

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Центральноукраїнський національний технічний університет

На правах рукопису

**Никифоров Антон Олексійович**

УДК 631.362.3-26

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ  
ВІБРОФРИКЦІЙНОГО СЕПАРАТОРА ДРІБНОНАСІННЄВИХ  
МАТЕРІАЛІВ**

05.05.11 – Машини і засоби механізації  
сільськогосподарського виробництва

133 – Галузеве машинобудування

Дисертація на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Науковий керівник:  
Галич Іван Васильович  
кандидат технічних наук, доцент

Кропивницький – 2024

## АНОТАЦІЯ

*Ницифоров А.О.* Обґрунтування конструктивно-режимних параметрів віброфрикційного сепаратора дрібнонасінневих матеріалів – кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.11 «Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва» (Технічні науки) – Центральноукраїнський національний технічний університет Міністерства освіти і науки України, Кропивницький, 2024.

Дисертацію присвячено вирішенню актуального науково-практичного завдання підвищення ефективності процесу вібросепарації насінневих матеріалів дрібнонасінневих культур шляхом обґрунтування раціональних параметрів та режимів роботи вібронасінневих сепараторів (ВФНС) з аеродинамічним екраном.

Подальше підвищення ефективності ВФНС щодо обробки дрібнонасінневих матеріалів стримане впливом на кінематичні параметри руху насіння, домішок, що виділяються, аеродинамічних сил та моментів внаслідок виникаючого знакозмінного руху повітря між робочими площинами блоку ВФНС. З цього, ВФНС з блоками робочих поверхонь, не дозволяє досягти задовільних показників сепарації для дрібнонасінневих матеріалів такого типу (деякі лікарські рослини та овочеві культури). Вплив знакозмінного повітряного потоку спостерігається на всіх режимах роботи ВФНС (безвідривних та з відскоком). Механізм дії аеродинамічних сил та моментів проявляється через віднесення насіння повітряним потоком (дія сили аеродинамічного опору) та через зменшення віброфрикційного імпульсу, що діє на насіння, внаслідок його зависання над робочою поверхнею та обертання навколо центру маси (дія бокових аеродинамічних сил та їх моментів).

Для теоретичного дослідження механізмів впливу знакозмінного повітряного потоку розроблено модель віброфрикційного безвідривного руху

насіння з урахуванням дії аеродинамічних сил та моментів. Безвідливний режим (рух з ковзанням та перекочуванням) є більш розповсюдженим для сепарації дрібнонасінневих культур. Аеродинамічні сили та моменти для цього режиму враховуються через зменшення віброфрикційного імпульсу внаслідок дії бокових аеродинамічних сил та їх моментів.

Моделювання віброфрикційного руху насіння з урахуванням дії аеродинамічних сил та моментів ґрунтується на основних положеннях механіки руху твердого тіла з визначеними механіко-геометричними характеристиками, аеродинаміки об'ємних тіл та газодинаміки ідеального газу при малих перепадах тиску, що мають місце при розповсюдженні акустичних хвиль.

Створена модель складеться з трьох частин:

- модель обтікання насіння потоком повітря. На відміну від існуючих підходів створена модель дозволяє обчислювати не тільки силу аеродинамічного опору, а також й бокові аеродинамічні сили та їх моменти для насіння будь-якої форми залежно від параметрів повітряного потоку та просторового положення насіння в потоці;

- тривимірна газодинамічна модель руху повітря під впливом робочих органів ВФНС. Модель дозволяє обчислювати значення швидкостей та тиску повітря в елементах повітряного простору, що знаходиться між двох робочих поверхонь блоку ВФНС. Тривимірна модель, на відміну від методик, де розглядається плоский випадок, дозволяє більш детально враховувати крайові умови (конструкцію аеродинамічного екрану) стосовно параметрів знакозмінного повітряного потоку в досліджуваній області;

- удосконалена модель віброфрикційного безвідливного руху насіння по нахиленій шорсткій поверхні, де враховується дія повного набору аеродинамічних сил та моментів, які викликані знакозмінним повітряним потоком.

На підставі математичного моделювання досліджений вплив

знакозмінного потоку повітря на якість сепарації насіння овочевих та лікарських рослин. Отримано кількісну оцінку впливу знакозмінного повітряного потоку шляхом порівняння параметрів віброфрикційного руху насіння з урахуванням та без урахування впливу аеродинамічних сил та моментів. Результати з оцінки параметрів руху фракцій досліджуваних насіннєвих матеріалів, які отримані за допомогою розробленої математичної моделі, зрівнювалися з результатами натурального експерименту. Як показав натурний експеримент, результати чисельного моделювання збігаються з результатами натурального експерименту з точністю до 11% (залежно від діапазону конструкційно-режимних параметрів ВФНС). Математична модель дає перебільшену оцінку впливу знакозмінного потоку повітря. Величина помилки збільшується при зростанні амплітуди коливань та зміні конструкційних параметрів екрану у бік зменшення його ефективності.

На підставі чисельного моделювання, шляхом варіювання крайових умов для досліджуваної області повітря та амплітуди коливань блоку ВФНС, встановлено аналітичну (регресійну) нелінійну залежність ступеня впливу знакозмінного потоку повітря на якість вібросепарації від конструкційних параметрів аеродинамічного екрану, амплітуди коливань та вертикального зазору між робочими поверхнями блоку ВФНС. Регресійні моделі отримано для насіння пастернаку, кропу запашного та салату листового. За критерієм мінімізації впливу знакозмінного повітряного потоку визначено раціональні конструкційно-режимні параметри ВФНС. Для безвідривних діапазонів вібросепарації раціональними є: відносний зазор між вертикальною стінкою екрану та кромкою робочої поверхні блоку ВФНС 50÷65% від вертикального зазору між робочими поверхнями блоку ВФНС; ступінь перекриття екраном зазору між робочими поверхнями блоку – 100÷110%; амплітуда коливань – 0,5 мм; вертикальний зазор між робочими поверхнями блоку – 6 мм.

