

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ
ТА ДИЗАЙНУ

На правах рукопису

НИЧЕГЛОД ВОЛОДИМИР ВАСИЛЬОВИЧ

УДК: 681.5.015:[621.929:62 – 229.6(043)]

**ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ
ПАРАМЕТРІВ ТРУБЧАСТО-ГРЕБНЕВОГО ЖИВИЛЬНИКА ДЛЯ
ТРАНСПОРТУВАННЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ У ЗМІШУВАЛЬНИХ
КОМПЛЕКСАХ**

133 – «Галузеве машинобудування»

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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



В. В. Ничеглод

Науковий керівник
Бурмістенков Олександр Петрович, д. т. н., професор

Київ – 2024

АНОТАЦІЯ

Ничеглод В.В. Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів трубчасто-гребневого живильника для транспортування сипких матеріалів у змішувальних комплексах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 – «Галузеве машинобудування». Київський національний університет технологій та дизайну, Київ, 2023.

Дисертаційну роботу присвячено вирішенню завдань транспортування сипких матеріалів, що використовують у різних галузях промисловості.

Актуальність зумовлена необхідністю зменшити кількість пульсацій на виході транспортувального елемента, що зокрема, уможливить збільшити однорідність багатокomпонентних сумішей та знизити тертя сипкого матеріалу під час транспортування в системах, що використовують у приготуванні багатокomпонентних сумішей. Також невід’ємною частиною роботи є зниження вартості на виготовлення деталей живильників шляхом виготовлення деталей за допомогою технології 3D-друку.

Метою дисертаційної роботи є обґрунтування конструктивних та технологічних параметрів трубчасто-гребневих живильників у змішувальних комплексах для покращення процесу транспортування сипких матеріалів, шляхом зменшення пульсацій, керування швидкістю сипкого матеріалу на виході з живильника та зменшення тертя в робочій зоні живильника.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішувалися такі завдання:

- проведення аналізу існуючих конструкцій живильників безперервної дії, їхні особливості, переваги та недоліки, принципи їх роботи;
- розроблення конструкції живильника з керованою продуктивністю із використанням технологій 3D-друку, що має покращену згладжувальну здатність при транспортуванні сипких матеріалів, зменшення тертя сипкого матеріалу в транспортуючій робочій зоні живильника;

– створення та дослідження математичних моделей руху сипкого матеріалу у шнекових живильниках з керованими параметрами режимів роботи;

– розроблення рекомендацій та підходу щодо проєктування обладнання запропонованої конструкції.

Об’єкт дослідження: процес безперервного транспортування сипких матеріалів у змішувальних комплексах із безперервним режимом роботи.

Предмет дослідження: трубчасто-гребневий живильник безперервної дії для транспортування сипких матеріалів; визначення його робочих характеристик та впливу на процес транспортування матеріалів під час різних режимів роботи.

Наукова новизна роботи полягає у дослідженні руху сипких матеріалів в живильнику змішувального комплексу за допомогою, аналітичного та експериментального підходу. Вирішена важлива науково-технічна проблема: розроблено трубно-гребневий живильник, що забезпечує регульований потік сипкого матеріалу з необхідними технологічними параметрами та властивостями, а також інженерний метод розрахунку.

При цьому вперше:

- створено математичні моделі процесу транспортування сипких матеріалів у трубчасто-гребневому живильнику, які уможливили прогнозування поведінки сипких матеріалів у системі, враховуючи різні параметри, такі як величина частинок, їх концентрація, властивості середовища та геометрія живильника;
- аналітично обґрунтовано можливість зменшення пульсацій на виході з живильника через розміщення гребнів на стінках труби. Цей вибір здійснено на основі аналізу механічних сил, що діють на частинки сипкого матеріалу та створення ефективних умов для їх руху;
- запропоновані системи автоматичного керування технологічними параметрами руху сипучих матеріалів у трубчастих живильниках,

що передбачають мікроконтролерне керування швидкістю обертів транспортувального елемента зі зворотним зв'язком та вимірюванням продуктивності.

Доведені переваги використання трубчасто-гребневого живильника:

- за допомогою МДЕ створено моделі, що дають можливість розраховувати циркуляцію матеріалу, час перебування частинок всередині обладнання та досліджувати ефект сегрегації. Величина пульсацій матеріалу у шнековому живильнику значно більша ніж у трубчасто-гребневому. Цей висновок підтверджується величинами середньоквадратичних відхилень і дисперсій, зокрема, середньоквадратичне відхилення для шнекового живильника у 7,3 раза більше при швидкості обертання 6 рад/с та у 16,4 раза більше при 10 рад/с. На практиці це означає, що використання трубчасто-гребневого живильника в змішувальних комплексах дає можливість досягти більшої однорідності сипких сумішей.
- аналітично та експериментально доведено збільшену енергоефективність трубчасто-гребневого живильника. Різниця становить більш ніж у два рази між енергозатратами на переміщення сипкого матеріалу у шнековому та трубчасто-гребневому живильниках. Це викликано передусім унаслідок відмінностей характеру руху сипкого матеріалу. У шнековому живильнику частинки продавлюються уперед тим самим викликають додаткове тертя між робочими елементами, також додаткове тертя створюється шляхом взаємодії труби та шнека, що в ній обертається тоді, як у трубчасто-гребневому живильнику такі недоліки відсутні.

Практичне значення дисертаційної роботи полягає в тому, що на основі проведених досліджень:

- розроблено новий живильник безперервної дії з підвищеними згладжувальною здатністю і можливістю керування продуктивністю;

– розроблено алгоритм проектування нових живильників безперервної дії з використанням методу дискретних елементів, який дає змогу оцінити вплив сил на процес руху сипких матеріалів у робочих елементах живильника;

– розроблені алгоритми та програми для проектування та виготовлення бункерів та живильників для сипучих матеріалів із використанням 3D-друку;

– результати досліджень упроваджено в освітній процес підготовки фахівців за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», за освітньою програмою «Електромеханіка» та 133 – «Галузеве машинобудування», за освітньою програмою «Прикладна механіка» на кафедрах комп'ютерної інженерії та електромеханіки та механічної інженерії КНУТД.

У **першому розділі** розглянуто властивості сипких матеріалів та їх вплив на процес транспортування. Проведено огляд існуючих живильників у «ЗК» для сипких матеріалів та їхніх характеристик. Також проаналізовано сучасні методи моделювання процесів руху сипких матеріалів у живильниках безперервної дії. Детально описано методи визначення параметрів руху матеріалу в елементах змішувальних комплексів, а також розглянуто використання методу дискретних елементів для дослідження руху сипких матеріалів. Зроблено теоретичні висновки щодо проблематики транспортування сипких матеріалів.

У **другому розділі** здійснено дослідження моделювання руху сипкого матеріалу в трубчасто-гребневому живильнику. Проведено аналіз впливу кута нахилу гребнів та початку руху на величину підйомно-рушійної сили, що виникає у трубчасто-гребневому живильнику. Визначено критичну частоту обертання робочого елемента живильника, яка є необхідною для коректної роботи живильника під час роботи. Оцінено енерговитрати трубчасто-гребневого живильника та розглянуто конструктивні параметри, що впливають на його продуктивність.

Також розглянуто роботу систем керування транспортувальним обладнанням безперервної дії, з використанням «ПІ» та «ПІД» регуляторів.

У **третьому розділі** описано експериментальні дослідження руху сипких матеріалів у трубчасто-гребневому живильнику. Розглянуто засоби та методи, які використовуються для проведення експериментальних досліджень. Подано детальний опис експериментальної установки, зокрема вибір робочого середовища для проведення експериментів.

Окремо досліджено потужність, що споживається трубчасто-гребневим живильником під час різних режимів роботи, та порівняння його енергозатрат з шнековим. Розглянуто вплив форми бункера на характер протікання порошкових сипких матеріалів.

Також проаналізовано характер руху сипких матеріалів у шнекових та трубчасто-гребневих живильниках. Отримані результати експериментів дають змогу глибше зрозуміти поведінку матеріалів у різних умовах і визначити ключові чинники, що впливають на якість транспортування сипких матеріалів у трубчасто-гребневих живильниках.

У **четвертому розділі** проаналізовано практичне використання результатів наукових досліджень для розробки та впровадження трубчасто-гребневого живильника безперервної дії. Розглянуто загальні принципи проектування цього типу живильника, які ґрунтуються на результатах експериментальних та теоретичних досліджень.

Запропоновано рекомендації щодо керування вхідним ШІМ-сигналом двигуна, що дає можливість збільшити коефіцієнт корисної дії живильника та забезпечити стабільне транспортування сипких матеріалів. Визначено критерії вибору матеріалу для виготовлення деталей живильника.

Розроблено алгоритм розробки та виготовлення деталей трубчасто-гребневого живильника, що охоплює всі етапи від проектування до фінального виготовлення. Цей алгоритм дає змогу організувати процес виробництва та забезпечити високу якість готових виробів.

Ключові слова: сипкий матеріал, бункер, живильник, метод дискретних елементів, рух, швидкість, пульсації, продуктивність, алгоритм, енергоефективність, траєкторія, технологія 3D-друку.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Публікації у зарубіжних та наукових фахових виданнях України, внесених до міжнародних наукометричних баз:

1) Ничеглод В. В. Стенд для дослідження системи керування дозувальним обладнанням безперервної дії / В. В. Ничеглод, В. В. Стаценко // Технології та дизайн. – 2019. – № 4 (33).

2) Ничеглод В. В. Дослідження впливу форми бункера на характер протікання порошкових сипких матеріалів / В. В. Ничеглод, О. П. Бурмістенков, В. В. Стаценко // Технології та інжиніринг. – 2022. – № 6 (11). – С. 42–51. DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2022.6.4>

3) Ничеглод В. В. Дослідження роботи систем керування дозувальним обладнанням безперервної дії з «ПІ» та «ПІД» регуляторами / В. В. Ничеглод, О. П. Бурмістенков, В. В. Стаценко // Технології та інжиніринг. – 2021. – № 3. – С. 18–27. DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2021.3.2>

4) Nychehlod, V., Burmistenkov, O., Statsenko, V., Bila, T., & Statsenko, D. (2023). Determining the pattern of loose material movement in screw and tubular-comb feeders. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(1 (126), 22–28. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.291680>

2. Опубліковані наукові праці апробаційного характеру:

5) Розробка системи керування для дозувального обладнання безперервної дії / В. В. Ничеглод, А. В. Пісоцький, В. В. Стаценко, О. О. Бурмістенков // Електромеханічні, інформаційні системи та нанотехнології :

матеріали Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції молодих учених та студентів, м. Київ, 18 листопада 2022 року. – Київ: КНУТД, 2022. – С. 34–35.

6) Пульсації живильників: порівняння конструкцій шнекового та трубчасто-гребневого живильників / В. В. Ничеглод, В. В. Стаценко, О. П. Бурмістенков // Електромеханічні, інформаційні системи та нанотехнології: матеріали II Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції молодих учених та студентів, м. Київ, 20 квітня 2023 року. – Київ: КНУТД, 2023. – С. 20–23.

7) Розробка стенду для дослідження системи керування дозувальним обладнанням безперервної дії / В. В. Ничеглод, В. В. Стаценко // Наукові розробки молоді на сучасному етапі : тези доповідей XVIII Всеукраїнської наукової конференції молодих вчених та студентів (18–19 квітня 2019 р., Київ). – Київ : КНУТД, 2019. – Т. 2 : Мехатронні системи і комп'ютерні технології. Ресурсозбереження та охорона навколишнього середовища. – С. 9–10.

ANNOTATION

Nychehlod V.V. Justification of Design and Technological Parameters of a Tubular-Crest Feeder for Transporting Bulk Materials in Mixing Complexes. – Qualification scientific work in the form of a manuscript. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 133 – Industrial Engineering. Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, 2023.

The dissertation is dedicated to solving the problem of transporting bulk materials used in various industries. The relevance is due to the need to reduce the number of pulsations at the output of the transporting unit, which, in turn, will increase the homogeneity of multicomponent mixtures and reduce the friction of the bulk material during transportation in systems based on the preparation of

multicomponent mixtures. An integral part of the work is also reducing the cost of manufacturing feeder parts through 3D printing technology.

The aim of the dissertation is to justify the structural and technological parameters of tubular-crest feeders in mixing complexes to improve the transportation process of bulk materials by reducing pulsations, controlling the speed of bulk material at the feeder output, and reducing friction in the working area of the feeder.

To achieve this goal, the following tasks were solved:

- Analysis of existing designs of continuous feeders, their features, advantages and disadvantages, principles of operation;
- Development of a feeder design with controlled productivity using 3D printing technologies, which has improved smoothing capacity during the transportation of bulk media, reducing friction of bulk material in the transport working area of the feeder;
- Creation and study of mathematical models of bulk material movement in screw feeders with controlled operating parameters;
- Development of recommendations and approaches for designing equipment of the proposed design. Object of research: The process of continuous transportation of bulk materials in mixing complexes with continuous operation.

Subject of research: Tubular-crest continuous feeder for transporting bulk media; determination of its operational characteristics and impact on the transportation process of materials under different operating modes.

Scientific novelty of the work: The study of the movement of bulk media in the feeder of the mixing complex through analytical and experimental approaches, solving an important scientific and technical problem of developing a tubular-crest feeder that provides a regulated material flow with necessary technological parameters and properties, as well as an engineering calculation method.

For the first time:

- Mathematical models of the transportation process of bulk media in a tubular-crest feeder have been created, allowing the prediction of the behavior of

bulk materials in the system, considering various parameters such as particle size, their concentration, media properties, and feeder geometry;

- Analytically substantiated the possibility of reducing pulsations at the feeder output by placing crests on the pipe walls. This choice is based on the analysis of mechanical forces acting on bulk media particles and creating effective conditions for their movement;

- Proposed automatic control systems for technological parameters of bulk material movement in tubular feeders, which provide microcontroller control of the rotating speed of the transporting unit with feedback and productivity measurement.

Proven advantages of using the tubular-crest feeder:

- Using the Discrete Element Method (DEM), models were created that allow calculating material circulation, the time particles spend inside the equipment, and studying the segregation effect. The magnitude of material pulsations in the screw feeder is significantly higher than in the tubular-crest feeder. This conclusion is confirmed by the values of standard deviations and dispersions, in particular, the standard deviation for the screw feeder is 7.3 times higher at a rotation speed of 6 rad/s and 16.4 times higher at 10 rad/s. In practice, this means that using the tubular-crest feeder in mixing complexes allows achieving greater homogeneity of bulk mixtures.
- Analytical and experimental evidence of increased energy efficiency of the tubular-crest feeder. The difference is more than two times between the energy consumption for moving bulk material in screw and tubular-crest feeders. This is primarily due to the differences in the nature of bulk material movement. In the screw feeder, particles are pushed forward, causing additional friction between the working units, and additional friction is created due to the interaction between the pipe and the screw rotating inside it, whereas such disadvantages are absent in the tubular-crest feeder.

Practical significance of the dissertation:

- Based on the conducted research, a new continuous feeder with improved smoothing capacity and the ability to control productivity has been developed;
- Developed an algorithm for designing new continuous feeders using the Discrete Element Method, allowing the assessment of the impact of forces on the movement process of bulk media in the working units of the feeder;
- Developed algorithms and programs for designing and manufacturing bunkers and feeders for bulk materials using 3D-printing;
- The research results have been implemented in the educational process for training specialists in specialty 141 – Electrical Power Engineering, Electrical Engineering, and Electromechanics, in the educational program "Electromechanics" and 133 – Industrial Engineering, in the educational program "Applied Mechanics" at the departments of computer engineering and electromechanics and mechanical engineering of KNUTD.

In the **first chapter**, the properties of bulk materials and their impact on the transportation process are considered. A review of existing feeders in "ZK" for bulk materials and their characteristics is conducted. Modern methods of modeling the movement processes of bulk materials in continuous feeders are analyzed. Methods for determining the parameters of material movement in the elements of mixing complexes are described in detail, and the use of the Discrete Element Method for studying the movement of bulk media is considered. Theoretical conclusions regarding the transportation of bulk materials are made.

In the **second chapter**, the modeling of bulk material movement in a tubular-crest feeder is studied. The impact of the angle of inclination of the crests and the beginning of movement on the lifting and driving force arising in the tubular-crest feeder is analyzed. The critical rotation frequency of the feeder's working unit necessary for the feeder's correct operation during work is determined. The energy consumption of the tubular-crest feeder is evaluated, and the structural parameters affecting its productivity are considered.

The work of continuous transportation equipment control systems using "PI" and "PID" regulators is also examined.

In the **third chapter**, experimental studies of bulk material movement in a tubular-crest feeder are described. The means and methods used for conducting experimental studies are considered. A detailed description of the experimental setup is provided, including the selection of the working environment for conducting experiments.

The power consumed by the tubular-crest feeder under different operating modes and a comparison of its energy consumption with a screw feeder are separately studied. The impact of the bunker's shape on the flow characteristics of powder bulk materials is examined.

The movement characteristics of bulk materials in screw and tubular-crest feeders are also analyzed. The obtained experimental results allow a deeper understanding of material behavior under different conditions and the identification of key factors affecting the quality of bulk material transportation in tubular-crest feeders.

In the **fourth chapter**, the practical use of scientific research results for the development and implementation of a continuous tubular-crest feeder is considered. General principles of designing this type of feeder based on the results of experimental and theoretical studies are examined.

Recommendations for controlling the input PWM signal of the engine, allowing for increased feeder efficiency and stable transportation of bulk materials, are proposed. Criteria for selecting materials for manufacturing feeder parts are determined.

An algorithm for developing and manufacturing parts of the "tubular-crest" feeder, including all stages from design to final manufacturing, is developed. This algorithm allows for the efficient organization of the production process and ensures high quality of finished products.

Keywords: bulk material, bunker, feeder, Discrete Element Method, movement, speed, pulsations, productivity, algorithm, energy efficiency, trajectory, 3D printing technology.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	16
ВСТУП	17
РОЗДІЛ 1	21
СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ У СФЕРІ ОБЛАДНАННЯ ТА ПРОЦЕСІВ БЕЗПЕРЕРВНОГО РУХУ СИПКОГО МАТЕРІАЛУ В ЗМІШУВАЛЬНИХ КОМПЛЕКСАХ «ЗК»	21
1.1. Властивості сипких матеріалів та їх вплив на процес транспортування.	22
1.2. Огляд існуючих живильників у «ЗК» для сипких матеріалів.	24
1.3. Сучасні методи моделювання та оптимізації процесів руху сипких матеріалів у живильниках безперервної дії.	31
1.4. Методи визначення параметрів руху матеріалу в елементах ЗК.	36
1.6. Використання методу дискретних елементів у дослідженні руху сипких матеріалів.	39
Висновки та завдання досліджень	46
РОЗДІЛ 2	48
МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ СИПКОГО МАТЕРІАЛУ В ТРУБЧАСТО-ГРЕБНЕВОМУ ЖИВИЛЬНИКУ	48
2.1. Визначення впливу кута нахилу гребнів та початку руху на величину підйомно-рушійної сили в трубчасто-гребневому живильнику	48
2.2. Визначення критичної частоти обертання робочого елемента живильника	52
2.3. Визначення енерговитрат трубчасто-гребневого живильника.	55
2.4. Визначення конструктивних параметрів та продуктивності трубчасто-гребневого живильника для сипких матеріалів.	57
2.5. Аналітичне дослідження траєкторії руху частинок у робочій зоні трубчасто-гребневого живильника	63
2.6. Дослідження роботи систем керування дозувальним обладнанням безперервної дії з «ПІ» та «ПІД» регуляторами	71
Висновки до розділу 2	78
РОЗДІЛ 3	79
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ У ТРУБЧАСТО-ГРЕБНЕВОМУ ЖИВИЛЬНИКУ	79
3.1. Засоби та методи експериментальних досліджень.	79
3.1.1. Опис експериментальної установки.	79
3.1.2. Вибір робочого середовища для проведення експериментальних досліджень	81
3.3. Визначення потужності, що споживається живильником при різних режимах роботи	82
3.4. Дослідження впливу форми бункера на характер протікання порошкових сипких матеріалів.	85
3.5. Визначення характеру руху сипких матеріалів у шнекових та трубчасто-гребневих живильниках	95

Висновки до розділу 3	107
РОЗДІЛ 4	108
ПРАКТИЧНЕ ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	108
4.1. Загальні принципи проектування трубчасто-гребневого живильника безперервної дії.	108
4.2. Рекомендації щодо керування вхідним ШІМ-сигналом двигуна	112
4.3. Вибір матеріалу для виготовлення деталей живильника.	118
4.4. Алгоритм розробки та виготовлення деталей трубчасто-гребневого живильника	122
Висновки до розділу 4	128
ВИСНОВКИ	130
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	131
ДОДАТКИ	143

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЗК – змішувальний комплекс;

МДЕ – метод дискретних елементів;

ПІ – пропорційно-інтегральний регулятор;

ПІД – пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор;

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція;

ABS – акрилонітрил-бутадієн-стирол;

PET-G – поліетилентерефталатгліколь Полілактід;

PLA – полілактід;

ТД – тензOMETричний датчик;

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

МК – мікроконтролер;

ПК – персональний комп'ютер.

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. У легкій, хімічній, харчовій, машинобудівній та інших галузях промисловості широко використовуються сипучі матеріали різного ступеня дисперсності для приготування композицій із певними фізико-механічними властивостями. Композиції виготовляються у змішувальних комплексах різного типу періодичного або безперервного дії. Особливий інтерес представляють змішувальні комплекси у багатотоннажних виробництвах плівкових матеріалів, полімерних труб, лінолеуму, штучної шкіри та ін. Змішувальні комплекси складаються з ряду ланцюжків, відповідно до кількості змішуваних компонентів.

Ланцюжок змішувального комплексу складається з бункера для зберігання сипучого матеріалу, живильника та змішувача. Усі елементи змішувального комплексу виконують певну роль у переміщенні сипучого матеріалу від бункера до змішувача. Особливе значення має живильник, який формує потік сипучого матеріалу на виході з бункера: швидкість потоку, рівномірність, продуктивність тощо. Роль живильника зростає в автоматизованих змішувальних комплексах, у яких вимоги до стабільності потоку сипучого матеріалу суттєво зростають. Дослідженням у галузі динаміки сипких матеріалів і створенню змішувальних комплексів присвячені роботи авторів [62; 67; 94; 98], у них розглянуто питання, пов'язані з якістю транспортування сумішей. Проте в індустріальних змішувальних комплексах спостерігаються певні недоліки, зумовлені не досконалістю конструкцій.

Удосконалення живильників з метою створення регульованого потоку сипучого матеріалу з необхідними фізико-механічними властивостями визначає основний напрям досліджень у цій роботі.

В основу роботи покладено гіпотезу:

Сипке середовище, що рухається в полі механічних сил, що виникають у обертовій трубі з гребінцями на внутрішній поверхні, може бути сформоване в

керований потік з рівномірною продуктивністю та швидкістю на виході, невеликими пульсаціями та тертям між частинками.

Мета роботи – покращення процесу транспортування сипких матеріалів шляхом зменшення пульсацій та керування швидкістю матеріалу на виході з живильника, зменшення тертя в робочій зоні живильника та зниження вартості деталей для живильника.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішувалися такі завдання:

- проведення аналізу існуючих конструкцій живильників безперервної дії та принципів їх роботи;
- розробка конструкції живильника з керованою продуктивністю, покращеною згладжувальною здатністю, зменшенням тертя сипкого матеріалу в транспортувальній зоні живильника;
- створення математичних моделей, що характеризують процес руху сипкого матеріалу у шнекових живильниках з керованими параметрами режимів роботи;
- розроблення рекомендацій щодо проектування обладнання запропонованої конструкції.

Об'єкт дослідження – процес безперервного транспортування сипких матеріалів у змішувальних комплексах з безперервним режимом роботи.

Предмет дослідження – трубчасто-гребневий живильник сипкого матеріалу безперервної дії.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі використовуються методи дослідження, що базуються на законах механіки, суцільного середовища, що визначають рух твердих тіл, гідродинаміки, електромеханічного перетворення енергії, теорії автоматичного регулювання, імітаційного моделювання в середовищі Simulink MatLab та використання програмного комплексу EDEM для дослідження характеру руху сипкого матеріалу в змішувальних комплексах. Використання цих методів дасть можливість розробити та дослідити трубчасто-гребневий живильник з використанням електромеханічного приводу з мікроконтролерним управлінням.

• **Наукова новизна одержаних результатів.** У роботі, спираючись на аналітичні та експериментальні дослідження руху сипких матеріалів в живильнику змішувального комплексу, вирішено важливу науково-технічну проблему – розроблено трубно-гребневий живильник, який забезпечує регульований потік матеріалу з необхідними технологічними параметрами та властивостями, а також інженерний метод розрахунку.

На основі аналітичних досліджень кінематики та динаміки руху частинок у живильнику, обґрунтовано умови створення та алгоритми проєктування живильника. При цьому вперше отримано наступні наукові результати:

- створено математичні моделі процесу транспортування сипких матеріалів у трубчасто-гребневому живильнику;
- аналітично обґрунтовано можливість зменшення пульсацій на виході з живильника шляхом розміщення гребнів на стінках труби;
- запропоновано системи автоматичного керування технологічними параметрами руху сипких матеріалів у трубчастих живильниках.

Практичне значення одержаних результатів

Практичне значення дисертаційної роботи полягає в тому, що на основі проведених досліджень:

- розроблено новий живильник безперервної дії з підвищеними згладжувальною здатністю і можливістю керування продуктивністю;
- розроблено алгоритм проєктування нових живильників безперервної дії;
- розроблені алгоритми та програми для проєктування та виготовлення бункерів та живильників для сипких матеріалів із використанням 3D-друку.

Особистий внесок

Самостійно вибрано предмет дослідження, розроблено й вдосконалено низку методів і засобів дослідження. Також було створено пристрій трубчасто-гребневого типу, робочі деталі якого виготовлені за допомогою сучасних технологій 3D-друку.

Окрім цього, особистий внесок дослідника відображено у спільно з науковим керівником опублікованих наукових працях, у проведенні експериментів, отриманні результатів та розв'язанні теоретичних та практичних завдань.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ У СФЕРІ ОБЛАДНАННЯ ТА ПРОЦЕСІВ БЕЗПЕРЕРВНОГО РУХУ СИПКОГО МАТЕРІАЛУ В ЗМІШУВАЛЬНИХ КОМПЛЕКСАХ «ЗК»

Усі змішувальні комплекси складаються з ланцюжків пристроїв, через які потоки вхідних компонентів подаються у змішувач. Кожен ланцюжок має свій бункер для зберігання сипкого матеріалу, живильник та дозатор. Кількість ланцюжків визначається числом компонентів, які необхідно змішати згідно з заданою рецептурою.

Під час дослідження змішувальних комплексів зазвичай вивчають два ланцюжки (рис. 1.1.), що містять елементи певного типу. Один ланцюжок передбачений для потоку основного компонента, а інший для потоку ключового компонента майбутньої суміші [103].

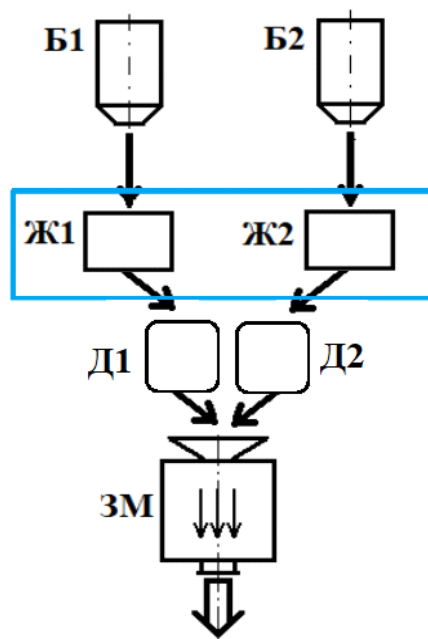


Рис. 1.1. Структурна схема двохкомпонентного змішувального комплексу:
Б1, Б2 – бункери; Ж1, Ж2 – живильники; Д1, Д2 – дозатори; ЗМ – змішувач

Дослідження живильників має на меті розробку ефективної конструкції живильника, що дасть можливість досягти зменшення пульсацій під час транспортування сипких матеріалів, підвищення максимальної точності та якості процесу транспортування.

Одним із ключових аспектів дослідження є вплив конструктивних та технологічних параметрів живильника на якість руху сипкого матеріалу в елементах змішувального комплексу, та її подальшого змішування. Крім того, дослідження живильників та їх класифікацій дає змогу виявити перспективні напрями для їх подальшого розвитку та удосконалення. Застосування новітніх технологій та інноваційних рішень сприятиме створенню більш точних, надійних та ефективних живильників, що підвищить їх якість та знизить витрати на виробництво.

1.1. Властивості сипких матеріалів та їх вплив на процес транспортування.

Під терміном «сипкий матеріал» розуміється кількість малих твердих частинок. Залежно від розміру та форми частинок, розсипний матеріал може бути в порошковому, зернистому, кусковому стані. Усі ці матеріали подаються у формі гранул, що представляють собою сипкий матеріал.

Сипкий матеріал – це сукупність дрібних твердих частинок, які мають різні розміри та форми.

Середній розмір частинок сипких матеріалів класифікується наступним чином:

- великі ($d > 10$ мм);
- великозернисті ($d = 2 \dots 10$ мм);
- дрібнозернисті ($d = 0,5 \dots 2,0$ мм);
- порошкоподібні ($d = 0,05 \dots 0,50$ мм);
- пилоподібні ($d < 0,05$ мм).

На відміну від рідин, сипкий матеріал має різко обмежену рухливість, що залежить від кута природного нахилу та коефіцієнта внутрішнього тертя. Чим менше ці параметри, тим рухливіший матеріал. Також під час аналізу процесу змішування необхідно враховувати властивості сипкого матеріалу, такі як насипна густина, злежуваність, липкість, абразивність, вибухонебезпечність, отруйність, насипна вага та вологість [95]. Насипна густина залежить від розміру частинок, середньої густини, вологості та щільності укладання. Вона не залишається постійною навіть коли матеріал залишається у стані спокою.

Злежуваність. Відмінності в поведінці сипких матеріалів можуть залежати від різних чинників, зокрема таких як злежуваність. При тривалому зберіганні, деякі дрібнозернисті й порошкоподібні матеріали можуть втратити свою сипкість і стати більш ущільненими. Це відбувається через перерозподіл частинок у шарі: дрібні частинки вклинюються в зазори між більшими частинками, що збільшує площу контакту між ними та збільшує сили адгезії.

Кут природного нахилу. У випадку сипких матеріалів, кут є показником рухливості, він вимірюється в градусах і визначається лінією природного нахилу матеріалу відносно горизонтальної площини. Залежно від сил тертя та зчеплення між частинками матеріалу, кут природного нахилу може змінюватися. Чим менший кут природного нахилу, тим рухливіший матеріал.

Текучість сипких матеріалів визначає їх здатність розсипатися під впливом власної ваги або механічних сил. Ця властивість залежить від геометричних характеристик частинок, ступеня їхньої сферичності, розміру, густини матеріалу, кута нахилу поверхні та інших чинників [96]. Більш розтікливі матеріали можуть викликати проблеми з їх транспортуванням та зберіганням, тому ця властивість є важливою у проектуванні процесів, пов'язаних із сипкими матеріалами.

Насипна густина. У випадку з сипкими матеріалами, насипна густина або об'ємна маса визначається як маса матеріалу, що займає одиницю його об'єму. Насипна густина залежить від розміру частинок, їх середньої густини, вологості та

щільності укладання в шар. Це значення не є постійним, навіть якщо матеріал перебуває в стані спокою.

Вологість сипкого матеріалу є важливою характеристикою і впливає на їхні властивості. Вона може впливати на плинність матеріалу, коефіцієнт внутрішнього тертя, змерзаємість, густину та інші характеристики. Існує декілька типів зв'язку вологи з матеріалом: механічний, фізико-хімічний і хімічний. Механічний зв'язок відбувається між вологою, яка наявна між частинками матеріалу і їхньою поверхнею. Фізико-хімічний зв'язок відбувається тоді, коли волога проникає в пори частинок за рахунок адсорбції або дифузії. Хімічно зв'язана волога, яка може бути гідратною чи кристалізаційною, також впливає на властивості матеріалу.

Дослідження властивостей сипких матеріалів є важливою основою для покращення процесу транспортування сипких матеріалів. Вони можуть бути використані для формулювання та обґрунтування наукових та інженерних проблем, а також для розроблення нових методів та технологій транспортування сипких матеріалів.

1.2. Огляд існуючих живильників у «ЗК» для сипких матеріалів.

Живильники мають різні конструкції, що відрізняються за формою та типом, механізмом подачі та іншими параметрами. Залежно від вимог виробництва та особливостей матеріалів, що використовуються, вибираються живильник певної конструкції та об'єму.

На практиці, підбір та налаштування живильників є складним процесом, оскільки вимоги до точності та стабільності вихідного матеріалу можуть змінюватися залежно від типу виробу та його характеристик.

На сьогодні існують різні види обладнання для транспортування сипких матеріалів, такі як шнекові живильники, вібраційні жолоби тощо.

Різноманітність сипких матеріалів потребує розробки та вдосконалення обладнання, що забезпечувало б їхнє якісне та ефективне транспортування. Одним із

таких пристроїв є трубчасто-гребневий живильник безперервної дії (рис. 1.2), який застосовується для транспортування сипких матеріалів у великих обсягах.

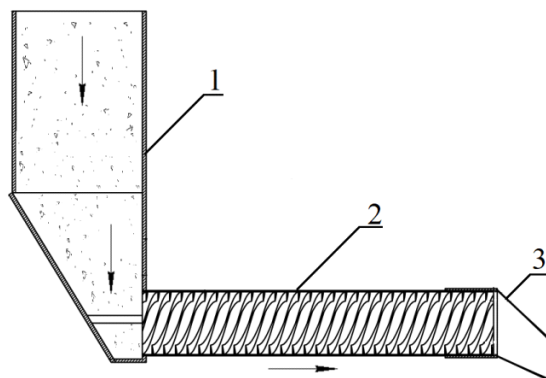


Рис. 1.2. Конструкція трубчасто-гребневого живильника безперервної дії

Конструкцію трубчасто-гребневого живильника представлено на рисунку 1.2. Живильник складається з транспортуючого елемента труби з гребнями, що обертається (2), сипкий матеріал завантажується через бункер (1) та виходить з живильника через формуючий патрубок (3). Такий живильник забезпечує подачу сипкого матеріалу в змішувач, де відбувається його змішування за допомогою спеціально розташованих лопатей та планок [49].

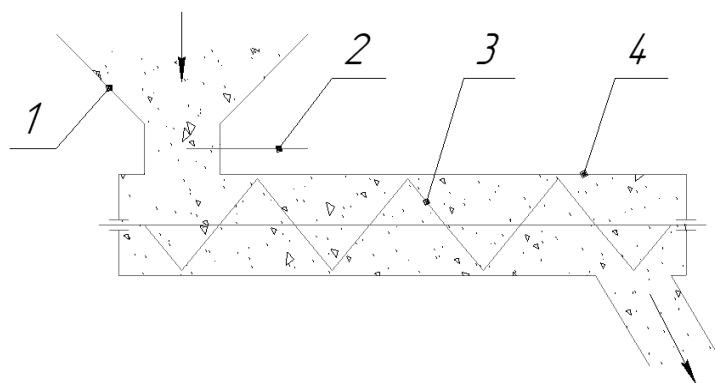


Рис. 1.3. Конструкція Шнекового живильника без перервної дії

Конструкція шнекового живильника показана на рис. 1.3. Сипкий матеріал надходить із бункера (1), який має затвор (2), у вхідний патрубок живильника. Рух матеріалу забезпечується за рахунок обертання шнека (3), який розташований усередині корпусу (4). Продуктивність живильника визначається швидкістю

обертання шнека. Для зменшення механічного впливу на матеріал застосовують шнеки із кроком, що збільшується у бік випускного отвору. Перевагою живильників цього типу є компактність конструкції та герметизація, що важливо у роботі із дрібнодисперсними матеріалами. Основний недолік – значний механічний вплив робочих елементів на частинки матеріалу, який може призводити до їх руйнування, нагріву та деформації [65].

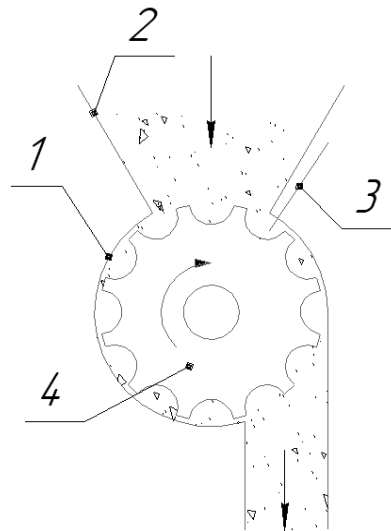


Рис. 1.4. Конструкція барабанного живильника безперервної дії

На рис. 1.4 зображено барабанний живильник сипкого матеріалу. Барабанні живильники застосовують для подання дрібнокускових та пиловидних матеріалів із високою сипкістю. Принцип їх дії полягає в тому, що сипкий матеріал, який надходить із бункера (2), переміщується за рахунок сил тертя між його частинками та барабаном (4). Залежно від фізико-механічних властивостей матеріалу можуть використовуватися живильники із гладкими, ребристими, гранованими та лопатевими барабанами. Продуктивність живильника залежить від геометричних розмірів барабану та корпусу (1), а її регулювання здійснюється за рахунок зміни швидкості обертання барабану та положення затвору (3). У випадку використання гладких барабанів продуктивність змінюється тільки за рахунок положення затвору (3). До переваг барабанних живильників можна віднести можливість транспортування вологих та липких матеріалів, широкий діапазон регулювання

продуктивності та закритий корпус. Недоліками є суттєвий механічний вплив на частинки та наявність пульсацій у потоці матеріалу у випадку використання ребристих, гранованих або лопатевих барабанів.

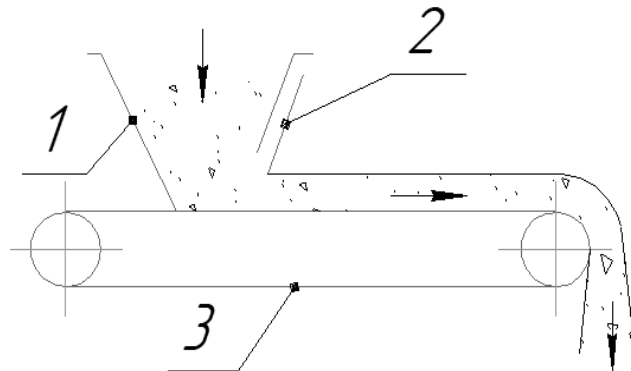


Рис. 1.5. Конструкція стрічкового живильника без перервної дії

У стрічковому живильнику (рис. 1.5) рух матеріалу забезпечується за рахунок сил тертя між частинками та стрічкою (3), що натягнута між двома барабанами. Сипкий матеріал під дією сил тяжіння із бункера (1) всипається на стрічку, що рухається поступально. У результаті частинки переміщуються у напрямку руху стрічки. Товщина шару матеріалу регулюється за допомогою затвору (2), що дає змогу змінювати продуктивність живильника. Також можливе коригування продуктивності за рахунок зміни швидкості руху стрічки. Перевагами живильників такого типу є: можливість зміни продуктивності у широкому діапазоні; низький механічний вплив на матеріал. Недоліком є наявність запізнення між моментом зміни положення затвору (2) та фактичною зміною продуктивності. Величина запізнення визначається кількістю матеріалу, що знаходиться на стрічці у момент зміни положення затвору.

