше обладнання, електричної енергії на транспортування і визначення діаметрів трубопроводів, що дозволяє знизити капітальні та експлуатаційні витрати на транспортування вантажу.

- уточнення регресійної моделі транспортування висококонцентрованого водовугільного палива з урахуванням гідравлічного опору його різних композицій та впливу на енерговитрати транспортування.

5. Запропоновані методи підвищення ефективності транспортування водовугільного палива дозволяють знизити енерговитрати гідротранспортних систем підприємства за рахунок визначення оптимального співвідношення фракцій гранулометричного складу водовугільного палива шляхом повного врахування їх складу в суміші для зменшення витрат енергії при його транспортуванні на 75457,6 грн/рік., використання послідовно-променевої схеми транспортної мережі і оптимізації наведених сумарних витрат на трубопроводи, насосне та інше обладнання, електричної енергії на транспортування і визначення діаметрів трубопроводів, дозволило знизити капітальні та експлуатаційні витрати на 71348,8 грн/рік. Економічний ефект для підприємств паливно-енергетичного комплексу України складає 3,5 млн.грн./рік при використанні трубопровідного транспорту замість автомобільного.

Голова комісії
Директор
«РМНП ДОНТЕПЛОСЕРВІС»



А.В. Михайлов

Члени комісії:
інженер
«РМНП ДОНТЕПЛОСЕРВІС»



В.М. Остапенко

інженер
«РМНП ДОНТЕПЛОСЕРВІС»



А.С. Шевченко



АКТ

впровадження результатів і висновків дисертаційної роботи
Баранова Ігора Олеговича

“Підвищення ефективності транспортування висококонцентрованого водовугільного палива в гідротранспортних системах промислових підприємств”
в навчальний процес Східноукраїнського національного університету
імені Володимира Даля

Комісія в складі завідувача кафедри “Логістичне управління і безпека руху на транспорті” д.т.н., проф. Н.Б. Чернецької-Білецької, д.т.н., проф. А.С. Рогового, к.т.н. доц. Є.В. Михайлова, вченого секретаря кафедри “Логістичне управління і безпека руху на транспорті” к.т.н. доц., Шворнікової Г.М., даним актом підтверджує використання у Східноукраїнському національному університеті імені Володимира Даля результатів і висновків досліджень, отриманих у дисертаційній роботі Баранова І.О. на тему “Підвищення ефективності транспортування висококонцентрованого водовугільного палива в гідротранспортних системах промислових підприємств”, представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.12 – промисловий транспорт.

У курсах «Управління ланцюгом постачань», «Спеціальні види транспорту на залізниці», «Методологія та організація наукових досліджень», а також при виконанні кваліфікаційних робіт за спеціальністю 275.02 – Транспортні технології (на залізничному транспорті) та спеціальністю 275.3 – Транспортні технології (на автомобільному транспорті) в навчальний процес 2017-2018 рр. були впроваджені наступні результати та висновки дисертаційної роботи:

- Можливості застосування оптимізаційної моделі вибору параметрів транспортної системи при вирішенні задачі мінімізації енерговитрат на транспортування вантажів та зменшення матеріальних ресурсів на спорудження та функціонування транспортної мережі;
- Результати експериментальних досліджень закономірностей зміни параметрів течії водовугільного палива та енерговитрат на його транспортування від основних факторів впливу: концентрації твердого компонента, параметра, що характеризує ступінь бімодальності гранулометричного складу, швидкості транспортування і зольності вихідного вугілля.

Впровадження у навчальний процес згаданих вище результатів та висновків дисертаційної роботи дозволило підвищити рівень підготовки фахівців за спеціальністю 275.02 – Транспортні технології (на залізничному транспорті) та спеціальністю 275.3 – Транспортні технології (на автомобільному транспорті).

Завідувач кафедри “Логістичне управління
та безпека руху на транспорті”, д.т.н., проф.

д.т.н., проф.

к.т.н., доц.

Вчений секретар
кафедри, к.т.н., доц.