Отримані рекомендації стосовно доцільних конструкційно-режимних параметрів ВФНС з екраном впроваджено в освітній процес Державного

біотехнологічного університету (місто Харків) та ПАТ «КМЗ» (м. Карлівка). Це дозволило забезпечити підвищення показника сортової чистоти вхідного насіннєвого матеріалу з 85 % до 98,5 % (на 13,5 % проти 10,5 % для ВФНС без екрана) при сепарації насіннєвого матеріалу пастернаку та знизити частку некондиційного насіннєвого матеріалу з 44 % до 7 % (на 37 %).

При обробці насіннєвих культур чутливих до дії знакозмінного повітряного потоку на ВФНС з аеродинамічним екраном зростає товарна ціна обробленого насіннєвого матеріалу. Наприклад, для насіння пастернаку це зростання складає 89%, тобто на 2 675 грн./кг більше його базової вартості. Це на 64%, тобто на 1 937 грн./кг, перевершує аналогічний ВФНС без екрану.

Фактичний економічний ефект від застосування ВФНС з екраном при сепарації насіння пастернаку у господарстві зі середньостатистичним обсягом річного врожаю насіння у 500 кг складає 1 335 000 грн. на рік (в цінах 2024 року).

**Ключові слова:** сепарація, аеродинамічні властивості, віброфрикційний насіннєвий сепаратор, повітряний потік, показник сортової чистоти, насіння.

## ANNOTATION

Nykyforov A. Substantiating the design and mode parameters of the vibro-friction separator of small-seeded materials.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (Candidate of Technical Sciences) in speciality 05.05.11 "Machines and means of mechanisation of agricultural production" (Technical Sciences) - Central Ukrainian National Technical University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kropyvnytskyi, 2024.

The dissertation is devoted to solving the urgent scientific and practical task of increasing the efficiency of the process of separating seed mixtures sensitive to airflow using vibration friction seed separators (VFNS) with an aerodynamic screen.

Further improvement of the efficiency of VFNS for processing seed mixtures with distinct aerodynamic properties is constrained by the negative impact on the kinematic parameters of the movement of seeds, impurities, aerodynamic forces and moments due to the periodic air movement between the working surfaces of the VFNS unit. For this reason, VFNS with blocks of working surfaces do not allow achieving satisfactory separation (cleaning) performance for seed mixtures of this type (some medicinal plants and vegetable crops). The influence of the sign-changing air flow is observed in all modes of operation of the VFS (non-detachable and with rebound). The mechanism of action of aerodynamic forces and moments is manifested through the removal of seeds by the air flow (the action of aerodynamic drag force) and through the reduction of the vibration impulse acting on the seeds due to their "floating" and rotation around the centre of mass (the action of lateral aerodynamic forces and their moments).

For a theoretical study of the mechanisms of the influence of sign-changing air flow, a model of vibrofrictional continuous movement of seeds was developed, taking into account the action of aerodynamic forces and moments. The non-detachable mode (movement with sliding and rolling) is more common for vibratory processing of small-seeded crops. Aerodynamic forces and moments for this mode

are taken into account due to the reduction of the vibration impulse due to the action of lateral aerodynamic forces and their moments.

Modeling of the vibrofrictional movement of seeds, taking into account the action of aerodynamic forces and moments, is based on the basic principles of the mechanics of the motion of a solid body with defined mechanical and geometric characteristics, the aerodynamics of volumetric bodies, and the gas dynamics of an ideal gas with small pressure drops that occur during the propagation of acoustic waves.

The created model consists of three parts. These are:

- a model of the airflow around the seeds in the acoustic velocity range. Unlike existing approaches, the model allows calculating not only the aerodynamic drag force, but also lateral aerodynamic forces and their moments for seeds of any shape, depending on the airflow parameters and the spatial position of the seeds in the flow;

- a three-dimensional gas-dynamic model of air movement under the influence of the working bodies of the VFNS. The model allows to calculate the values of air velocity and pressure in the elements of the air space located between two equidistant synchronously oscillating surfaces. The three-dimensional model, in contrast to methods that consider a flat case, allows you to take into account in more detail the boundary conditions (design of the aerodynamic screen) in relation to the parameters of the sign-changing air flow in the studied area;

- an improved model of vibrofrictional continuous movement of seeds on an inclined rough surface, which takes into account the action of a full set of aerodynamic forces and moments caused by a sign-changing air flow.

On the basis of mathematical modeling, the effect of the sign-changing air flow on the quality of seed separation of vegetable and medicinal plants was investigated. A quantitative assessment of the influence of the sign-changing air flow was obtained by comparing the parameters of the vibro-frictional movement of seeds with and without taking into account the influence of aerodynamic forces and moments. The results of the estimation of the movement parameters of the fractions

of the studied seed materials, which were obtained using the developed mathematical model, were compared with the results of the natural experiment. As the full-scale experiment showed, the results of the numerical simulation coincide with the results of the full-scale experiment with an accuracy of up to 11% (depending on the range of structural and operational parameters of the VFNS). The mathematical model gives an exaggerated estimate of the influence of the sign-changing air flow. The magnitude of the error increases when the amplitude of oscillations increases and the design parameters of the screen change in the direction of decreasing its efficiency.