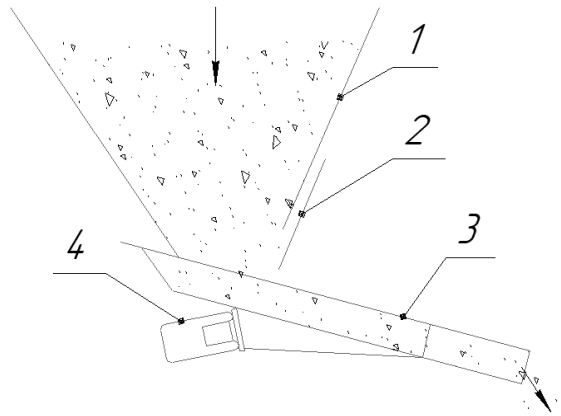


Рис. 1.6. Конструкція вібраційного живильника безперервної дії

Основою вібраційних живильників рис. 1.6 є опорний або підвісний лоток (3), який отримує коливальний рух від вібродвигуна (4), що дає можливість регулювати подачу матеріалу змінюючи частоту коливань. Сипкий матеріал висипається на лоток із бункера (1) за рахунок сил тяжіння. Товщина шару матеріалу регулюється за допомогою затвору (2). Довжину лотка підбирають з урахуванням кута природного укосу матеріалу, чим менше його величина, тим довшим має бути лоток. Використання вібраційних живильників дає змогу зменшити вплив злежуваності матеріалу та уникнути утворення склепінь. Водночас, у вихідному потоці матеріалу виникають пульсації, що мають частоту вібродвигуна.

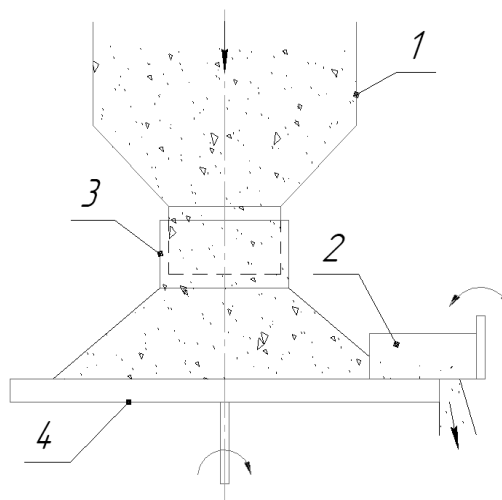


Рис. 1.7. Конструкція тарільчастого живильника безперервної дії

Конструкцію тарільчастого живильника зображено на рис. 1.7. Сипкий матеріал під дією сили тяжіння всипається із бункера (1) на таріль (4), де розташовується у

вигляді усіченого конуса. Кут нахилу бічної стінки конуса дорівнює куту природнього укосу матеріалу. Висоту конуса можна регулювати за допомогою манжети (3). Під час роботи живильника таріль обертається із заданою швидкістю, а сипкий матеріал знімається з неї за допомогою ножа (2). Положення ножа визначає продуктивність живильника. Існує можливість керування продуктивністю за рахунок зміни швидкості обертання та положення манжети, але ці варіанти технічно складніше реалізувати ніж керування за рахунок зміни положення ножа. До переваг тарільчастих живильників можна віднести широкий діапазон керування продуктивністю, висока точність транспортування, низькі масогабаритні показники. Для забезпечення роботи живильника необхідно використовувати бункери із круглим випускним отвором. Порівняно з іншими типами живильників, тарільчасті живильники можуть мати обмежену точність при подачі сипких матеріалів. Це може стати проблемою в деяких дуже точних технологічних процесах. Також завантаження та подача сипких матеріалів через тарільчасті живильники може призводити до зносу поверхонь тарілок, особливо при обробці абразивних матеріалів. Це може потребувати частої заміни або обслуговування, що підвищує витрати на утримання.

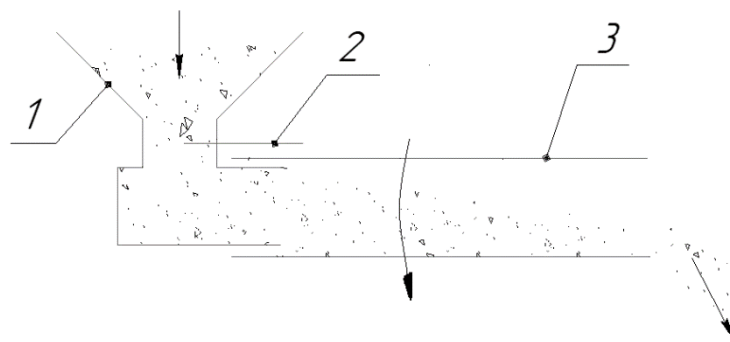


Рис. 1.8. Конструкція тарубчастого живильника безперервної дії

У живильника цієї конструкції (рис. 1.8) до виходу бункера (1) під'єднано горизонтальну трубу (3), що обертається із постійною кутовою швидкістю навколо власної вісі. Частинки матеріалу під дією сили тяжіння висипаються із бункера в

трубу, що обертається. Кількість цього матеріалу визначається розмірами отвору та кутом природного укосу сипкого матеріалу. Під час обертання труби на частинки, що знаходяться в ній, починають діяти механічні сили, що сприяє розподіленню сипкого матеріалу до одного шару. Цей процес викликає рух сипкого матеріалу вздовж осі труби. Продуктивністю такого живильника можна керувати за допомогою засуву (2).

Розглядаючи різноманітні типи живильників для транспортування сипких матеріалів, можна виділити як їхні переваги, так і недоліки:

- шнековий живильник, який вирізняється компактністю та герметичністю, ідеально підходить для дрібнодисперсних матеріалів, але його механічний вплив може викликати нагрівання та деформацію частинок:

- барабанний живильник є ефективним для дрібнокускових та пиловидних матеріалів, але може викликати пульсації у потоці та суттєвий механічний вплив;

- стрічковий живильник дає можливість змінювати продуктивність та має низький механічний вплив, але має запізнення при зміні продуктивності;

- вібраційний живильник зменшує вплив злежування, але може викликати пульсації у вихідному потоці матеріалу;

- тарільчастий живильник має широкий діапазон керування, але має проблемами зносу та обмеженою точністю при подачі сипких матеріалів;

- трубчастий живильник хоч і має найменше тертя та пульсації на виході, але в той самий момент має вузький спектр застосування за рахунок можливих утворень застійних зон, що призводить до неоднорідності змішуваних сумішей.

Серед різноманітних живильників для транспортування сипких матеріалів вирізняється трубчасто-гребневий живильник, який добре проявив себе у ряді аспектів. Його конструкція забезпечує стабільну та регульовану подачу матеріалу, а гребені на внутрішній поверхні труби сприяють рівномірному руху матеріалу, запобігаючи його розтіканню.

Надійність і простота конструкції трубчасто-гребневого живильника робить його перспективним для використання у промислових виробництвах, де важлива безперебійна робота та ефективне транспортування матеріалів.

1.3. Сучасні методи моделювання та оптимізації процесів руху сипких матеріалів у живильниках безперервної дії.

Сучасні методи моделювання процесів транспортування сипких матеріалів дають можливість підвищити точність та якість процесу, а також знизити витрати на виробництво. Одним із найпоширеніших методів є математичне моделювання процесу транспортування, яке використовують для розрахунку оптимальних параметрів транспортування залежно від характеристик сипкого матеріалу та умов виробництва.

Опис процесу транспортування рідин досить складний через різні властивості самих матеріалів, які мають як тверді, так і рідинні характеристики. Для аналізу руху потоку суміші можна використовувати методи механіки суцільних середовищ, оскільки рух потоку подібний до руху рідини. Але транспортування сипких матеріалів значно складніше, оскільки кожна частинка має свої розміри та масу, що відображає її твердість. Для моделювання руху кожної окремої частинки потрібно враховувати їх взаємодію між собою та з робочими елементами змішувача, що призводить до великої кількості параметрів, які ускладнюють проектування обладнання. Тому, розрахунок процесу транспортування сипких матеріалів потребує значної кількості обчислень та уваги до відповідних параметрів.

Сьогодні існує значна кількість наукових досліджень, присвячених методам моделювання процесів транспортування сипких матеріалів [62, 43]. Для моделювання процесів руху сипких матеріалів можуть застосовуватись такі методи:

- емпіричні;
- механіки суцільних середовищ;
- стохастичні;

- ентропійно-інформаційний підхід;
- кібернетичні;
- числові.

Емпіричні методи – це методи дослідження, що ґрунтуються на експериментах дослідженнях. При цьому результати спостережень або експериментів аналізуються та узагальнюються для формулювання висновків та гіпотез про об’єкт дослідження.

Методи механіки суцільних середовищ – це методи дослідження, що базуються на математичному моделюванні поведінки тіл у різних середовищах, таких як тверді тіла, рідини або гази. Вони охоплюють різноманітні чисельні методи та моделі, які дають змогу досліджувати фізичні процеси та явища в цих середовищах.

Стохастичні методи – це методи дослідження, що використовують статистичні методи та теорію випадкових процесів для аналізу досліджуваних явищ. Вони дають можливість враховувати випадковість та невизначеність у досліджуваному процесі.

Ентропійно-інформаційний підхід – це метод дослідження, який базується на теорії інформації та теорії ентропії. Він використовується для аналізу складних систем та процесів, та дає змогу оцінювати рівень неупорядкованості та впорядкованості в системі.

Кібернетичні методи – це методи дослідження, що ґрунтуються на теорії керування та автоматики. Вони використовуються для моделювання та оптимізації систем, зокрема, автоматизованих технологічних процесів. Вони передбачають різні методи та алгоритми для аналізу та управління процесами.

Числові методи – ці методи дослідження представляють собою широкий спектр математичних та комп’ютерних методів, що застосовуються для моделювання, аналізу та розв’язання різноманітних наукових, інженерних та прикладних проблем. Вони дають можливість наближено або точно вирішувати

складні математичні задачі, для яких аналітичні методи можуть бути недостатніми або непрактичними.

Метод дискретних елементів – (МДЕ або англ. Finite Element Method, FEM) – це числовий метод, який використовується для розв’язання різноманітних інженерних та наукових задач з механіки, теплофізики, гідродинаміки та інших галузей. Основна ідея полягає у розбитті аналізованої структури або системи на елементарні, обмежені ланки, які називаються елементами.

З-поміж найбільш поширених методів моделювання процесів руху сипких матеріалів також можна виділити методи, засновані на використанні штучних нейронних мереж, генетичних алгоритмах, а також методи, що використовують імітаційне моделювання та системи підтримки прийняття рішень. Дослідження в цьому напрямі дають змогу покращити точність процесів транспортування, що має важливе значення для різних галузей промисловості та виробництва.

Важливим показником роботи живильника є його продуктивність, яка визначає роботу всього змішувального комплексу.

У деяких видах робіт для визначення продуктивності окремих елементів ЗК використовується формула для моделі ідеального процесу руху сипкого матеріалу:

$$Q = \rho AV, \quad (1.1)$$

де Q – продуктивність елемента ЗК (кг/с),

ρ – щільність матеріалу (кг/м³),

A – площа вихідного отвору елемента ЗК (м²),

V – швидкість руху матеріалу в елементі ЗК (м/с).

Ця формула описує залежність між масовим витокм матеріалу, щільністю матеріалу, площею вихідного отвору та швидкістю руху матеріалу в елементах ЗК. Звичайно, це є лише однією з можливих моделей транспортування сипких матеріалів, а конкретна формула може залежати від багатьох чинників, таких як форма та розмір елементів ЗК, тип матеріалу та його властивості, тиск та температура у системі тощо.

У формулі можна використовувати такі позначення:

Отже, формула для ідеального процесу транспортування сипкого матеріалу має вигляд:

$$Q_d = Q_{d0} + K_p * (Q - Q_{d0}) + K_i \int (Q - Q_{d0})dt + K_d * d(Q - Q_{d0}), (1.2)$$

де Q – потік матеріалу (в кг/с);

t – час транспортування (в с);

Q_d – дозований потік матеріалу (в кг);

Q_{d0} – заданий дозований потік матеріалу (в кг);

δ – похибка транспортування (в %);

K_p – коефіцієнт пропорційності (в кг/с);

K_i – коефіцієнт інтегральної дії (в кг·с/кг);

K_d – коефіцієнт диференціювання (в кг·с²/кг).

Ця формула дає змогу розрахувати потік матеріалу за заданою похибкою транспортування та враховуючи взаємозв'язок між потоком матеріалу та його потоком.

Ця формула є математичною моделлю ідеального процесу транспортування сипкого матеріалу в ланці математичної моделі і використовується для розрахунку транспортованого потоку матеріалу з урахуванням похибки. Коефіцієнти пропорційності, інтегральної дії та диференціювання відображають різні аспекти взаємозв'язку між потоком матеріалу та його дозованим потоком і дають можливість врахувати динамічні ефекти в процесі транспортування. Значення цих коефіцієнтів можуть бути знайдені за допомогою експериментальних досліджень або розрахункових методів.

Також, формула вміщує коефіцієнти пропорційності, інтегральної дії та диференціювання, що дає можливість коригувати процес транспортування залежно від його динаміки та уникнути можливих перерегулювань або коливань.

Коефіцієнт пропорційності (K_p) визначає, наскільки швидко дозатор реагує на зміни потоку матеріалу. Чим більший K_p , тим швидше живильник буде реагувати на зміни потоку матеріалу, але може при цьому виникнути перерегулювання.

Коефіцієнт інтегральної дії (K_i) враховує накопичену похибку транспортування в часі та дає змогу зменшити її за допомогою коригування живильника. Чим більший K_i , тим швидше дозатор буде компенсувати похибку, але може при цьому виникнути затримка у реакції живильника.

Коефіцієнт диференціювання (K_d) визначає, як швидко дозатор реагує на зміни швидкості зміни потоку матеріалу. Чим більший K_d , тим швидше живильник буде реагувати на зміни швидкості, але може при цьому виникнути додатковий шум або відхилення.

Отже, формула для ідеального процесу транспортування сипкого матеріалу враховує різні чинники та параметри, що впливають на процес транспортування та надає можливість розрахувати оптимальні значення коефіцієнтів та похибки транспортування для досягнення найкращої продуктивності та якості продукту.

Побудова повної фізичної моделі руху частинок у суміші в окремій зоні дозатора є украй складним завданням через велику кількість чинників, що впливають на цей процес. Тому для створення моделі необхідно врахувати вплив кожного з цих чинників та відобразити у моделі найбільш впливові з них. Ця модель дає змогу оцінити траєкторію руху частинок у робочому елементі живильника залежно від початкового положення, швидкості та напрямку їх руху.

Така інформація дає змогу визначити різницю між швидкостями та напрямками руху частинок у різних потоках, кількість потоків та ступінь турбулентності, що дає можливість оцінити внесок зони потоку в процес транспортування сипких матеріалів. Для оцінки коректності моделі необхідно провести дослідження якості транспортування живильника.

Таким чином, ця модель надає можливість прогнозувати роботу нових конструкцій живильників та оцінювати вплив зміни режимів роботи на якість руху сипкого матеріалу в існуючому обладнанні. Такі дослідження допомагають

зменшити кількість експериментальних досліджень та підвищити якість процесів транспортування.

1.4. Методи визначення параметрів руху матеріалу в елементах ЗК.

Оцінювання якості транспортування здійснюється за допомогою різних показників, таких як відхилення від заданої кількості матеріалу, коефіцієнт транспортування, точність транспортування та інші.

Один із таких показників – це коефіцієнт транспортування (D). Він відображає співвідношення фактично дозованої кількості матеріалу до заданої кількості та обчислюється за формулою.

$$D = (W_f - W_i) / W_s * 100\%, \quad (1.3)$$

де W_f – фактична маса дозованого матеріалу;

W_i – ініціальна маса дозованого матеріалу;

W_s – задана маса дозованого матеріалу.

Таким чином, якщо коефіцієнт транспортування дорівнює 100%, це означає, що фактично дозована кількість матеріалу відповідає заданій кількості. Якщо ж коефіцієнт менший за 100%, то фактична кількість матеріалу, дозованого у систему, менша за задану. Звісно, чим більше коефіцієнт, тим більш точне транспортування.

Одним з ефективних методів оцінювання якості транспортування є аналіз середньоквадратичної похибки (MSE), яка визначається за такою формулою:

$$MSE^2 = \frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2, \quad (1.4)$$

де n – кількість вимірів;

Y_i – фактичне значення дозованого матеріалу;

\hat{Y}_i – очікуване (теоретичне) значення дозованого матеріалу, що було розраховано згідно зі заздалегідь встановленими параметрами транспортування.

Що менше значення MSE, тим вища якість транспортування. Однак, для того щоб оцінювання було більш точним, необхідно враховувати й інші чинники, що можуть впливати на якість транспортування, такі як:

- точність вимірювального обладнання;
- стабільність властивостей дозованого матеріалу;
- правильність вибору методу транспортування;
- правильне налаштування обладнання та контроль параметрів процесу транспортування.

Загалом, оцінювання якості транспортування – це складний процес, який потребує комплексного підходу та врахування багатьох чинників. Однак, з використанням відповідних методів вимірювання та аналізу можна досягти високої точності транспортування та забезпечити високу якість виробництва.

Інші показники оцінювання якості транспортування можуть використовуватись залежно від вимог до конкретної системи транспортування та матеріалів.

Методи визначення параметрів дозованого матеріалу використовуються в промисловості для точного транспортування матеріалу в процесі виробництва. Основними параметрами, які визначаються в процесі транспортування матеріалу, є маса або об'єм дози, час транспортування та швидкість подачі матеріалу.

Розглянемо наявні методи аналізу транспортування сипких матеріалів.

Ваговий метод. Одним із методів визначення параметрів транспортування є використання вагових датчиків, що встановлюються на системі транспортування. Вагові датчики реєструють масу матеріалу, який проходить через систему, та передають цю інформацію до контролера. За допомогою цієї інформації контролер регулює швидкість подачі матеріалу, щоб забезпечити точне транспортування.

Метод рівня. Інший метод визначення параметрів транспортування полягає у використанні датчиків рівня. Ці датчики вимірюють рівень матеріалу в бункері або в

системі транспортування і передають цю інформацію до контролера. Контролер відповідно регулює швидкість подачі матеріалу, щоб забезпечити точну транспортування.

Метод маси за одиницю часу. Цей метод полягає у вимірюванні часу, за який дозований матеріал проходить певну відстань. Цей час можна виміряти за допомогою різних пристроїв, таких як лічильники, таймери або електронні пристрої, що можуть визначати час за допомогою заряджених частинок.

Для цього методу потрібно знати швидкість руху матеріалу. Зазвичай швидкість руху визначається за допомогою кількох вимірювань за допомогою датчиків руху або за допомогою обчислень, враховуючи властивості матеріалу, такі як його густина і в'язкість.

Цей метод має декілька переваг, зокрема, його можна використовувати для транспортування різних типів матеріалів, він досить точний і не потребує великої кількості обладнання. Однак він може бути не дуже точним, якщо швидкість руху матеріалу змінюється, і він не підходить для транспортування матеріалів, що мають низьку в'язкість або липкість.

Метод маси за відстанню. Цей метод полягає у вимірюванні відстані, яку проходить дозований матеріал та обчисленні маси за допомогою властивостей матеріалу, таких як його густина. Цей метод може використовуватися для транспортування матеріалів, що мають низьку в'язкість або липкість, і він досить точний.

Для цього методу необхідно виміряти відстань, яку проходить матеріал, за допомогою датчиків руху або різних пристроїв, таких як лічильники або електронні пристрої.

Метод визначення масових втрат, що полягає у зважуванні зразків матеріалу до та після транспортування. Для цього використовують зважувальні прилади з точністю до 0,1 грама. Результатом є відношення різниці між масою зразка до та після транспортування до часу транспортування. Цей метод дає змогу визначити точну масу дозованого матеріалу та витрати на час транспортування.

Метод гравіметричного транспортування, що використовується для транспортування великих об'ємів матеріалу з високою точністю. Для цього використовують ваги, які автоматично дозують матеріал із точністю до 0,1 грама. Цей метод дає можливість отримувати стабільні та повторювані результати транспортування.

Метод вимірювання об'єму, що використовується для транспортування рідинних матеріалів. Для цього використовують дозатори, які дають змогу дозувати матеріал з точністю до міліграма. Цей метод дає можливість визначати точний об'єм дозованого матеріалу.

Кожен з цих методів має свої переваги та недоліки та використовується залежно від вимог до точності та обсягів транспортування. Незалежно від методу визначення параметрів транспортованого матеріалу, важливо дотримуватися стандартних процедур та протоколів, щоб забезпечити точність та повторюваність результатів.

1.6. Використання методу дискретних елементів у дослідженні руху сипких матеріалів.

З великомасштабними процесами в багатьох галузях промисловості, де працюють із твердими частинками або сипучими матеріалами, існує необхідність розуміння їхньої поведінки без використання дорогих експериментів, що може обмежувати час. Використання першоосновних обчислювальних методів, таких як моделювання дискретних елементів (МДЕ), стає все більш поширеним. З правильно налаштованої моделі МДЕ можна отримати уявлення про багато промислових процесів МДЕ — це чисельний метод, теоретична основа якого походить із законів руху Ньютона. Загальні сили, що діють на окремі частинки в гранульованій системі моделюються, а їх швидкості та положення відстежуються протягом певного періоду часу. Загальна сила є сумою контактних сил (частинка/частинка та частка/корпус пристрою, то що) і сил тіла, таких як сили тяжіння, рідини, магнітні

або електростатичні сили. Основна відмінність між МДЕ і молекулярною динамікою (МД) полягає в тому, що в МДЕ зіткнення та обертання кінцевих частинок відіграють головну роль.

Поведінка окремих частинок у системі моделюється за допомогою без сіткового методу, а поведінка маси прогнозується. Блок-схему, що відображає послідовність моделювання МДЕ, зображено на рис. 1.9.

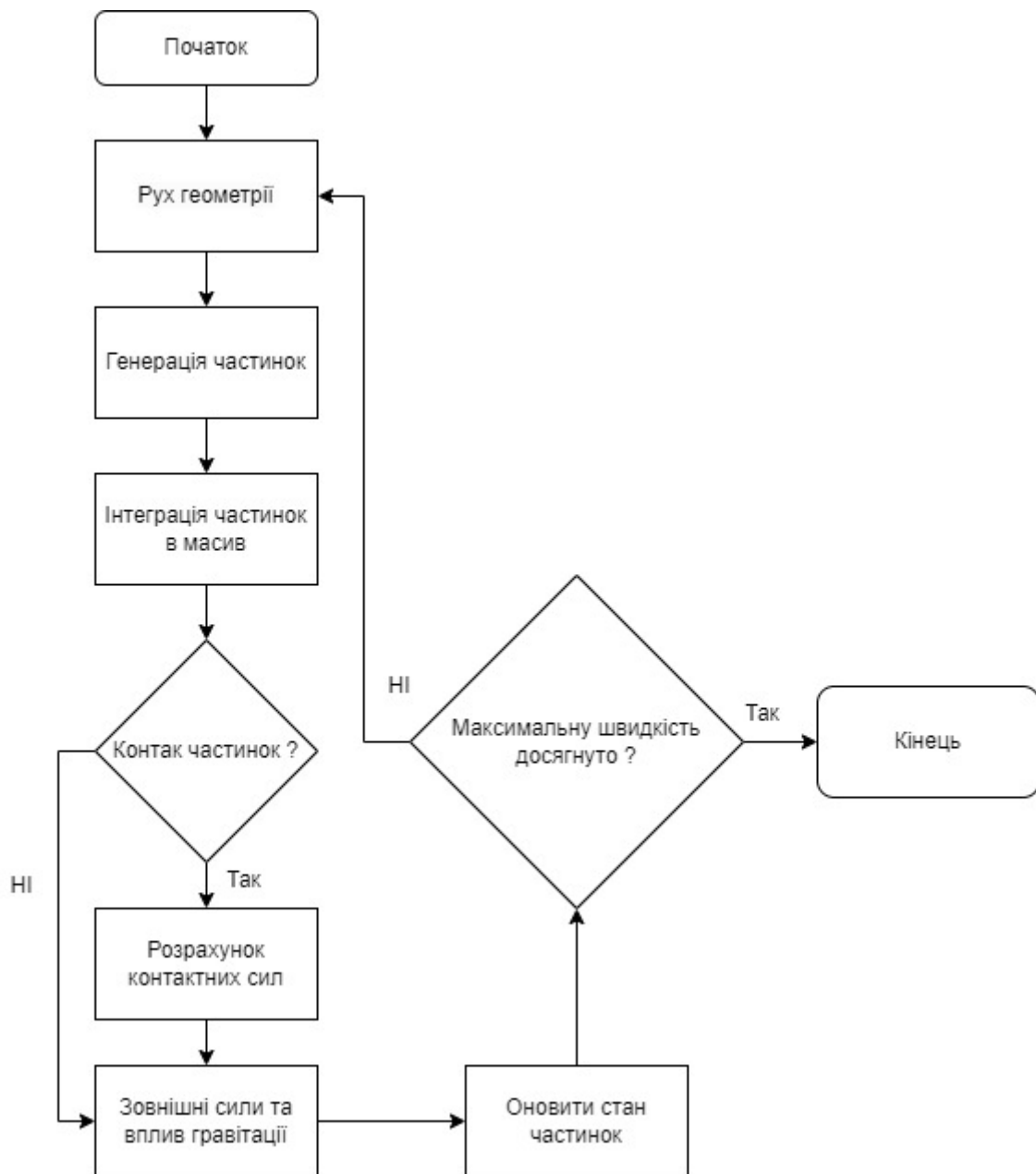


Рис. 1.9. Базова блок-схема моделювання МДЕ

Першим кроком є створення геометрії за допомогою стандартного пакету CAD, а потім визначення граничного руху рухомих частин. Наприклад: змішувач може мати нерухомий зовнішній циліндр і рухомі внутрішні гвинтові лопаті; конвеєр може мати стрічку, що рухається із заданою швидкістю. Масові матеріали потім випускаються в систему в межах площини в певних початкових координатах. Моделювання відбувається з використанням невеликих проміжків часу, та загальної сили, що діє на кожну частинку. Загальна сила – це сума всіх механічних та контактних сил, що виникають під час зіткнень частинок сипкого матеріалу в процесі руху:

$$\sum F = F_{\text{контакту}} + F_{\text{механічні}} = ma, \quad (1.5)$$

де $F_{\text{контакту}}$ – сума усіх контактних сил, що діють на частинку, Н;

$F_{\text{механічні}}$ – сума усіх механічних сил, що діють на частинку, Н;

m – маса частинки, кг;

a – прискорення частинки м/с².

Модель також може враховувати силу тяжіння, опір рідини, адгезію/когезію, електростатику та магнітні сили. Схема інтегрування часу використовується для прогнозування лінійної та кутової швидкостей кожної частинки разом із її переміщеннями. Найбільш часто використовуваною в моделюванні МДЕ є модель пружинного приладу (затухаючий гармонічний осцилятор) (рис. 2).

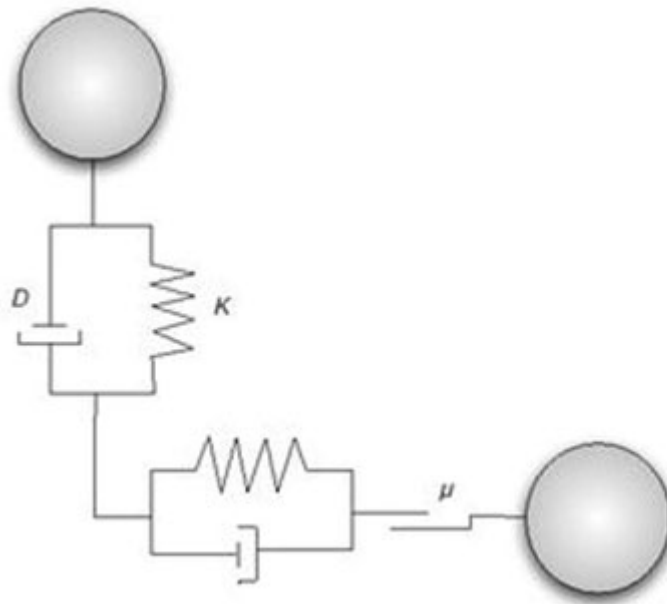


Рис. 1.10. Контактна модель з демпфрованою силою в нормальному та тангенційному напрямках удару

Для похилих зіткнень сила розкладається на нормальний і тангенціальний напрямки удару за допомогою окремих пружинних елементів. Повзунок, що представляє кулонівське тертя, також діє у тангенціальному напрямку. Загальний закон сили-переміщення задається як [40]:

$$F_{\text{контакту}} = -K\delta^n - D\delta^l\delta'^m, \quad (1.6)$$

де δ — перекриття між частинками,

δ' — відносна швидкість удару (штрих являє собою похідну за часом від перекриття),

K і D — жорсткість пружини та константа демпфування відповідно.

Жорсткість пружини

K є функцією розміру частинок та властивостей матеріалу, таких як модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона. Константа демпфування. D пов'язана з коефіцієнтом відновлення, який є зосередженим параметром, що кількісно визначає втрату енергії

під час зіткнення. Вибір моделі контакту та її параметрів залежить від системи та вимірювань. Визначення властивостей матеріалу та параметрів контактної взаємодії потребує калібрування для отримання точних результатів.

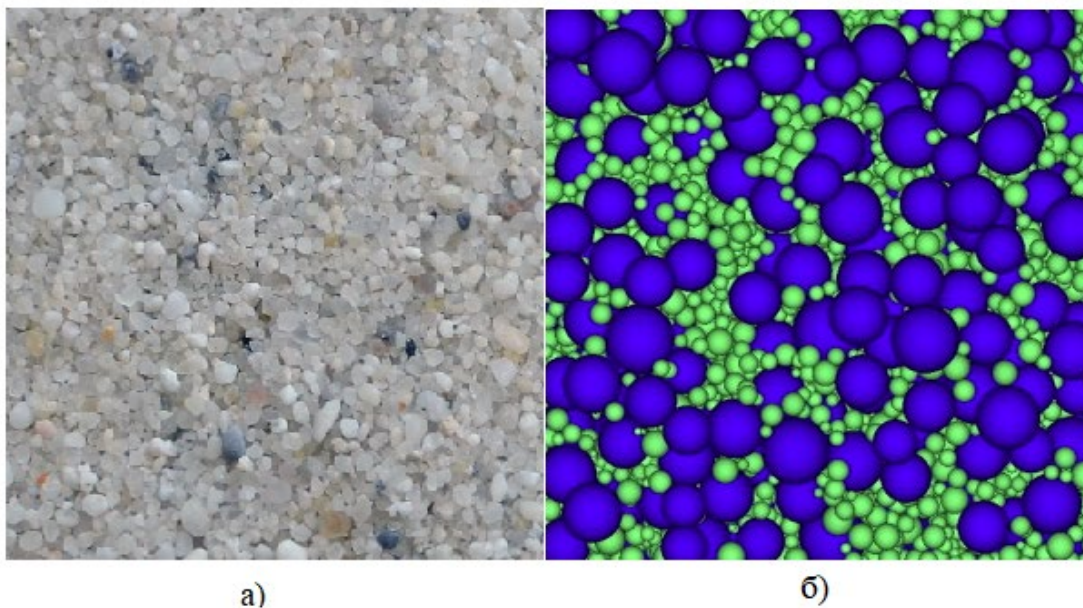


Рис. 1.11. а) частинки кварцового піску не сферичної форми; б) представлення частинок кварцового піску у формі сфери для спрощення обрахунку МДЕ

Більшість моделей МДЕ використовують сферичні форми частинок (рис. 1.11) не через їхню точність, а завдяки перевагам прямого виявлення контакту та перекриття, що використовується для розрахунку контактної сили. Проте це представлення ідеальної форми не здатне точно змодельовати більшість явищ, що демонструють реальні гранульовані матеріали, такі як механічне блокування, прогнозування продуктивності систем сортування та живильників.

Існує кілька методів представлення несферичних форм. Найпростішим і найпоширенішим є метод склесно-сферних або багатосферних моделей [1, 10].

У цьому підході форма апроксимується шляхом жорсткого зв'язування кластеру сфер, що можуть перекриватися або не перекриватися. Перевага використання цієї методики полягає у збереженні простоти виявлення контакту, пов'язаного зі сферами. Хоча будь-яку довільну форму можна змодельовати, суттєвим недоліком є складність апроксимації форм із гострими краями та великим

співвідношенням сторін. Крім того, «нерівна» поверхня викликає штучне тертя між контактами.

Іншим підходом до представлення несферичних частинок є математична апроксимація їхньої форми за допомогою неперервних функцій, таких як суперквадрики [15, 27]. Порівняно з методом склеєних сфер, суперквадрики можуть алгебраїчно моделювати різноманітні форми з підвищеною точністю (рис. 1.12 б).



Рис. 1.12. а) частинки слюди плоскої форми; б) представлення частинок слюди у формі багатокутників для спрощення обрахунку МДЕ

Однак для цих форм виявлення контактів є дорогим з точки зору обчислень та іноді повільним для певних програм. Поява швидких розв'язувачів із використанням графічних карт і багатоядерних процесорів зробила цей метод більш практичним, ніж раніше. У даний час МДЕ використовується для вивчення таких процесів, як змішування, сегрегація, сепарація, зберігання та обробка, транспортування та потоки частинок рідини. Він використовується в основному як інструмент для досліджень і розробок для багатьох застосувань, за винятком транспортних лотків для видобутку корисних копалин і обробки корисних копалин. Він ідеально підходить для ситуацій [18], коли великомасштабні параметричні експериментальні дослідження важко виконати або коштують непомірно.

Моделювання МДЕ може уможливити передбачення деяких ключових величин, таких як:

- схеми та швидкості потоку;

- споживана сила, крутний момент і потужність обладнання;
- ударні та абразивні сили на частинки та обладнання;
- характер зношення та напруги на поверхнях;
- швидкості руйнування та енергетичні спектри;
- профілі швидкості та мертві зони;
- моделі змішування та сегрегації;
- час перебування та розподіл часток.

За допомогою цього підходу можна аналізувати продуктивність різних конструкцій живильників. МДЕ також можна використовувати для прогнозування потоку та сегрегації дрібних порошків у фармацевтичній промисловості. Його можна використовувати як інструмент для прогнозування та усунення несправностей щодо однорідності вмісту під час обробки порошку. Незважаючи на те, що вони все ще перебувають на ранніх стадіях, дослідження, пов'язані з теплопередачею та/або хімічними реакціями в процесах хімічної інженерії (наприклад, сушіння, спалювання вугілля в газових псевдозріджених шарах, обертові барабани, масштабування грануляторів псевдозрідженого шару з використанням МДЕ, також можуть бути досліджені. Основним обмеженням МДЕ є його властива обчислювальна інтенсивність. Оскільки ця техніка відстежує кожен окрему частинку та її взаємодію з часом, збільшення кількості частинок (N) збільшує час обчислення, який зазвичай масштабується в порядку N . Крім значного впливу кількості частинок моделювання на час, технічні складності, такі як несферичні форми частинок, рухомі границі та моделі контактної сили, також впливають на час обчислення. Вторинні сили такі як когезія також збільшують час обчислення. Однак із появою швидших комп'ютерів і процесорів швидкість обробки моделювання МДЕ покращується. На додаток до вищезазначених обмежень, ще однією серйозною проблемою з моделями МДЕ є перевірка результатів. МДЕ ідеально підходить для систем, де експериментальні вимірювання є складними або надзвичайно дорогими; однак це стає шкодою під час перевірки результатів моделі. Іншим поширеним занепокоєнням є представлення несферичних форм частинок

ідеальними сферами. Прогнози МДЕ продуктивності таких пристроїв, як вібраційні сепаратори та транспортери, також чутливі до представлення форми частинок.

Висновки та завдання досліджень

Аналіз обладнання для транспортування сипких матеріалів та методів дослідження їх руху, дає змогу зробити такі висновки:

1. Найбільш вживаним на сьогодні є шнековий живильник. З-поміж інших конструкцій він вирізняється високою продуктивністю, однак має ряд недоліків такі як високе тертя в робочій зоні, значні пульсації сипкого матеріалу на виході та пошкодженням транспортованого матеріалу за рахунок контакту між робочими елементами.

2. Складна конструкція робочих елементів живильника призводить до підвищення вартості виготовлення та вимог до наладки роботи пристрою.

3. Деякі сучасні конструкції живильників мають конкретну сферу застосування, що унеможливує їх використання для роботи з різними видами сипких матеріалів.

4. Наявність великої кількості робочих зон зсуву в транспортувальному елементі підвищити якість руху суміші, при якому зменшиться амплітуда пульсацій як на виході живильника так і в зоні транспортування, але при цьому підвищуються масогабаритні показники, споживання енергії та вартість пристрою.

5. Завдяки високій продуктивності живильника можна отримати більшу кількість продукції за той же час, але отримати гірші показники транспортування.

6. Використання методів динамічного моделювання та експериментів (МДЕ) дає можливість зменшити час на проектування та оптимізацію живильника.

7. МДЕ уможливує виконання численних ітерацій конструктивних змін без необхідності виготовлення фізичних прототипів, що значно знижує витрати на розробку.

8. МДЕ дає можливість провадити випробування віртуальних моделей живильників в умовах, максимально наближених до реальних, що дає можливість отримати достовірні результати й рекомендації щодо подальших удосконалень конструкції.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ СИПКОГО МАТЕРІАЛУ В ТРУБЧАСТО-ГРЕБНЕВОМУ ЖИВИЛЬНИКУ

Одним із способів зменшення впливу відхилень є підвищення згладжувальної здатності самого живильника. Це може потребувати збільшення середнього часу, протягом якого частинки матеріалу перебувають у середині живильника. Такий підхід допомагає забезпечити більш точне та стабільне транспортування сипкого матеріалу під час його транспортування.

У цьому розділі розглянуто різні аспекти трубчасто-гребневого живильника, такі як його будова, принципи роботи та параметри налаштування. Також проведено дослідження його функціональних характеристик, вимірюючи продуктивність при різних параметрах роботи.

Також дослідження охоплює аналіз траєкторії руху частинок сипкого матеріалу під час транспортування. Для цього використовуються конструкційні елементи, такі як гребні в середині труби, що створюють додаткові шляхи руху матеріалу.

2.1. Визначення впливу кута нахилу гребнів та початку руху на величину підйомно-рушійної сили в трубчасто-гребневому живильнику

Вплив нахилу гребнів на здатність транспортувати матеріал трубчасто-гребневого живильника можна розглядати як зміну величини сили, яка переміщує матеріал.

Фізична природа процесу переміщення частинок сипкого матеріалу вздовж осі труби з гребенями (спіралями) описує взаємозв'язок між кутом підйому гребня та опором, який чиниться силі, що рухає частинки сипкого матеріалу.

На рис. 2.1 зображено сили, що діють на частинку сипкого матеріалу. У трубі є дві точки дотику а саме: профіль труби та спіральний гребінь $F_{\text{тр.г}}$, $F_{\text{тр.т}}$ є силою, яка сприяє переміщенню частки матеріалу по спіралі.

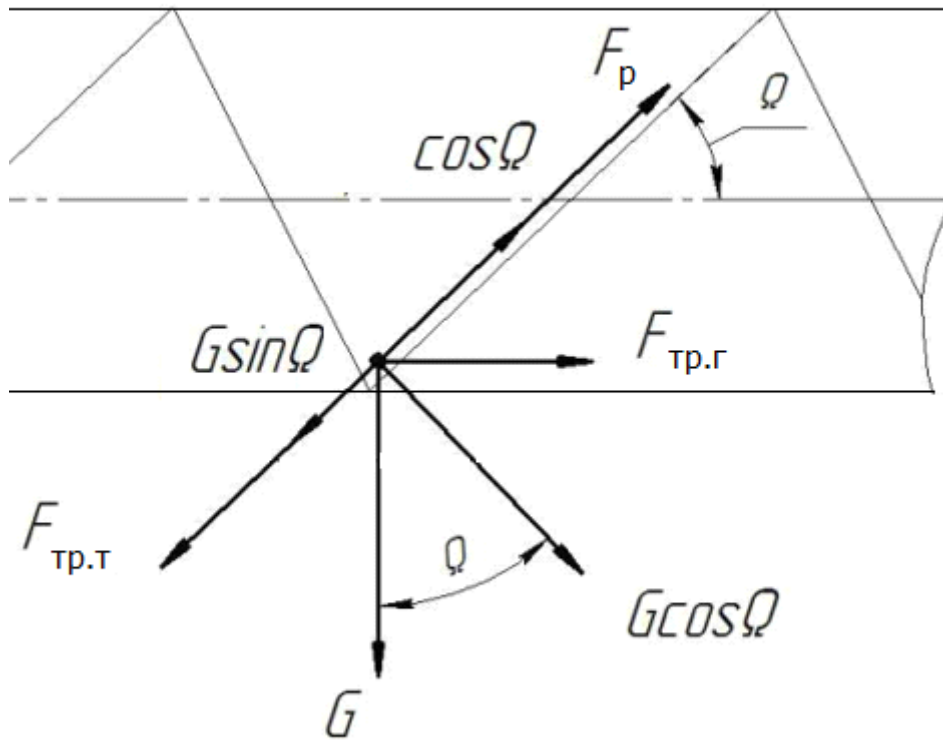


Рис. 2.1. Схема сил що діють на частинку сипкого матеріалу вздовж труби з гребнями

Сила, яка піднімає та рухає частинку матеріалу по спіралі, може бути виражена як:

$$F_p = m * (\omega_T^2 * R * \cos(\theta) * f_T - g * (\sin(\theta) + \cos(\theta) * f_T)), \quad (2.1)$$

де m – маса частинки сипкого матеріалу;

ω_T – кутова швидкість труби;

R – радіус труби;

θ – кут підйому гребня в трубі;

f_T – коефіцієнт тертя матеріалу по стінці труби;

g – прискорення вільного падіння;

f_r – коефіцієнт тертя матеріалу по гребню.