Н.Б. Чернецька-Білецька

А.С. Роговий

Є.В. Михайлов

Г.М. Шворнікова

"ЗАТВЕРДЖУЮ"
 Голови Правління
 ПрАТ «СЄВЕРОДОНЕЦЬКЕ
 ОБ'ЄДНАННЯ АЗОТ»
 Бугайов Л.С.
 2018 р.
 м. Сєвєродонецьк



АКТ РЕАЛІЗАЦІЇ

результатів і висновків дисертації Баранова І.О.
 представленої на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук

Комісія в складі:

Голови – Голови Правління ПрАТ «СЄВЕРОДОНЕЦЬКЕ ОБ'ЄДНАННЯ АЗОТ» Бугайова Л.С. і членів комісії: директора з транспорту ПрАТ «СЄВЕРОДОНЕЦЬКЕ ОБ'ЄДНАННЯ АЗОТ» Бойцова А.М., головного електрика ПрАТ «СЄВЕРОДОНЕЦЬКЕ ОБ'ЄДНАННЯ АЗОТ» Скорика С.Ю., розглянувши дисертаційну роботу І.О. Баранова, встановила:

1. У дисертаційній роботі Баранова І.О. проведені дослідження процесів транспортування висококонцентрованого водовугільного палива трубопровідним гідротранспортом.

2. Особливу значущість в аспекті практичної реалізації представляють розроблені в дисертації науково-обґрунтовані методи зниження енерговитрат на транспортування водовугільного палива в промислових гідротранспортних системах, які полягають у наступному:

- визначенні критерію бімодальності гранулометричного складу водовугільного палива з урахуванням оптимального співвідношення його фракцій.
- визначенні енерговитрат на транспортування водовугільного палива в промислових гідротранспортних системах з урахуванням реологічних властивостей, режимів течії і гранулометричного складу.

3. При розробці згаданих методів використані наступні викладення і результати досліджень:

- рівняння регресії гідравлічного опору різних композицій водовугільних суспензій в функції змінних: концентрація твердого, критерій бімодальності, швидкість і зольність вихідного вугілля;

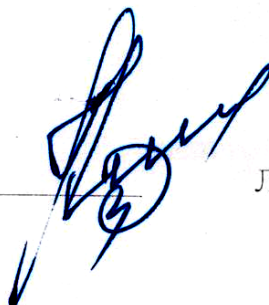
- оптимізаційна модель вибору параметрів гідротранспортної системи промислового підприємства з урахуванням мінімізації витрат на транспортування водовугільного палива;
- результати досліджень закономірностей транспортування водовугільного палива на лабораторній експериментальній установці.

4. Запропоновані методи зниження енерговитрат на транспортування водовугільного палива в промислових гідротранспортних системах на основі вибору раціонального його гранулометричного складу дозволяють покращити реологічні властивості палива, знизити питомі втрати тиску при транспортуванні і тим самим зменшити витрати електроенергії підприємства на 43%.

5. На основі результатів запропонованих досліджень визначена оптимальна схема транспортування водовугільного палива до котелень підприємства, витрати на перевезення 1ткм вантажу при використанні послідовно-променевої схеми транспортування промисловим гідротранспортом становили 20 коп/ткм, що більше ніж в 3 рази менше в порівнянні з автомобільним транспортом, витрати якого складають 66 коп/ткм. Запропонована схема транспортування дозволила знизити загальні капітальні та експлуатаційні витрати на 151,63 тис.грн/рік.

6. Робота Баранова І.О. є самостійним, закінченим дослідженням, результати якого представлені у вигляді науково-обґрунтованих рекомендацій, інженерних методів розрахунку, конструктивних і схемних рішень, виконаних на сучасному науково-технічному рівні.

Голова комісії
Голова Правління
ПрАТ «СЄВЄРОДОНЕЦЬКЕ
ОБ'ЄДНАННЯ АЗОТ»



Л.С. Бугайов

Члени комісії:
Директор з транспорту
ПрАТ «СЄВЄРОДОНЕЦЬКЕ
ОБ'ЄДНАННЯ АЗОТ»



А.М. Бойцов

Головний електрик
ПрАТ «СЄВЄРОДОНЕЦЬКЕ
ОБ'ЄДНАННЯ АЗОТ»



С.Ю. Скорик