On the basis of numerical modeling, by varying the boundary conditions for the studied area of air and the amplitude of oscillations of the VFNS unit, an analytical (regression) nonlinear dependence of the degree of influence of the sign-changing air flow on the quality of vibration separation on the design parameters of the aerodynamic screen, the amplitude of oscillations and the vertical gap between the working surfaces of the VFNS unit was established. Regression models were obtained for lettuce, dill, and parsnip seeds. According to the criterion of minimization of the influence of the sign-changing air flow, the rational design and mode parameters of the VFS have been determined. For continuous ranges of vibration separation, the following are rational: the relative gap between the vertical wall of the screen and the edge of the working surface of the VFS unit is 50÷65% of the vertical gap between the working surfaces of the VFS unit; the degree of screen overlap of the gap between the working surfaces of the block - 100÷110%; oscillation amplitude - 0.5 mm; the vertical gap between the working surfaces of the block is 6 mm.

The received recommendations regarding the appropriate design and mode parameters of the VFNS with a screen were implemented in the educational process of the State Biotechnology University (Kharkiv) and PJSC "KMZ" (Karlivka). This made it possible, during the separation of parsnip seed material, to increase the varietal purity of the input seed material from 85% to 98.5% (by 13.5% versus 10.5%



for VFNS without a screen) and reduce the share of substandard seed material from 44% to 7% (by 37%).

When processing seed crops sensitive to the effect of sign-changing air flow on VFSN with an aerodynamic screen, the commodity price of the processed seed material increases. For example, for parsnip seeds, this increase is 89%, that is, UAH 2,675/kg more than its base price. This is 64%, i.e. UAH 1,937/kg, higher than the similar VFNS without a screen.

The actual economic effect of using VFS with a screen when separating parsnip seeds in a farm with an average annual seed yield of 500 kg is UAH 1,335,000. per year (in 2024 prices).

**Keywords:** separation, aerodynamic properties, vibro-friction seed separator, air flow, index of varietal purity, seeds.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА, В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

*Статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних  
Web of Science Core Collection та/або Scopus:*

1. **Anton Nykyforov**, Roman Antoshchenkov, Ivan Halych, Liliia Kiskorkishchenko, Victor Kis, Alla Dombrovska, Inna Kilimnik (2023). Regression models for assessing the efficiency of vibratory separation of parsnip seeds taking into account air dynamics based on numerical simulation and field experiment. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies [this link is disabled](#), 2 (1-122). P. 40–51. *(Здобувачу належить порівняння регресійних рівнянь за результатами чисельного і натурного експериментів).*

2. **Anton Nykyforov**, Roman Antoshchenkov, Ivan Halych, Victor Kis, Pavlo Polyansky, Vitalii Koshulko, Dmytro Tymchak, Alla Dombrovska, Inna Kilimnik (2022). Construction of a regression model for assessing the efficiency of separation of lightweight seeds on vibratory machines involving measures to reduce the harmful influence of the aerodynamic factor. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. ISSN 1729-3774. P. 24-34. *(Здобувачу належить планування чисельного експерименту та результати моделювання за сформованим планом)*

3. **Nykyforov A.**, Nykyforova A., Antoshchenkov, R., Antoshchenkova, V., Diundik, S., & Mazanov, V. (2021). Development of a mathematical model of vibratory non-lift movement of light seeds taking into account the aerodynamic forces and moments. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. No 3 (111). P. 70–78. *(Здобувачу належить удосконалення математичної моделі вібраційного руху насінини з урахуванням дії аеродинамічних сил та моментів).*

4. Roman Antoshchenkov, **Anton Nykyforov**, Ivan Halych, Victor Tolstolutskyi, Vitalina Antoshchenkova, Sergey Diundik (2020). Solution of the system of gas-dynamic equations for the processes of interaction of vibrators with

the air. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol 2, No 7 (104). P. 67–73. *(Здобувачу належить постановка та подання у кінцево-різницевому вигляді крайової задачі обчислення поля швидкостей та тиску повітря у робочій області ВФНС).*

***Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України та у інших наукових виданнях:***

5. Лук'яненко В. М., **Никифоров А. О.**, Галич І. В. (2013). Підвищення продуктивності вібраційної насіннеочисної машини з неперфорованими робочими площинами. *Motrol. Commision of motorization and energetics in agriculture. – Lublin-Rzeszow*. Vol. 15, No 7. С. 185–190. *(Здобувачу належить аналіз характеристик вібраційних насіннеочисних машин).*

6. Галич І. В., **Никифоров А. О.** (2015). Мехатронна вібраційна насіннеочисна машина. *Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка*. Харків,. Вип. 156. С. 413–419. *(Здобувачу належить опис конструкції мехатронної вібраційної насіннеочисної машини).*

7. Лук'яненко В. М., **Никифоров А. О.**, Галич І. В. (2015). Метод розрахунку аеродинамічних характеристик об'ємних фігур неправильної форми. *Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка*. Харків,. Вип. 156. С. 459–464. *(Здобувачу належить аналітична методика розрахунку аеродинамічних характеристик плоского перерізу об'ємного тіла).*

8. Лук'яненко В. М., **Никифоров А. О.** (2017). Постановка задачі розрахунку поля швидкостей повітряного середовища між двома еквідістантними площинами при здійсненні ними синхронних гармонійних коливань. *Науковий журнал «Інженерія природокористування»*, No 2 (8). С. 33–38. *(Здобувачу належить математична постановка задачі обчислення поля швидкостей повітря у вигляді крайової задачі).*

9. Лук'яненко В. М., Петрик А. П., **Никифоров А. О.** (2017). Метод розрахунку поля швидкостей повітряного середовища між двома еквідістантними площинами при здійсненні ними синхронних гармонійних

коливань. Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Харків., Вип 180. С. 100–105. *(Здобувачу належить обґрунтування системи рівнянь газодинаміки та метод розв'язання системи диференційних рівнянь).*

10. Лук'яненко В. М., **Никифоров А. О.**, Кісь В. М. (2018). Розрахунок поля швидкостей повітряного середовища між двома еквідистантними площинами під час здійснення ними синхронних гармонійних коливань методом прогонки. Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка. Харків. Вип. 190. С. 337–345. *(Здобувачу належить система диференційних рівнянь та крайові умови у кінцево-різницевій формі).*