Додаткові гребні під час установки в середині труби дають можливість розглядати сили, що діють на частинку сипкого матеріалу, у фронтальній площині (рис. 2.1) разом із силами, що діють на частинку сипкого матеріалу в горизонтальній площині. Сили, що діють на частинку сипкого матеріалу в фронтальній площині, визначаються кутом нахилу гребня і кутом, під яким розташована частинка сипкого матеріалу на гребні, починає рух – β .

$$\begin{aligned} F_p &= m * (\omega_T^2 * R * \cos(\theta) * f_T - g * (\sin(\theta) + \cos(\theta) * f_r)) - F_{Tp} + g \cos(\Omega) - \\ F_{ц} * \cos(\Omega) &= m * (\omega_T^2 * R * \cos(\theta) * f_T - g * (\sin(\theta) + \cos(\theta) * f_r)) - N * f_{Tp} + m * \\ \omega_T^2 * R * \cos(\Omega) * f_T - g * (\sin(\Omega) + \cos(\theta) * f_r) &= m(\omega_T^2 * R * \cos(\theta) * f_T - g * \\ (\sin(\theta) + \cos(\theta) * f_r) + g \cos(\Omega) - \omega_T^2 * \cos(\Omega) - N * f_{Tp} &= m * (\omega_T^2 * R * \\ (\cos(\theta) * f_T - \cos(\Omega)) - g * (\sin(\theta) + \cos(\theta - \beta) * f_r - \cos(\Omega)) - N \end{aligned} \quad (2.2)$$

З урахуванням сил, що діють на частинку в горизонтальних і фронтальних площинах, кінцева формула для визначення підйомно-рушійної сили має такий вигляд:

$$F_p = -N * m * (\omega_T^2 * R * (\cos(\theta) * f_T - \cos(\Omega)) - g * (\sin(\theta) + \cos(\theta - \beta) * f_r - \cos(\Omega)), \quad (2.3)$$

де N - реакція поверхні ребра на частинку сипкого матеріалу.

Аналіз рівнянь (2.1) і (2.2) показує, що для зменшення підйомно-рушійної сили при транспортуванні сипкого матеріалу гребневим живильником порівняно з класичною конструкцією трубчастого живильника (рис. 1.7) важливий вплив мають кут нахилу гребнів та кут початку руху частинки.

На основі аналізу рівняння (2.2) отримуємо залежність підйомно-рушійної сили від кута нахилу гребнів, що відображено на графіку залежності рухливої сили від кута нахилу гребнів (рисунк 2.2).

З рис. 2.2 випливає, що ефективним діапазоном кута нахилу, при якому значення підйомно-рушійної сили найменше, є від 1 до 15 градусів.

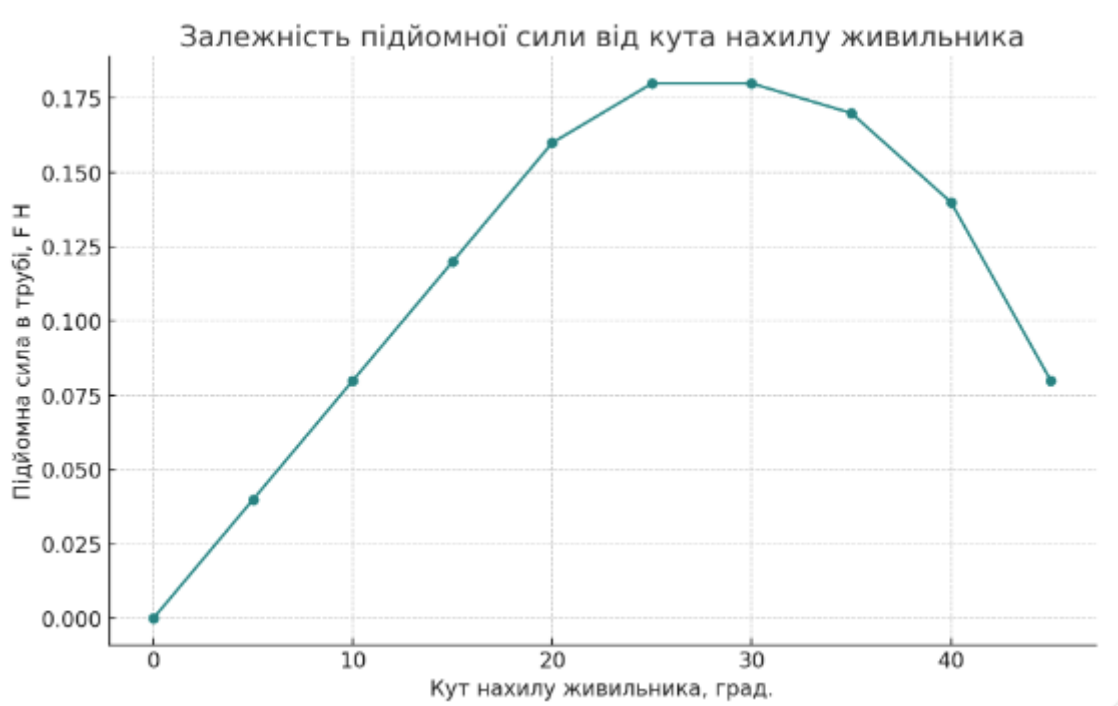


Рис. 2.2. Графік залежності рушійної сили від робочого кута нахилу дозатора

Підйомна сила, що піднімає частинки сипкого матеріалу залежить від кута нахилу гребнів та труби живильника. Чим більший кут нахилу тим більша підйомна сила, але із збільшенням нахилу труби ця сила зменшується оскільки сипкий матеріал починає рухатися сам собою.

2.2. Визначення критичної частоти обертання робочого елемента живильника

Під час обертання труби з гребнями, зокрема заповненого сипучим матеріалом, у його поперечному перерізі можна спостерігати такі режими руху матеріалу [44; 45; 46]:

- рух із обваленням, при якому періодично відбувається перерозподіл матеріалу;
- циркуляційний рух, при якому матеріал утворює замкнений циркуляційний контур. При цьому частина матеріалу рухається або по відкритій поверхні викривленого сегмента, або знаходиться у польоті.

Для більшого розуміння сил що діють на частинку приведено зображення рівноваги сил рис. 2.3.

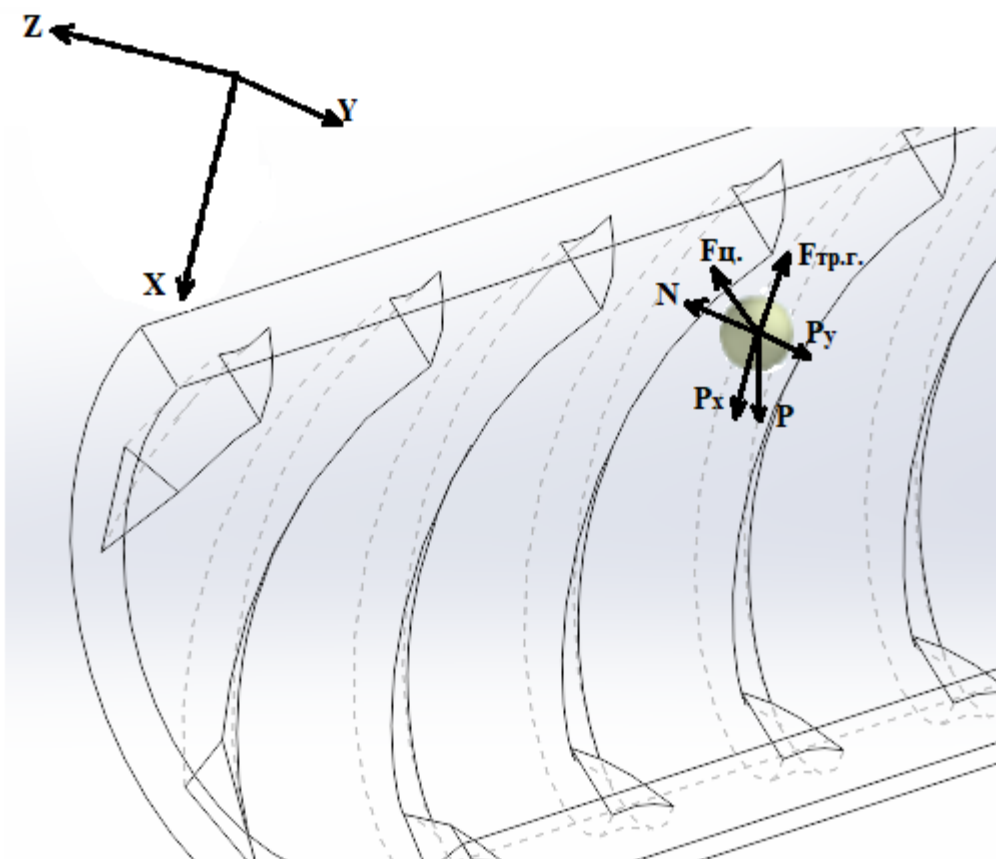


Рис. 2.3. Сили що діють на матеріал у транспортувальному елементі трубчасто-гребневого живильника

Вісь X направлена по дотичній до гребня, вісь Y паралельна поверхні ребра, вісь Z направлена перпендикулярно поверхні ребра. Якщо сили $P_x(mg \sin(\beta))$, $P_y(mg \cos(\beta))$, $P(mg)$, $F_{\text{тр.г.}}$, знаходяться в рівновазі рух частинки сипкого матеріалу не відбувається. Обертання труби створює відцентрову силу $F_{\text{ц}}$, яка разом з іншими діючими силами, такими як сила тяжіння P , горизонтальна складова сили тяжіння P_x , вертикальна складова сили тяжіння P_y та сила тертя $F_{\text{тр.г.}}$, визначає рух частинки сипкого матеріалу. Дизбаланс цих сил сприяє переміщенню частинок матеріалу вздовж осі труби.

Критична швидкість, за якої частинки не відриватимуться від стінок навіть у найвищій точці, визначиться з умови

$$F_{\text{ц}} \leq mg, \quad (2.4)$$

де $F_{\text{ц}} = m\omega^2 R$ – відцентрова сила;

R – радіус труби, м;

m – маса матеріалу, кг;

g – земне прискорення.

Таким чином, отримуємо наступну нерівність:

$$m\omega^2 R \leq mg \quad (2.5)$$

Скасовуємо масу m :

$$\omega^2 R \leq g \quad (2.6)$$

Тепер можемо виразити критичну швидкість $\omega_{\text{кр}}$, за якої частинка матеріалу не відриватиметься від внутрішньої стінки трубчато-гребневого живильника:

$$\omega_{\text{кр}} = \sqrt{(g/R)} \quad (2.7)$$

На практиці використовують більш просту формулу, оскільки ступінь заповнення труби переважно не перевищує 30%. Отже, значення в дужках може наближатися до одиниці.

Очевидно, що для складання рівняння визначення критичної швидкості обертання необхідно представити рівняння поверхні площини гребню:

$$\cos\alpha_x (x - x_0) + \cos\alpha_y (y - y_0) + \cos\alpha_z (z - z_0) = 0 \quad (2.8)$$

Якщо відома точка з координатами (x_0, y_0, z_0) , через яку проходить поверхня, то рівняння може мати такий вигляд:

$$x \cos\alpha_x + y \cos\alpha_y + z \cos\alpha_z - l = 0, \quad (2.9)$$

де l – відстань до поверхні, $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ – кути між нормаллю і відповідними осями. Згідно з рисунком 2.3., для початкового розташування точки на витку рівняння набуде такого вигляду:

$$(x - R)\cos\alpha + y \sin\alpha = 0 \quad (2.10)$$

Отже отримуємо рівняння:

$$x \cos\alpha + y \sin\alpha - R\cos\alpha = 0, \quad (2.11)$$

де $R\cos\alpha = l$.

Тоді рівняння площини гребнів з урахуванням кута початку руху матеріалу виражається так:

$$x \cos(\alpha + \beta) + y \sin(\alpha + \beta) - R\cos\alpha = 0 \quad (2.12)$$

Але кут β – це кут початку руху матеріалу по гребню і також кут нахилу площини до площини труби, отже, площина лопаті має просторовий рух.

Рівняння (2.12) описує баланс сил вздовж проєкції площини гребня на вісь. Складемо рівняння сил вздовж перпендикулярної осі до площини:

$$N - G\sin(\alpha + \beta) + F_{\mu} \sin(90 - \alpha) = 0 \quad (2.13)$$

Об'єднавши отримане рівняння (2.12) з рівнянням (2.13), ми отримуємо:

$$\omega_{кр}^2 R (\sin\alpha + f_{mp} \cos\alpha) = g (\cos(\alpha + \beta) + f_{mp} \sin(\alpha + \beta)) \quad (2.14)$$

Враховуючи тертя між матеріалом та витком спіралі, а також кут нахилу витка спіралі та кут нахилу труби, можна розрахувати критичну частоту обертів за більш точною формулою.

$$\omega_{кр} = \sqrt{\frac{g \sin(\alpha) - f_{тр} * g \cos(\theta)}{R * f_{тр} * \cos(\theta)}}, \quad (2.15)$$

де $\omega_{кр}$ – критична частота обертання труби (радіани/сек);

g – прискорення вільного падіння (m/s^2);

$\theta = \alpha \pm \beta$ – сума або різниця кутів нахилу труби та витка спіралі відповідно;

$f_{тр} = f_t + f_r$ – сума коефіцієнтів тертя між матеріалом, витком спіралі та трубою;

R – радіус труби, м.

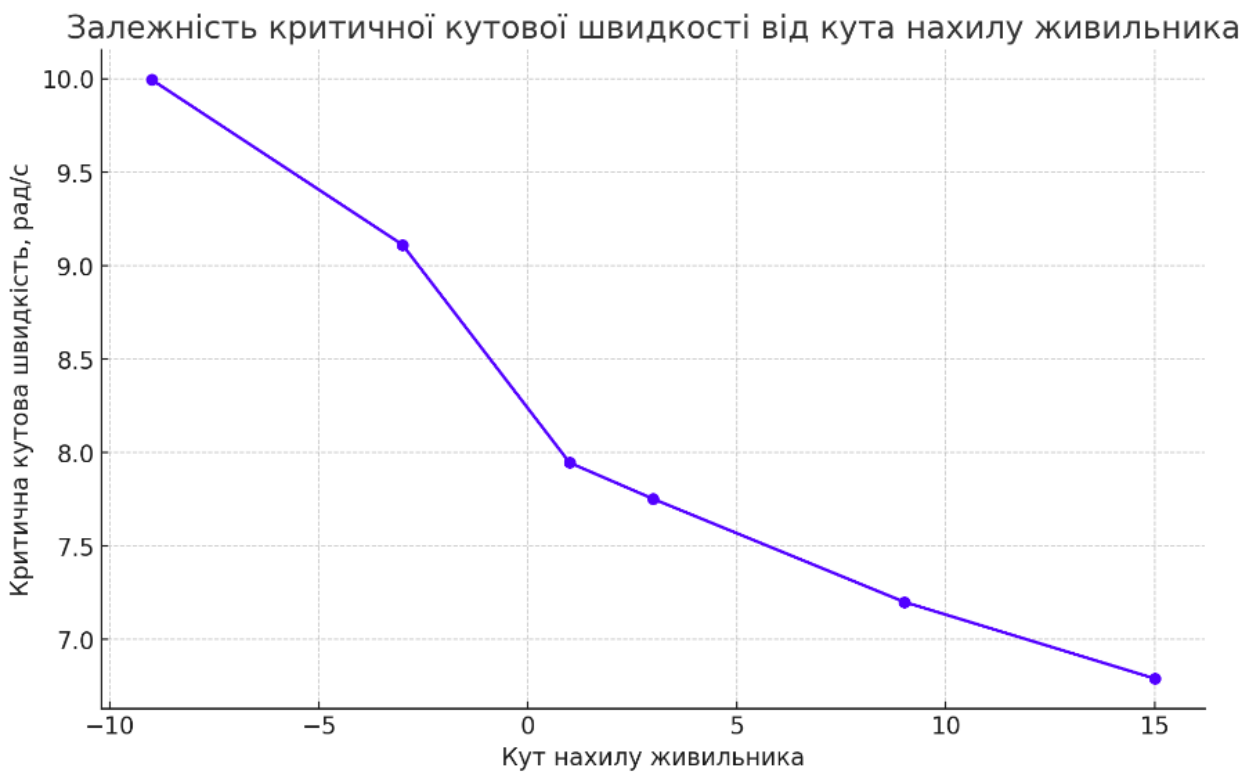


Рис. 2.4. Залежність кутової швидкості від кута нахилу живильника

2.3. Визначення енерговитрат трубчасто-гребневого живильника.

Числовим вираженням енергоємності системи є показник, який представляє собою відношення енергії, споживаної системою (сила), до величини, що

характеризує результат функціонування цієї системи (швидкість переміщення).
Класичний вираз енергоємності має вигляд добутку сили на швидкість:

$$P = F * V * t, \quad (2.16)$$

де P – затрачена потужність, Квт/год;

F – сила надана на переміщення, Н Ньютон;

V – швидкість переміщення, м/с.

t – час переміщення.

У якості сили у формулі буде використано як діючу F_p . Швидкість доцільно виразити через критичну частоту обертання робочого елемента:

$$V = \frac{n_{кр} * d * \pi}{10^3} \quad (2.17)$$

Для визначення енергозатрат трубчасто-гребневого живильника рівняння матиме такий вигляд:

$$P = n_{кр} * \pi * F_p * d * 10^{-3} \quad (2.18)$$

Таблиця 2.1

Енергозатрати в трубчасто-гребневому живильнику

ω – рад/с	F_p - Н Ньютон	Кут нахилу живильника $\alpha, ^\circ$	Енергозатрати P, Вт/год
3.454	0,065	5	0,000336765
5.758	0,087	7	0,000751245
10.996	0,12	10	0,0019782
13.918	0,144	13	0,003006864
16.336	0,16	15	0,00391872

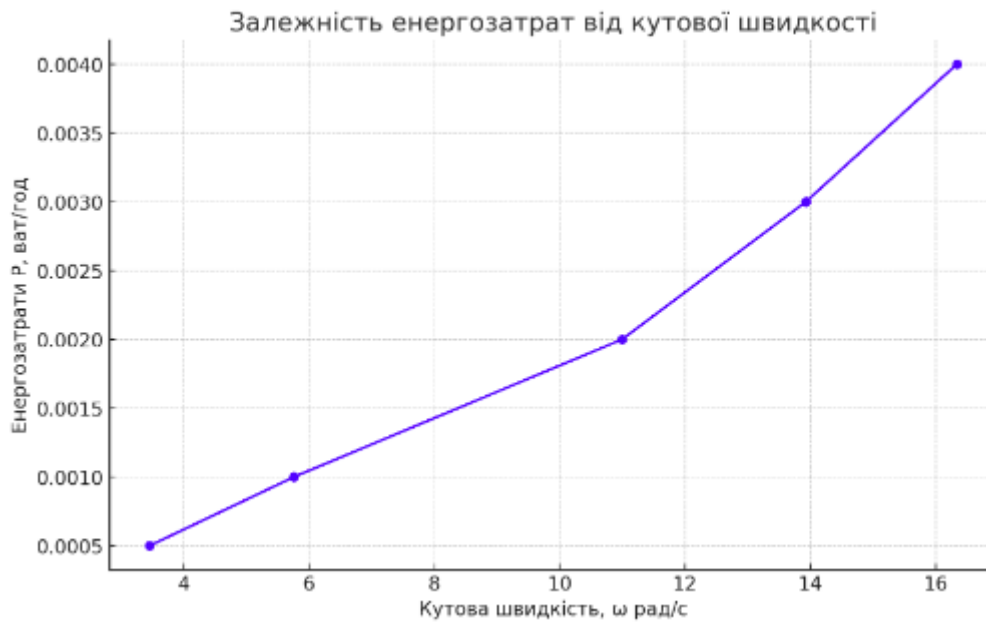


Рис. 2.5. Графік залежності потужності від кількості обертів для транспортування однієї частинки сипкого матеріалу в трубчасто-гребневому живильнику

З графіка можна сформулювати висновок, що мінімальні витрати енергії для транспортування однієї частинки сипкого матеріалу досягаються при 55 обертах на хвилину робочого елемента трубчасто-гребневого дозатора.

2.4. Визначення конструктивних параметрів та продуктивності трубчасто-гребневого живильника для сипких матеріалів.

У дослідженні враховуються такі чинники, як фізичні властивості сипкого матеріалу та кут нахилу транспортуючого механізму. Визначення оптимальної довжини труби живильника ґрунтується на аналізі взаємодії сипкого матеріалу з конструкцією труби і гребнів у ній.

Відомо, що існує залежність між параметрами робочих елементів живильника і швидкістю транспортування сипких матеріалів у ньому. Ця залежність обумовлена багатьма чинниками, зокрема: фізико-механічними властивостями сипкого

матеріалу, робочими параметрами живильника (швидкість обертання транспортуючого механізму), а також розмірами транспортувального елемента (довжина й діаметр труби).

Продуктивність живильника визначається із швидкості виходу сипкого матеріалу з труби та загальної маси.

$$Q' = v \cdot m, \quad (2.19)$$

де m – масова витрата (масовий потік) матеріалу, кг/с,

v – швидкість матеріалу в живильнику, м/с,

Для визначення площі поперечного перерізу труби, заповненої матеріалом на виході з живильника, необхідно визначити, як саме розподіляється сипкий матеріал вздовж труби з гребнями.

У статичному режимі розподіл сипкого матеріалу в трубі залежить від кута природного укосу.

Кут природного укосу α — це найбільший кут нахилу, який може утворюватися укосом вільно насипаного сипкого матеріалу в стані рівноваги з горизонтальною площиною. Кут залежить від багатьох чинників, таких як шорсткість і форма частинок, вологість, гранулометричний склад, густина і насипна щільність матеріалу. Він може змінюватися залежно від умов і характеристик сипкого матеріалу.

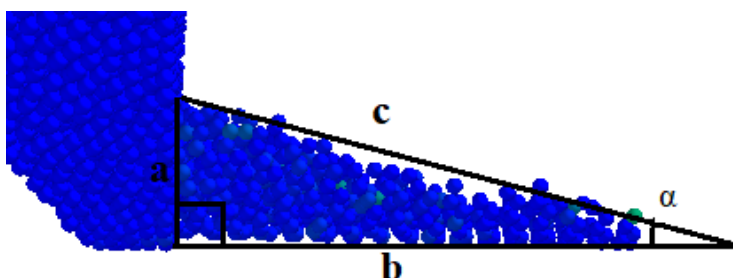


Рис. 2.6. Розподілення сипкого матеріалу в трубі живильника

Для визначення кількості частинок, що перебувають у кінцевій точці розподілення, необхідно вивести залежність між діаметром труби та її довжиною. Виходячи з того, що кут природного укосу є табличним значенням, довжина труби визначається як:

$$b = \frac{a}{\tan(\alpha)}, \quad (2.20)$$

де b – довжина труби живильника, L м;

α – кут природного укосу сипкого матеріалу;

a – діаметр труби живильника, D м;

Залежність цих величин зображено на рисунку 2.7.

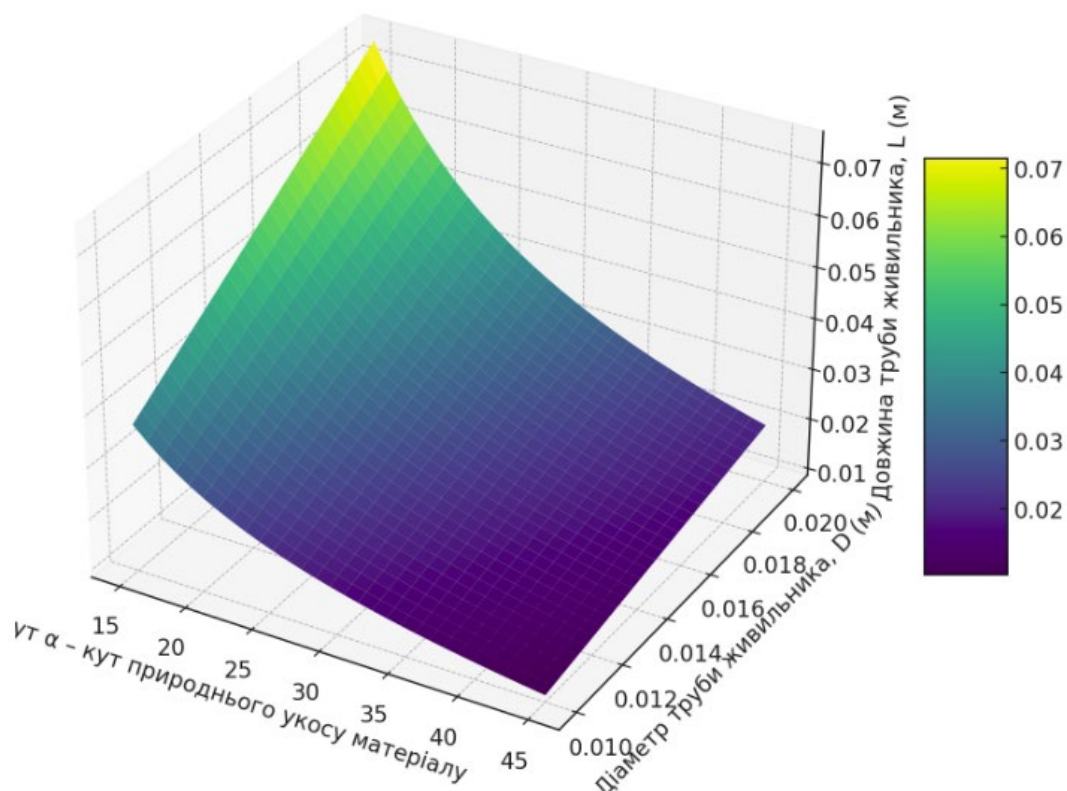


Рис. 2.7. Поверхня залежності величин між кутом природного укосу діаметром та довжиною труби

Взаємозв'язок між довжиною та діаметром труби живильника для певного сипкого матеріалу дає змогу встановити об'єм сипкого матеріалу, який заповнює

поперечний переріз труби в кінцевій точці розподілу при наявності одного шару матеріалу.

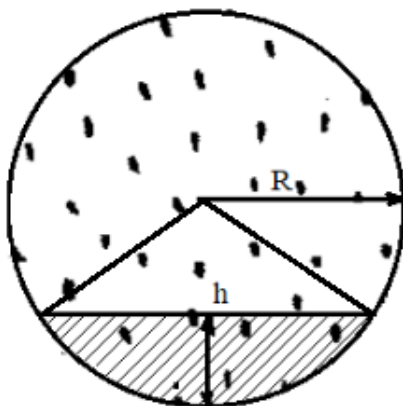


Рис. 2.8. Висота заповнення сипкого матеріалу при одному шарі в перерізі труби

Для визначення маси сипкого матеріалу, що виходить із живильника, обчислюється площа, яку займає сипкий матеріал на витку в трубці. Для цього використовується класична формула для знаходження площі сегмента кола. [39]:

$$S = \frac{1}{2} r^2 (\theta - \sin(\theta)), \quad (2.21)$$

де S – площа сектора;

r – радіус кола;

θ – міра кута в секторі.

Радіус кола визначається з довжини витка спіралі оскільки в проєкції сипкий матеріал займає меншу площу ніж є насправді.

$$r = \frac{L_B}{2\pi}, \quad (2.22)$$

Де L_B – довжина витка спіралі що контактує з сипким матеріалом.

Звідси θ буде дорівнювати [39]:

$$\theta = 2 \arccos\left(1 - \frac{h}{2r}\right), \quad (2.23)$$

де h – висота одного шару сипкого матеріалу.

Радіус кола визначається з довжини витка спіралі оскільки в проєкції сипкий матеріал займає меншу площу ніж є насправді.

$$r = \frac{L_B}{2\pi} \quad (2.24)$$

Де L_B – довжина витка спіралі що контактує з сипким матеріалом.

Врахувавши формулу 9 площі сегмента поперечного перерізу труби обраховано загальну масу частинок між витками:

$$m = \frac{S}{S_q} * \frac{L_B}{d_q} * m_q, \quad (2.25)$$

де S_q – площа однієї частинки сипкого матеріалу;

$\frac{L_B}{d_q}$ – відношення, відстані між витками L_B до діаметра однієї частинки d_q ,

яке буде враховувати наповненість простору між витками;

m_q – маса однієї частинки сипкого матеріалу.

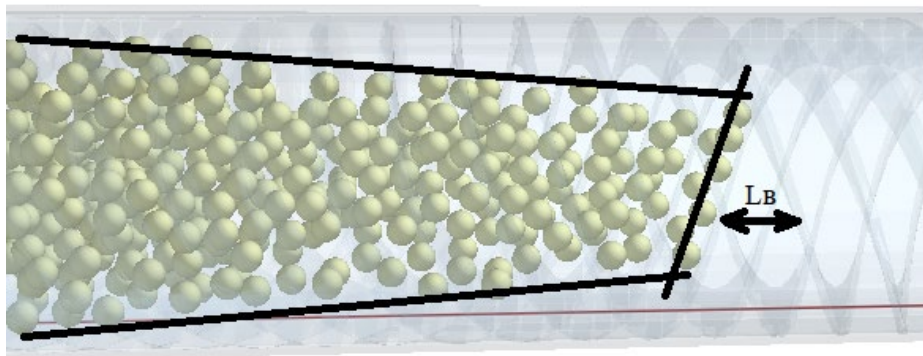


Рис. 2.9. Розподіл сипкого матеріалу на витках в трубі

Швидкість, з якою один шар сипучого матеріалу виходить з труби, залежить від кількості витків і частоти обертів труби за умови, що забезпечується така швидкість, при якій матеріал не прилипає до стінок труби.

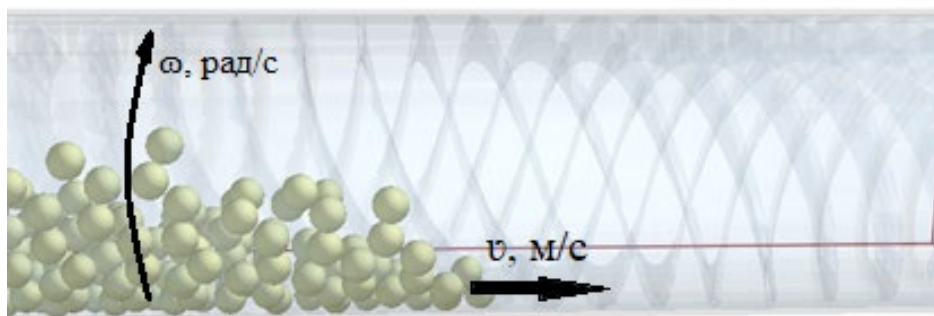


Рис. 2.10. Рух сипкого матеріалу в трубі

$$v = \frac{\omega * 30}{\pi} * N_B, \quad (2.26)$$

де ω – кутова швидкість обертання труби, рад/с;

N_B – кількість витків.

Отже, із вище сказаного випливає, що продуктивність живильника буде дорівнювати.

$$Q = \frac{\omega * 30}{\pi} * N_B * \frac{S}{s_{ч}} * \frac{L_B}{d_{ч}} * m_{ч}, \quad (2.27)$$

Для розрахунків було визначено такі параметри сипкого матеріалу:

Таблиця 2.2

Радіус однієї частинки $d_{ч}$, м.	Насипна густина ρ кг/м ³	Кількість витків в трубі N_B , шт.	Вага однієї частинки $m_{ч}$, кг	Відстань між витками в трубі L_B , м	Діаметр труби D , м
0,0035	880	5	0,7	0,25	0,048

Результати аналітичних досліджень зображено на рис. 2.11.

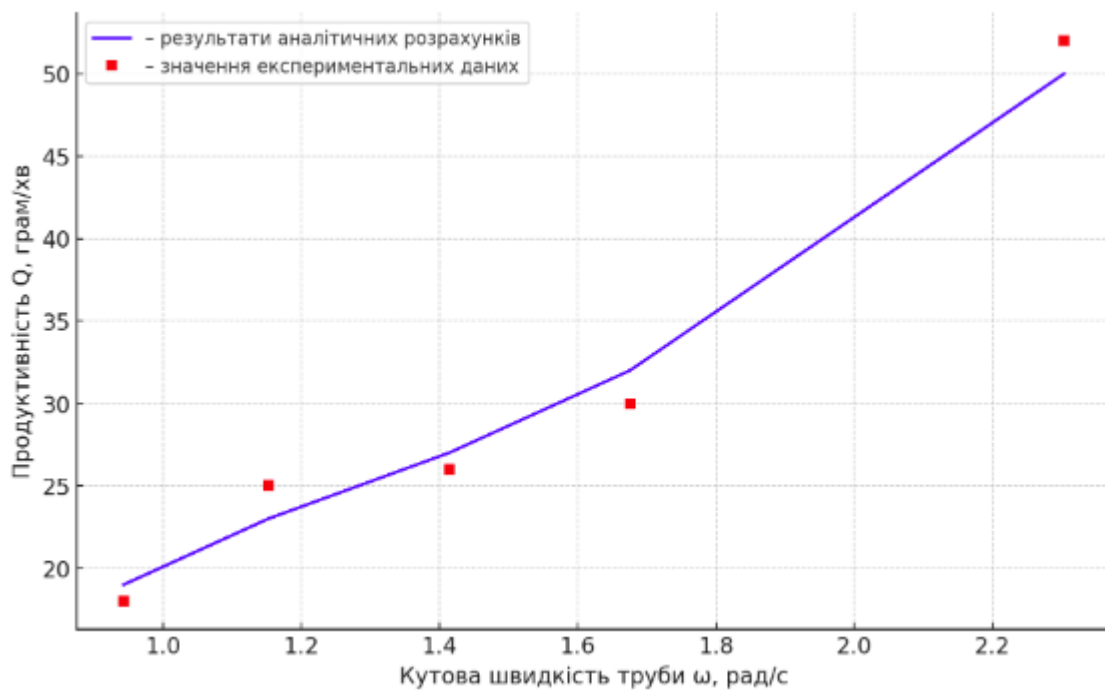


Рис. 2.11. Залежність продуктивності від кількості обертів, що зробила труба під час транспортування сипкого матеріалу:

“■” – значення експериментальних даних;

“—” – результати аналітичних розрахунків.

Отримані аналітичні та експериментальні залежності відображають характер руху сипкого матеріалу в трубі живильника і можуть використовуватися під час розробки технологічного режиму в змішувальних комплексах. У діапазоні від 0,94 до 1,67 рад/с зміна продуктивності відбувається за лінійним законом.

2.5. Аналітичне дослідження траєкторії руху частинок у робочій зоні трубно-гребневого живильника

Робочими елементом трубно-гребневого живильника (рис. 2.12), що досліджується у роботі, є труба на бічній стінці в середині якої розташовані гребні закручені по спіралі, які мають свою висоту та розташовані вздовж усієї осі труби. Під час роботи живильника частинки суміші із бункера попадають до труби, що обертається із сталою швидкістю. Процес транспортування відбувається за рахунок руху частинок матеріалу по гребнях, тобто виникає рух кочення та ковзання по

поверхні під кутом. Через те, що частинки суміші мають різні масу та форму, траєкторії їх руху можуть відрізнятись.

Для дослідження руху частинки сипкого матеріалу в робочій зоні транспортувального елемента живильника створена модель, яка припускає, що частка сипучого матеріалу рухається по гребню вздовж профілю труби (рис. 2.12), що додатково враховує фізико-механічні характеристики частинок у трубі та на виході з неї.

Цей рух можна описати як маятниковий, оскільки при обертанні труби частинка сипкого матеріалу виконує коливання, підйом на гребні після якого відбувається скочування частинки донизу. Перехід від руху догори до руху скочування відбувається коли кут тертя-ковзання зменшується, а відцентрова сила не достатня, щоб втримати частинку на стінці труби. Якщо уявити що центр профілю труби це точка на якій закріплено частинку на підвісі R то можна розрахувати траєкторію частинки, та її положення в часі (рис. 2.12)

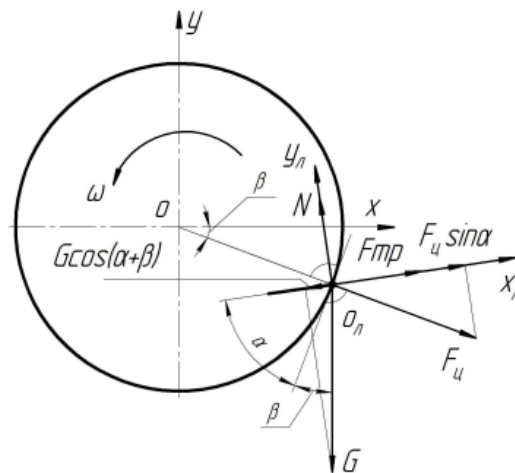


Рис. 2.12. Схема сил, що діють на частинку на бічній стінці труби

Амплітуду коливання можна визначити за рахунок максимального кута підйому частинки на витку в трубі. Висота підйому буде залежати від рівняння рівнодіючих сил:

$$-F_{\text{тр}} + g * \cos(\alpha + \beta) - F_{\text{ц}} * \cos(90 - \alpha) = 0, \quad (2.28)$$

де $F_{\text{тр}}$ – сила тертя, Н;

g – сила тяжіння, Н;

$F_{ц}$ – відцентрова сила, Н.

Силу тертя можна визначити зі співвідношення:

$$F_{тр} = N * f_{тр} , \quad (2.29)$$

де N – реакція опори;

$f_{тр}$ – коефіцієнт тертя.

Відцентрову силу можна визначити за формулою:

$$F_{ц} = m * \omega^2 * R, \quad (2.30)$$

де m – маса частинки, кг;

ω – кутова швидкість, рад/с;

R – радіус труби.

З формули кут підйому частинки сипкого матеріалу β буде визначатися із співвідношення:

$$G * \cos(\alpha + \beta) = F_{тр} + F_{ц} * \cos(90 - \alpha) \quad (2.31)$$

З урахуванням відповідних підстановок:

$$mg(\cos(\alpha + \beta)) = N * f_{тр} + m * \omega^2 * R * \sin\alpha \quad (2.32)$$

$$g(\cos(\alpha + \beta)) = \frac{N * f_{тр}}{m} + \omega^2 * R * \sin\alpha \quad (2.33)$$

Розкриваючи тригонометричну функцію $\cos(\alpha + \beta)$ отримуємо:

$$g(\cos(\alpha) * \cos(\beta) - \sin(\alpha) * \sin(\beta)) = \frac{N * f_{тр}}{m} + \omega^2 * R * \sin\alpha \quad (2.34)$$

Після переносу змінних отримаємо таке співвідношення:

$$(\cos(\alpha) * \cos(\beta) - \sin(\alpha) * \sin(\beta)) = \frac{N * f_{тр}}{mg} + \frac{\omega^2 * R * \sin\alpha}{g} \quad (2.35)$$

Виконуємо тимчасову заміну для спрощення рівняння:

$$z = \frac{N * f_{тр}}{mg} + \frac{\omega^2 * R * \sin\alpha}{g} \quad (2.36)$$

Виразимо $\cos(\beta) = \sqrt{1 - \sin^2\beta}$.