11. Лук'яненко В. М., **Никифоров А. О.**, Лук'яненко О. В., Никифорова А. П. (2019). Конструктивні заходи, щодо інтенсифікації процесу сепарування насінневих сумішей на вібраційних насіннеочисних машинах. Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка. Харків, Вип. 198 С. 277–283. *(Здобувачу належить аналіз способів та конструкційних заходів щодо інтенсифікації процесу сепарування насінневих сумішей на вібраційних насіннеочисних машинах).*

12. Лук'яненко В. М., **Никифоров А. О.**, Никифорова А. П. (2019). Використання метода прогонки при розрахунку тривимірного поля швидкостей повітряного середовища, що знаходяться між двох синхронно коливальних робочих площин вібромашини. Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка. Харків., Вип. 198 С. 214–226. *(Здобувачу належить результати чисельного розв'язання системи рівнянь газодинаміки при визначених крайових умовах).*

13. **Никифоров А. О.** (2020). Дослідження ефективності застосування аеродинамічних екранів при обробці на вібраційних машинах насіння з вираженими аеродинамічними властивостями. The 7 th International scientific and practical conference “Science, society, education: topical issues and development prospects” (June 7-9) SPC “Sci-conf.com.ua”, Kharkiv, Ukraine. С. 31–38.

14. Степаненко С. П., **Никифоров А. О.** (2024). Дослідження впливу знакозмінного повітряного потоку на якість віброфрикційного розділення дрібнонасінневих матеріалів. Науковий журнал «Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів». Харків. № 24. С. 52-68. *(Здобувачу належить результати моделювання віброфрикційного руху насінин з урахуванням дії аеродинамічних сил та моментів).*

***Тези і матеріали конференцій:***

15. **Никифоров А. О.** (2016). Постановка задачі розрахунку поля швидкостей повітряного середовища між двома еквідистантними площинами при здійсненні ними синхронних гармонійних коливань. Міжнародна науково – практична конференція молодих вчених «Технічний прогрес в АПК». *(Здобувачу належить результати аналізу процесу взаємодії робочих органів ВФНС з повітряним середовищем).*

16. Лук'яненко В. М., **Никифоров А. О.**, Галич І. В. (2017). Універсальний віброзбуджувач коливань. Міжнародна науково – практична конференція молодих вчених «Технічний прогрес в АПК». *(Здобувачу належить результати аналізу та узагальнення способів віброзбуджування коливань ВФНС).*

17. Лук'яненко В. М., **Никифоров А. О.** (2017). Метод розрахунку поля швидкостей повітряного середовища між двома еквідистантними площинами при здійсненні ними синхронних гармонійних коливань. Міжнародна науково – практична конференція молодих вчених «Технічний прогрес в АПК». *(Здобувачу належить результати аналізу методів розрахунку поля швидкостей повітря при взаємодії робочих органів машин з повітряним середовищем).*

18. **Никифоров А. О.** (2017). Основні фактори впливу на показники ефективності віброочищення. Міжнародна науково – практична конференція молодих вчених «Технічний прогрес в АПК».

19. Лук'яненко В. М., **Никифоров А. О.**, Петрик А. П. (2018). Расчёт поля

скоростей воздушной среды между двумя эквидистантными плоскостями при совершении ими синхронных гармонических колебаний методом прогонки. Міжнародна науково – практична конференція молодих вчених «Технічний прогрес в АПК». *(Здобувачу належить результати розрахунку поля швидкостей).*

20 Лук'яненко В. М., **Никифоров А. О.**, Никифорова А. П. (2019). Використання метода прогонки при розрахунку тривимірного поля швидкостей повітряного середовища, що знаходяться між двох синхронно коливальних робочих площин вібромашини. Міжнародна науково – практична конференція молодих вчених «Технічний прогрес в АПК». *(Здобувачу належить опис метода прогонки щодо розв'язання крайової задачі обчислення поля швидкостей повітря у робочій області).*

21. Лук'яненко В. М., Галич І. В., **Никифоров А. О.** (2020). Регулювання технологічного процесу сепарації вібраційних насіннеочисних машин. Інноваційні розробки в аграрній сфері: матеріали Міжнар. наук. - практ. конф., м. Харків, 3-4 груд. 2020 р. ХНТУСГ, 2020. Т. 1. *(Здобувачу належить результати аналізу та узагальнення методів регулювання процесів сепарації).*

22. V. Lukjanenko, **A. Nykyforov**, A. Nykyforova. (2020). Numerical solution of the system of equations of gas dynamics using the sweep method for the three-dimensional. Сучасні проблеми землеробської механіки: матеріали XXI Міжнар. наук. конф., присвяч. 90-річчю ХНТУСГ, м. Харків, 17-18 жовтня 2020 р. *(Здобувачу належить результати чисельного розв'язання системи диференціальних рівнянь газодинаміки).*

23. Лук'яненко В. М., **Никифоров А. О.**, Никифорова А. П. (2020). Методи оцінки ефективності використання аеродинамічних екранів. Science and education: problems, prospects and innovations: the 1 st International scientific and practical conference, Kyoto, October 7-9, 2020. *(Здобувачу належить обґрунтування методів оцінки ефективності аеродинамічних екранів для ВФНС).*

24. **Никифоров А. О.** (2022). Порівняльний аналіз регресійних моделей оцінки шкідливого впливу аеродинамічного фактора на ефективність віброфрикційного розділення насіння пастернаку, що отримано на підставі чисельного та натурного експериментів. Сучасна інженерія агропромислових харчових виробництв. Харків, 24–25 листопада 2022 року.

25. **Никифоров А. О.** (2023). Математична модель віброфрикційного безвідривного руху насіння з урахуванням дії аеродинамічних сил і моментів. Матеріали ХІХ міжнародного форуму молоді "Молодь і індустрія 4.0 в ХХІ столітті". Харків, 06-07 квітня 2023 року.

26. **Никифоров А. О.** (2023). Критерій вдосконалення технологічного процесу віброфрикційного розділення насінневих матеріалів чутливих до руху повітря. Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції «ТЕХНІЧНИЙ ПРОГРЕС В АПВ». Харків 9-10 травня 2023 року.

27. Степаненко С. П., **Никифоров А. О.** (2024). Комплексна модель віброфрикційного руху насінини по нахиленій шорсткій поверхні з урахуванням впливу знакозмінного повітряного потоку повітря у блоці віброфрикційного сепаратора. Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції «ТЕХНІЧНИЙ ПРОГРЕС В АПВ». Харків 21-22 травня 2024 року. *(Здобувачу належить опис математичної моделі віброфрикційного руху насінини в умовах дії знакозмінного повітряного потоку).*

28. Степаненко С. П., **Никифоров А. О.** (2024). Обґрунтування параметрів віброфрикційного сепаратора дрібнонасінневих матеріалів. Матеріали ІV Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Новітні технології в АПК: проблеми та перспективи впровадження». Полтава 27-28 червня 2024 року. *(Здобувачу належить результати кількісного порівняння альтернативних варіантів ВФНС з аеродинамічним екраном).*

29. Степаненко С. П., **Никифоров А. О.** (2024). Дослідження моделі віброфрикційного безвідривного руху насіння по нахиленій шорсткій поверхні з урахуванням дії аеродинамічних сил. Матеріали Всеукраїнської науково-

практичної конференції «Досягнення та перспективи галузі виробництва, переробки і зберігання сільськогосподарської продукції». Кропивницький, 21 квітня 2024 року. *(Здобувачу належить результати моделювання траєкторій насінин визначеної форми з урахуванням дії аеродинамічних сил).*

***Патенти України:***

30. Лук'яненко В. М., **Никифоров А. О.**, Галич І. В. (2014) Патент на корисну модель №88048 Україна, В03С1/10. Універсальний віброзбудник. заявник Лук'яненко В. М. u201312141; заяв. 17.10.2013; надрук. 25.02.2014, Бюл. № 25. Опубл. 25.02.2014 р. Бюл. № 4. *(Здобувачу належить результати патентного пошуку).*

31. Козаченко О. В., **Никифоров А. О.**, Бакум М. В., Крекот М. М., Піх Е. О. (2021). Патент на корисну модель №149837 Україна. В07В13/00. Вібраційна насіннеочисна машина. заявник Козаченко О.В. u202103892; заяв. 05.07.2021 надрук. 08.12.2021 р. Бюл. № 49. *(Здобувачу належить ідея встановити перфоровані пластини - регулятори на робочих торцевих поверхнях кожного пакета площин).*

32. Лук'яненко В. М., Никифоров А. О., Галич І. В. (2022) Патент на корисну модель 151223 Україна, МПК (2022.01) В07В 13/00. Спосіб підвищення продуктивності вібраційних насіннеочисних машин з блоками неперфарованих вібруючих поверхонь. Заявник Лук'яненко В. М. u 2021 05954; заяв. 23.10.2021; надрук. 22.06.2022, Бюл. № 25. *(Здобувачу належить ідея щодо зменшення втрат якісного насіння у нехарактерну фракцію).*



**ЗМІСТ**

ВСТУП .....	21
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІБРОСЕПАРАЦІЇ ДРІБНОНАСІННЄВИХ МАТЕРІАЛІВ .....	29
1.1 Методи очищення і сортування насіннєвих матеріалів .....	29
1.2 Використання віброфрикційних насіннєвих сепараторів .....	33
1.3 Аеродинамічні властивості насіння .....	44
1.4 Аналіз теоретичних досліджень вібросепарації насіннєвих матеріалів з виразними аеродинамічними властивостями .....	51
1.5 Висновки по розділу, мета і завдання дослідження .....	56
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІБРОФРИКЦІЙНОГО БЕЗВІДРИВНОГО РУХУ НАСІННЯ З УРАХУВАННЯМ ДІЇ АЕРОДИНАМІЧНИХ СИЛ І МОМЕНТІВ .....	59
2.1 Методика розрахунку аеродинамічних характеристик насіння заданої форми .....	59
2.2 Модель руху повітря відносно паралельних пластин, що синхронно коливаються .....	62
2.2.1 Загальна постановка задачі по розрахунку поля швидкостей в каналі, утвореному двома паралельними пластинами, що синхронно коливаються .....	62
2.2.2 Дослідження впливу конструктивних характеристик робочих блоків та режиму роботи ВФНС на динаміку повітря між робочими площинами .....	88
2.2.3 Граничні умови, які враховує аеродинамічний екран .....	92
2.3 Модель віброфрикційного безвідривного руху насіння по нахиленій шорсткій поверхні з урахуванням дії аеродинамічних сил та моментів .....	95
2.3.1 Система диференціальних рівнянь .....	95
2.3.2 Результати моделювання вібраційного руху насінни з	