Тоді:

$$\cos(\alpha)\sqrt{1 - \sin^2\beta} = z + \sin(\alpha) * \sin(\beta) \quad (2.31)$$

Виконуємо такі перетворення:

$$\sin\beta(1 + \sin^2\alpha) + 2z * \sin\alpha * \sin\beta + \sin^2\alpha * \sin^2\beta + z^2 - 1 = 0 \quad (2.37)$$

Розв'язуємо квадратне рівняння типу:

$$ax^2 + bx + c = 0 \quad (2.38)$$

в якому коефіцієнти виражаються наступним чином:

$$a = (1 + \sin^2\alpha); \quad b = z\sin\alpha; \quad c = z^2 - 1$$

Підставляючи значення коефіцієнтів a,b та c, знаходимо корені рівняння:

$$\begin{aligned} x = \sin\beta &= \frac{-b\sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} = \frac{-z\sin\alpha \mp \sqrt{z^2\sin^2\alpha - 4(1 + \sin^2\alpha)(z^2 - 1)}}{2(1 + \sin^2\alpha)} = \\ &= \frac{-z\sin\alpha \mp \sqrt{z^2\sin^2\alpha - 4(z^2 - 1 + z^2\sin^2\alpha - \sin^2\alpha)}}{2(1 + \sin^2\alpha)} = \\ &= \frac{-z\sin\alpha \mp \sqrt{z^2\sin^2\alpha - 4z^2 - 4 + 4z^2\sin^2\alpha - 4\sin^2\alpha}}{2(1 + \sin^2\alpha)} = \\ &= \frac{-z\sin\alpha \mp \sqrt{z^2\sin^2\alpha - 3z^2\sin^2\alpha - 4z^2 + 4}}{2(1 + \sin^2\alpha)} = \\ &= \frac{-\sin\left(\frac{N * f_{\text{ТР}}}{m * g} + \frac{\omega^2 * R * \sin\alpha}{g}\right)}{2(1 + \sin^2\alpha)} \pm \\ &\pm \frac{\sqrt{4(\sin^2\alpha + 1) - (3 * \sin^2\alpha + 4\left(\frac{N * f_{\text{ТР}}}{m * g} + \frac{\omega^2 * R * \sin\alpha}{g}\right)^2}}{2(1 + \sin^2\alpha)} \end{aligned} \quad (2.39)$$

$$\beta = \arcsin \frac{\sin\left(\frac{N * f_{\text{ТР}}}{m * g} + \frac{\omega^2 * R * \sin\alpha}{g}\right) \pm \sqrt{4(\sin^2\alpha + 1) - (3 * \sin^2\alpha + 4\left(\frac{N * f_{\text{ТР}}}{m * g} + \frac{\omega^2 * R * \sin\alpha}{g}\right)^2}}{2(1 + \sin^2\alpha)} \quad (2.40)$$

Сектор коливання δ в трубі буде дорівнювати:

$$\delta = 45 \pm \beta \quad (2.41)$$

Оскільки тепер відома амплітуда коливання необхідно визначити час одного коливання та їх кількість залежно від обертів транспортувального елемента та його технічних параметрів.

Оскільки розглядається змішаний рух частинок сипкого матеріалу підйом та падіння, таку характеристику як час підйому та час падіння також необхідно розділяти.

$$t_p = t_{\text{під}} + t_{\text{пад}}, \quad (2.42)$$

де t_p – загальний час одного коливання частинки в трубі, с;

$t_{\text{під}}$ – час за який частинка підіймається від мінімальної точки в трубі до моменту падіння або скочування по гребню, с;

$t_{\text{пад}}$ – час за який частинка сипкого матеріалу проходить відстань від початку свого скочування до початку нового підйому, с.

Звідси $t_{\text{під}}$ буде залежати від кутової швидкості обертів труби ω та сектора підйому δ

$$t_{\text{під}} = 1 / \left(\frac{\omega}{\delta \cdot \frac{\pi}{180}} \right) \quad (2.43)$$

Час скочування можна визначити знаючи сектор підйому δ відстань від точки початку руху та точки зупинки.

Оскільки рух у проекції – це рух частинки, що спускається по витку відбувається у півсфері, цей рух можна спростити до руху по похилій площині (рис. 2.13).

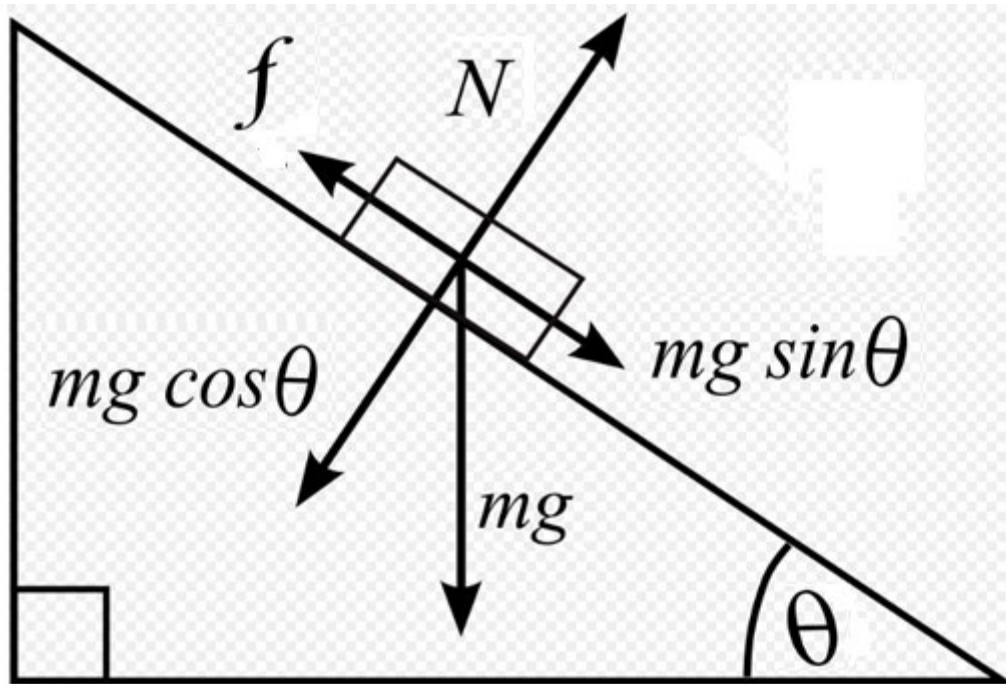


Рис. 2.13. Рух тіла по похилій площині

Час руху тіла t що сповзає по площині буде дорівнювати:

$$t = \sqrt{\frac{s}{a}}, \quad (2.44)$$

де s – шлях який пройде частинка сипкого матеріалу, м;

a – прискорення частинки, м/с^2 .

Оскільки замкнутий виток гребня в трубі має більший діаметр, то шлях, який проходить частинка сипкого матеріалу s буде дорівнювати:

$$s = \frac{2\pi r_B \delta}{360}, \quad (2.45)$$

де $r_B = \frac{L_B}{2\pi}$ радіус який утворює виток спіралі.

Прискорення частинки a можна визначити:

$$a = g(\sin\theta - \mu\cos\theta) \quad (2.46)$$

Де, θ кут нахилу витка спіралі.

Кінцева формула часу одного повного коливання сипкого матеріалу матиме вигляд:

$$t_p = \frac{1}{\frac{\omega}{\delta \cdot \frac{\pi}{180}}} + \sqrt{\frac{s}{a}} \quad (2.47)$$

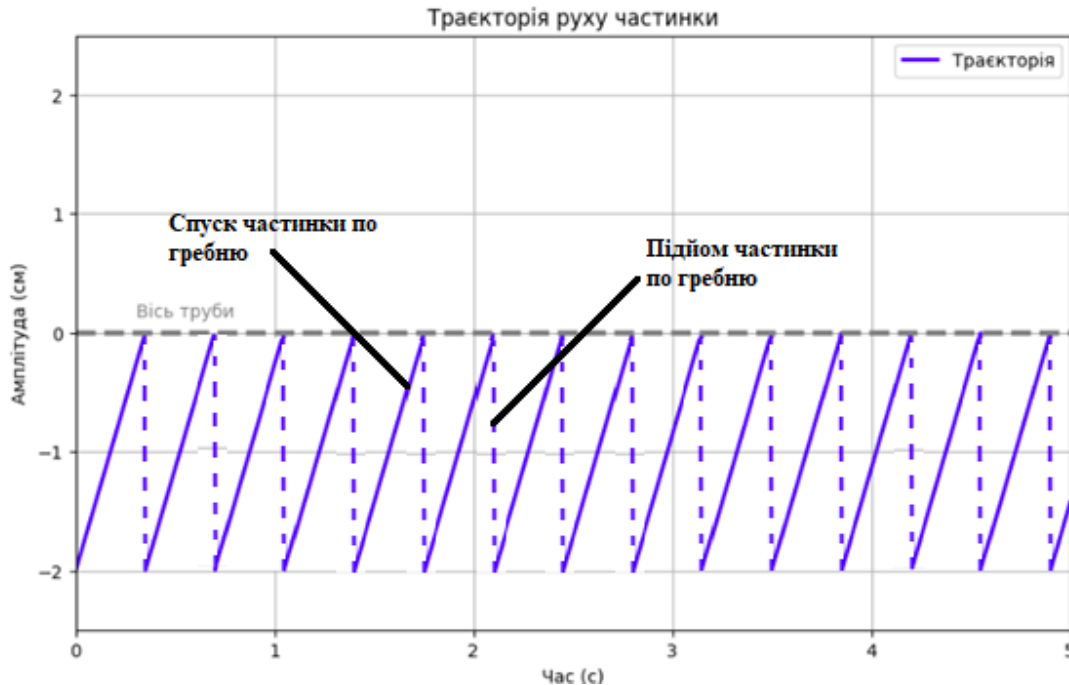


Рис. 2.14. Проекція руху частинки сипкого матеріалу на витках в трубчато-гребневому живильнику

У Додатку А наведено програму для чисельного рішення системи диференціальних рівнянь, що дає можливість змінювати швидкість обертання робочого елемента, його кут нахилу, коефіцієнт тертя та початкове положення частинки суміші. Про моделюємо траєкторію руху частинки суміші у трубці з гребнями. На рис. 2.15 показано траєкторії руху частинки суміші в залежності від частоти обертання ω труби для однакових початкових умов.

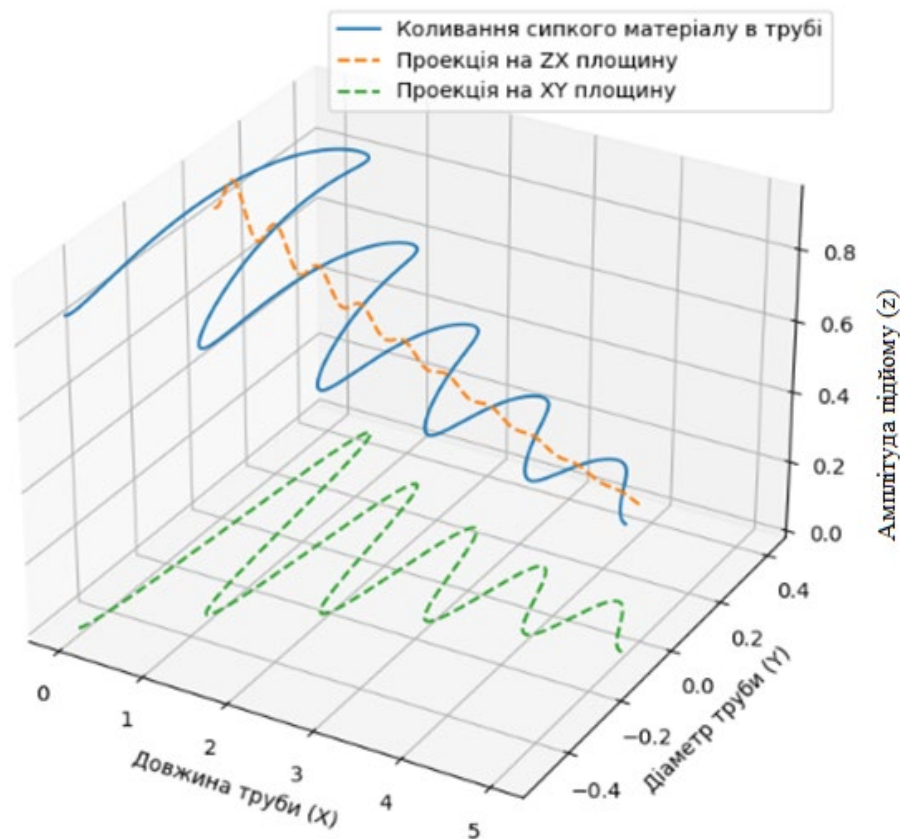


Рис. 2.15. Траєкторії руху частинок. При умовах $\omega = 6 \text{ c}^{-1}$, $x_0 = R_0$, $y_0 = 0$, $z = 0$.

Результати моделювання свідчать, що частинка суміші рухається за маятниковою траєкторією. У загальному випадку кількість витків, їх висота та форма визначається характеристиками матеріалу. При збільшенні частоти обертання ω в два рази кількість витків спіралі збільшується також у два рази, що впливатиме на довжину траєкторії руху частинки та час її перебування у роторі.

Аналіз результатів моделювання свідчить, що форма траєкторії руху частинки суттєво залежить від робочих параметрів живильника, а саме частоти обертання. Таким чином, забезпечення різних початкових параметрів робочих елементів дає можливість створити рух частинок з різною амплітудою відхилення, та, відповідно, інтенсифікувати процес руху сипкого матеріалу.

2.6. Дослідження роботи систем керування дозувальним обладнанням безперервної дії з «ПІ» та «ПІД» регуляторами

ПІ- та ПІД-регулятори досить широко використовуються для роботи на стійких та нейтральних об'єктах, коли статичне відхилення має дорівнювати нулю. Показники якості перехідного процесу покращуються збільшенням коефіцієнта підсилення регулятора. Актуальність дослідження полягає в інтеграції таких регуляторів у систему керування живильниками безперервної дії, зокрема у вузли, де використовуються двигуни. Це дасть змогу зменшити кількість пульсацій у системі транспортування та підвищити якість перехідних процесів завдяки якісному зворотному зв'язку, що позитивно вплине на кінцеву якість продукту.

На сьогодні широке застосування в промисловості отримали ПІ- та ПІД-регулятори. Значна частина всіх комплексів у промисловості використовує саме такі регулятори. Тому метою цієї роботи є оцінка впливу регуляторів та доцільність їх використання в системі керування трубчасто-гребневим живильником.

$$Y(t) = K_p \cdot e + \frac{1}{T_i} \int edt \quad (2.48)$$

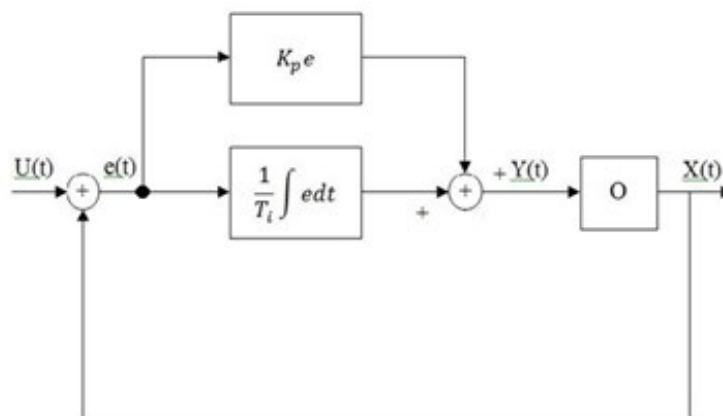


Рис. 2.16. Диференціальне рівняння та математична модель ПІ-регулятора

Пропорційно-інтегральний (ПІ) регулятор. Регулятори, що працюють за цим законом, виконують переміщення регулюючого органу пропорційно сумі відхилення

та інтеграла від відхилення регульованої величини. Таким чином, вони здійснюють як пропорційний (П), так і інтегральний (І) вплив.

$$Y(t) = K_p e + \frac{1}{T_i} \int e dt + T_d \frac{de}{dt} \quad (2.49)$$

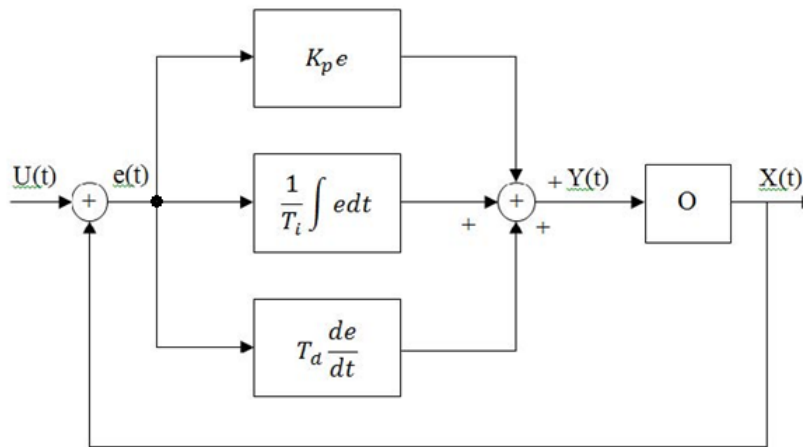


Рис. 2.17. Диференціальне рівняння та математична модель ПІД-регулятора

Пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор формує керуючий сигнал, який є сумою трьох складових. Перша складова пропорційна різниці вхідного сигналу та сигналу зворотного зв'язку (П) – це сигнал неузгодженості. Друга складова – інтеграл (І) сигналу неузгодженості, а третя складова – це похідна (Д) сигналу неузгодженості.

У якості об'єкта керування та дослідження в системі живильника використовується двигун постійного струму. Переваги використання такого двигуна:

- простота будови та управління;
- практично лінійні механічні і регульовальні характеристики двигуна;
- легкість регулювання частоти обертання;
- хороші пускові властивості (великий пусковий момент).

Для проведення досліджень використано двигун постійного струму, типову математичну модель (Додаток Б), до якої додано регулятор. ПІ- та ПІД- регулятори використані для керування продуктивністю та кутовою швидкістю двигуна.

$$w(p) = (\omega_{зд}(p) \cdot \left(-(P + U_{зд}) \left(\left(\left(\frac{1}{T_{я} \cdot p + 1} \cdot K_{ем} - M_c \right) \cdot \left(\frac{1}{J \cdot p} \right) \right) \cdot K_{ем} \right) + \left(\left(\frac{1}{T_{я} \cdot p + 1} \cdot K_{ем} - M_c \right) \cdot \left(\frac{1}{J \cdot p} \right) \right) \right) \right) \quad (2.50)$$

Вузол керування продуктивністю живильника був заміщений ПІ-регулятором для спрощення експерименту. У ньому пропорційна та інтегральна складові виконують роль мікроконтролера, який задає відсоткову величину продуктивності живильника, та сервоприводу. Тензодатчик у цій схемі використовується для забезпечення сигналу зворотного зв'язку.

На рис. 2.18. зображено математичну модель вузла керування продуктивністю:

$$P(w) = K_p \cdot e + \frac{1}{T_i} \int edt \quad (2.51)$$

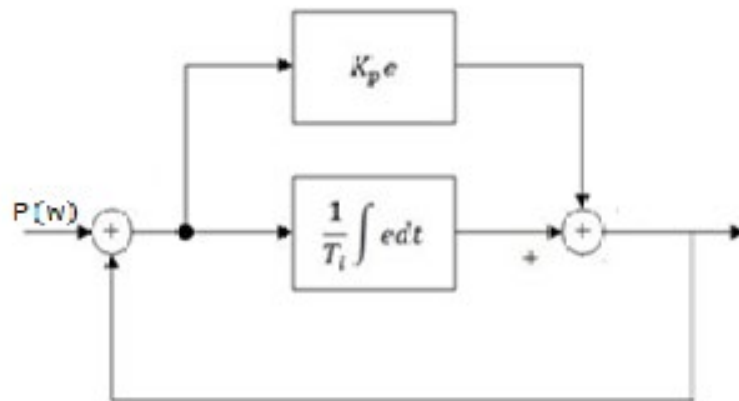


Рис. 2.18. Матиматична модель вузла керування продуктивністю живильника.

На основі раніше наведених математичних моделей була зібрана модель у середовищі Simulink (рис. 2.19). До її складу входять математичні моделі: ПІ та ПІД-

регуляторів, двигуна постійного струму, та вузла керування продуктивністю живильника.

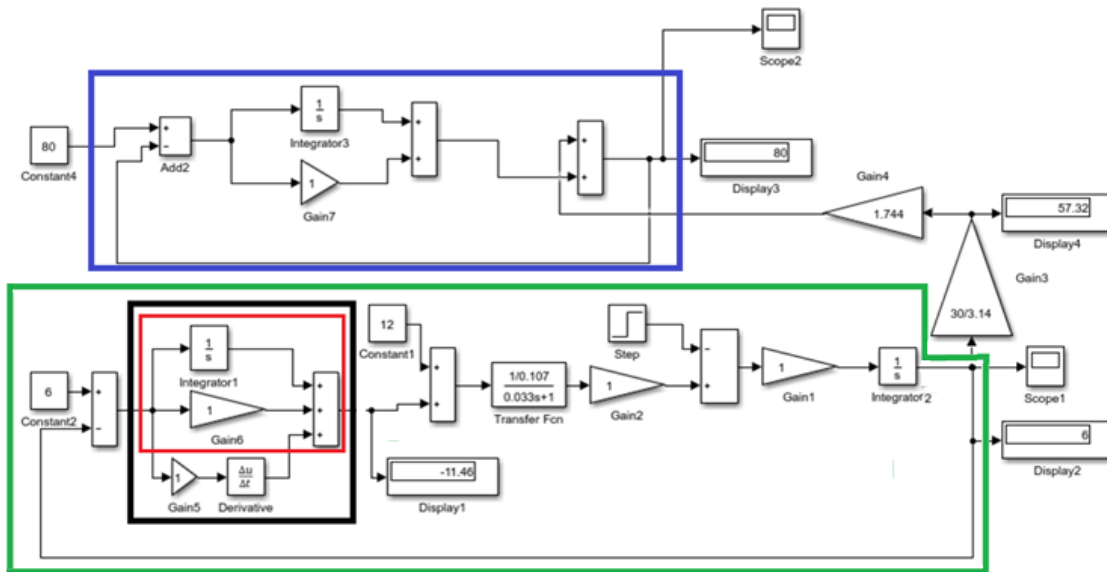


Рис. 2.19. Математична модель системи керування трубчасто-гребневим живильником безперервної дії в системі Simulink

Диференціальне рівняння загального виду охоплює рівняння ПІД-регулятора для керування двигуном, рівняння самого двигуна, а також рівняння ПІ-регулятора, який відповідає за продуктивність системи.

$$\begin{aligned}
 P_{вих}(p) = (\omega_{зд}(p) \cdot \left(- \left(\left(K_{pe} + \frac{1}{T_e} \cdot \int ed + T_d \cdot \frac{de}{dt} \right) + U_{зд} \right) \left(\left(\left(\frac{1}{T_{я} \cdot p + 1} \cdot K_{ем} - M_c \right) \cdot \left(\frac{1}{J \cdot p} \right) \right) \cdot K_{ем} \right) + \left(\left(\frac{1}{T_{я} \cdot p + 1} \cdot K_{ем} - M_c \right) \times \left(\frac{1}{J \cdot p} \right) \right) \right) + K_1 + K_2) + ((P_{зд} + \\
 (K_{pe} + \frac{1}{T_i} \int edt) - (\omega_{зд}(p) \cdot \left(- \left(\left(K_{pe} + \frac{1}{T_e} \cdot \int ed + T_d \cdot \frac{de}{dt} \right) + U_{зд} \right) \left(\left(\left(\frac{1}{T_{я} \cdot p + 1} \cdot K_{ем} - M_c \right) \cdot \left(\frac{1}{J \cdot p} \right) \right) \right) \right)
 \end{aligned}$$

$$M_c) \left(\frac{1}{J \cdot p} \right) \times K_{em} \right) + \left(\left(\frac{\frac{1}{R}}{T_{я \cdot p+1}} \cdot K_{em} - M_c \right) \cdot \left(\frac{1}{J \cdot p} \right) \right) + K_1 + K_2) + (K_{pe} + \frac{1}{T_i} \int edt) , \quad (2.52)$$

де $\omega_{зд}$ – задана кутова швидкість, рад/с;

K_{pe} – пропорційна складова регулятора;

$\frac{1}{T_e} \cdot \int ed$ – інтегральна складова регулятора;

$T_d \cdot \frac{de}{dt}$ – диференціальна складова регулятора;

$U_{зд}$ – задана напруга двигуна, В;

$\frac{\frac{1}{R}}{T_{я \cdot p+1}}$ – складова рівняння яка відповідає за загальний опір двигуна;

K_{em} – номінальний магнітний потік, Вб;

M_c – статичний момент опору на валу двигуна, Ом;

$\left(\frac{1}{J \cdot p} \right)$ – інтеграл для отримання кутової швидкості;

K_1, K_2 – коефіцієнти трансформації сигналу.

Модель Simulink складається з моделі двигуна помтійного струму, яка знаходиться в полі зеленого кольору (рис. 2.19). До неї входить блок Constant1, який відображає робочу напругу двигуна, блок Transfer fcn, що відповідає за моделювання струму якоря двигуна, а також блок Integrator, використаний для отримання на виході кутової швидкості, яка буде виступати в якості зворотного зв'язку для регуляторів. Частота обертів двигуна контролюється одним із двох регуляторів: ПІ-регулятором, виділеним червоним квадратом, що складається з блоків Integrator (інтегральна складова) та Gain 6 (пропорційна складова), та ПІД-регулятором, що має додаткову диференційну ланку, яка складається з двох послідовно ввімкнених блоків Gain та Derivative. Цей регулятор виділено чорним

квадратом на рис. 2.19. На вхід регуляторів подається різниця між заданою кутовою швидкістю в блоці Constant 2 та кутовою швидкістю на виході з двигуна.

У блоці Display 2 відображено поточну величину кутової швидкості. У Score 1 можна бачити криві перехідного процесу старту двигуна. Блок Step зображує величину навантаження на двигун, що виникає, коли кількість сипкого матеріалу збільшується в трубі живильника.

Верхня частина моделі, що знаходиться в полі синього прямокутника, відповідає за продуктивність живильника за допомогою блоку Constant 4 у відсотках. Вона складається з ПІ-регулятора, зворотний зв'язок якого здійснюється за допомогою різниці між сигналом з тензодатчика та заданою величиною продуктивності. Ця величина залежить від кількості сипкого матеріалу, який потрапляє з труби живильника на формувач потоку, та заданого сигналу з пристрою керування. Блоки Display 3 та 4 відображають поточні значення продуктивності живильника у відсотках та кількості обертів двигуна за хвилину відповідно. Блок Score 2 показує криву потоку сипкого матеріалу у відсотках.

Для визначення величини впливу регуляторів на систему проведено експериментальне дослідження на моделі в середовищі Simulink. Першою частиною експерименту є дослідження впливу регуляторів на криву перехідної характеристики при роботі системи в холостому режимі, тобто без навантаження. Наступним кроком є фіксування часу перехідного процесу і подачі додаткового навантаження на вал. У стенді цим навантаженням виступає сипкий матеріал. Дослід повторювався для двох заданих регуляторів. Результати досліджень зображено на рис. 2.20.

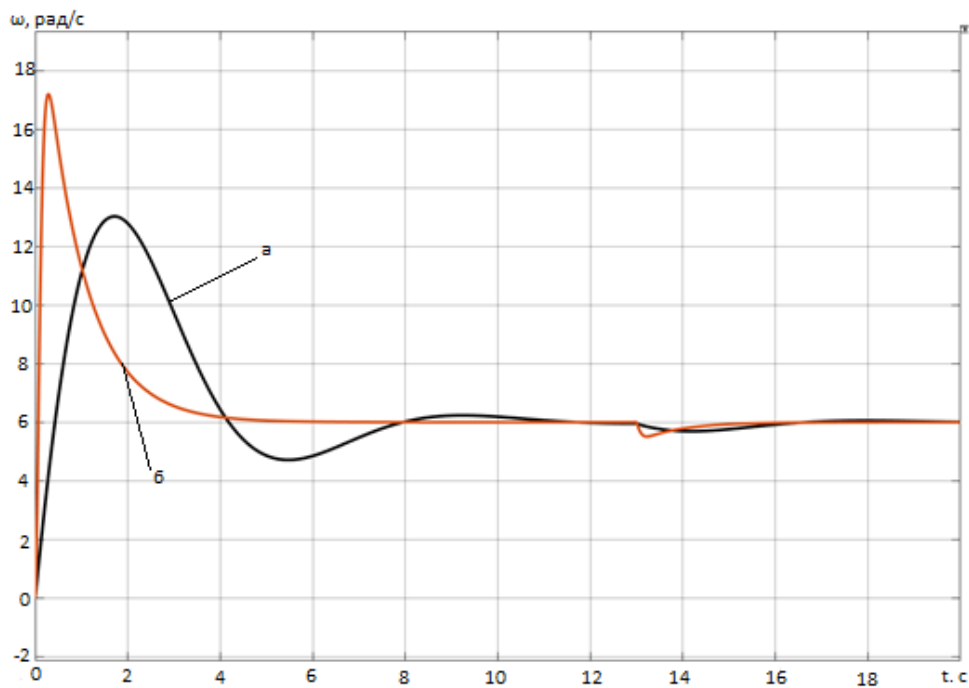


Рис. 2.20. Перехідна характеристика кутової швидкості двигуна.
 а) крива перехідного процесу з використанням ПД-регулятора;
 б) крива перехідного процесу з використанням ПІ-регулятора.

При використанні ПІ-регулятора:

- час перехідного процесу при старті двигуна $T_{пер}=6$ с;
- максимальне динамічне відхилення від заданого значення $\omega_{від}=17$ рад/с;
- час перехідного процесу експерименту $t_{екс}=2.5$ с;
- максимальне відхилення від заданого значення $\omega_{екс}=0.48$ рад/с.

При використанні ПД-регулятора:

- час перехідного процесу при старті двигуна $T_{пер}=11$ с;
- максимальне динамічне відхилення від заданого значення $\omega_{від}=13$ рад/с;
- час перехідного процесу експерименту $t_{екс}=7$ с;
- максимальне відхилення від заданого значення $\omega_{екс}=0.31$ рад/с;

З отриманих кривих можна оцінити вплив диференціальної ланки на перехідну характеристику ПД-регулятора. Максимальне відхилення від заданого значення менше, ніж при використанні ПІ-регулятора, але час перехідного процесу майже

вдвічі довший. Це обумовлено тим, що реалізація ідеальної диференціальної ланки неможлива, оскільки величина сплеску вихідного сигналу при подачі одиничного ступінчастого впливу на вхід завжди обмежена. На практиці використовуються реальні диференціюючі ланки, які здійснюють наближене диференціювання вхідного сигналу.

Висновки до розділу 2

1. Запропоновано конструкцію трубчасто-гребневого живильника в якому гребні розміщуються на внутрішній стінці труби та розроблено математичні моделі, що дають можливість прогнозувати траєкторію руху сипкого матеріалу в середині транспортувального елемента.

2. Розроблено математичні моделі залежності руху частинок всередині живильника від геометричних параметрів транспортувального органу запропонованої конструкції, критичної частоти обертів, взаємного розташування, форми корпусу живильника.

3. Встановлено, що розміщення гребнів на бічній стінці труби у живильнику уможлиблює розподіл суміші на порції, що дає можливість поліпшити прогнозування якості та об'єму транспортованих сипких матеріалів.

4. Розроблено модель, що дає змогу прогнозувати масові витрати живильника запропонованої конструкції залежно від фізико-механічних параметрів сипкого матеріалу. Точність даних такої моделі порівняно з експериментальними в межах 10%.

5. Розроблено математичну модель зворотних зв'язків з ПІ- та ПІД-регуляторами, для інтегрування в систему керування живильником.

6. Використання таких регуляторів у вузлах сприятиме значному зменшенню кількості пульсацій у системі транспортування сипких матеріалів.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ У ТРУБЧАСТО-ГРЕБНЕВОМУ ЖИВИЛЬНИКУ

3.1. Засоби та методи експериментальних досліджень.

3.1.1. Опис експериментальної установки.

Дослідження проведено за допомогою експериментального стенду. Він складається з бункера до якого надходять сипкий матеріал, труби з гребнями, формоутворювача, редуктора, двигуна постійного струму, мікроконтролера, датчика ваги та вологи матеріалу, що входить та виходить з живильника. Структурну схему трубчато-гребневого живильника зображено на рис. 3.1. Конструкція живильника дає можливість змінювати трубу, що уможливорює дослідження процесу транспортування сипкого матеріалу за різних конструктивних параметрів транспортувального елемента. Під час експериментів фіксувалась продуктивність живильника за допомогою датчика ваги, який передавав сигнали на мікроконтролер, а також вимірювався час проходження матеріалу через живильник.

Момент від двигуна передається на транспортувальний елемент через конічний зубчастий редуктор. Така конструкція дає можливість плавно регулювати швидкість обертання транспортувального елемента і, у випадку додаткового навантаження в трубі, зменшувати пульсації під час обертання за рахунок моменту. Визначення потужності, що споживається живильником, здійснювалось за допомогою часономера.

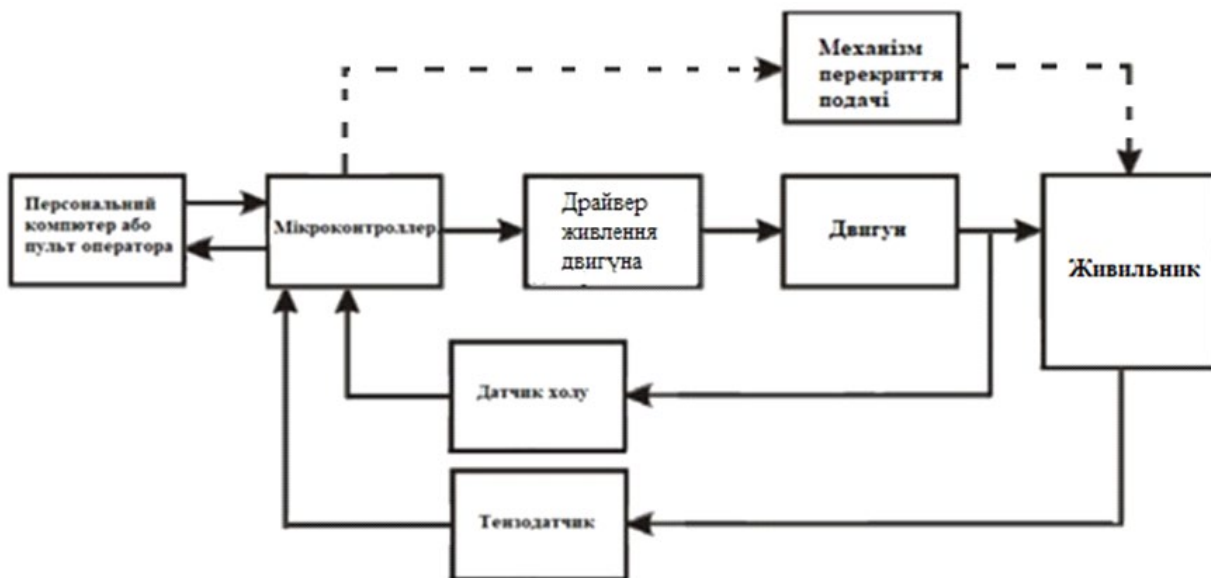


Рис. 3.1. Структурна схема дослідної установки

Основною функцією системи є забезпечення автоматичної корекції дозування матеріалу відповідно до його заданої рецептури. Вона відрізняється тим, що має додаткову ланку керування механізмом перекриття подачі, яка зупиняє надходження суміші з робочого елемента живильника до формувача потоку суміші. Вхід цього механізму через підсилювач потужності під'єднаний до схеми порівняння сигналів компенсації вимірювача ваги.

Система містить мікроконтролер (рис. 3.1), який задає частоту обертів двигуна через драйвер живлення і також контролює положення механізму перекриття подачі суміші. Зміна положення механізму може здійснюватися з робочої панелі або в автоматичному режимі. Для забезпечення якості транспортування у якості зворотного зв'язку використовується датчик Холла та тензодатчик, сигнали з яких порівнюються для корекції частоти обертів двигуна робочого елемента живильника.

Пристрій працює таким чином: різниця напруги між тензодатчиком і заданим значенням ваги через підсилювач потужності подається на вхід двигуна, що перетворює електричний сигнал у механічний обертальний рух. У разі виникнення утворення, що може вплинути на якість роботи двигуна, передбачено датчик Холла на валу двигуна, напруга з якого порівнюється з заданим значенням. Механізм

перекриття живильника спрацьовує тоді, коли дозатор потрібно вимкнути або коли задана вага суміші досягнута.

3.1.2. Вибір робочого середовища для проведення експериментальних досліджень

Основними характеристиками сипких матеріалів є такі параметри, як насипна вага, гранулометричний склад, коефіцієнти внутрішнього та зовнішнього тертя, діелектрична проникність і багато інших. Ці величини мають суттєвий вплив як на властивості готового продукту, так і на вимоги до технологічного обладнання, що використовується для виготовлення композиції.

Наукове дослідження спрямоване на вивчення механізму взаємодії сипкого матеріалу з робочими елементами живильника. Основною метою експерименту є встановлення транспортних характеристик живильника, зокрема впливу кута нахилу дозатора та швидкості обертання на процес переміщення матеріалу через трубу. Дослідження передбачає встановлення кута дозатора та частоти обертання дозуючого елемента, та їх впливу на якість транспортування сипкого матеріалу.

При проведенні досліджень використовувався рублений гранулянт гуми SBR з розміром частинки 3–6 мм (насипна густина – 660 кг/м³).

Розміри частинок компонентів суміші обиралися відповідно до параметрів дослідної установки.

Щодо проведення експерименту з різними умовами (наприклад, кутами нахилу та частотами обертання), цей метод дає можливість розглянути різні сценарії роботи живильника та визначити їх вплив на продуктивність. Після проведення експериментів можна проаналізувати отримані дані і зробити висновки щодо ефективних умов роботи трубчасто-гребневого живильника.

Частота обертів робочого елемента живильника змінювалася в діапазоні від 10 до 60 обертів на хвилину, кут нахилу від 0 до 15 градусів.

Такий вибір параметрів уможливив отримання широкого обсягу даних, щоб досягти повноти та багатогранності експериментального дослідження трубчато-гребневого живильника за різних умов роботи. За таких умов можна провести систематичні спостереження та аналіз для визначення ефективних параметрів роботи живильника з точки зору продуктивності.

3.3. Визначення потужності, що споживається живильником при різних режимах роботи

Дослід проводився наступним чином. До бункеру завантажуються матеріал. Кутова швидкість обертання живильника поступово збільшувалась. Ця швидкість обертання буде не достатньою для того, щоб частинки сипкого матеріалу притиснулися до стінки труби та оберталися разом з нею за рахунок відцентрової сили. Критичну швидкість обертів труби живильника визначено за формулою раніше. Під час самого процесу транспортування замірявся час затрачений на транспортування порції сипкого матеріалу, кількість обертів труби, струм та напруга на двигуні, та збільшення маси сипкого матеріалу, що висипався на ваги. Щоб зменшити похибку дослідження кожен дослід проводився декілька разів.

Результати досліджень наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Загальна кількість обертів труби, об.	Час роботи установки, с.	Напруга на двигуні, В.	Струм, А.	Потужність, Вт/год.	У перерахунку на затрачений (експериментально час, Вт.	У перерахунку на затрачений час (аналітично), Вт.
77	86	18,8	0,18	3,384	0,071064	0,07108332
84	139	13,6	0,15	2,04	0,07446	0,08216124
92	196	9,37	0,13	1,4055	0,074023	0,07754544
89	517	4,64	0,11	0,5104	0,0712008	0,08493072

Також у якості порівняння необхідно визначити енергозатрати на транспортування сипкого матеріалу у шнековому живильнику. Для цього використано параметри при яких габарити живильників найбільш схожі, а продуктивність обох дорівнює 107,4 грам на хвилину.