урахуванням дії аеродинамічних сил та моментів .....	117
2.4 Висновки по розділу .....	121
<b>РОЗДІЛ 3 ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНО-РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ ВІБРОФРИКЦІЙНОГО НАСІННЄВОГО СЕПАРАТОРА ..</b>	<b>124</b>
3.1 Методика обґрунтування конструкційно-режимних параметрів ВФНС з аеродинамічним екраном .....	124
3.2 Результати чисельного моделювання щодо обґрунтування раціональних конструкційно-режимних параметрів ВФНС з екраном .....	128
3.3 Обґрунтування раціональних конструкційно-режимних параметрів ВФНС з аеродинамічним екраном на підставі сформованих регресійних моделей .....	152
3.4 Висновки по розділу .....	154
<b>РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІБРОФРИКЦІЙНОГО СЕПАРАТРУ З АЕРОДИНАМІЧНИМ ЕКРАНОМ .....</b>	<b>156</b>
4.1 Програма лабораторних випробувань .....	156
4.3 Методика лабораторних випробувань .....	158
4.3.1 Методика варіювання та вимірювання конструкційних параметрів аеродинамічного екрану .....	158
4.3.2 Методика варіювання та вимірювання амплітуди коливань.....	160
4.3.3 Методика вимірювання кінематичних параметрів віброфрикційного руху насіння.....	162
4.3.4 Методика планування і проведення багатофакторного експерименту .....	165
4.3.5 Методика проведення лабораторних випробувань з оцінки ефективності сепарації насіння пастернаку за допомогою ВФНС, оснащеного аеродинамічним екраном .....	165
4.4 Результати лабораторних випробувань .....	167

4.4.1 Оцінка впливу конструкції аеродинамічного екрану та амплітуди коливань на параметри віброфрикційного руху насіння пастернаку.....	167
4.4.2 Оцінка приросту показника сортової чистоти насіння з контрольної вибірки за рахунок зменшення впливу знакозмінного повітряного потоку .....	172
4.5 Висновки по розділу .....	176
<b>РОЗДІЛ 5 РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....</b>	<b>178</b>
5.1 Впровадження результатів досліджень .....	178
5.2 Техніко-економічна ефективність застосування ВФНС з аеродинамічним екраном .....	179
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....</b>	<b>183</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>186</b>
Додаток А методика визначення елементарних аеродинамічних сил і моментів для плоских аеродинамічних профілів-перетинів .....	205
Додаток Б методика визначення геометричних характеристик перетинів насіння, що приводяться до характеристик еталонних аеродинамічних профілів .....	215
Додаток В система алгебраїчних рівнянь в кінцево-різницевій формі та алгоритм розрахунку .....	219
Додаток Г геометричні та фізико-механичні властивості насіння .....	225
Додаток Д план проведення чисельного експерименту.....	240
Додаток Е результати чисельного експерименту з оцінки показника ступеня впливу знакозмінного повітряного потоку на якість вібросепарації залежно від конструкційно-режимних параметрів ВФНС з аеродинамічним екраном .....	242
Додаток Ж кроки перетворень повнофакторних регресійних моделей, отриманих в результаті чисельного експерименту .....	259
Додаток З план і результати проведення натурального експерименту ....	262

Додаток І кроки перетворень повнофакторної регресійної моделі, отриманої в результаті натурального експерименту .....	265
Додаток К акти впровадження.....	266

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Важливою задачею агропромислового виробництва слід вважати забезпечення підприємств різних форм власності якісним посівним матеріалом для одержання високих врожаїв сільськогосподарських культур. Це завдання узгоджується з цілями та задачами, що сформульовано у:

- законі України «Про стимулювання розвитку вітчизняного машинобудування для агропромислового комплексу» N 5478-VI (5478-17) від 06.11.2012 р.;

- постанові Кабінету Міністрів України № 556 від 23.08.2016 р. «Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2024 року»;

- плані дій затвердженого Міністерством аграрної політики та продовольства України «Стратегічні напрями розвитку сільського господарства України на період до 2024 року»;

- проєкті ЄС «Підтримка впровадження сільськогосподарської та продовольчої політики в Україні»;

- регіональній програмі «Стратегія сталого розвитку Харківської області до 2024 року».

Для підвищення якості насіннєвого матеріалу здійснюється його очистка від домішок та сепарація на фракції. Аналізом досліджень процесів сепарації встановлено перспективність застосування у технологічних лініях віброфрикційних сепараторів. Віброфрикційні насіннєві сепаратори (ВФНС) є дешевим та ефективним засобом розділення дрібнонасіннєвих матеріалів (деякі овочеві, лікарські культури і т.і.) за сукупністю геометричних (форма та розміри), фізичних (коефіцієнт тертя) та механічних (твердість, пружність, маса, моменти інерції) властивостей насінин різних фракцій. Але у відомих роботах недостатньо вивчено процес віброфрикційної сепарації таких культур

з урахуванням аеродинамічних властивостей насінин. Досить обмежено досліджено вплив на кінематичні параметри руху насінневого матеріалу аеродинамічних ефектів, що виникають внаслідок взаємодії робочих органів ВФНС з повітряним середовищем. При нарощуванні продуктивності ВФНС за рахунок застосування блоків робочих поверхонь, сусідні робочі поверхні утворюють плоскі канали, на гранях яких виникає знакозмінний тиск та швидкість повітря внаслідок синхронних коливань поверхонь при роботі ВФНС. Знакозмінний повітряний потік, обтікаючи насінини, викликає виникнення на їх криволінійних поверхнях аеродинамічних сил та їх моментів. Внаслідок цього змінюється кінематика віброфрикційного руху насінин різних фракцій. Збільшуються кути розкриття та перекриття секторів можливих траєкторій насіння різних фракцій. Погіршується якість розділення насінневого матеріалу.

Для мінімізації впливу знакозмінного потоку можна застосовувати аеродинамічні екрани, якими треба оснащати робочі блоки ВФНС. За рахунок застосування екранів зменшується, аж до повного усунення, виникнення знакозмінних швидкостей та перепадів тиску на гранях області повітря між робочими поверхнями блоку ВФНС. Також на поле швидкостей та тиску повітря у робочій області впливає режимні та конструктивні параметри ВФНС (амплітуда коливань, вертикальний зазор між робочими поверхнями блоку).

Таким чином, підвищення ефективності процесу сепарації насінневих матеріалів дрібнонасінневих культур, чутливих до дії повітряного потоку, на ВФНС та обґрунтування його конструкційно-режимних параметрів, є актуальною та перспективною науково-прикладною задачею для агропромислового виробництва.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана у відповідності до Закону України «Про стимулювання розвитку вітчизняного машинобудування для агропромислового комплексу» № 5478-VI (5478-17) від 06.11.2012 р.; постанови Кабінету Міністрів України № 556 від

23.08.2016 р. «Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2024 року»; розробленого плану дій затвердженого Міністерством аграрної політики та продовольства України «Стратегічні напрями розвитку сільського господарства України на період до 2024 року»; спрямована на реалізацію Проєкту ЄС «Підтримка впровадження сільськогосподарської та продовольчої політики в Україні»; регіональної програми «Стратегія сталого розвитку Харківської області до 2024 року».

Робота є частиною науково-дослідних держбюджетних тем Державного біотехнологічного університету: «Розробка та удосконалення мехатронних машино-технологічних систем, що відповідають вимогам ергономіки, технічної естетики та охорони праці для механізованого виробництва сільськогосподарської продукції на основі енергозберігаючих та економічно безпечних технологій» (ДР № 0123U101678, 2023-2025 рр.).

**Мета дослідження:** підвищення ефективності процесу вібросепарації насіннєвих матеріалів дрібнонасіннєвих культур шляхом обґрунтування раціональних параметрів та режимів роботи ВФНС з аеродинамічним екраном.

**Задачі дослідження:**

– проаналізувати механізм впливу знакозмінного повітряного потоку на процес вібросепарації насіння з виразними аеродинамічними властивостями;

– розробити математичну модель та чисельний алгоритм розрахунку кінематичних параметрів безвідривного віброфрикційного руху насіння з урахуванням процесів: створення знакозмінного повітряного потоку в середині робочого блоку ВФНС; виникнення аеродинамічних сил та моментів на поверхнях насінин; суперпозиції аеродинамічних і механічних сил при вібраційному русі насіння;

– з використанням створеної математичної моделі дослідити вплив динаміки повітря на кінематичні параметри безвідривного віброфрикційного

руху та ефективність сепарації насіння з виразними аеродинамічними властивостями залежно від конструктивно-режимних параметрів ВФНС. Перевірити адекватність отриманих результатів за допомогою натурального експерименту;

– обґрунтувати конструкційні параметри аеродинамічного екрану для робочого блоку ВФНС за критерієм мінімізації або виключення впливу знакозмінного повітряного потоку на процес сепарації насіння з виразними аеродинамічними властивостями;

– провести лабораторні випробування з насінням пастернаку при використанні удосконаленого ВФНС, який оснащений аеродинамічним екраном та реалізує раціональні конструкційно-режимні параметри.

**Об’єкт дослідження:** процес віброфрикційного руху насіння з урахуванням дії аеродинамічних сил та моментів, його зв'язок з конструкцією аеродинамічного екрану, блоку робочих поверхонь та режимом роботи ВФНС.

**Предмет дослідження:** закономірності впливу режиму коливань, конструкції блоку робочих поверхонь та аеродинамічного екрану ВФНС на кінематичні параметри руху насіння під впливом вібрації та руху повітря.

**Методи дослідження:** в роботі використано методи класичної механіки, механіки суцільного середовища, аналізу та синтезу, математичного моделювання, математичної статистики, розв’язку систем нелінійних диференційних рівнянь. Для розв’язання математичної моделі динаміки віброфрикційного руху насіння застосовано чисельні методи. Експериментальні дослідження проведено із застосуванням чисельного, фізичного моделювання та випробувань, які виконані в лабораторних умовах. Математичне моделювання, теоретичні дослідження та обробка результатів наукових досліджень виконані з використанням програмного забезпечення GNU Octave, PAST, Matlab та Microsoft Office.



### **Наукова новизна одержаних результатів.**

#### *Вперше:*

– встановлено залежність впливу знакозмінного повітряного потоку на якість вібросепарації насінневих матеріалів пастернаку, кропу запашного та салату листового залежно від вертикального зазору між робочими поверхнями блоку ВФНС, амплітуди коливань, висоти перекриття вертикальної стінки аеродинамічного екрану та його відстані від торцю блоку робочих поверхонь;

#### *Отримало подальший розвиток:*

– формалізоване уявлення основних закономірностей та зв'язків процесу віброфрикційного безвідривного руху насіння об'ємної форми по нахиленій шорсткій поверхні робочого блоку, де, на відміну від відомих підходів, враховується вплив повного набору аеродинамічних сил і моментів, що діють на насіння, а також геометричних характеристик, амплітуди коливань робочого блоку ВФНС і конструктивних параметрів аеродинамічного екрану;

#### *Удосконалено:*

– метод оцінки аеродинамічних сил та моментів, що діють на насіння визначеної геометричної форми, залежно від параметрів повітряного потоку у просторі між робочими поверхнями блоку ВФНС та положення насіння у цьому просторі;

– метод оцінки параметрів повітряного потоку у просторі між робочими поверхнями блоку ВФНС залежно від амплітуди коливань, вертикального зазору між робочими поверхнями та конструктивних параметрів аеродинамічного екрану.