Класична формула для визначення енергозатрат на транспортування шнекового живильника має вид:

$$P_0 = \frac{Q}{367} (L_r * k + H) + 0,02 * R * g_k * L_r * \omega_b, \quad (3.1)$$

де P_0 – потужність, яку потрібно надати на транспортування, кВт;

L_r – горизонтальна проекція довжини шнека, м;

H – висота підйому, мм;

k – коефіцієнт опору при транспортуванні частинок;

R – радіус шнека м;

g_k – погонна маса шнека, кг/м;

ω_b – коефіцієнт опору руху частин, що обертаються.

На рис. 3.2. зображені результати експериментальних досліджень та аналітичних розрахунків шнекового та трубчасто-гребеневого живильників.

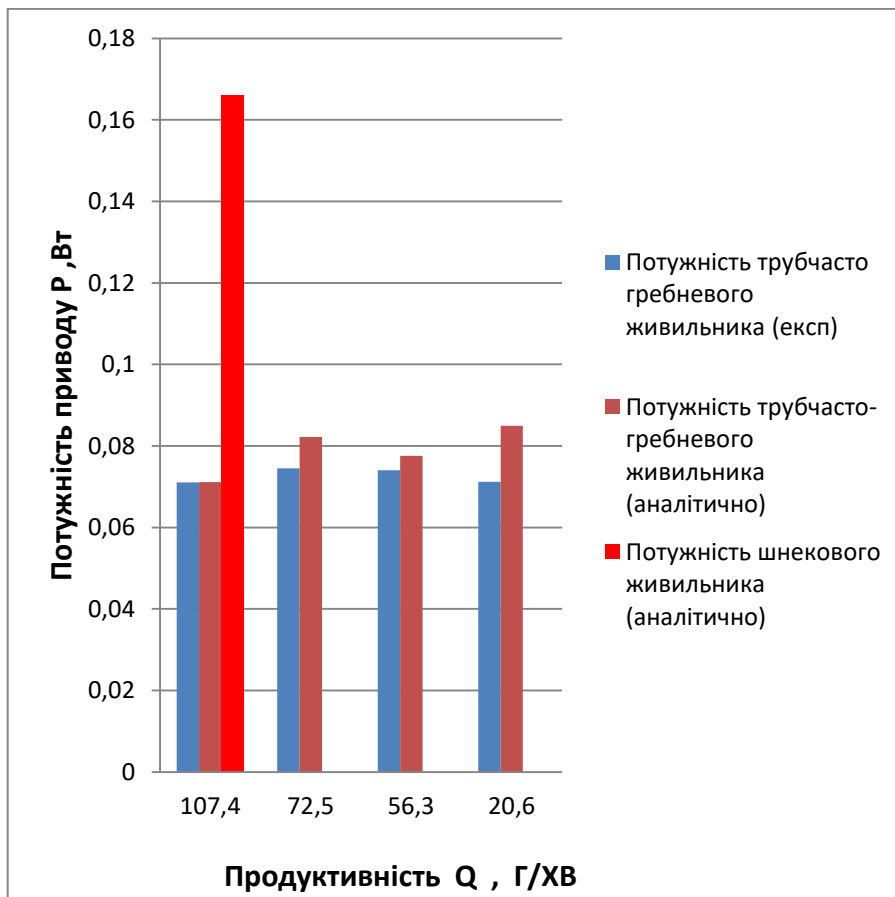


Рис. 3.2. Гістограма залежностей потужності, що витрачається на транспортування під час роботи

Різниця між результатами експерименту і даними розраховано аналітично у трубчасто-гребеневого живильника, у середньому становить 8,4%, це значення потрапляє в рамки 5–10%, що дозволяє використовувати отримане рівняння для інженерних розрахунків.

Ця розбіжність може бути викликана деякими чинниками, такими як низькі коефіцієнти, що характеризують особливості роботи двигуна, параметри системи транспортування та інші фізичні обмеження.

Можливі різноманітні чинники, такі як особливості роботи двигуна, не ідеальність у виконанні роботи приладів, що вимірювали різні параметри, та деякі неточності у врахуванні фізичних обмежень можуть призводити до цієї розбіжності.

Зокрема, параметри двигуна, такі як недостатньо високі коефіцієнти ефективності, можуть бути однією з головних причин такої розбіжності. Важливо враховувати ці параметри та фізичні обмеження під час аналізу даних, щоб забезпечити більш точні результати та висновки.

З отриманих кривих і аналізу результатів розрахунків зробити висновок, що для даного електроприводу енергозатрати будуть зменшуватись по мірі збільшення частоти обертів, починаючи з 30 обертів на хвилину. Цей ефект може бути пов'язаний з деякими особливостями роботи електродвигуна, які виявляються при певних значеннях обертів.

Також необхідно відмітити різницю у більш ніж два рази між енергозатратами на переміщення сипкого матеріалу шнековому та трубчасто-гребневого живильниках. Це викликано передусім унаслідок відмінностей характеру руху сипкого матеріалу. У шнековому живильнику частинки продавлюються уперед тим самим викликають додаткове тертя між робочими елементами, також додаткове тертя створюється за рахунок взаємодії труби та шнека, що в ній обертається тоді, як у трубчасто-гребневому живильнику таких недоліків немає.

3.4 Дослідження впливу форми бункера на характер протікання порошкових сипких матеріалів.

Рухомість сипких матеріалів визначається кутом природного укосу. Коли сипкий матеріал вільно насипається на горизонтальну площину, він утворює конус, у якого кут нахилу твірної до горизонтальної площини є кутом природного укосу матеріалу в стані спокою. Під час руху матеріалу на стрічці або полотні транспортера, унаслідок поштовхів та коливань, цей кут значно зменшується.

Також результати аналітичних досліджень показують, що процес витікання сипких матеріалів залежить як від їх фізико-механічних властивостей, так і від геометричних параметрів бункера. Ці залежності можна визначити на основі інформації про величину продуктивності бункера та її зміну у часі.

З метою проведення зазначених досліджень у роботі використано дослідний стенд, структурна схема якого показана на рис. 3.3.

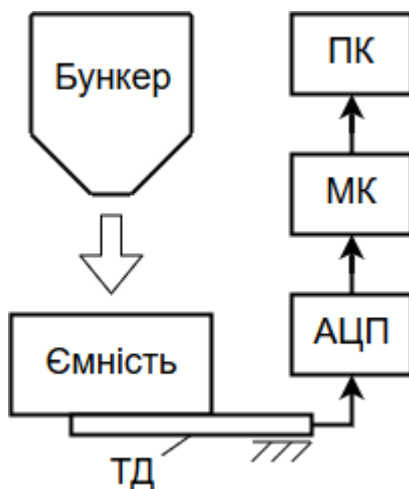


Рис. 3.3. Структурна схема стенду для визначення продуктивності бункера

До складу стенду входять: бункер, ємність для сипкого матеріалу, тензометричний датчик (ТД), аналого-цифровий перетворювач (АЦП), мікроконтролер (МК) та персональний комп'ютер (ПК). Ємність для сипкого матеріалу закріплена безпосередньо на ТД, тому її маса визначає величину сигналу ТД. Бункер розташовано безпосередньо над ємністю. Якщо вихідний патрубок бункера відкритий, сипкий матеріал під дією сили тяжіння висипається у ємність, змінюючи її масу. МК через АЦП зчитує сигнал датчика маси та передає його для збереження та подальшого аналізу на ПК.

Конструкція стенду майже не обмежує форму та розміри бункерів, що використовуються під час дослідження. Над ємністю можна закріпити майже будь-який бункер. Основною умовою є відповідність маси сипкого матеріалу та припустимих навантажень на тензодатчик.

Під час досліджень використовувались бункери двох конструкцій, що представлені на рис. 3.3 а та 3.3 б. Бункер на рис. 3.3 а складається з однієї циліндричної зони та конічної зони, що з'єднані між собою через шийку. Бункер на рис. 3.3 б має одну циліндричну зону та зону із параболічним нахилом бокових стінок.

При проведенні досліджень кожен бункер повністю завантажувався сипким матеріалом, що гарантувало роботу бункера з наповненням усіх можливих комбінацій зон під час витікання матеріалу.

- 1) Проведення калібрування системи: визначався сигнал тензодатчика (ТЗ), який відповідає порожній ємності.
- 2) Заповнення бункера сипким матеріалом.
- 3) Запуск процесу вимірювання. Мікроконтролер (МК) через задані інтервали часу (0,09 с) зчитував сигнали тензодатчика за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП).
- 4) Відкриття вихідного патрубку бункера.
- 5) Припинення вимірювання після того, як весь матеріал витік у ємність.
- 6) Повторення досліду тричі для кожного з трьох порошкових матеріалів, трьох дрібнозернистих матеріалів, а також для двох бункерів різної форми (рис. 3.3 а та 3.3 б).

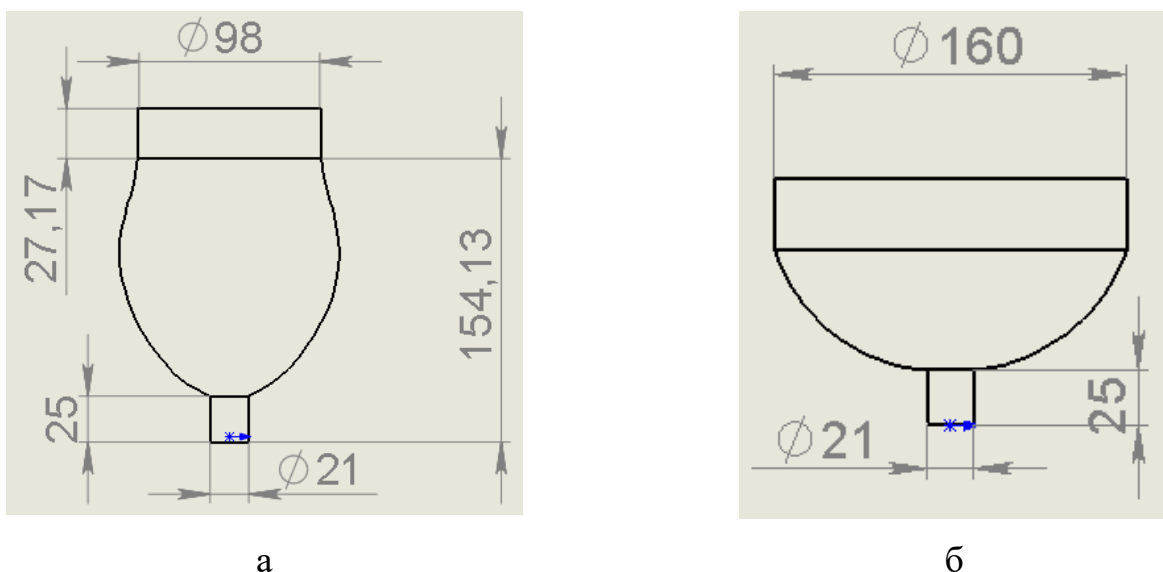


Рис. 3.3. Бункери із змінним кутом нахилу бічних стінок

Параметри сипких матеріалів, які визначалися під час проведення експериментальних досліджень, наведено у таблиці 3.2. До них відносяться: розміри частинок, насипна густина та кут природного укосу. Варто зазначити, що при проведенні аналітичних досліджень, зокрема використання методу дискретних елементів (МДЕ), параметрами, що характеризують взаємодію частинок між собою та з поверхнею бункера, є коефіцієнти тертя ковзання та кочення. Ці параметри значною мірою визначають продуктивність бункера. Визначення значень цих коефіцієнтів під час експериментальних досліджень є технічно складним завданням, оскільки вони залежать від зовнішніх умов. З іншого боку, результати аналітичних розрахунків показують, що кут природного укосу матеріалу визначається сукупною дією всіх його властивостей. Таким чином, взаємозв'язок між продуктивністю бункера та кутом природного укосу відображає вплив властивостей матеріалу на продуктивність.

Параметри сипких матеріалів

Назва параметра	Матеріал 1 Порошок поліуретану (PU)	Матеріал 2 Каучук подрібнений	Матеріал 3 Гранули етиленвінілацетату (EVA)	Матеріал 4 Гранульований поліетилен (PE)	Матеріал 5 Гранули полівінілхлориду (PVC)	Матеріал 6 Гранули термопластичного поліуретану (TPU)
Розмір частинки, мм	0,1–0,4	~0,125	0,2–1	2,9–3,8	~1,7	~2,2
Кут природнього укосу, град	25	45	38	35	41,9	30,7
Насипна густина, кг/м ³	1300–1500	800	720	815	770	850

Результати експерименту формувалися зі значень поточного моменту часу та відповідного сигналу датчика маси. Після завантаження даних у ПК здійснювалася їх попередня обробка, яка охоплювала три етапи:

1. Визначення моменту початку надходження сипкого матеріалу у ємність. Всі попередні дані, отримані для порожньої ємності, вилучалися з подальших розрахунків.

2. Визначення моменту завершення надходження матеріалу у ємність. Всі подальші дані також вилучалися з розрахунків.
3. Для кожного інтервалу часу, у які знімалися сигнали датчика маси, визначалося середнє значення результатів трьох вимірювань.

Результати досліджень для бункера, зображеного на рис. 3.3 а, та всіх шести матеріалів показані на рис. 3–8. Аналіз результатів свідчить, що залежність між масою матеріалу, який витік з бункера та часом є лінійною. Для її апроксимації методом найменших квадратів були розраховані коефіцієнти лінійного рівняння регресії.

На графіках точками показані експериментальні дані, суцільними лініями – результати розрахунків за отриманим рівнянням регресії.

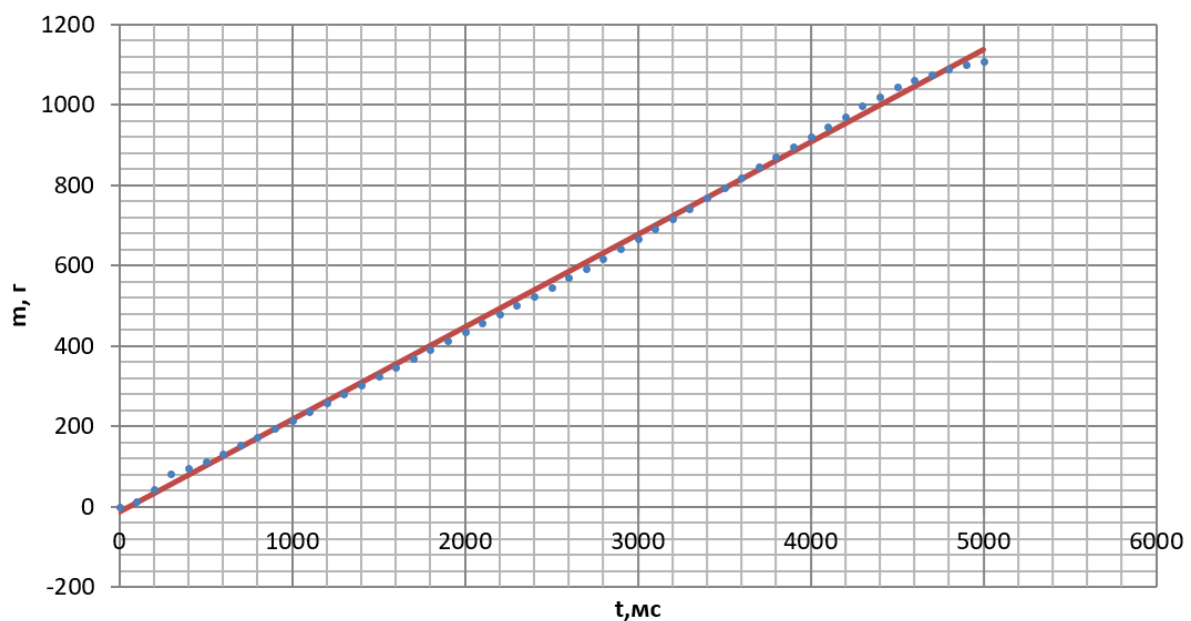


Рис. 3.4. Залежність між масою матеріалу 1 у ємності та часом витікання з бункера

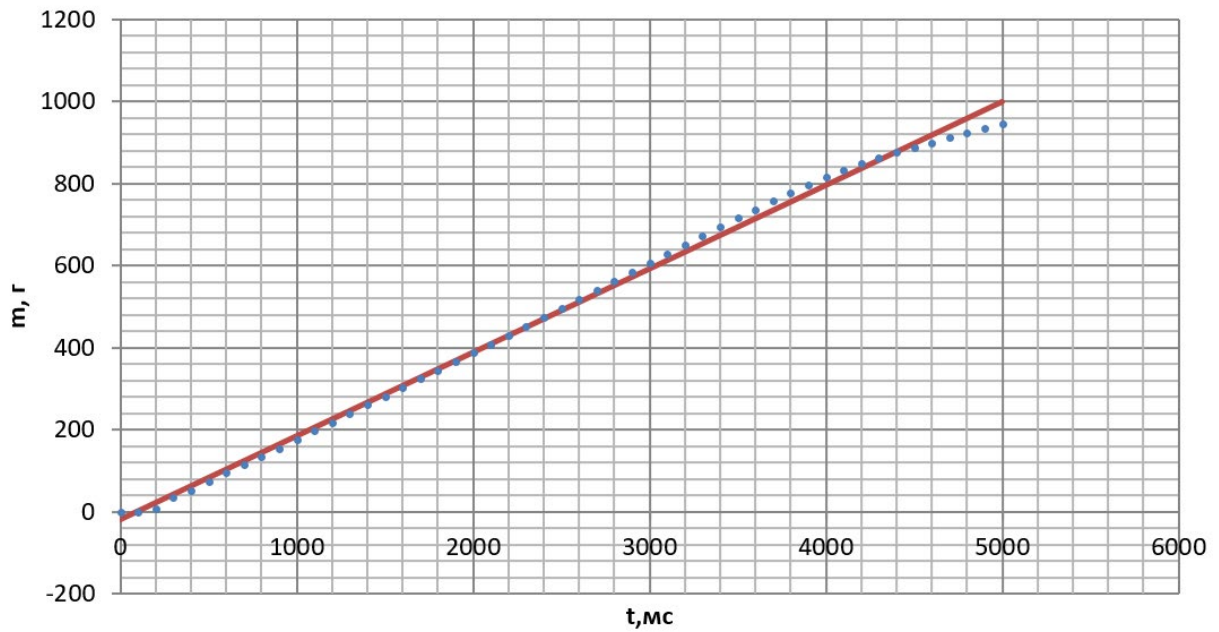


Рис. 3.5. Залежність між масою матеріалу 2 у ємності та часом витікання з бункера
Рівняння регресії для матеріалу 1:

$$m = 0,2303t - 14,284. \quad (3.2)$$

Рівняння регресії для матеріалу 2:

$$m = 0,1199t + 34,302. \quad (3.3)$$

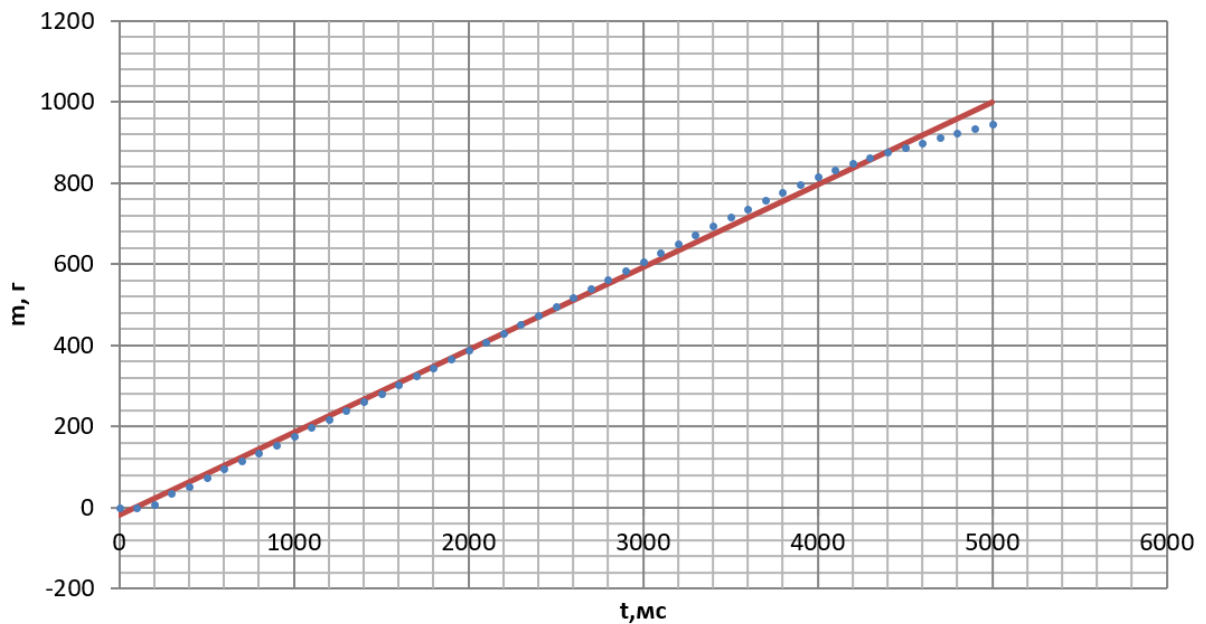


Рис. 3.6. Залежність між масою матеріалу 3 у ємності та часом витікання з бункера

Рівняння регресії для матеріалу 3:

$$m = 0,2039t - 19,56. \quad (3.4)$$

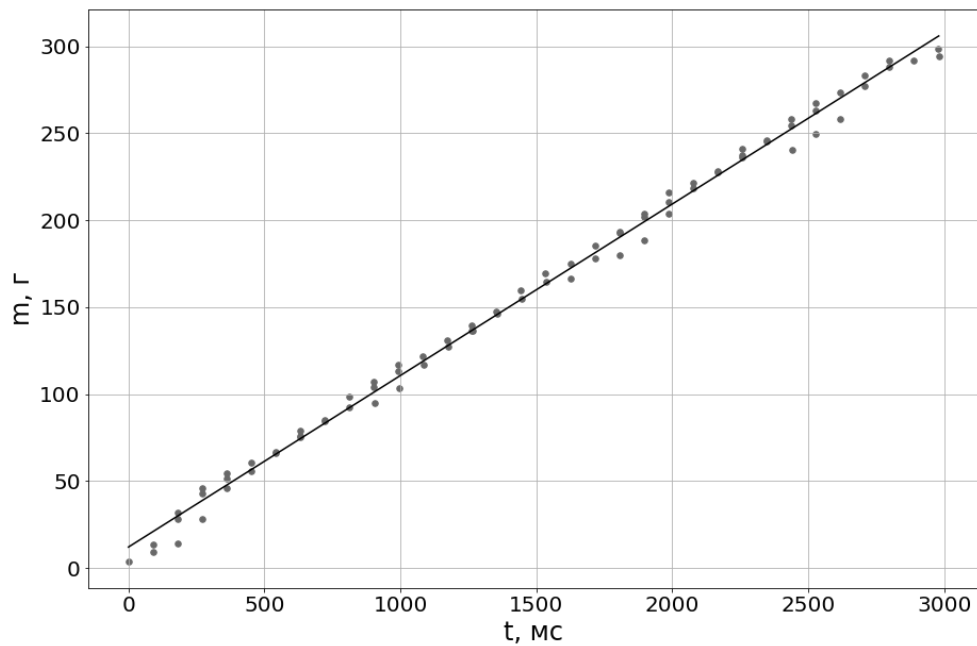


Рис. 3.7. Залежність між масою матеріалу 4 у ємності та часом витікання з бункера

Рівняння регресії для матеріалу 4:

$$m = 0,0986t + 12,037. \quad (3.5)$$

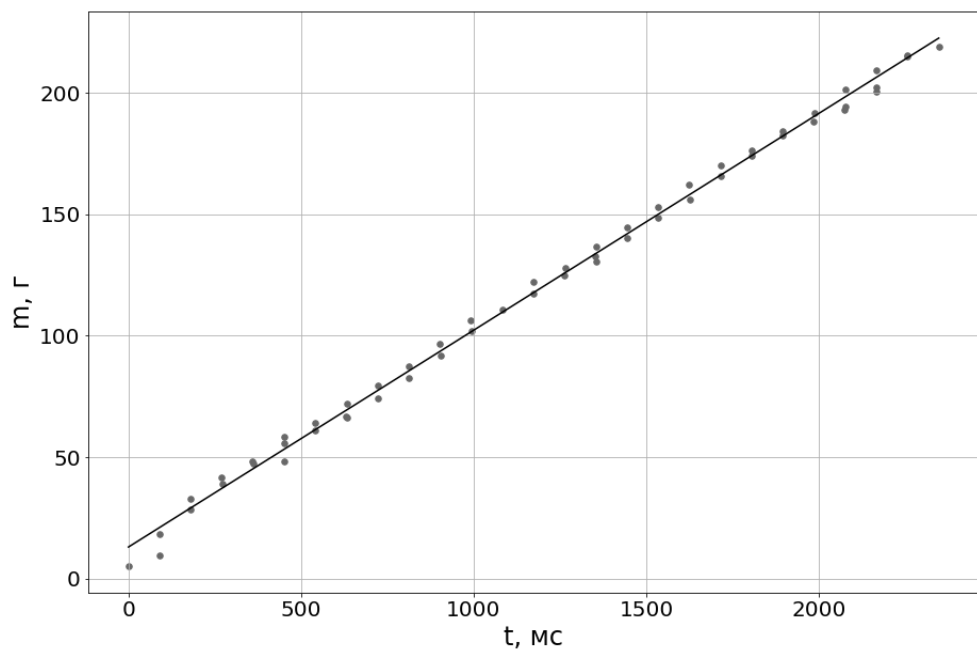


Рис. 3.8. Залежність між масою матеріалу 5 у ємності та часом витікання з бункера

Рівняння регресії для матеріалу 5:

$$m = 0,2039t - 19,56. \quad (3.6)$$

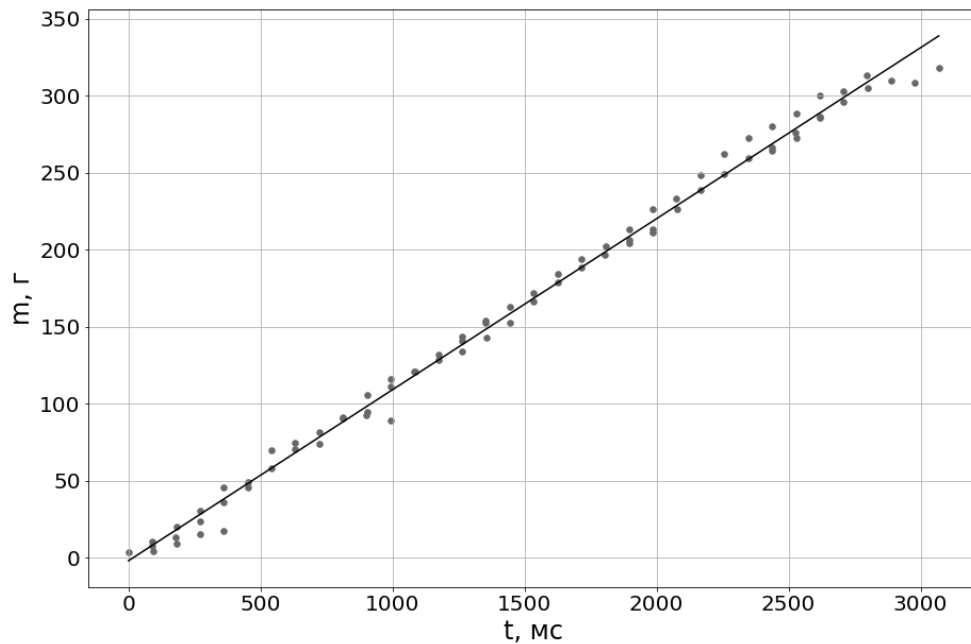


Рис. 3.9. Залежність між масою матеріалу 6 у ємності та часом витікання з бункера

Рівняння регресії для матеріалу 6:

$$m = 0,111t - 1,841. \quad (3.7)$$

Коефіцієнти рівнянь регресії при змінній t відображають темп зміни маси ємності з матеріалом, що відповідає продуктивності бункера. У таблиці 3.3 представлені значення продуктивності бункера для всіх трьох типів матеріалу.

Таблиця 3.3

Продуктивність конічного бункера для різних матеріалів

Назва параметра	Матеріал 1 Порошок поліуретану (PU)	Матеріал 2 Каучук подрібнений	Матеріал 3 Гранули етиленвінілацетату (EVA)	Матеріал 4 Гранульований поліетилен (PE)	Матеріал 5 Гранули полівінілхлориду (PVC)	Матеріал 6 Гранули термопластичного поліуретану (TPU)
Продуктивність, кг/с	0,201	0,184	0,1131	0,0986	0,0894	0,0911

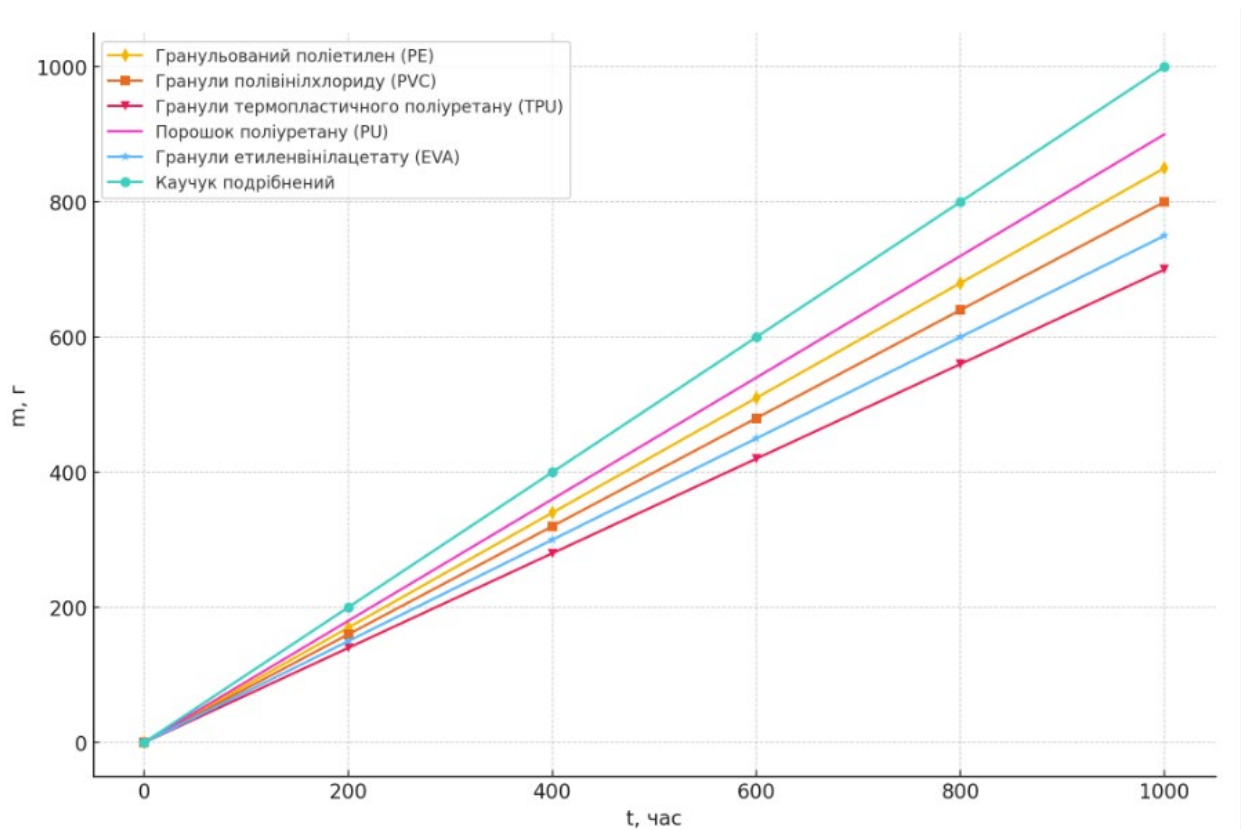


Рис. 3.10. Загальний графік залежності між масою усіх матеріалів у ємності та часом витікання для конічного бункера

Чисельна оцінка взаємозв'язку між параметрами сипких матеріалів та їх продуктивністю проводилася за допомогою коефіцієнтів кореляції між наступними параметрами:

- кутом природного укосу та продуктивністю;
- розміром частинок та продуктивністю;
- насипною густиною та продуктивністю.

Коефіцієнт кореляції Пірсона використовується для визначення наявності лінійної залежності між двома величинами (x, y) і розраховується за формулою:

$$r_{xy} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x}) \sum(y_i - \bar{y})}} \quad (3.8)$$

де x_i y_i – вибіркові середні.

Результати розрахунків для порошковидних матеріалів:

1) Коефіцієнт кореляції між продуктивністю та насипною густиною $r_p = 0,433$.

2) Коефіцієнт кореляції між продуктивністю та кутом природнього укосу $r_\varphi = -0,638$.

3) Коефіцієнт кореляції між продуктивністю та розміром частинок $r_a = -0,89816$.

Результати розрахунків для дрібнозернистих та крупнозернистих матеріалів:

1) Коефіцієнт кореляції між продуктивністю та насипною густиною $r_p = 0,988$.

2) Коефіцієнт кореляції між продуктивністю та кутом природнього укосу $r_\varphi = -0,976$.

3) Коефіцієнт кореляції між продуктивністю та розміром частинок $r_a = -0,212$.

3.5. Визначення характеру руху сипких матеріалів у шнекових та трубчасто-гребневих живильниках

За допомогою методу дискретних елементів створені моделі, що дають можливість визначати циркуляцію матеріалу, час перебування частинок у обладнанні та досліджувати ефект сегрегації. Також проведено дослідження для частинок різних форм та описано їх вплив на параметри руху матеріалу. Запропонована модель може бути використана для прогнозування якості сумішей, проте вплив конструктивних і технологічних параметрів на пульсації потоку частинок у цій роботі не розглядається.

Аналіз показав, що шнекові живильники найчастіше використовуються для транспортування сипких матеріалів. Однак, попередні дослідження вказують на те, що під час їх роботи виникають пульсації потоків частинок, які знижують однорідність суміші. Також відомо про трубчасті конвеєри, у яких характер руху частинок значно відрізняється від шнекових живильників. Отже, варто дослідити

можливість поєднання переваг обох конструкцій. Застосування методу дискретних елементів (МДЕ) для створення математичних моделей руху сипких матеріалів останніми роками стало дуже популярним і дало можливість підвищити точність розрахунків. Це робить МДЕ основним методом моделювання під час дослідження нового обладнання.

У дослідженні було вивчено продуктивність та рівень пульсацій сипкого матеріалу в трубчасто-гребеневому живильнику, а також проведено порівняння зі шнековим живильником. Це дало змогу обґрунтовано вибрати конструкцію та робочі режими живильників для використання у змішувальних комплексах сипких матеріалів.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

- створити математичні моделі шнекового та трубчасто-гребеневого живильників з використанням методу дискретних елементів (МДЕ);
- розробити експериментальний стенд і провести дослідження продуктивності та пульсацій потоку сипкого матеріалу на виході трубчасто-гребеневого живильника;
- дослідити рівень пульсацій на виході трубчасто-гребеневого та шнекового живильників.

У роботі розглядаються живильники сипких матеріалів двох типів: шнекового (рис. 3.11) та трубчасто-гребеневого (рис. 3.12).

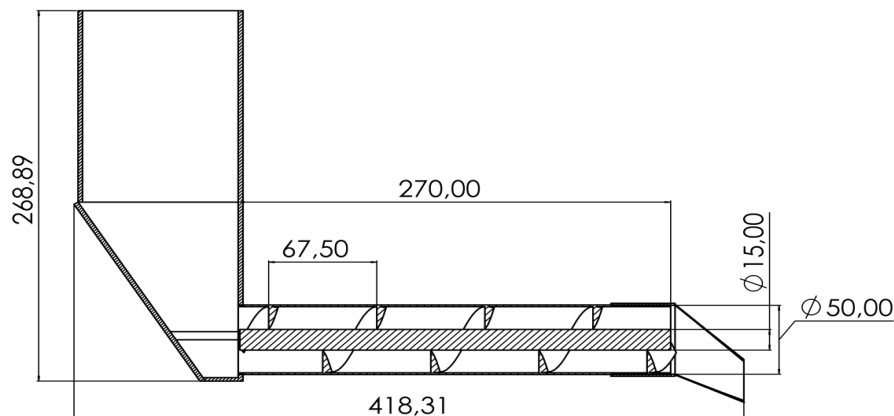


Рис. 3.11. Шнековий живильник

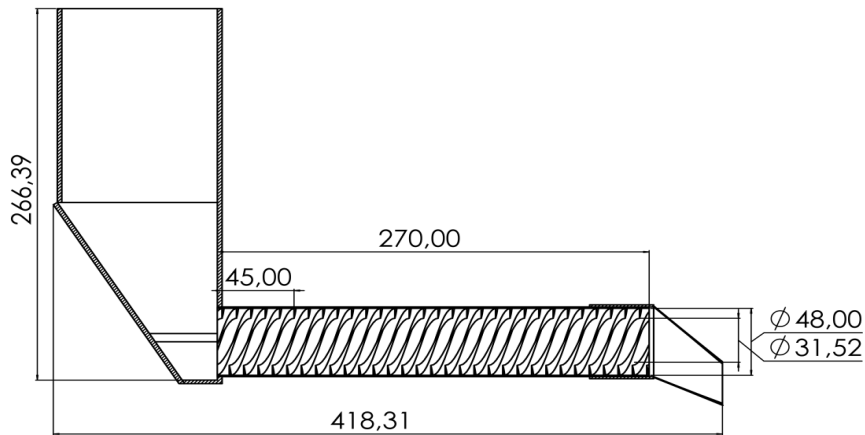


Рис. 3.12. Трубчасто-гребеневий живильник

Конструкція шнекового живильника (рис. 3.11) є добре відомою. Сипкий матеріал завантажується в бункер і переміщується уздовж горизонтальної труби за допомогою шнека, який обертається із заданою швидкістю. Горизонтальний рух матеріалу забезпечується завдяки силам тертя між шнеком і частинками. При цьому труба залишається нерухомою.

Трубчасто-гребеневий живильник (рис. 3.12), запропонований у цій роботі, має схожу конструкцію зі шнековим живильником. Сипкий матеріал також завантажується у бункер і переміщується вздовж труби до вихідного патрубка. Однак, замість шнека, на внутрішній поверхні труби розташовані спіралеподібні гребені. Горизонтальне переміщення матеріалу забезпечується обертанням труби навколо власної осі з заданою швидкістю. На початку роботи частинки під дією сили тяжіння потрапляють із бункера в трубу. Коли труба починає обертатися, частинки за рахунок сил тертя між ними та поверхнями труби і гребенів рухаються разом з нею. Як тільки сила тертя стає недостатньою для утримання частинок на бічній поверхні труби, вони починають скочуватися вниз. Переміщення в горизонтальному напрямку відбувається завдяки тому, що при переміщенні частинок разом із бічною поверхнею труби, на їх місце висипаються нові частинки з бункера. В результаті частинки скочуються вниз і вперед. Гребені на поверхні труби виконують дві

функції: збільшують площу контакту з частинками та обмежують горизонтальне переміщення частинок за рахунок сил інерції.

Дослідження руху частинок всередині живильників здійснювалося за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення EDEM 2017. Математичні моделі були розроблені на основі методу дискретних елементів (МДЕ). При цьому сипкий матеріал розглядався як сукупність сферичних частинок із постійним радіусом, що мають пружні властивості. МДЕ передбачає визначення сил, що діють між частинками. У роботі визначення нормальних складових сил взаємодії здійснювалось на основі контактної теорії Герца. Для розрахунку тангенціальної складової використовувався алгоритм Міндліна-Дересієвіча. Параметри частинок і матеріалів, з яких виготовлено корпуси та робочі елементи живильників, наведено у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Параметри частинок, робочих елементів та корпусів живильників

Назва параметра	Частинки сипкого матеріалу	Матеріал корпусів живильників	Матеріал труби трубчасто-гребеневого живильника
Коефіцієнт Пуассона	0,25	0,3	0,5
Густина, кг/м ³	880	7300	1100
Модуль зсуву, Па	$1 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^9$	$5 \cdot 10^6$
Модуль Юнга, Па	$2,5 \cdot 10^8$	$2,6 \cdot 10^9$	$1,5 \cdot 10^7$
Радіус, мм	2,5	—	—

Також перед проведенням розрахунків МДЕ були задані параметри взаємодії всіх матеріалів, що взаємодіють між собою. Їх перелік наведено у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5

Параметри взаємодії об'єктів, що контактують

Назва параметра	«частинка – частинка»	«частинка – матеріал корпусу живильника»	«частинка – матеріал труби трубчасто-гребеневого живильника»
Коефіцієнт пружності	0,3	0,3	0,4
Коефіцієнт статичного тертя	0,3	0,5	0,5
Коефіцієнт тертя кочення	0,05	0,05	0,1

Значення, наведені у таблицях 3.4 та 3.5, є характерними для полімерних гранульованих матеріалів (частинки) та сталі (корпуси живильників). Властивості труби трубчасто-гребеневого живильника відповідають параметрам матеріалу соРЕТ, який використовувався під час проведення експериментальних досліджень.

Статистичне опрацювання результатів здійснювалося з використанням програм, розроблених мовою програмування Python, бібліотеки NumPy та програмного забезпечення Jupyter. Розрахунок коефіцієнтів рівнянь регресії проводився методом найменших квадратів, а перевірка адекватності математичної моделі здійснювалась за критерієм Фішера.

Перевірка працездатності та характеристик трубчасто-гребеневого живильника провадилася за допомогою дослідного стенду (рис. 3.13). Він складається з бункера (1), труби з гребенями на її внутрішній поверхні (2), електроприводу (3), який забезпечує обертання труби, та тензометричного датчика (4).

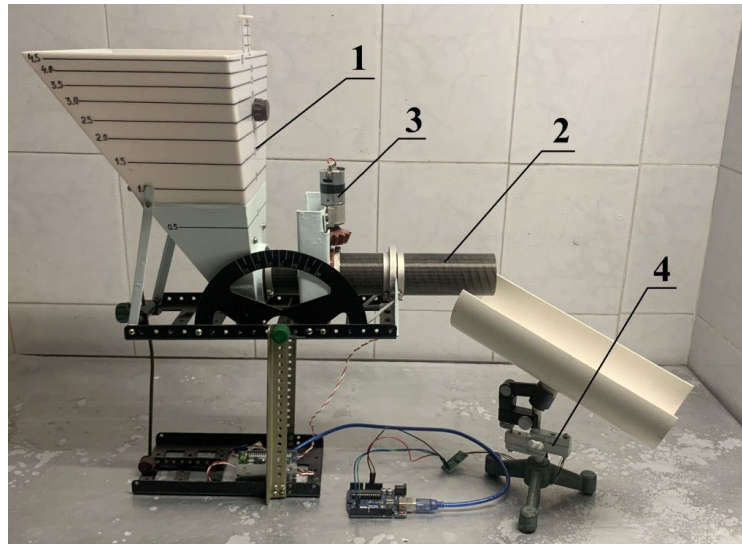


Рис. 3.13. Стенд для експериментального дослідження роботи трубчасто-гребеневого живильника

Конструкція стенду дає можливість змінювати кут нахилу труби, однак під час проведення досліджень вона встановлювалася горизонтально. Труба з гребенями була виготовлена за допомогою 3D-друку з матеріалу соPET, її геометричні параметри відповідають розмірам, що вказані на рис. 3.12.

Під час досліджень інформація з тензOMETричного датчика через аналого-цифровий перетворювач (АЦП) передавалася до мікроконтролера (МК), який у свою чергу передавав її до персонального комп'ютера для подальшого аналізу. Величина сигналу датчика була пропорційною кількості матеріалу, що подавався живильником за одиницю часу, тобто його продуктивності (Додаток В).

Моделі шнекового та трубчасто-гребеневого живильників, створені на основі методу дискретних елементів (МДЕ) з використанням програмного забезпечення EDEM 2017, показані на рис. 3.14.

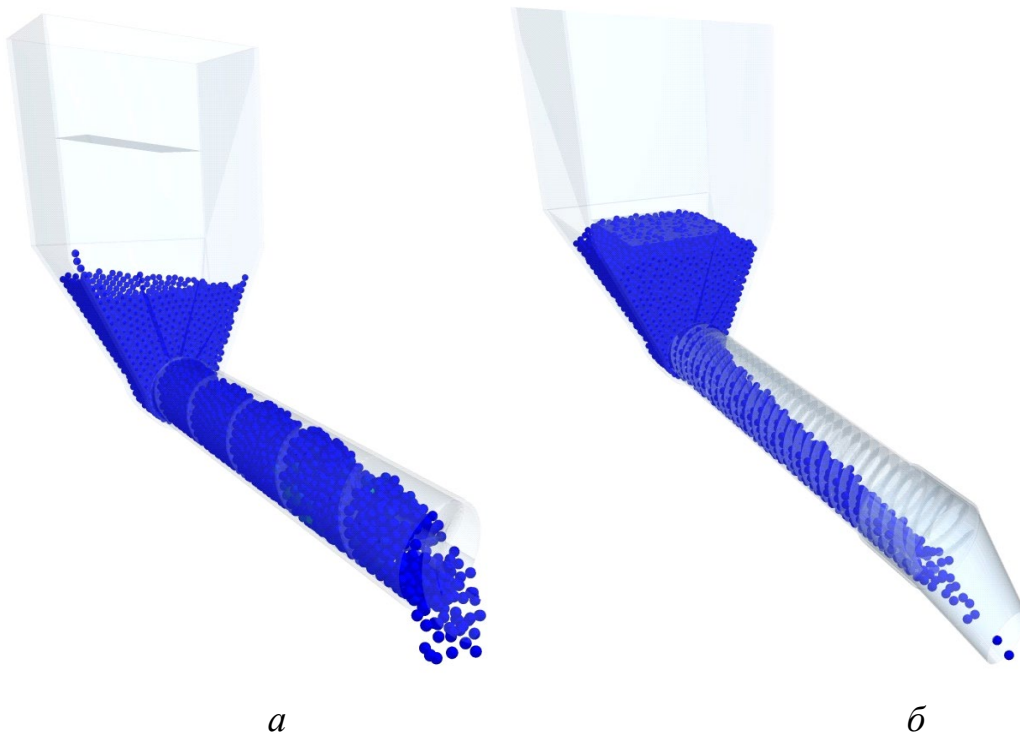
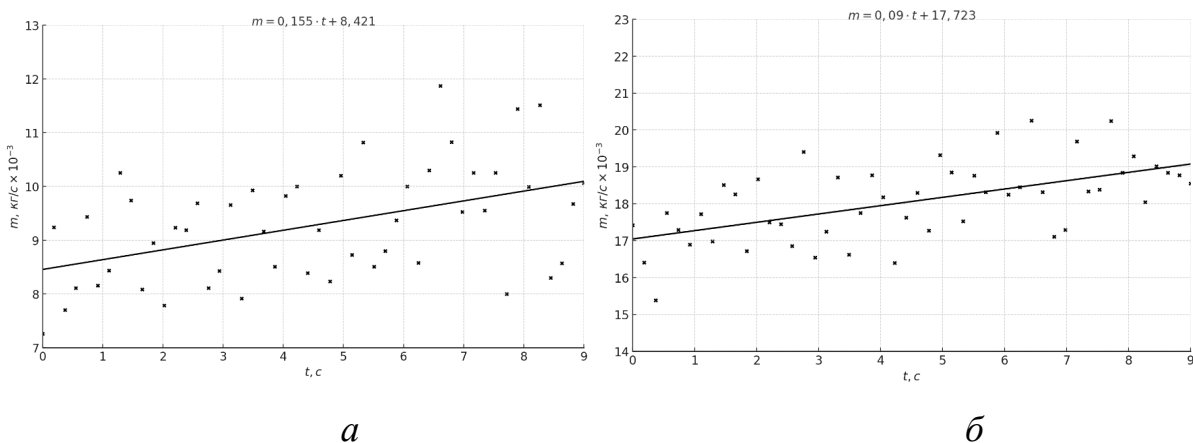


Рис. 3.14. Моделі живильників, що створені на основі методу дискретних елементів: *а* – шнековий, *б* – трубчасто-гребеневий

Геометричні параметри моделей відповідають значенням, показаним на рис. 3.11 і 3.12. Досліди проводилися для двох швидкостей обертання труби та шнека: 6 і 10 рад/с. У результаті моделювання були отримані залежності маси матеріалу, що подається живильником, від часу (рис 3.15).



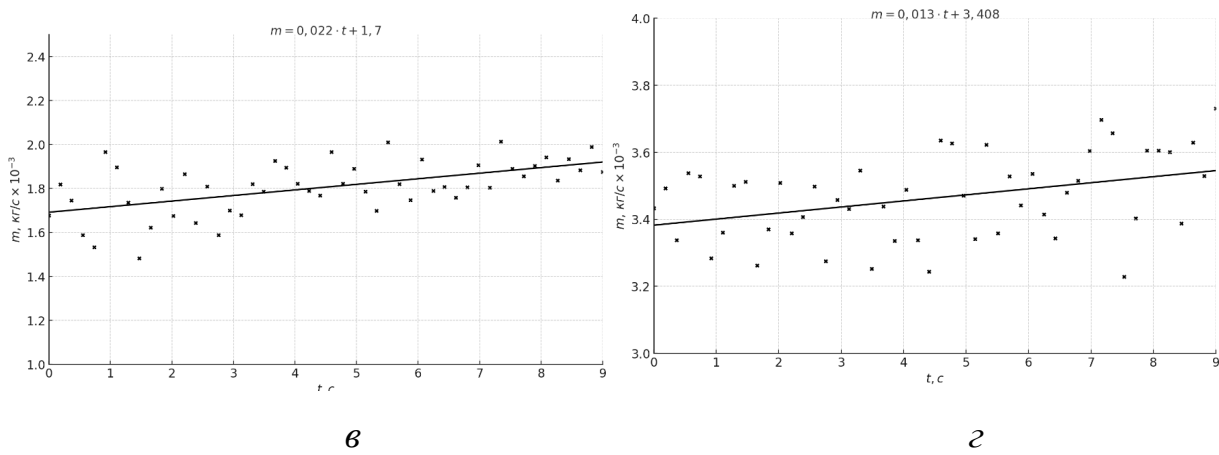


Рис. 3.15. Залежність маси матеріалу від часу на виході живильників: а – шнекового (6 рад/с); б – шнекового (10 рад/с); в – трубчасто-гребеневого (6 рад/с); г – трубчасто-гребеневого (10 рад/с).

На рис. 3.15 суцільними лініями показані графіки апроксимуючих лінійних залежностей, а також наведені коефіцієнти відповідних рівнянь, розраховані методом найменших квадратів.

Під час експериментальних досліджень трубчасто-гребеневого живильника за допомогою стенду (рис. 3.13) швидкість обертання труби була встановлена на рівні 6 і 10 рад/с. Показання тензOMETричного датчика знімалися для стабільного режиму роботи. Отримані залежності представлені на рис. 3.16.

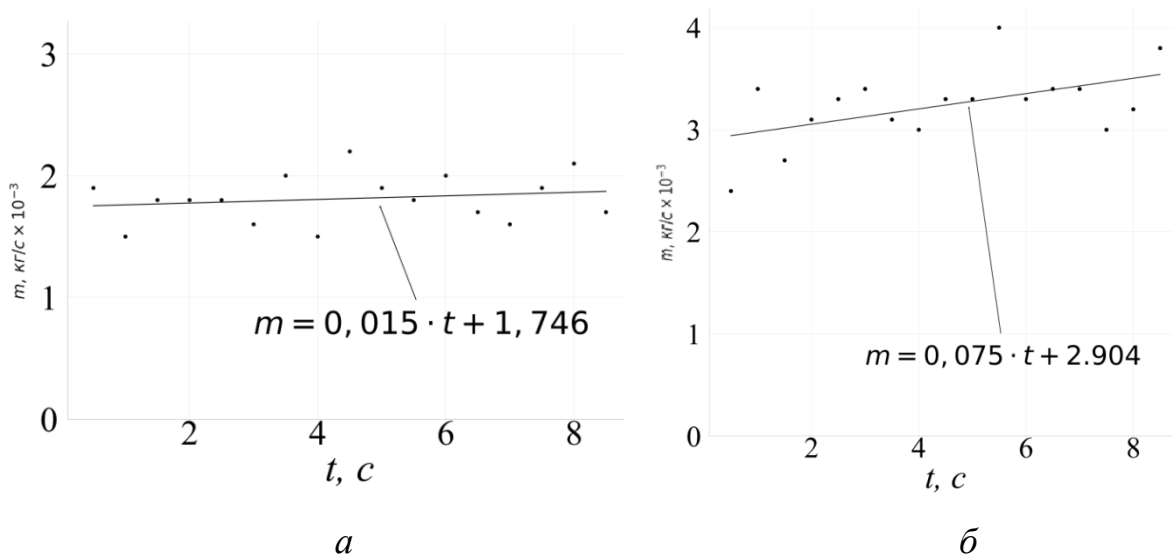


Рис. 3.16. Залежність маси матеріалу від часу на виході трубчасто-гребеневого живил

ьника за швидкості обертання труби: $a - 6$ рад/с; $b - 10$ рад/с

Як і у випадку дослідження за допомогою МДЕ, суцільними лініями на рис. 3.15 показані графіки апроксимуючих лінійних залежностей. Визначення впливу конструкцій живильників і режимів їх роботи на параметри руху сипкого матеріалу проведено для всіх експериментально отриманих залежностей. Було розраховано такі статистичні параметри: середнє значення, медіана, середньоквадратичне відхилення, дисперсія, довірчий інтервал та коефіцієнти детермінації. Їх значення наведені у таблицях 3.6–3.8.

Таблиця 3.6

Статистичні параметри процесу руху матеріалу в шнековому живильнику, що розраховані з використанням МДЕ

Назва параметра	Швидкість обертання шнеку	
	6 рад/с	10 рад/с
Середнє значення, г	9,097	18,151
Медіана, г	9,292	18,426
Середньоквадратичне відхилення	0,867	1,621
Дисперсія	0,752	2,627
Довірчий інтервал (для надійності 95 %)	8,842...9,351	17,639...18,591
Коефіцієнт детермінації	0,199	0,019

Таблиця 3.7

Статистичні параметри процесу руху матеріалу в трубчасто-гребеновому живильнику, що розраховані з використанням МДЕ

Назва параметра	Швидкість обертання труби	
	6 рад/с	10 рад/с

Середнє значення, г	1,793	3,467
Медіана, г	1,818	3,479
Середньоквадратичне відхилення	0,118	0,099
Дисперсія	0,014	0,01
Довірчий інтервал (для надійності 95 %)	1,758...1,827	3,438...3,496
Коефіцієнт детермінації	0,208	0,115

Таблиця 3.8

Статистичні параметри процесу руху матеріалу в трубчасто-гребеновому живильнику, що отримані експериментально

Назва параметра	Швидкість обертання труби	
	6 рад/с	10 рад/с
Середнє значення, г	1,812	3,241
Медіана, г	1,8	3,3
Середньоквадратичне відхилення	0,2	0,368
Дисперсія	0,04	0,135
Довірчий інтервал (для надійності 95%)	1,71...1,914	3,052...3,43
Коефіцієнт детермінації	0,035	0,265

З метою перевірки відповідності експериментальних і розрахункових (отриманих на основі МДЕ) результатів, для трубчасто-гребенового живильника були розраховані значення відповідних дисперсій. Для експериментальних значень за швидкості обертання 6 рад/с дисперсія становить $\sigma_{E6}^2 = 0,011$, а для значень розрахованих з використанням МДЕ – $\sigma_{МДЕ6}^2 = 0,038$. За швидкості обертання 10 рад/с відповідні значення дисперсій дорівнюють: $\sigma_{E10}^2 = 0,008$ та $\sigma_{МДЕ10}^2 = 0,099$. Перевірка обох випадків за критерієм Фішера рівності дисперсій довела

відповідність результатів, отриманих за допомогою математичної моделі, реальному процесу.

Отримані результати (рис. 3.15, 3.16) підтверджують дискретний характер руху сипкого матеріалу на виходах живильників обох типів. Тобто, хоча параметри сипкого матеріалу при моделюванні за допомогою МДЕ є ідеалізованими, характер їх руху співпадає з експериментальними дослідженнями. Кількісна перевірка параметрів потоків частинок в усталених режимах роботи, здійснена на основі критерію Фішера рівності дисперсій, також показала відповідність математичної моделі реальному процесу. Це свідчить про те, що отримана за допомогою МДЕ модель трубчасто-гребеневого живильника дає змогу з достатньою точністю моделювати рух частинок, і тому може бути використана при проектуванні нового обладнання. Зокрема, за допомогою цієї моделі можна аналізувати рух частинок при різних геометричних і технологічних параметрах трубчасто-гребневих живильників.

Також розраховані значення коефіцієнтів детермінації, які наближаються до нуля, свідчать про збіг середніх значень з розрахунковими за рівнянням регресії. Це уможливорює формулювання висновку, що характер руху для всіх досліджень відповідає усталеному режиму роботи. Середні значення маси частинок (таблиця 3.8, 3.9) дають можливість порівняти продуктивність живильників. Максимальні значення за цим параметром забезпечують шнекові живильники, продуктивність яких у 5...5,2 рази вища, ніж у трубчасто-гребеневого за однакових розмірів і кутових швидкостей обертання шнеку та труби. Це підтверджується характером руху частинок, що можна спостерігати на рис. 3.14. У трубчасто-гребеному живильнику, на відміну від шнекового, заповнення труби матеріалом зменшується при наближенні до вихідного патрубку.

Водночас, величина пульсацій матеріалу у шнековому живильнику значно більша ніж у трубчасто-гребеному. Цей висновок підтверджується величинами середньоквадратичних відхилень і дисперсій, зокрема, середньоквадратичне відхилення для шнекового живильника у 7,3 рази більше при швидкості обертання 6

рад/с та у 16,4 раза більше при 10 рад/с. На практиці це означає, що трубчасто-гребеневий живильник забезпечує більш рівномірну подачу матеріалу, і його використання у складі змішувальних комплексів безперервної дії дозволить зменшити неоднорідність суміші.

Крім того, у трубчасто-гребневих живильниках значно менша площа поверхні контакту частинок з робочими елементами порівняно зі шнековими. Це зумовлено тим, що розміри гребенів значно менші, ніж лопаті шнека. Таким чином, запропонована конструкція дає можливість уникнути додаткового стискання частинок, характерного для шнекових живильників. Визначення величини сил, що діють на частинки, та пошук зон вірогідної появи розривів у їх потоках є перспективним напрямом дослідження цього типу обладнання. Крім того, наявність гребенів на поверхні труби дає змогу утримувати частинки від скочування, що відкриває можливість збільшення продуктивності таких живильників за рахунок нахилу труби.

Результати дослідження трубчасто-гребневих живильників враховують наявність додаткових робочих елементів (гребенів) на внутрішній поверхні труби. Це дає можливість визначити їх вплив на горизонтальне переміщення частинок за рахунок сил інерції. Розроблені математичні моделі дають змогу визначити траєкторії руху частинок всередині трубчасто-гребневих живильників. Вони надають можливість, на основі конструктивних та технологічних параметрів таких живильників, розрахувати їх продуктивність та визначити величину пульсацій потоків сипких матеріалів. Крім того, представлене дослідження вміщує порівняння зазначених параметрів для шнекових та трубчасто-гребневих живильників, що дає змогу робити обґрунтований вибір обладнання, виходячи з вимог технологічних процесів.

Представлені у праці математичні моделі роботи трубчасто-гребневого та шнекового живильників враховують особливості конструкції обладнання такого типу. Це дає змогу визначити їх технологічні параметри та порівнювати їх вплив на параметри готового продукту, зокрема, однорідність сумішей.

Основні обмеження отриманих математичних моделей характерні для методу дискретних елементів (МДЕ). Це, передусім, жорстка прив'язка до конструкції обладнання та режимів його роботи, а також представлення частинок, що можуть мати складну форму, у вигляді сфер.

Недоліком цього дослідження є те, що запропоновані моделі не враховують можливі варіації фізико-механічних властивостей сипких матеріалів. Такі зміни можуть спостерігатися навіть у межах однієї партії матеріалу (наприклад, через спресування або вологість) і можуть призводити до значних змін траєкторій руху частинок.

Висновки до розділу 3

1. Встановлено, що результати, отримані на основі математичної моделі, відповідають реальному процесу.

2. Енергозатрати на переміщення сипкого матеріалу в трубчасто-гребневому живильнику є більш ніж у два рази меншими порівняно зі шнековим живильником з урахуванням рівної продуктивності.

3. Встановлено, що існує залежність, чим менший діаметр частинки матеріалу тим більшу роль у швидкості витікання матеріалу з бункера відіграє насипна густина матеріалу і навпаки.

4. Швидкість витікання матеріалу з бункера залежить від насипної густини.

5. Для даних габаритів бункера та характеристики насипної густини матеріалів швидкість витікання з конічного бункера збільшується відповідно до міри зменшення матеріалу в ньому.

6. На основі результатів МДЕ встановлено, що величина пульсацій потоку сипкого матеріалу на виході трубчасто-гребеневого живильника у 7,3...16,4 рази менша ніж у шнекового живильника.

РОЗДІЛ 4

ПРАКТИЧНЕ ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1. Загальні принципи проєктування трубчасто-гребневого живильника безперервної дії.

Проєктування живильників передбачає визначення його складових елементів, їх характеристик та взаємозв'язків. Отримана система має відповідати заданим вимогам та параметрам, забезпечувати якісний рух сипкого матеріалу. Вирішення цього завдання може бути забезпечено за допомогою обладнання різних типів та конструкцій, але обґрунтований вибір конструктивних та технологічних параметрів дає можливість скоротити витрати на створення та експлуатацію живильника.

Першим етапом проєктування є аналіз вихідних параметрів. Умовно їх можна розділити на три групи (таблиця 4.1):

- технологічні параметри;
- параметри сипкого матеріалу;
- масогабаритні та енергетичні параметри живильника.

Технологічні параметри вміщують вимоги до кількості матеріалу що транспортується, її дисперсності та інших характеристик, часу автономної роботи (без додаткового завантаження сипких матеріалів). Дотримання цих параметрів є необхідною умовою для коректної роботи обладнання, що знаходиться у наступних ланках технологічного ланцюга.

Параметри сипкого матеріалу визначають вибір конкретних габаритів робочого елемента живильника. Вони зумовлюють характер руху частинок та їх взаємодію із робочими елементами. На їх основі здійснюються розрахунки конструктивних та технологічних параметрів обладнання.

Масогабаритні та енергетичні параметри зумовлюють обмеження на відповідні характеристики складових елементів живильника. Переважно вони

зумовлені виробничими умовами. Водночас, треба враховувати, що енергетичні параметри впливають на собівартість продукту.

Таблиця 4.1

**Перелік параметрів, що визначають вимоги до проєктування
змішувального комплексу**

№ п/п	Назва	Позначення
Технологічні параметри		
1	Масова продуктивність	Q , кг/с
4	Час роботи	T_p , с
Параметри сипкого матеріалу		
5	Радіус частинки	r , м
6	Коефіцієнти тертя між частинками сипкого матеріалу та між частинками та матеріалом робочих елементів	$f_{тр1} \dots f_{трn}$
7	Кут природнього укосу	φ , рад
8	Насипна густина	ρ , кг/м ³
Масогабаритні та енергетичні параметри		
10	Максимально припустимі розміри транспортувального елемента	L_x, D_x , м
11	Максимально припустима потужність	P , Вт
12	Максимально припустима маса	m_k , кг

Запропонований у роботі алгоритм проєктування охоплює шість основних етапів, які показані на схемі (рис. 4.1).

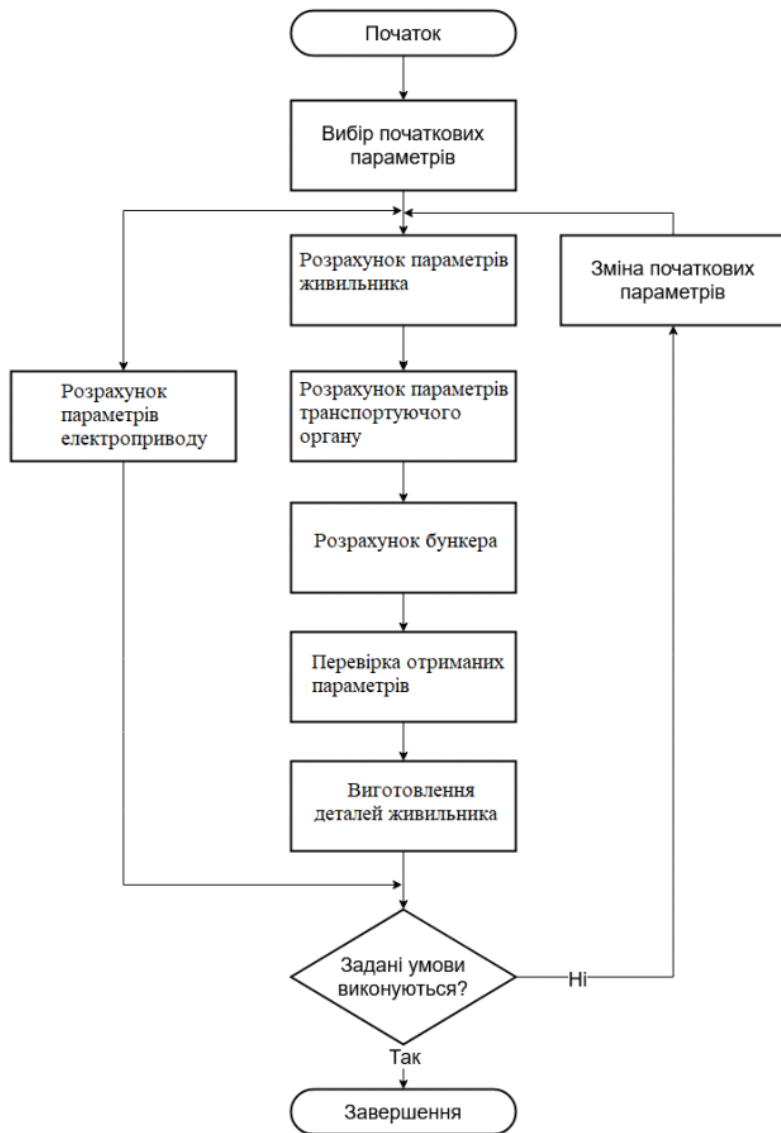


Рис. 4.1. Загальна схема алгоритма проєктування трубчато-гребневого живильника

На першому етапі здійснюється постановка бажаних результатів розрахунків основних геометричних та технологічних параметрів трубчато-гребневого безперервної дії. Оскільки всі параметри робочих елементів змішувача неможливо однозначно визначити на основі заданих властивостей суміші, частина характеристик задається у вигляді початкових наближень. На їх основі здійснюється розрахунок інших параметрів живильника та перевірочний розрахунок руху частинок сипкого матеріалу всередині нього.

Другий етап проектування передбачає розрахунок траєкторій руху потоків сипких матеріалу всередині живильника, визначення взаємного розташування, форми та геометричних розмірів гребнів у трубі.

На третьому етапі проектування визначаються конструктивні та технологічні параметри транспортувального елемента живильника. Залежно від заданих параметрів сипкого матеріалу розраховується довжина, діаметр труби, а також висота, нахил, та кількість спіралей та їх витків у трубі.

Діаметр труби живильника визначається з діаметра отвору бункера

$$D_o = D_T \quad (4.1)$$

Мінімальну довжину труби можна визначити з залежності:

$$L_T = \frac{D_T}{\tan(\alpha)}, \quad (4.2)$$

де D_T – діаметр труби живильника, м;

L_T – довжина труби живильника, м;

α – кут природнього укосу сипкого матеріалу.

Четвертий етап проектування передбачає визначення геометричних параметрів бункера, таким чином, щоб забезпечити рух матеріалу із мінімальними пульсаціями. За формулою Кенемана Ф.Е. продуктивність бункера буде дорівнювати:

$$Q_z \leq Q_b = 21(D_o - 2,5d_q)^{2,5}, \quad (4.3)$$

де Q_z – очікувана продуктивність живильника;

Q_b – продуктивність бункера;

D_o – діаметр вихідного отвору бункера;

d_q – діаметр частинки сипкого матеріалу.

На п'ятому етапі здійснюються виготовлення та складання елементів живильника.

На шостому етапі здійснюються перевірочні експерименти на живильнику та порівняння їх із заданими умовами.

Аналіз результатів експериментів дає змогу прийняти рішення про відповідність параметрів пристрою заданим критеріям або про необхідність здійснення повторного розрахунку із іншими початковими параметрами.

4.2. Рекомендації щодо керування вхідним ШІМ-сигналом двигуна

Існує 2 схеми під'єнання перемикаючого транзистора. Він може бути включений між землею та двигуном, а інший вихід двигуна до плюса живлення, або, навпаки, транзистор (драйвер) включений між плюсом живлення та двигуном, а 2-й підключено двигун до землі (Додаток Г).

Перша схема простіша і підходить для простого регулювання швидкості обертання вала двигуна. Однак у цій схемі важко виміряти струм та напругу на двигуні. При спробі фіксування показників до струму двигуна буде доданий струм через транзистор від МК. Амплітуда цього струму не висока, але вона має накопичувальний характер. У другій схемі і струм, і напруга вимірюються досить просто, оскільки один дріт двигуна з'єднаний із землею.

Логіка автоматичного керування двигуна живильника

Усі ці питання виникли при реалізації на практиці системи керування живильника на основі двигуна RS550, який обертає трубу живильника.

Логіка роботи в автоматичному режимі передбачає кілька етапів роботи двигуна:

1. Старт двигуна після включення живлення.
2. Розгін двигуна до заданої швидкості обертання.
3. Робота на заданій швидкості для транспортування потрібної кількості сипкого матеріалу.
5. Після транспортування сипкого матеріалу відбувається поступове гальмування двигуна до мінімальної швидкості обертання.
6. Пауза для нейтралізації інерційних властивостей двигуна. У цей час вимірювання можуть містити недостовірну інформацію про інерцію якоря двигуна.

7. Повертаємося до 2-го етапу роботи двигуна.

Схему підключення двигуна живильника представлено на рис. 4.2.

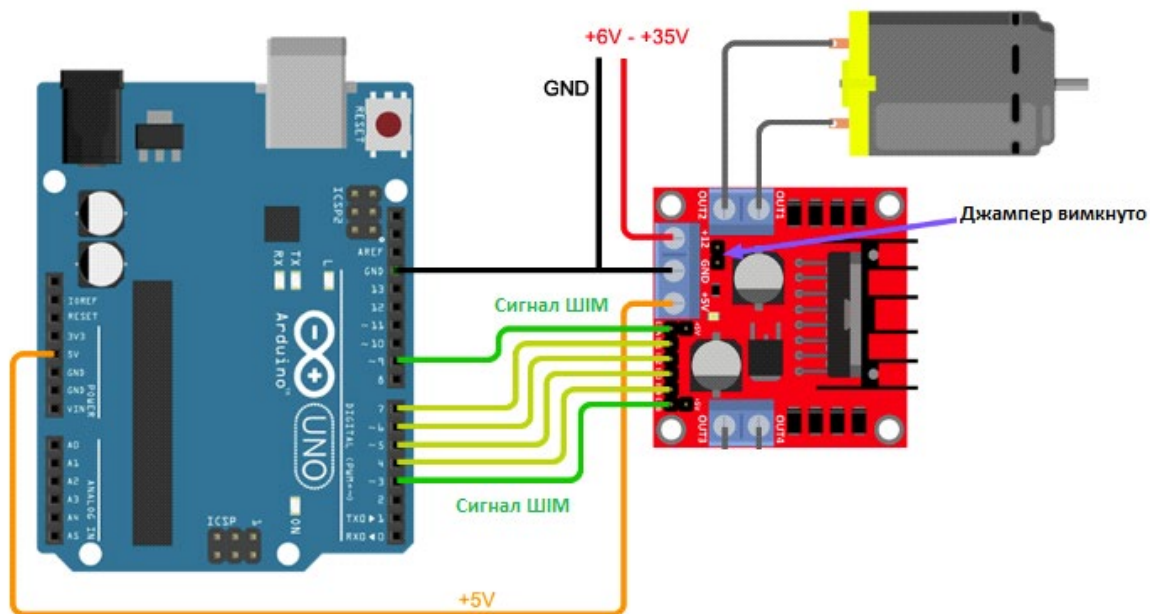


Рис. 4.2. Схема підключення двигуна постійного струму через драйвер L298N до мікроконтролера

У схемі реалізовано підключення системи керування обертанням двигуна постійного струму з використанням мікроконтролера та драйвера L298N.

Передусім, встановлюється фізичне з'єднання мікроконтролера Arduino та драйвера L298N. Пін VCC драйвера виводиться на джерело живлення Arduino, що, як правило, становить +5V, та пін GND з'єднується з землею мікроконтролера.

Цифрові входи драйвера L298N (In1, In2, In3, In4) призначені для управління напрямком обертання двигуна. За допомогою програмного коду, розробленого на платформі Arduino, керуючі сигнали подаються на вказані входи драйвера, реалізуючи тим самим точне управління рухом двигуна у визначених напрямках.

На виходах драйвера L298N (OUT1, OUT2,) встановлюються з'єднання з відповідними контактами двигуна. Це дає можливість передавати сигнали від драйвера до двигуна та контролювати його обертання згідно з програмним скетчем (Додаток Г), який записано в мікроконтролер.

Живлення самого двигуна реалізується через піни M1 та M2 драйвера L298N, що надає необхідну енергію для його роботи.

Швидкість обертання визначає частоту перемикання обмоток якоря і, отже, тривалість напруги подачі на обмотку до перемикання на іншу частину обмотки. Струм обмотки залежатиме від її індуктивності та опору, а також від часу її включення та швидкості обертання якоря з обмотками.

На рисинку 4.3 вказана тривалість імпульсу ШІМ у режимі Холостого Ходу.

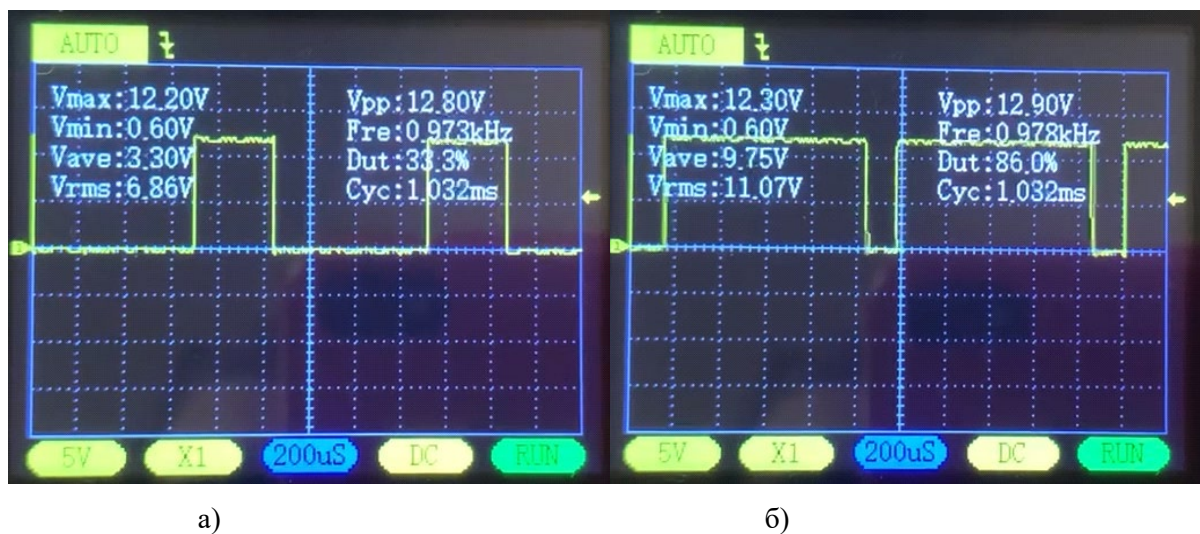


Рисунок 4.3 тривалість імпульсу ШІМ режимі Холостого Ходу, а) заповненість полоси ШІМ 33,3 %; б) заповненість полоси ШІМ 86 %.



а)

б)

На рисунку 4.4 зображено напругу в робочому режимі живильника з навантаженням на валу при різній тривалості імпульсу ШІМ.

а) заповненість полоси ШІМ 33,3 %; б) заповненість полоси ШІМ 86 %.

На рисунках 4.3 та 4.4 значення V_{max} – максимальне значення амплітуди ШІМ сигналу, V_{min} - мінімальне значення амплітуди ШІМ сигналу, V_{ave} – 3 робоче значення полоси ШІМ, V_{rms} – не задіяне значення полоси ШІМ, Fre – частота сигналу, Dut – відсоток наповненості полоси ШІМ робочим значенням.

На рисунку 4.3 відображено, що робочий сигнал ШІМ набуває вигляд міандру (квадратний вигляд сигналу) також можна сформулювати висновок, що якість сигналу досить добра враховуючи якість та ціну компонентів схеми.

На рисунку 4.4 видно, що при підключення до сигналу ШІМ двигуна живильника величина V_{min} набуває від'ємного значення, а значення V_{max} росте на величину додатної величини V_{min} . Також відбувається викривлення сигналу міандру.

При практично максимальному ШІМ різниця між цими режимами вже не така помітна. Форма струму та напруги вже не має імпульсного характеру і близька до інтегрованого на значенні RC-ланцюга рис. 4.5.

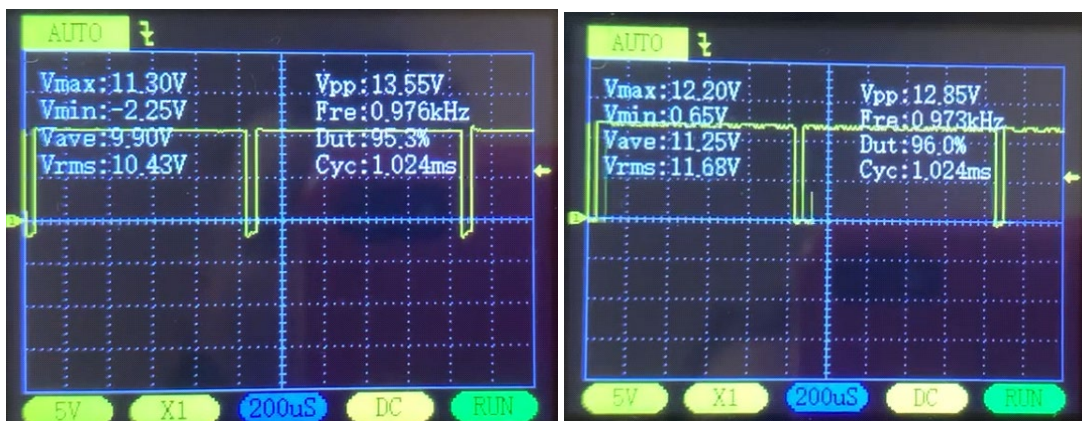


Рис. 4.5. Імпульси ШІМ при режимах роботи а) Робочому, б) Холостому ході.

Великий пік амплітуди напруги в робочому режимі при мінімальному імпульсі ШІМ пояснюється тим, що швидкість обертання двигуна мала, отже, і контр-ЕДС теж мале, а час увімкнення обмоток виходить за межі розрахункових значень, індуктивність все менше впливає на струм, який прагне до максимального значення:

$$I_{\text{обм}} = \frac{U_{\text{жив}}}{R_{\text{обм}}} \quad (4.1)$$

Ця ситуація подібна до запуску двигуна. Зі збільшенням ШІМ швидкість обертання і контрЕДС зростають, а струм падає.

Після завершення дії імпульсу ШІМ системи керування двигун, через певний час, починає працювати як генератор напруги, оскільки обертання якоря продовжується. Величина цієї напруги прямо пропорційна швидкості обертання, тобто швидкості перетину обмотками якоря магнітного поля постійних магнітів. Цей факт відображається формулою:

$$E = C_e * \Phi * n \quad (4.2)$$

де C_e - одна з конструктивних констант, залежить від конструкції двигуна, кількості полюсів, кількості витків, товщини зазорів між якорем і статором;

Φ — потік збудження, тобто сила магнітного поля статора. У дрібних моторчиках, де це задається постійним магнітом, це також константа;

n — кількість обертів якоря на хвилину.

Обертання двигуна починається при величині $V_{ave} = 2.2$ В. Це відображає той факт, що двигун у цьому випадку має невелику потужність, і будь-яке навантаження впливає на швидкість його обертання, отже, це параметр чутливий до навантаження.

Середня тривалість імпульсу ШІМ показує аналогічну картину. При навантаженні напруга генерації падає приблизно на 5 вольт. Крім того, на цьому малюнку чітко видно викиди напруги при перемиканні обмоток.

При практично максимальному імпульсі ШІМ вже важко розрізнити різницю між холостим ходом і навантаженням, оскільки двигун працює майже на максимальній потужності та швидкості обертання.

Для того щоб зменшити паразитні струми, що повертаються з якоря двигуна назад до драйвера можна використати напівпровідниковий елемент такий, як діод який не пропускатиме деякі від'ємні величини напруг.

Вплив діода марки 1N5408 на якість роботи двигуна представлено на рис. 4.6:

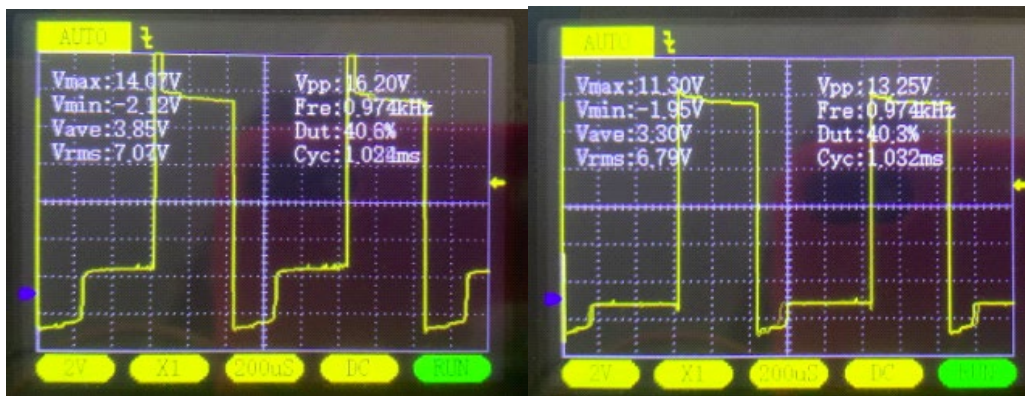


Рис. 4.6.: а) якість сигналу ШІМ без діоду; б) з використанням діоду.

З цих осцилограм можна висновувати, що значення V_{min} зменшилось при тих самих значеннях наповненості полоси ШІМ (Dut), що означає що ККД схеми виросло. Оскільки діод марки 1N5408 не призначений для роботи на таких частотах і використовується переважно в побутових приладах для випрямлення мережі використання його не є доцільним, використання більш сучасних діодів призначених для роботи на високих частотах підвищить якість роботи двигуна постійного струму при використанні ШІМ регулятору.

Варто відзначити ще одну особливість, пов'язану з вимірюванням струму та напруги на двигуні. Справа в тому, що ці значення «пливуть» з часом. Після

увімкнення живлення струм та напруга мають відносно невеликі значення, і протягом 7–10 хвилин зростають, а потім стабілізуються.

Оскільки в інтегруючих ланцюгах час вимірювання RC (~100 мікросекунд), то короткі викиди при перемиканні обмоток починають впливати через деякий час на роботу. Двигун під час роботи змащується і починає обертатися швидше. Щітки двигуна починають краще прилягати до ламелі колектора. У зв'язку з цим не можливо створити чіткі по часу цифрові орієнтири для роботи мікроконтролера.

4.3. Вибір матеріалу для виготовлення деталей живильника.

Для зменшення витрат на виготовлення деталей живильника використано 3D-друк елементів деталей.

Найбільш доцільним є виготовлення деталей моделі на 3D-принтері з поліматеріалів. З цією метою потрібно правильно вибрати вихідний пластиковий матеріал.

Пластик є основним матеріалом для 3D-друку. Він легко плавиться (при температурі 200–250 °C) і швидко затвердіває, що дає змогу наносити його шарами один на одного, утворюючи таким чином об'ємні тіла. У даному підрозділі розглянуто, які існують види пластика для 3D-друку, проаналізовано їх характеристики та обрано найбільш підходящий пластик для моделі живильника, яка в подальшому буде брати участь у експерименті.

АБС-пластик (ABS, акрилонітрил-бутадієн-стирол) – ударостійка технічна термопластична смола на основі сополімера-акрилонітрила з бутадієном та стиролом (назва пластика утворена з початкових літер найменувань мономерів). Пропорції можуть варіюватися в межах:

15–35 % акрилонітрилу, 5–30 % бутадієну і 40–60 % стиролу. Властивості АБС-пластику [2]:

- непрозорий матеріал жовтуватого відтінку. Може бути забарвлений у різні кольори;
- нетоксичність в нормальних умовах;
- довговічність в умовах відсутності прямих сонячних променів і ультрафіолету;
- стійкість до лугів та миючих засобів;
- вологостійкість;
- стійкість до масел;
- стійкість до кислот;
- термостійкість 103 °С (до 113 °С для модифікованих марок);
- широкий діапазон експлуатаційних температур (від -40 °С до +90 °С);
- розчиняється у складних ефірах, кетонах, 1,2-дихлоретані, ацетоні, етилацетаті. Фізико-механічні властивості АБС-пластику наведені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.2

Фізико-механічні властивості АБС-пластика

Характеристика	Показник
Густина	1,02–1,08 г/см ³
Міцність при розтягуванні	35–50 МПа
Відносне видовження	10–25%
Усадка	0,4–0,7%
Твердість по Брінелю	90–150 МПа
Температура зм'якшення	90–105°С
Межа текучості при розтягуванні	35,3 МПа
Модуль Юнга	1700–2930 МПа

Полілактід (ПЛА, PLA) – біорозкладний, біосумісний, термопластичний, аліфатичний поліефір, мономером якого є молочна кислота. Сировиною для виробництва є щорічно оновлювані ресурси, такі як кукурудза і цукровий тростник. Використовується для виготовлення виробів з коротким терміном служби (харчова упаковка, одноразова посуд, пакети, різна тара), а також у медицині, для

виробництва хірургічних ниток та штифтів (зазвичай цей матеріал проходить спеціальну медичну сертифікацію).

Властивості PLA-пластику [30]:

- нетоксичний;
- широка колірна палітра;
- при друці не потребує нагрітої платформи;
- стабільні розміри;
- ідеально підходить для рухомих частин та механічних моделей;
- відмінне ковзання деталей;
- економія енергозатрат завдяки низькій температурі розм'якшення нитки;
- гладкість поверхні надрукованого виробу;
- отримання більш детальних та повністю готових до застосування об'єктів.

Фізико-механічні властивості PLA-пластику наведено у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Фізико-механічні властивості PLA-пластику

Характеристика	Показник
Густина	1,23-1,25 г/см ³
Міцність при розтягуванні	57,8 МПа
Відносне видовження	3,8%
Усадка	Не более 0,8%
Твердість по Брінелю	127-187 МПа
Температура зм'якшення	50 °С
Межа текучості при розтягуванні	53-70 МПа
Модуль Юнга	350-2800 МПа

Поліетилентерефталатгліколь (ПЕТГ) (за міжнародним позначенням (PET-G)) представляє собою модифікацію поліетилентерефталату (ПЕТ або ПЕТФ), яка дає змогу подолати його певні недоліки [28].

Недоліком ПЕТ є те, що він стає непрозорим при повільному охолодженні через часткову кристалізацію. Для тонких деталей цього уникається швидким

охолодженням (наприклад, у ПЕТ-пляшках, що мають залишатися прозорими). Якщо потрібно відводити тепло з великих або товстостінних виробів, то прозорість не може бути забезпечена. Заміна частини етиленгліколю (1,2-етандіолу) диметанолом циклогексаном як діола у виробництві цього ефіру призводить до значних стеричних перешкод (через конфігурацію циклогексана). Пластик отримав назву ПЕТГ, тому що модифікований гліколь має набагато більш низьку температуру плавлення і залишається прозорим при будь-яких операціях, що є очевидною перевагою при термоформуванні деталей з плівки/листа ПЕТГ.

Властивості PETG-пластику [28]:

- прозорий аморфний матеріал. Температура склоподібного стану приблизно 80–85 °С;
- має високу жорсткість та твердість;
- стійкий до розбавлених кислот і лугів, розчинів солей, мил, масел, спиртів, аліфатичних вуглеводнів;
- добре стерилізується;
- легко переробляється.

Фізико-механічні властивості PETG-пластику наведені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Фізико-механічні властивості PETG-пластика

Характеристика	Показник
Густина	1,26 – 1,28 г/см ³
Міцність при розтягуванні	60 - 66 МПа
Відносне видовження	1.02 - 1.18%
Усадка	0,2 - 0,6%
Твердість по Брінелю	141-156 МПа
Температура зм'якшення	81 - 91 °С
Межа текучості при розтягуванні	47,9 – 52,9 МПа
Модуль Юнга	2010 - 2110 МПа

Основними вимогами для матеріалів, з яких буде виготовлено модель живильника для експериментальних досліджень, є міцність матеріалу, відносне подовження, твердість (оскільки у моделі використовуються зубчасті передачі) та усадка матеріалу, оскільки при великій усадці втрачається точність при виготовленні деталей. Порівнюючи ці параметри, можна дійти до таких висновків. За міцністю найбільший показник має PETG-пластик (60–66 МПа проти 57,8 МПа у PLA-пластика та 35–50 МПа у ABS-пластика). За відносним подовженням найкращий показник також має PETG-пластик (1,02–1,18% проти 3,8% у PLA-пластика та 10–25% у ABS-пластика). За твердістю найбільший показник має PLA-пластик (127–187 МПа проти 141–156 МПа у PETG-пластика та 90–150 МПа у ABS-пластика). За усадкою найкращий показник має PETG-пластик (0,2–0,6% проти 0,4–0,7% у ABS-пластика та 0,8% у PLA-пластика).

Враховуючи вищезазначене, можна сформулювати висновок, що за більшістю показників найкращим пластиком для виготовлення деталей живильника на 3D-принтері моделі придатної для випробувань, є PETG-пластик.

4.4. Алгоритм розробки та виготовлення деталей трубчато-гребневого живильника

У роботі для створення експериментального стенду було використано технологію 3D-друку, за допомогою якого були виготовлені: бункер; живильник; зубчастий конічний редуктор.

3D-друк дає можливість швидко та ефективно виготовляти складні деталі без необхідності використання складних виробничих процесів. Це сприяє значному скороченню часу виготовлення та зниженню витрат на виробництво.

Технологія 3D-друку – це добре розроблений і підготовлений процес перетворення віртуальних моделей на фізичні об'єкти. Він передбачає покрокову

розробку деталі із використанням програмних та технічних комплексів Процес 3D-друку складається з етапів, перерахованих на рисунку.

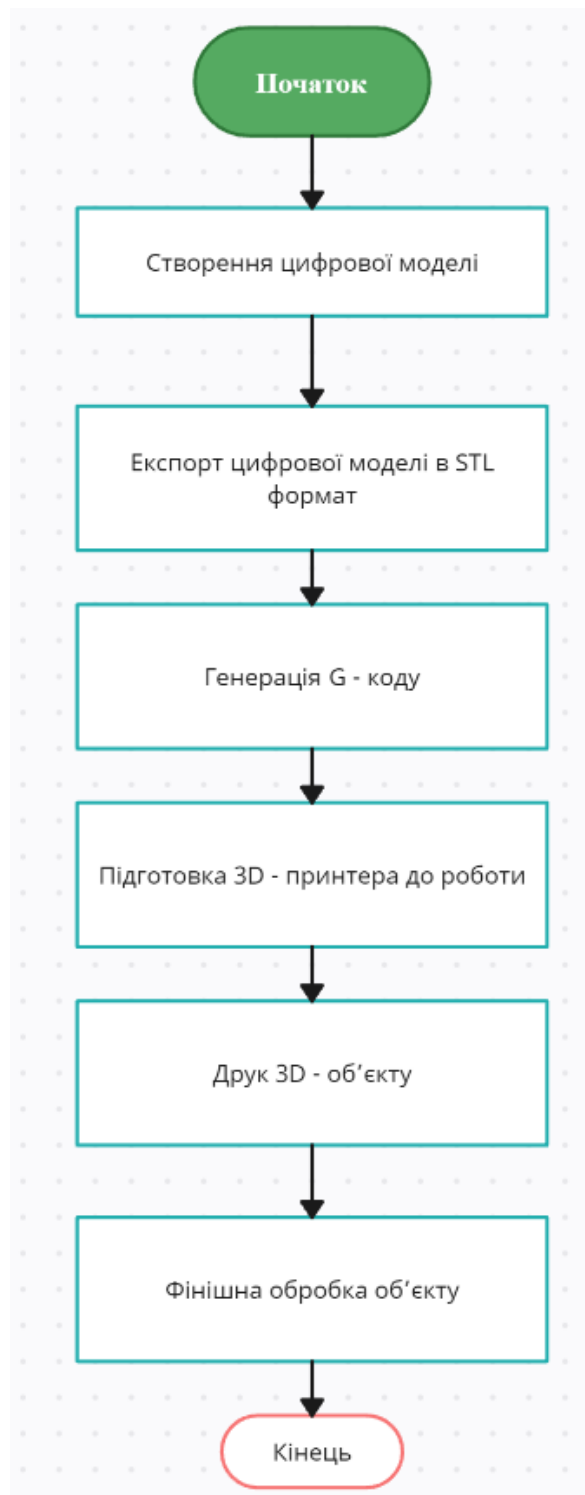


Рис. 4.15. Алгоритм технології 3д-друку

У додатках (Д, Е, Є, Ж) наведено робочі креслення. Також у живильнику використана зубчаста конічна пара, що виступає в якості редуктора. Оскільки

розробка зубчатих пар досить трудомістке завдання було використано розширення GearTrax[17].

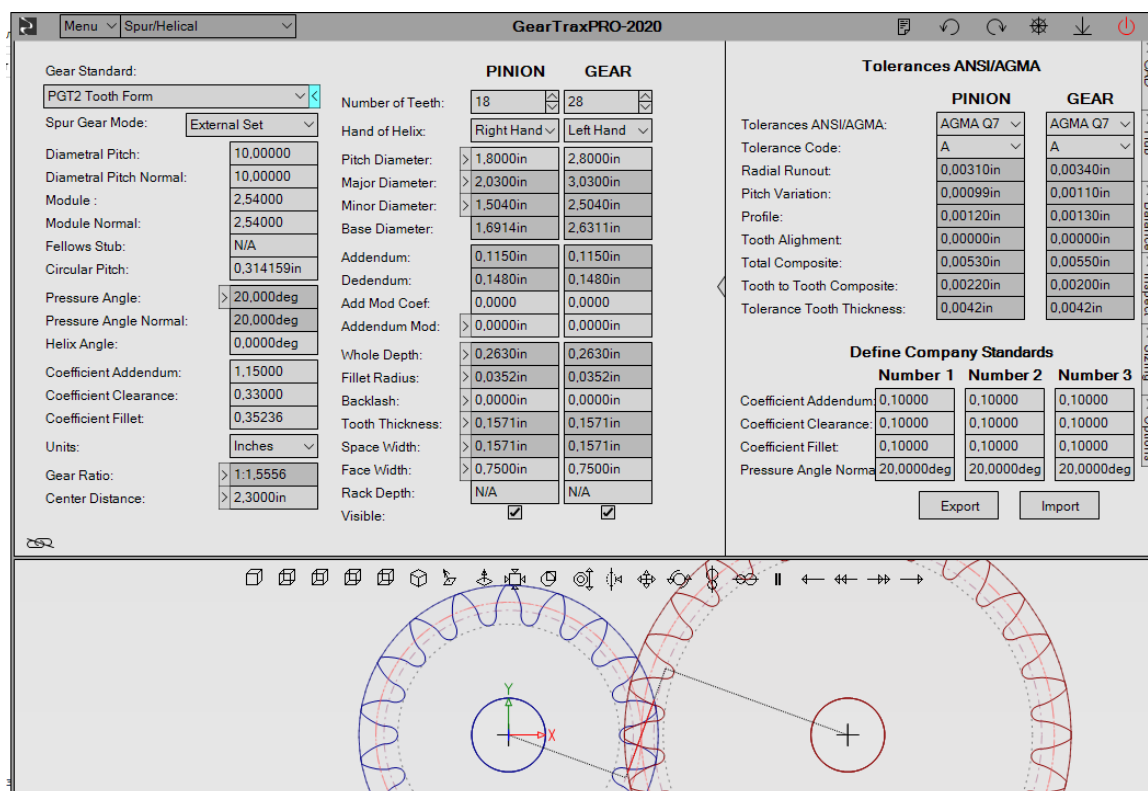
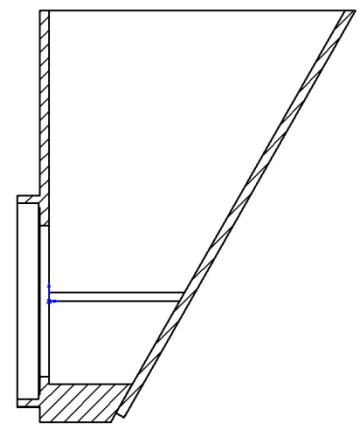
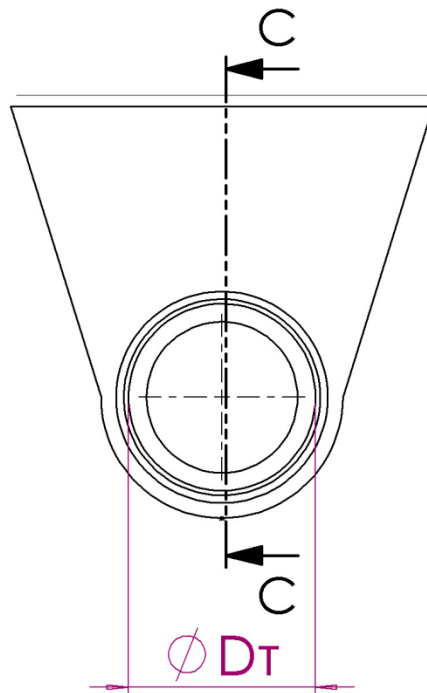


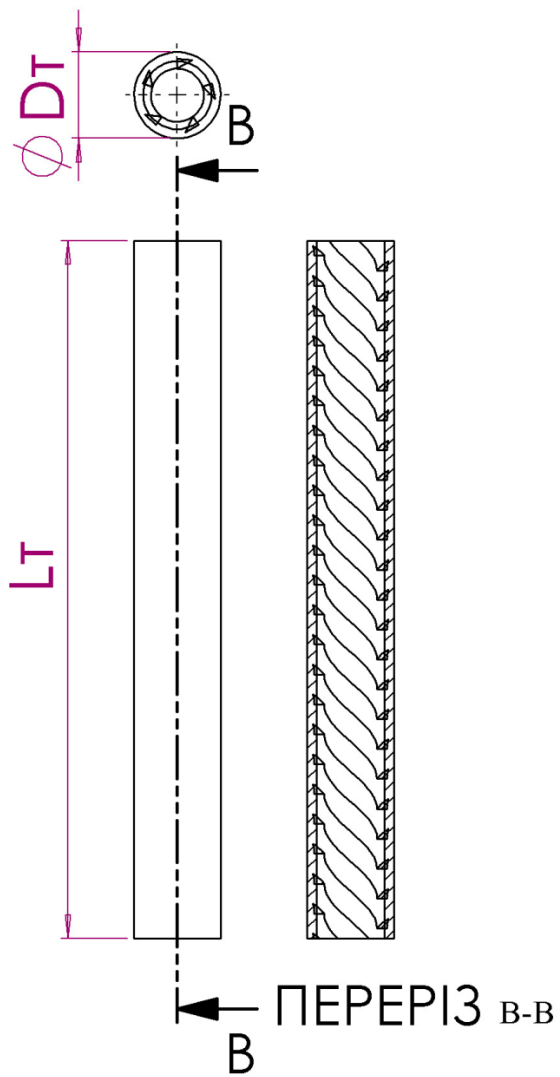
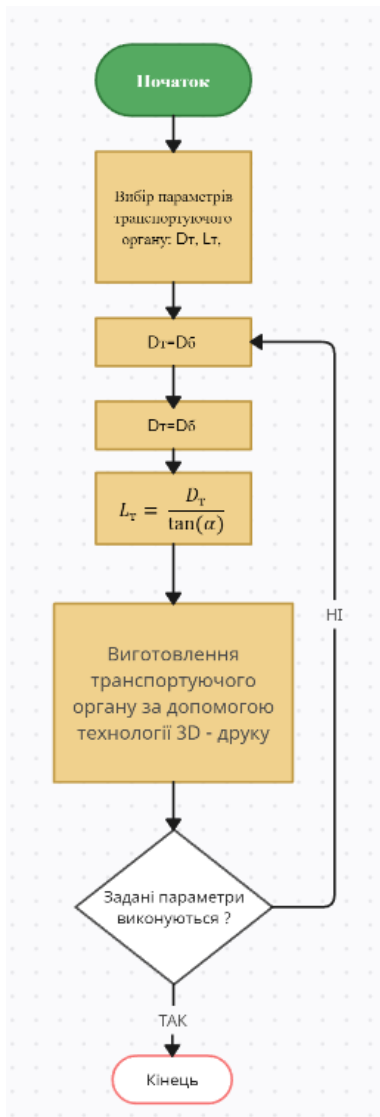
Рис. 4.18. Модуль розробки зубчастих пар GearTrax

GearTrax дає можливість створювати широкий спектр зубчастих передач, зокрема зубчасті колеса зі звичайними, шевронними, конічними та іншими типами зубів. Він також надає можливість автоматичної генерації геометрії зубчастих коліс на основі введених параметрів, що спрощує і прискорює процес проєктування. Алгоритми створення деталей представлено на рис. 4. 19:

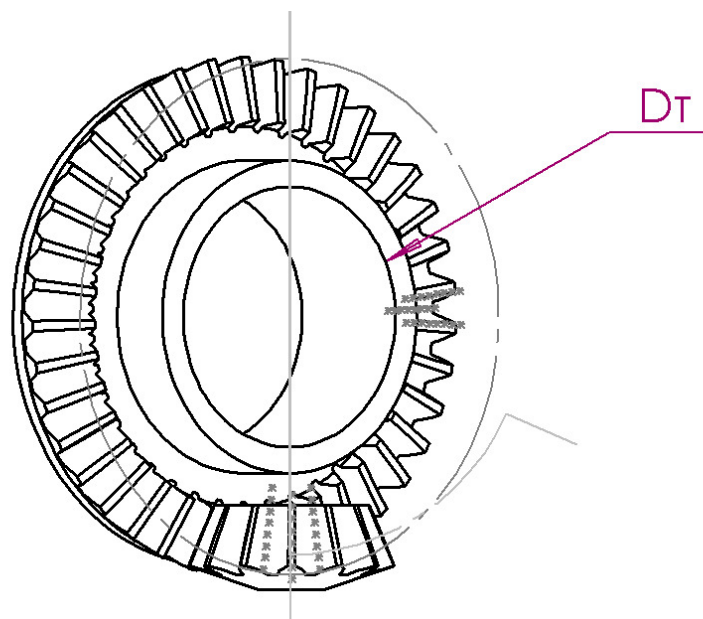
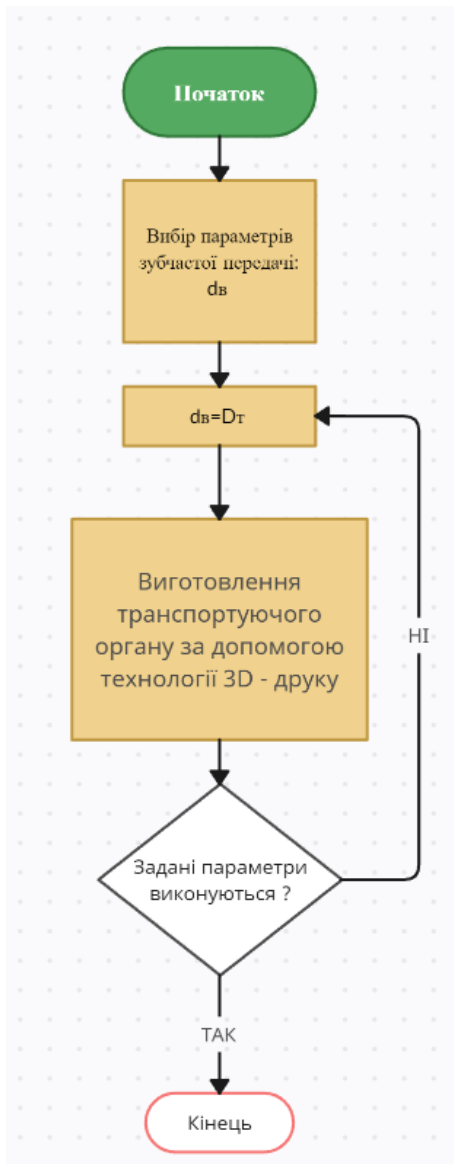


ПЕРЕРІЗ C-C

a)



б)



в)

Рисунок 4.19 – а) алгоритм розробки бункера; б) алгоритм розробки живильника; в) алгоритм розробки зубчастої пари

Для виготовлення деталей живильника використано 3D-принтер марки 3D FreeSculpt PV-8700-675 [13] рис. 4.17, який розташовано на кафедрі комп'ютерної інженерії та електромеханіки, КНУТД.

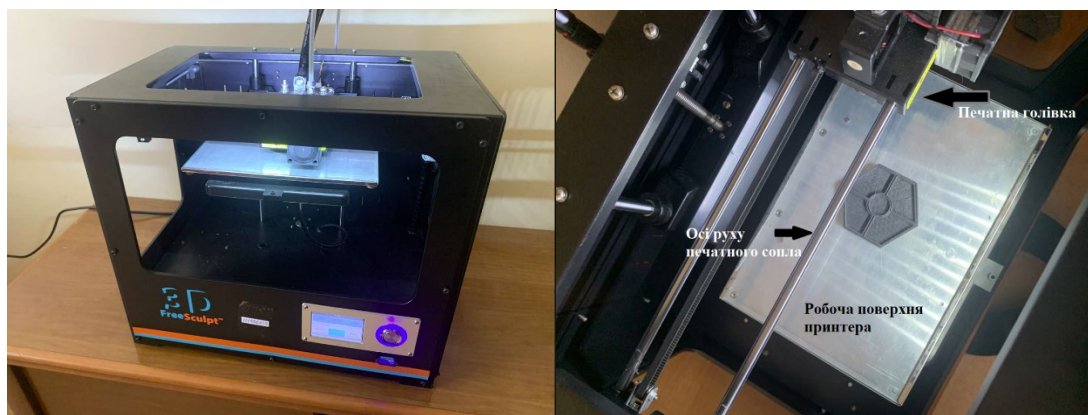


Рис. 4.17. 3D-принтер марки 3D FreeSculpt PV-8700-675

Таблиця 4.5

Технічні характеристики 3D-принтера

Характеристика	Значення
Максимальні розміри об'єкта	230 × 150 × 185 мм
Швидкість подачі матеріалу	40–60 мм/с
Швидкість переміщення	80-120 мм/с
Товщина шарів	До 0,1 мм
Діаметр сопла	0,35 мм
Потужність	200–240 Вт
Інтерфейси	Карта SD, USB-порт
Підтримувані формати файлів	STL, GCODE (PC), X3G (SD)
Живлення	230 В AC
Сумісне програмне забезпечення	Windows XP/Vista/7/8, Mac OS X
Розміри без рулонів філаменту	470 × 390 × 310 мм
Товщина філаменту	1,75 мм

Для друку використано матеріал PETG-пластик фізичні властивості якого наведено в таблиці 4.4.

Висновки до розділу 4

1. Запропоновано послідовний алгоритм розрахунку та виготовлення конструкції трубчасто-гребневого живильника для сипких матеріалів.

2. Розроблено рекомендації щодо керуванням вхідного ШІМ сигналу двигуна постійного струму в живильнику та покращення його коефіцієнту корисної дії шляхом використання напівпровідникових елементів у якості зворотних фільтрів.

3. Проведено аналіз матеріалів для виготовлення деталей живильника за допомогою технологій 3D-друку.

4. Запропоновано програмні комплекси для розробки креслень деталей живильника.

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз існуючих конструкцій живильників безперервної дії для сипких матеріалів, принципів їх роботи та конструкцій.
2. Створено математичні моделі процесу транспортування сипкого матеріалу, що надають можливість визначати вплив геометричних розмірів та швидкостей обертання робочих елементів живильників на згладжувальну здатність.
3. Аналітично та експериментально підтверджено факт зменшення пульсацій на під час виходу сипкого матеріалу з трубчасто-гребневого живильника у порівнянні зі шнековим шляхом розташування гребнів на внутрішній стінці труби, різниця амплітуди пульсацій сягає, залежно від режиму роботи, до 16,4 раза.
4. Визначено критичну кутову швидкість обертання труби живильника, яка становить від 7 до 10 рад/с в залежності від заданих фізико-механічних властивостей сипкого матеріалу .
5. Розроблено та реалізовано нову конструкцію трубчасто гребневого-живильника безперервної дії, який може використовуватися у різних галузях та подано заявку на патент.
6. Розроблено інженерний метод та алгоритм проєктування трубчасто-гребневого живильника безперервної дії для сипких матеріалів легкої з використанням технології 3D-друку.
7. Результати дисертаційної роботи впроваджено в освітній процес Київського національного університету технологій та дизайну на кафедрах механічної інженерії та комп'ютерної інженерії та електромеханіки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Abou-Chakra, H., Baxter, J., and Tuzun, U., (2004). “Three-dimensional particle shape descriptors for computer simulation of non-spherical particulate assemblies”, *Advanced Powder Technology*, 15 (1), pp. 63–77.
2. ABS/PLA пластики // ADDITIVE TECHNOLOGY GROUP (ATG) / [Електроний ресурс]. – Режим доступу: URL: https://atg3d.ru/services/3d/abs_pla
3. Berruti F., Liden A.G., Scott D.S. Measuring and Modeling Residence Time Distribution of Low Density Solid in a Fluidized Bed Reactor of Sand Particles. /*Chem. Eng. Scien.*, 1988, vol.43, p.739–748.
4. Bharadwaj, R., “Using DEM to solve bulk material handling problems”, *Chemical Engineering Progress*, September 2012.
5. Bharadwaj, R., Ketterhagen, W. R., and Hancock, B. C., (2010). “Discrete element simulation study of a Freeman powder Rheometer”, *Chemical Engineering Science* 65 (21), pp. 5747-5756.
6. Chen S., Xu H., Zhao Z., (2021). Modeling and optimization of novel ball valve with high adjustable ratio. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. Volume 190, 104299. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2020.104299>
7. Cleary, P. W., (2010). “DEM prediction of industrial and geophysical particle flows”, *Particuology*, 8 (2), pp. 106–118.
8. Cundall, P., and Strack, O.D.L., (1979). “A discrete numerical model for granular assemblies”, *Géotechnique*, 29, pp. 47–65.
9. Erdmenger R. : Mehrwellenschnecken in der Verfahrenstechnik. *Chem. Ing.-Techn.* S. 175—185 (1964).
10. Fan W., Fan L., Keith D. Optimum Particle Size in Gas-Liquide-Solid Fluidized Bed Catalitic Reactor. /*Chem. Eng. Scien.*, 1988, vol.43, p.2741–2750.
11. Favier, J. F., Abbaspour-Fard, M. H., Kremmer, M., and Raji, A. O., (1999). “Shape representation of axisymmetrical, non-spherical particles in discrete element simulation using multi-element model particles,” *Engineering Computation*, 16 (4), pp. 467–480.

12. Fisher E.G. : Extrusion of Plastics. London : Iliffe Books Ltd. 1964.
13. FreeSculpt 3D-Drucker EX2-Basic mit Dual-Extruder. [Електроний ресурс]- Режим доступу: URL: <https://www.computerworld.ch/tests/pressticker/freesculpt-3d-drucker-ex2-basic-dual-extruder-1253512.html>
14. Fries, L., Antonyuk, S., Heinrich, S., and Palzer, S., (2011).“DEM-CFD modeling of a fluidized bed spray granulator”, Chemical Engineering Science, 66 (11), pp. 2340–2355.
15. Gavva, O. (2016).The research mechanical dynamic of model of the asynchronous engine in systems of continuous transport// Gavva O., Yakymchuk M., KryvopliasVolodina, L., – Праці інституту електродинаміки НАН України, випуск 44, 2016. – 94–99 p.
16. Gavva, O., Kryvoplias-Volodina, L., Blazhenko, S., Tokarchuk, S., Derenivska, A. (2021). Synthesis of a precision dosing system for liquid products based on electro-pneumatic complexes. EasternEuropean Journal of Enterprise Technologiesthis link is disabled, 6(2—114), 125—135. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.247187>.
17. GearTrax Camnetics, Inc. [Електроний ресурс]. – Режим доступу: URL: <https://www.solidworks.com/ru/partner-product/geartrax>
18. Hogue, C., (1998). “Shape representation and contact detection for discrete element simulations of arbitrary geometries”, Engineering Computations, 15 (3), pp. 374–390.
19. Holst, J. M., Rotter, J. M., Ooi, J. Y., and Rong, G. H., (1999). “Numerical modeling of silo filling. II: Discrete element analysis”, Journal of Engineering Mechanics, 125, pp. 94–110.
20. Houlsby, G., (2009). “Potential particles: a method for modeling non-circular particles in DEM,” Computers and Geotechnics, 36 (6), pp. 953–959.
21. Ketterhagen, W. R., Am Ende, M. T., and Hancock, B. C., (2009). “Process modeling in the pharmaceutical industry using the discrete element method,”

Journal of Pharmaceutical Sciences, 98, pp. 442–470.

22. Kiaulehn W. : Die eisemen Engel. Reinbeck : Rowohlt 1953, S. 23.
23. Kind R. Fluid Structure Interaction in Mixing processes. /Process Engineering, 1985, #2, P.50–51.
24. Liu Q., Tian S., Lin Z., Zhu Z. (2022). Effect of the convergence flow conditioner on rectifying eccentric jet flow induced by a ball valve. Flow Measurement and Instrumentation, Volume 83, 102091.
<https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2021.102091>.
25. Me Kelvey J.M.: Polymer Proceeing. New York : John Wiley A. Sons, Inc. 1962.
26. Oden, J. T., Martins, J. A. C., (1985). “Models and computational methods for dynamic friction phenomena”, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 52 (1–3), pp. 527–634.
27. Panasyuk I. Driving machine shaft angular velocity impact on motion conditional change of granular medium in working reservoir for components compounding and process. / I. Panasyuk, M. Zalyubovskiy // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – No3. P.260–264.
28. PETG пластик для 3D-принтера. [Электроний ресурс]. – Режим доступу: URL: <https://voltiq.ru/petg-plastic-for-3d-printing>
29. Petukhov Arkadyi, Shnyruk Oleg, Mikulionok Ihor, Gavva Oleksandr, Kryvoplias-Volodina Liudmyla. Design of a Composition Based on Polyethylene and Marble Microparticles That Decomposes Under the Effect of Ultraviolet Radiation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(6 (108)), 102-110, 2020.
30. PLA-пластик для 3D-друка // 3Dtoday / [Электроний ресурс]. 2013-2021. – Режим доступа: URL: https://3dtoday.ru/wiki/PLA_plastic.
31. Polishchuk, O., Zozulia, P., Polishchuk, A., Maidan, P., Skyba, M., Kostyuk, N., Kravchuk, A. & Kravchuk, O. (2020). Development and research of equipment for processing of granulated polymeric materials via 3d printing for the needs

of light industry. *Fibres and Textiles*. 27(4). pp. 75-80.

32. Rubanka M., Dvorzhak V. Zhilali Z., Shcherban Yu. Features of the use of modern automated projecting systems of machine-building industries. *Herald of Khmelnytskyi national university. Technical sciences*. 2023. Issue 6. pp.38-43.

33. Salter G. : *Stetigforderer*. Mainz : Krausskopf, 1964.

34. Sukhareva, N., Yakovlev, F., (2018). *Polymers for Packaging and Containers in Food Industry*. doi:<https://doi.org/10.1201/b12240>

35. Tsuji Y., Tanaka T., Ishida T. Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe. *Powder Technology*. Volume 71, Issue 3. 1992. – P. 239–250.

36. Vance F.P. *Statistical Properties of Dry Blends*. //Eng. Chem., 1986, v.58, P.37.

37. Vytvytskyi Viktor, Mikulionok Ihor, Sokolskyi Oleksandr, Gavva Oleksandr, Kryvoplias-Volodina Liudmyla. Design and technological parameters of equipment influence on the lateral pressure coefficient and reduced friction coefficient of granular polyvinyl chloride. *Ukrainian Food Journal*, 2021, Vol. 10, No. 1, 182-197, 219 ref. 29 ref.

38. Williams, J.R., and Pentland, A.P., (1992). “Superquadrics and modal dynamics for discrete elements in interactive design”, *Engineering Computation*, 9, pp. 115–127.

39. WolframMathworld. [Електроний ресурс]. – Режим доступа: URL <https://mathworld.wolfram.com/CircularSegment.html>

40. Zhu, H. P., Zhou, Z. Y., Yang, R. Y., and Yu, A. B., (2008). “Discrete particle simulation of particulate systems: A review of major applications and findings”, *Chemical Engineering Science*, 63 (23), pp. 5728–5770.

41. Антомонов М. Ю., Коробейніков Г. В., Хмельницька І. В. /Математичні методи оброблення та моделювання результатів експериментальних досліджень. // Олімпійська література, 2021. – 216 с.

42. Безсмертний Д. Порівняльний аналіз витратних характеристик

прецизійних дозаторів / Д. Безсмертний, С. В. Токарчук // Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у ХХІ столітті : матеріали 90-ї Міжнародної наукової конференції молодих вчених, аспірантів і студентів, 11–12 квітня 2024 р. – Київ : НУХТ, 2024. – Ч. 2. – С. 123.

43. Біла Т. Я. Моделювання динамічних навантажень в змішувальних комплексах безперервної дії. / Т. Я. Біла, В. В. Стаценко // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2015. – № 4. С.24-29.

44. Біла Т. Я., Стаценко В. В. Дослідження автоматизованого комплексу для змішування сипких композицій //Тези доповідей V Всеукраїнської наукової конференції молодих вчених та студентів «Наукові розробки молоді на сучасному етапі», том 2, Київ, КНУТД, 2006, с.5.

45. Біла Т. Я., Стаценко В. В. Комп'ютерне моделювання системи автоматичного керування змішувачем безперервної дії //Вісник СНУ ім. Даля №1, 2006, с. 9–12.

46. Боровик В. Н., Яковець В. П. Курс вищої геометрії: навч. посібник. Суми: ВТД «Університетська книга», 2004. 464 с.

47. Бурмістенков О. П. Виробництво литих деталей та виробів з полімерних матеріалів у взуттєвій та шкіргалантерейній промисловості : монографія / під заг. ред. В.П. Коновала. Хмельницький : ХНУ, 2007. – 255 с.

48. Бурмістенков О. П., Панасюк І. В. Основи теорії та практична реалізація пристроїв для зачищувальної обробки формових деталей із полімерних матеріалів. – Київ : НМК ВО, 1993. – 64 с.

49. Воляник О. Ю., Ковальов Ю. А., Рубанка М. М. / Аналітичне дослідження технологічних параметрів трубчасто-гребневого живильника для сипких матеріалів // Технології та інжиніринг, № 2(19), 2024.

50. Воляник О. Ю., Ковальов Ю. А., Рубанка М. М.. Аналітичне дослідження технологічних параметрів трубчасто-гребневого живильника для сипких матеріалів. Технології та інжиніринг. - 2024. - № 2 (19). - С. 9-17.

51. Гавва О. М. Пакувальне обладнання в 3 кн. – 2 кн. Обладнання

для групового пакування / Гавва О. М., Безпалько А. П., Волчко А. І. [За ред. А. І. Волчка]. – Київ: ІАЦ «Упаковка», 2007. – 136 с.

52. Гавва О. М., Кривопляс-Володіна Л. О., Токарчук С. В.. Функціонально-орієнтоване проектування машин пакування харчових продуктів у контексті технологій замкненого циклу. Наукові праці Національного університету харчових технологій. - 2022. - Т. 28, № 6. - С. 85- 95.

53. Гавва О. О. Ініціалізації нестационарного моделювання з метою підвищення точності дозування / О. О. Гавва, Л. О. Кривопляс-Володіна // Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у ХХІ столітті : матеріали 90-ї Міжнародної наукової конференції молодих вчених, аспірантів і студентів, 11–12 квітня 2024 р. – Київ : НУХТ, 2024. – Ч. 2. – С. 120.

54. Гевко І. Б. Технологічність конструкцій гвинтових транспортнотехнологічних механізмів машин / І. Б. Гевко // Науковий вісник Національного аграрного університету. – 2004. – № 73. – С. 348–352.

55. Гевко І. Синтез змішувачів з гвинтовими робочими органами / І. Гевко, Р. Любачівський, А. Дячун // Вісник Львівського національного аграрного університету : агроінженерні дослідження. – 2012. – № 16. –

56. Електричні машини та електропривод побутової техніки / М. Г. Попович, Л. Ф. Артеменко, О. П. Бурмістенков та ін.; за ред. Д. Б. Головка, М. Г. Поповича. – К.: Либідь, 2002. – 352 с.

57. Залуцький С. З., Гевко Р. Б., Гладь Ю. Б., Ткаченко І. Г., Клендій О. М. Рух потоку сипкого матеріалу по поверхні шнека з еластичними секціями, що перекриваються між собою. Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. – 2018. – № 11. – С. 81–90.

58. Залюбовський М. Г., Панасюк І. В., Малишев В. В. Перспективні технології обробки деталей та змішування сипких речовин у рухомих робочих ємкостях (частина 1: способи технологічних операцій). Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія «Технічні науки». – 2020. – № 2. – Т. 31(70). – С. 29–35.

59. Залюбовський М. Г., Панасюк І. В., Малишев В. В., Скідан В. В.. Кінетостатичне дослідження шарнірних просторових механізмів галтувальних машин (частина 1: дослідження механізму з додатковою рухомою ланкою – коромислом) Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки. - 2021. - № 1 (154).
- С. 9-18.
60. Залюбовський М. Г., Панасюк І. В., Малишев В. В.. Перспективні галтувальні та змішувальні технологічні процеси у машині типу «Turbula» Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. 2021. № 3, том 32 (71). С. 6-11;
61. Залюбовський М. Г., Панасюк І. В.. Машина для обробки деталей з семиланковим просторовим механізмом – синтез та дослідження Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. 2020. №4 (148). С. 38-47;
62. Калашніков Є. Є. Моделі та засоби автоматизації процесів керування дозуванням сипких матеріалів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.07 «Автоматизація процесів керування» / Є. Є. Калашніков; Харк. нац. ун-т радіоелектроніки. – Х. : ХНУРЕ, 2011. – 21 с.
63. Ковальов Ю. А., Плешко С. А., Лопухов Є. В. Пристрій зниження динамічних навантажень в приводі машин з пружиною кручення та вибір його параметрів. Вісник Хмельницького національного університету. Серія : Технічні науки. – 2021. – № 3 (297). – С. 87-93.
64. Ковальов Ю. А., Плешко С. А., Суворов І. О.. Розробка удосконаленої роботизованої системи завантаження екструдера. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2023. – Т. 1, № 1 (317). – С. 100-104.
65. Кривопляс-Володіна, Л. О. Вплив точності виготовлення поршневого дозатора на точність дозування в'язких продуктів// Л. О. Кривопляс-Володіна, Г. Р. Валіулін, А. В. Легун-Упаковка, 2009, №3. – с. 46– 50.

66. Лещук Р. Результати експериментальних досліджень гвинтових перевантажувальних механізмів / Р. Лещук, І. Гевко, Р. Комар // Вісник ТДТУ. – 2003. – Т. 8, № 4. – С. 56–61.
67. Ловейкін В. До розрахунку швидкохідних гвинтових конвеєрів / Вячеслав Ловейкін, Олена Рогатинська // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь, 2004. – Вип. 21. – С. 130–141.
68. Мікульонок І. О. Технологічні основи перероблення полімерів, пластмас і гумових сумішей. – Київ : НТУУ «КПІ», 2015. – 312 с. 27.
69. Нестеренко Т. М., Скачков В. О., Воденнікова О. С. Теорія і технологія порошкової металургії : навчально-методичний посібник. Запоріжжя : ЗДІА, 2016. – 192 с.
70. Одінцева О. О., Казак І. О. Один з способів удосконалення натяжного пристрою пластинчатого живильника // Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки: зб. наук. праць за матеріалами XI Всеукр. наук.-практ. конф. (Київ, 4–5 червня 2020 р.). – К: НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2020. – С. 52–53.
71. Оптимізація режимів роботи та конструктивних параметрів вертикальних гвинтових конвеєрів / О. Р. Рогатинська, Ю. В. Дудун, Л. Р. Рогатинська [та ін.] // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка «Механізація сільськогосподарського виробництва», – 2006. – Т. 2, № 44. – С. 258–264.
72. Пат. 18784 Україна, МПК В01F 7/26. Відцентровий змішувач безперервної дії; Біла Т. Я., Ковальов А. П., Стаценко В. В. Заявл. 02.06.06; Опубл. 15.11.2006, Бюл. №11, 2006.
73. Пат. 27245 Україна, МПК В65G 33/14 Гвинтовий транспортер для дозованого транспортування сипких матеріалів / Валлнер Ф.; заявник і патентовласник Фьест Альпине Індустріанлагенбау. – № 93090859; заявл. 06.07.1993; опубл. 15.08.2000, Бюл. № 3/2 000.
74. Пат. 32387 Україна, МПК В65G 33/14 Винтовий конвеєр / Гевко

Р. Б.; заявник і патентовласник Гевко Роман Богданович. – № u200800724; заявл. 21.01.2008; опубл. 12.05.2008, Бюл. № 9/2008.

75. Пат. 4497576 США, МКІ G 01 N 15/02. Спосіб аналізу часток у потоці сипкого матеріалу та пристрій для його здійснення; Йоргенсен Т., Странд О.Е., Асбьорсен О.А., 1985.

76. Пат. 45000 Україна, МПК В65G 33/14. Шнековий пристрій / Парієв А.А.; заявник і патентовласник Ін-т механізації тваринництва Укр. академії аграрних наук. – № 2000127022; заявл. 07.12.2000; опубл. 15.03.2002, Бюл. №3/2002.

77. Пат. 62236 Україна, МПК В65G 33/14 Дозатор-змішувач / Карманов В.В.; заявник і патентовласник Херсонський державний технічний університет. – № 2003021080; заявл. 06.02.2003; опубл. 15.12.2003, Бюл. № 12/2003. Пат. 66717 України МКІ 7G01N15/02. Спосіб визначення неоднорідності суміші сипких компонентів; Кострицький В. В., Біла Т. Я., Стаценко В. В. – Заявл. 13.10.03; Опубл. 17.05.04; Бюл.№5, від 17.05.2004.

78. Пат. 69213 Укріна, МПК В65G 33/14 Гвинтовой конвейер / Рогатинский Р.М.; заявник і патентовласник Національний університет водного господарства та природокористування – № u291111229 ; заявл. 21.09.2011 ; опубл. 25.04.2012, Бюл. № 8/2012.139.

79. Патент на винахід № 120536 UA. В03 В5/00, В03 В11/00. Мийка для вторинних полімерних матеріалів / Костюк В. С., Валіулін Г. Р., Костюк Є. В., Полумбрик М. О., Петрусенко А. С., Халіман М. В.; заявник та патентовласник Національний університет харчових технологій; опубл. 26.12.2019, Бюл № 24.

80. Пилипець М. І. Науково-технологічні основи виробництва навивних заготовок деталей машин : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук : спец. 05.03.01 «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти» / М. І. Пилипець. – Львів, 2002. – 35 с.

81. Повітряне або водяне охолодження для нагрівачів екструдера циліндра - що краще? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ten24.com.ua/ua/blog/vozdushnoe-ili-vodyanoe-okhlazhdenie-dlyanagrevateley-tsilindra-ekstrudera-hto-luchshe/>.
82. Поліщук А., Поліщук О. Розробка методу проєктування шнека екструдера 3D-принтера. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2023. № 4. С. 389-482.
83. Поліщук А., Поліщук О., Лісевич С., Урбанюк Є., Рубанка М. Композиційні суміші на основі синтетичних полімерів і наповнювачів та обладнання для 3D-друку ними. Вісник Хмельницького національного університету, Том 1, №2, 2023. – С.252–262.
84. Поліщук А., Поліщук О., Лісевич С., Урбанюк Є., Рубанка М. Композиційні суміші на основі синтетичних полімерів і наповнювачів та обладнання для 3D-друку ними. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2023. № 2. Ч.1. С. 104-110.
85. Поліщук О. С., Кармаліта А. К., Бурмістенков О. П. Полімерні матеріали для виробництва виробів легкої промисловості та їх фізико- механічні властивості // Вісник Хмельницького національного університету. 2018.
86. Рогатинський Р. Вплив імпульсних сил на крутильні коливання шнека / Рогатинський Р., Гевко И., Дячун А. // Матеріали шістнадцятої наукової конференції ТНТУ ім. І. Пулюя. – Тернопіль, 2012– С. 62–63.
87. Рогатинський Р. М. Дослідження процесів транспортування вантажів мобільними гвинтовими конвеєрами // Збірник наукових праць Національного аграрного університету «Сучасні проблеми сільськогосподарського машинобудування». – Київ: Видавництво НАУ, 1997. – Т. 1. С. 69– 73.
88. Рогатинський Р. Оптимізація параметрів гвинтових

транспортотехнологічних систем / Р. Рогатинський, І. Гевко, Л. Рогатинська

// Вісник ТНТУ. – 2013. – №1 (69). – С. 123–230.

89. Рогатинський Р. Оптимізація швидкохідних гвинтових конвеєрів за енергоємністю / Р. Рогатинський, І. Гевко. – [Електронний ресурс]

90. Савчук П. П., Кашицький В. П., Мельничук М. Д., Садова О. Л. Композитні та порошкові матеріали : навчальний посібник. – Луцьк : ФОП Теліцин О.В., 2017. – 368 с.

91. Семенцов В. В., Бойко І. Г. Розробка енергозберігаючої конструкції гравітаційного дозатора сипучих кормів [Текст] : В. В. Семенцов, І. Г. Бойко // Motrol. Commission of motorization and energetics in agriculture. An international journal on operation of farm and agri-food industry machinery. – Vol. 15, No 7. – Lublin – Rzeszow, 2013. – С. 10–13.

92. Системна інженерія пакувальних машин-автоматів : монографія / О. М. Гавва, Л. О. Кривопляс-Володіна, С. В. Токарчук, Л. В. Марцинкевич, О. О. Гавва. – Київ : Сталь, 2023. – 466 с.

93. Сокольський О. Л., Івіцький І. І., Олексишен В. О. «Моделювання течії розплавів полімерів за наявності низьков'язкого пристінного шару» // Вісник НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». – Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2019. – N 1. С. 35–40. DOI: 10.20535/2617-9741.1.2019.171033

94. Стаценко В. В. Керування процесом змішування сипких композицій у відцентрових змішувачах безперервної дії // Вісник КНУТД № 5 2005, С.79–82.

95. Стаценко В. В., Біла Т. Я. Аналіз сучасних методів контролю якості процесу змішування багатокомпонентних середовищ // Вісник КНУТД

№1 2004, С. 80–84.

96. Суберляк О. В. Технологія переробки полімерних та

композиційних матеріалів: підруч. для студ. вищ. навч. закл. / О. В. Суберляк, П. І. Баштанник. — Л.: Растр-7, 2007. — 376 с.

97. Суберляк О. В., Баштанник П. В. Технологія переробки полімерних та композиційних матеріалів. Львів : Растр, 2007. 375 с.

98. Тарасевич А. М. Удосконалення дозатора легкосипких матеріалів: кваліфікаційна робота : спец. 208 «Агроінженерія» / Поліський нац. ун-т, каф. агроінженерії та технічного сервісу ; наук. кер. Медведський О. В. – Житомир, 2023. – 35 с.

99. Технологічні основи формоутворення спеціальних профільних гвинтових деталей / [Б. М. Гевко, О. Л. Ляшук, І. Б. Гевко та ін.]. – Тернопіль: ТДТУ імені Івана Пулюя, 2008. – 367 с.

100. Цизь І. Є., Дідух В. Ф. Дозування сипких зв'язних матеріалів під час виробництва органо-мінеральних добрив: монографія. Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2017. – 184 с.

101. Щербань В. Ю., Колиско О. З., Мельник Г. В., Колиско М. І., Щербань Ю. Ю.. Комп'ютерна реалізація модуля для шатунно-коромисловї групи програми K DAM для визначення кінематичних та динамічних параметрів. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2023. – № 4 (323). – С. 343-346.

102. Щербань В.Ю., Кольва М.А., Єгоров Д.С., Колиско О.З., Щербань Ю.Ю. Розробка комп'ютерного модуля для кінематичного та динамічного аналізу важільних механізмів машин легкої промисловості програми для оцінки напруженості технологічних процесів. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2023. №1. С. 220-223

103. Юскаєв В. Б. Композиційні матеріали : навчальний посібник. – Суми : Видавництво СумДУ, 2006. –199 с.

ДОДАТКИ

Код для отримання графіку коливання сипкого матеріалу в трубі жмаильника

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Параметри коливання матеріалу в трубі
total_time = 5 # Загальна кількість часу (с)
tooth_time = 0.35 # Час одного коливання (с)
amplitude = -1 # Амплітуда (см)

# Час
t = np.linspace(0, total_time, 1000)

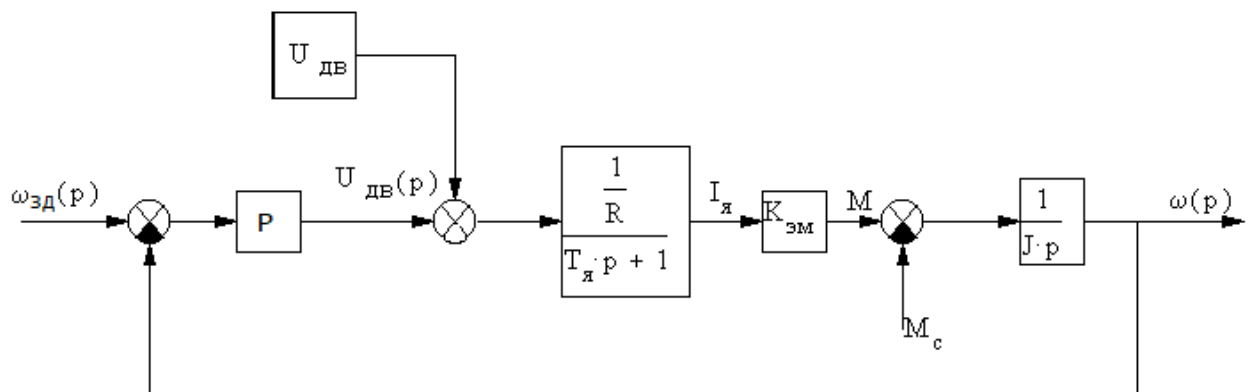
# траєкторія
y = np.zeros_like(t)
for i in range(len(t)):
    y[i] = amplitude * (2 * (t[i] % tooth_time) / tooth_time - 2) * -1

# Побудова графіка
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(t, y, color='b', linewidth=2, label='Траєкторія')
plt.title('Траєкторія руху частинки')
plt.xlabel('Час (с)')
plt.ylabel('Амплітуда (см)')
plt.ylim(-2.5, 2.5) # Змінюємо межі по осі Y
plt.xlim(0, total_time) # Змінюємо межі по осі X

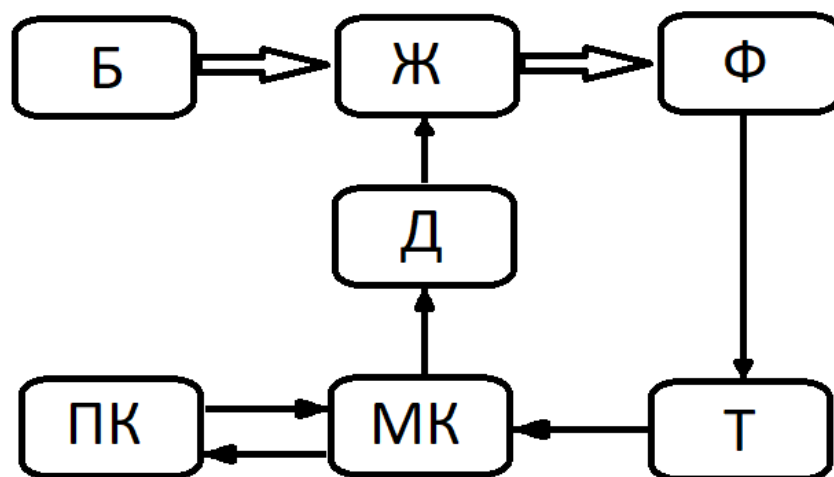
# Додавання штрихованої лінії на нулі
plt.axhline(y=0, color='gray', linestyle='--', linewidth=3)
plt.text(0.8, 0.1, 'Вісь труби', fontsize=10, va='bottom', ha='right', color='gray')

plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()
```


Математична модель двигуна постійного струму



**Структурна схема стенду для визначення продуктивності
трубчасто-гребневого живильника**



Б – прямокутно-трапецеїдальний бункер;

Ж – трубчасто-гребневий живильник;

Ф – формувач потоку;

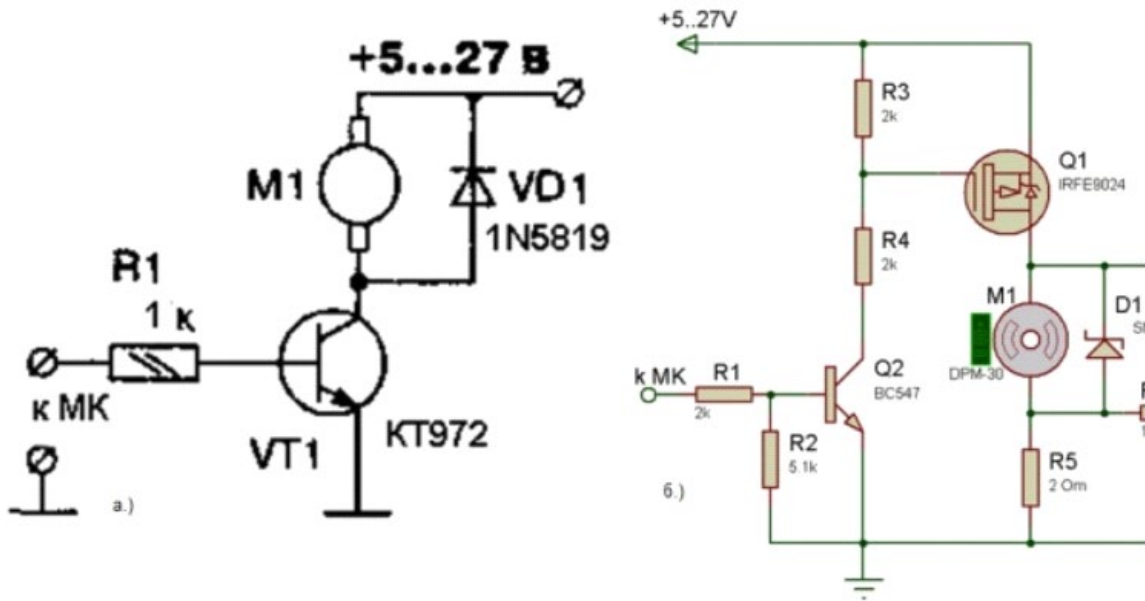
Т – тензодатчик;

МК – мікроконтролер типу ATmega328 (arduino);

Д – драйвер контролю двигуна на базі мікросхеми L298N;

ПК – персональний комп'ютер.

**Схеми підключення перемикаючого транзистора
в систему живлення двигуна**



**Скетч коду для використання мікроконтролера
в якості генератора ШІМ сигналу**

```
const int potPin = A1; // Підключення центрального виходу потенціометра до
A1

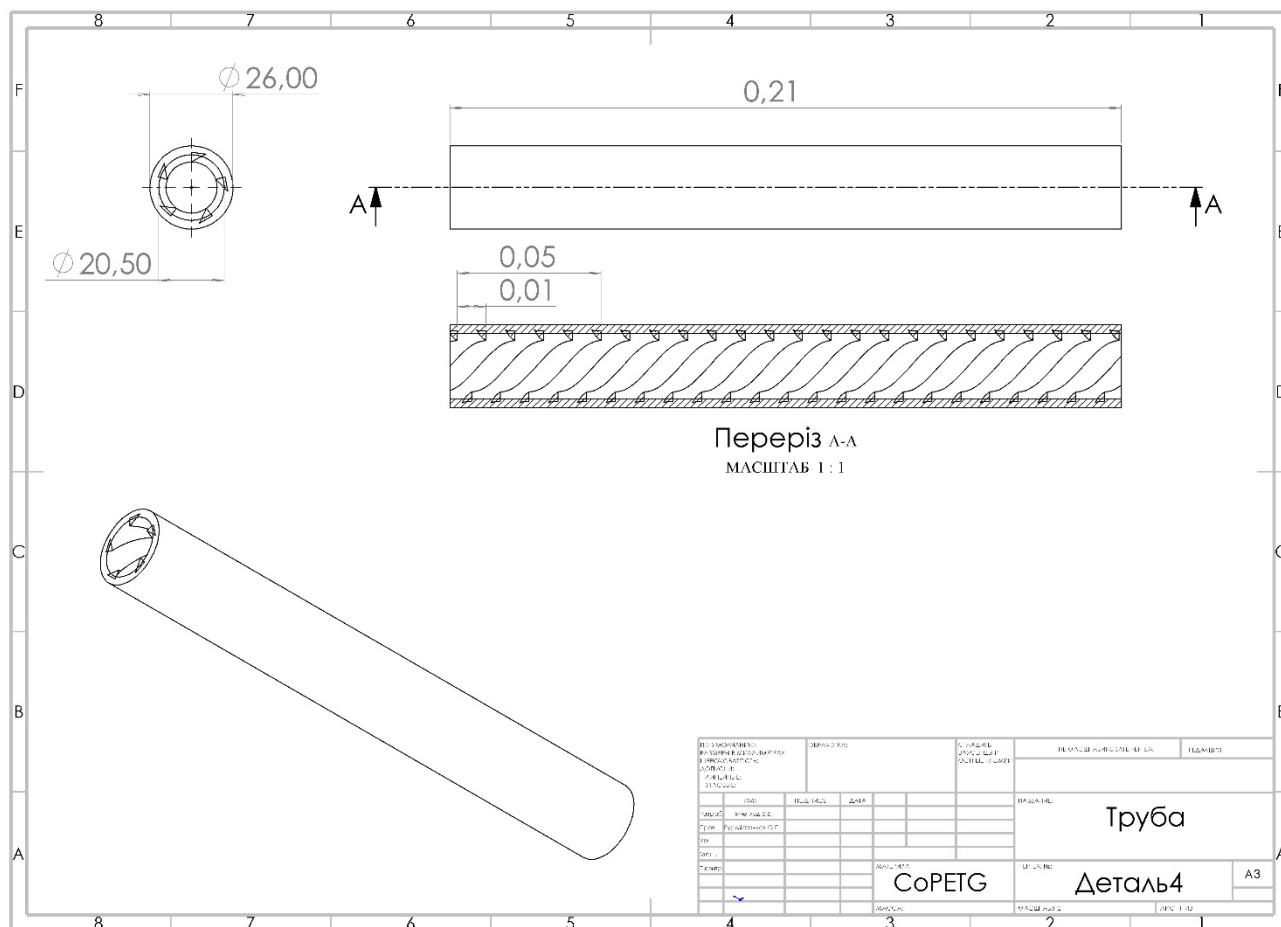
const int motorPin = 6; // Пін для керування двигуном (PWM)

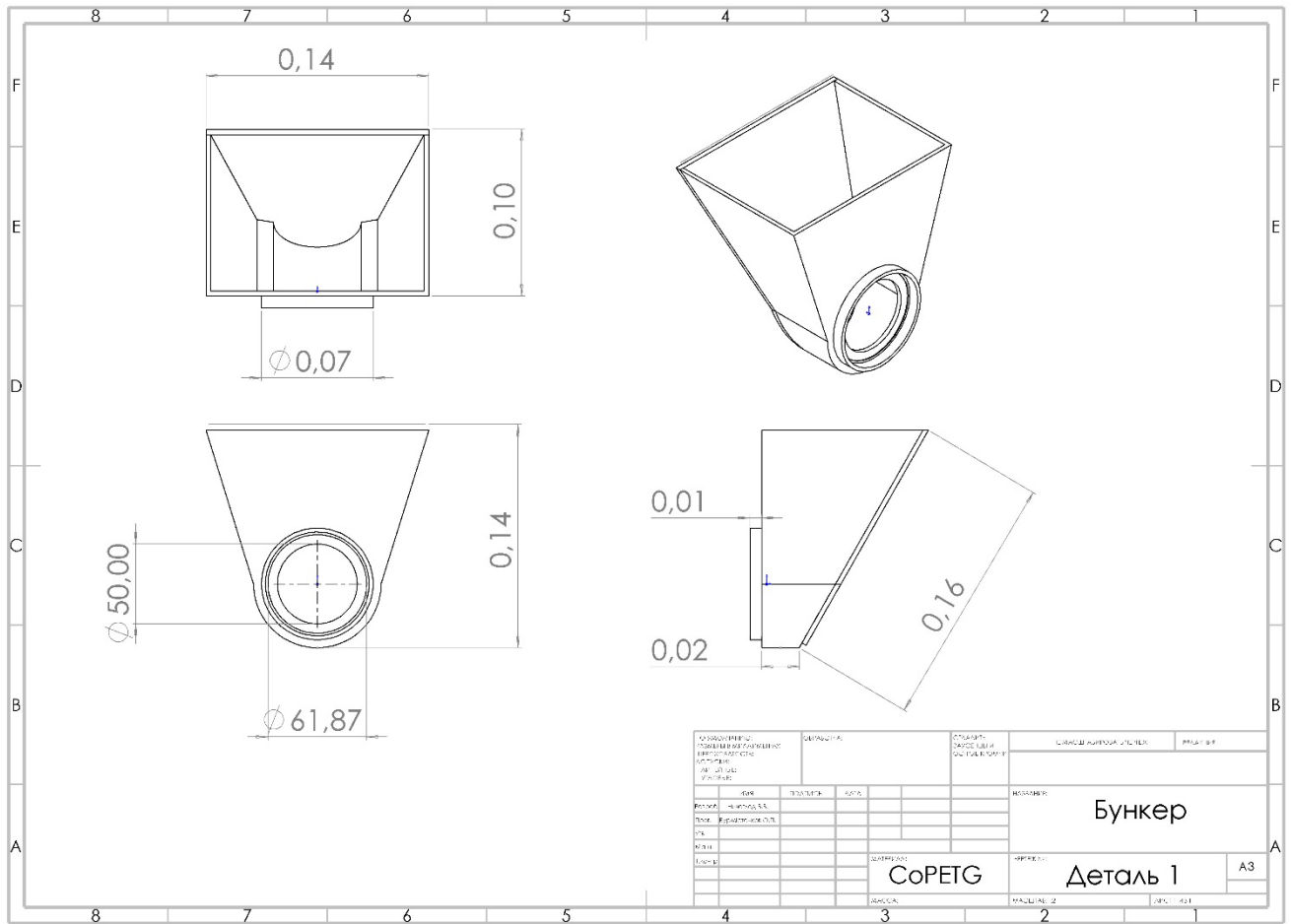
void setup() {
  pinMode(potPin, INPUT);
  pinMode(motorPin, OUTPUT);
}

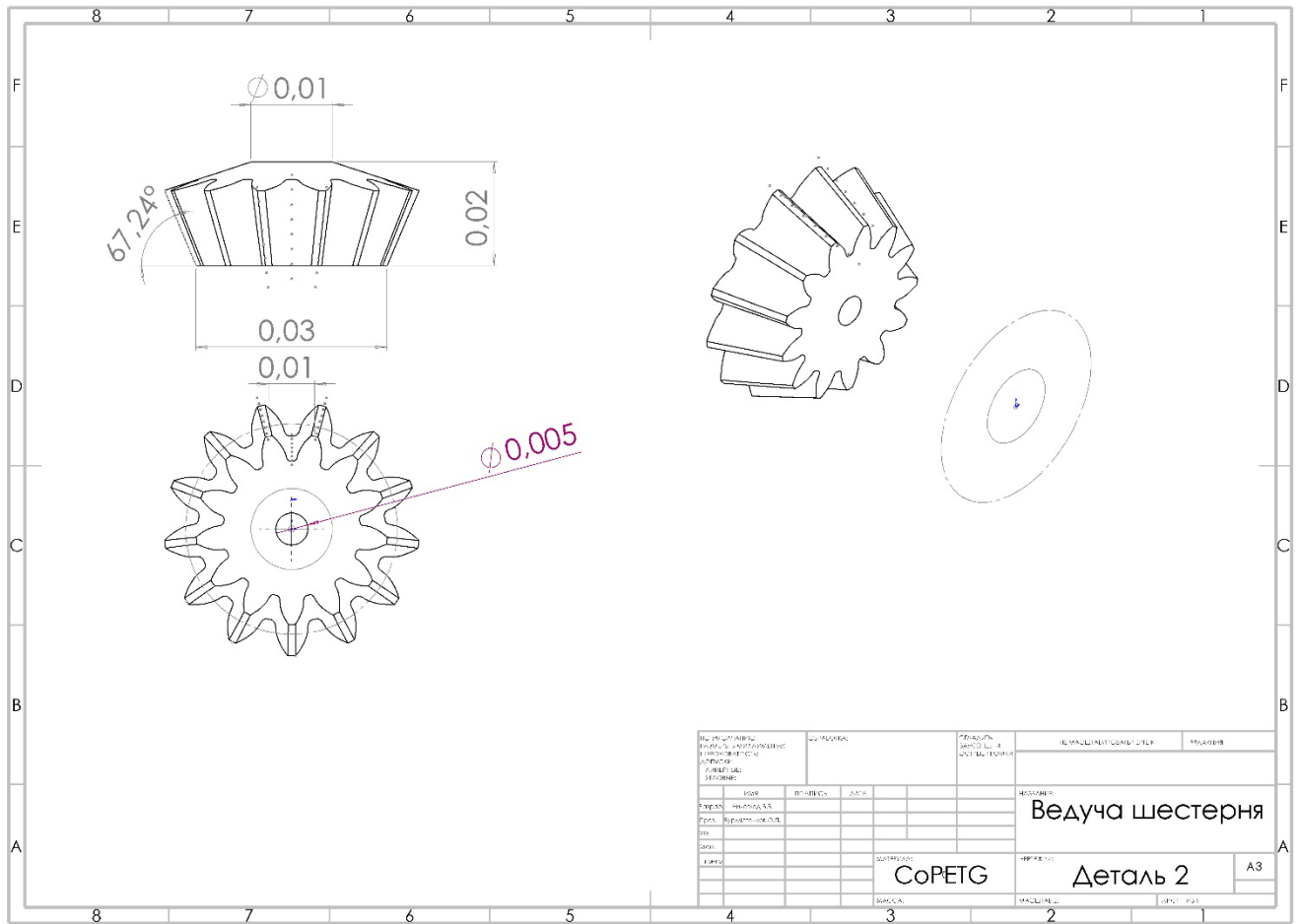
void loop() {
  int potValue = analogRead(potPin); // Зчитування значення потенціометра (0-
1023)

  int motorSpeed = map(potValue, 0, 1023, 0, 255); // Відображення діапазону
потенціометра на діапазон ШІМ (0-255)

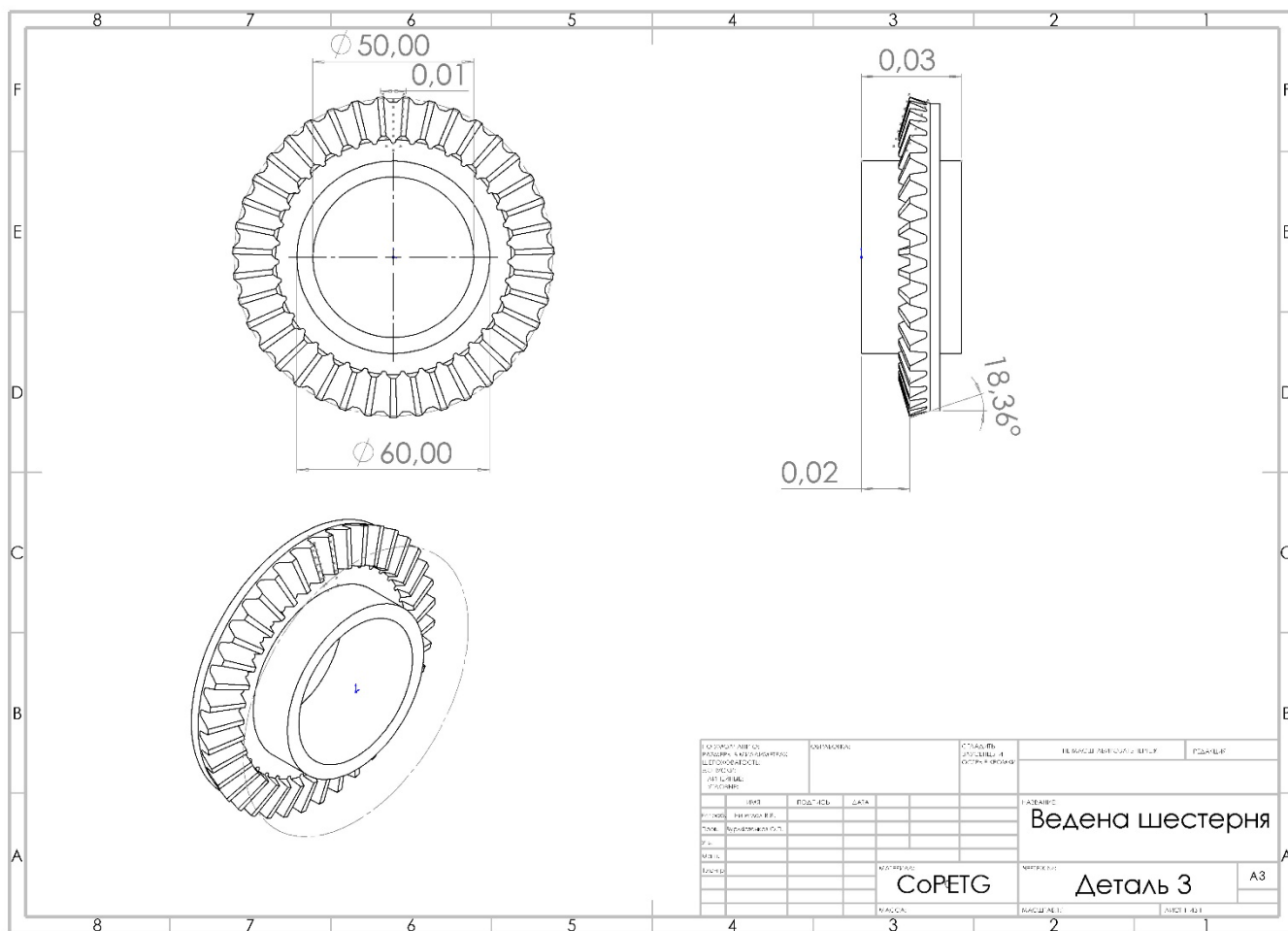
  analogWrite(motorPin, motorSpeed); // Встановлення швидкості двигуна за
допомогою ШІМ
}
```







Додаток И



Код документа	Дата	Исполнитель	Проверенный	Специальный штамп	Исполнитель
010101010101	01.01.2020	И.И.И.	В.В.В.		
010101010101	01.01.2020	И.И.И.	В.В.В.		
010101010101	01.01.2020	И.И.И.	В.В.В.		
010101010101	01.01.2020	И.И.И.	В.В.В.		
010101010101	01.01.2020	И.И.И.	В.В.В.		
010101010101	01.01.2020	И.И.И.	В.В.В.		
Материал: СорЕТГ				Материал: Деталь 3	А3
Масса: _____				Классификация: _____	Лист 1 из 1

Исполнитель: **Ведена шестерня**

Затверджую
Проректор з науково-педагогічної
діяльності Київського національного
університету технологій та дизайну
Людмила ГАНУЩАК-СФІМЕНКО

«24» *квітня* 2024 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційного дослідження здобувача кафедри механічної інженерії Київського національного університету технологій та дизайну Ничеглода Володимира Васильовича на тему: «Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів трубчасто-гребневого живильника для транспортування сипких матеріалів в змішувальних комплексах» на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 – «Галузеве машинобудування».

Комісія у складі:

Голова:

Воляник Олексій Юрійович, к.т.н., доцент, завідувач кафедри механічної інженерії;

Члени комісії:

Манойленко Олександр Петрович, к.т.н., доцент, доцент кафедри механічної інженерії;

Рубанка Микола Миколайович, к.т.н., доцент, доцент кафедри механічної інженерії.

Цим Актом засвідчує, що результати дисертаційного дослідження Ничеглода Володимира Васильовича використовуються у навчальному процесі кафедри механічної інженерії Київського національного університету технологій та дизайну при підготовці та викладанні лекційного курсу і проведенні лабораторних занять з дисциплін «Комп'ютерні системи 3D моделювання»

Голова комісії:

Завідувач кафедри МІ,
к.т.н., доц.

Воляник О.Ю.

Члени комісії:

Доцент кафедри МІ,
к.т.н., доц.

Манойленко О.П.

Доцент кафедри МІ,
к.т.н., доц.

Рубанка М.М.

«24» *квітня* 2024 р.

Затверджую
Проректор з науково-педагогічної
діяльності Київського національного
університету технологій та дизайну
Людмила ГАЛУЩАК-СФІМЕНКО

« 25 » травня 2024 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційного дослідження здобувача кафедри механічної інженерії Київського національного університету технологій та дизайну Ничеглода Володимира Васильовича на тему: «Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів трубчасто-гребневого живильника для транспортування сипких матеріалів в змішувальних комплексах» на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 – «Галузеве машинобудування».

Комісія у складі:

Голова:

Стаценко Дмитро Володимирович, к.т.н., доцент, завідувач кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки;

Члени комісії:

Панасюк Ігор Васильович, д.т.н., професор кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки;

Демішонкова Світлана Анатоліївна, к.т.н., доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки.

цим Актом засвідчує, що результати дисертаційного дослідження Ничеглода Володимира Васильовича використовуються у навчальному процесі кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки Київського національного університету технологій та дизайну при підготовці та викладанні лекційного курсу і проведенні лабораторних занять з дисципліни «Автоматизоване проєктування електропобутової техніки».

Голова комісії:

Завідувач кафедри КІЕМ,
к.т.н., доц.



Стаценко Д.В.

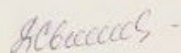
Члени комісії:

Професор кафедри КІЕМ,
д.т.н., проф.



Панасюк І.В.

Доцент кафедри КІЕМ,
к.т.н., доц.



Демішонкова С.А.

« 25 » травня 2024 р.