### **Практичне значення одержаних результатів.**

Розроблено регресійні моделі щодо прогнозування рівню впливу знакозмінного повітряного потоку на якість вібросепарації насінневих матеріалів деяких рослинних культур, рекомендації щодо раціональних

конструкційно-режимних параметрів ВФНС з аеродинамічним екраном, які передано на ПрАТ «Карлівський машинобудівний завод» для використання при проведенні дослідно-конструкторських і науково-дослідних робіт з удосконалення технології вібросепарації насіння з виразними аеродинамічними властивостями. Експериментальні дослідження підтвердили ефективність використання аеродинамічного екрану при сепарації насіння (пастернаку) в якості засобу для мінімізації впливу знакозмінного повітряного потоку. Отримано збільшення на 3%, порівняно зі звичайним ВФНС, середньозваженого показника сортової чистоти кондиційної частки вихідного насіннєвого матеріалу з 95,5% до 98,5%. При цьому частка некондиційного матеріалу знизилась на 37%: з 44% до 7% від загального обсягу матеріалу. Також ВФНС з екраном, на відміну від звичайного сепаратору, дозволив виділити фракції насіння, які належать групам оригінального, елітного та репродуктивного насіння, в той час як обробка на звичайному ВФНС виділяла тільки групу репродуктивного насіння.

**Особистий внесок здобувача.** Теоретичні та експериментальні результати досліджень, що виносяться на захист, отримані автором самостійно. Постановка задач, аналіз і трактування результатів виконані спільно з науковим керівником і частково зі співавторами публікацій. У наукових роботах, які опубліковано у співавторстві, здобувачу належать такі результати: теоретично досліджено вплив геометричної форми насіння та характеру його обтікання повітряним потоком на динаміку віброфрикційного безвідривного руху [7]; теоретично сформульовано постановку крайової задачі та розроблено алгоритм розрахунку поля швидкостей та тиску повітря між двома паралельними робочими поверхнями ВФНС, що коливаються синхронно [4, 8, 9, 10, 12]; теоретично сформульовано задачу та створено алгоритм розрахунку віброфрикційного руху насіння з урахуванням дії аеродинамічних сил та моментів [3, 5, 6]; виконано аналіз впливу параметрів аеродинамічного екрану на аеродинамічні процеси між робочими площинами

ВФНС [13]; побудовано регресійну модель ефективності аеродинамічного екрану залежно від його геометричних характеристик та параметрів режиму роботи ВФНС, запропоновано раціональні характеристики аеродинамічного екрану та оптимальний режим віброфрікції насіння пастернаку, кропу запашного та салату листового [1]; здійснено перевірку адекватності математичної моделі віброфрікційного руху насіння з урахуванням аеродинамічних сил та моментів шляхом порівняння регресійних моделей оцінки впливу періодичного повітряного потоку, які побудовані за результатами чисельного і натурного експериментів [2, 14].

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертації пройшли апробацію і отримали позитивні оцінки на міжнародних науково-практичних конференціях: Commission of motorization and energetics in agriculture An international journal on operation of farm and agri-food industry machinery (Lublin – Rzeszow 2013), «Технічний прогрес в АПВ» (Харків, ХНТУСГ, 2017-2020 рр.); «Молодь і технічний прогрес в АПВ» (Харків, ХНТУСГ, 4 квітня 2019 р.); всеукраїнська НПК «Оптимізація технічних та технологічних систем агровиробництва» (Харків, ХНТУСГ, 18-19 квітня 2019 р.); Science and education: problems, prospects and innovations: the 1st International scientific and practical conference (Kyoto, 7-9 жовтня 2020); «Експлуатаційна та сервісна інженерія» (Харків, ХНТУСГ, 15-16 жовтня 2020 р.); «Сучасні проблеми землеробської механіки» присвяченої 90-річчю Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка та 120-й річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка (Харків, 17-18 жовтня 2020 р.); сучасна інженерія агропромислових харчових виробництв (Харків, 24–25 листопада 2022 року) Матеріали XIX міжнародного форуму молоді "Молодь і індустрія 4.0 в XXI столітті" (Харків, 06-07 квітня 2023 р.); міжнародна науково-практична конференція «Технічний прогрес в АПВ» (Харків, 9-10 травня 2023 р.); всеукраїнська науково-практична конференція «Досягнення та перспективи галузі виробництва, переробки і

зберігання сільськогосподарської продукції» (Кропивницький, 21 квітня 2024 р.); міжнародна науково-практична конференція «Технічний прогрес в АПВ» (Харків, 21-22 травня 2024 р.); всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція «Новітні технології в АПК: проблеми та перспективи впровадження» (Полтава, 27-28 червня 2024 року.).

В повному обсязі дисертаційна робота обговорювалась та позитивно схвалена на науковому семінарі «Науково-технічної ради» факультету мехатроніки та інжинірингу Державного біотехнологічного університету (Харків, 21 березня 2024 р.).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 32 наукових працях, у тому числі: 14 статей у спеціалізованих наукових виданнях України (з них 4 статті у виданні, що включено до міжнародної науково-метричної бази даних Scopus); 2 публікації у закордонному виданні; 15 тез у збірниках доповідей наукових конференцій, отримано 3 патенти.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 268 сторінок, у тому числі 10 додатків на 64 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації становить 170 сторінок, 78 рисунків та 20 таблиць. Список використаних джерел нараховує 148 найменувань на 19 сторінках.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІБРОСЕПАРАЦІЇ ДРІБНОНАСІННЄВИХ МАТЕРІАЛІВ

Розгляд проблеми підвищення ефективності процесу вібросепарації насіннєвих культур, на які впливають параметри повітряного потоку, доцільно розглянути на основі аналізу конструктивних особливостей ВФНС та процесу взаємодії насіння з повітрям.

Безумовно, величина впливу аеродинамічного фактору залежить, з одного боку, від геометричних параметрів, режиму роботи ВФНС, а з іншого – від аеродинамічних та механічних властивостей насіння. Це зумовлює необхідність проведення детального аналізу сучасних конструкцій, вимоги до них, зміни конструктивних параметрів при експлуатації, відомих методів підвищення їх продуктивності і аеродинамічних властивостей насіння, та на цій основі визначити перспективний науковий напрямок, щодо удосконалення та підвищення ефективності вібросепарації насіння з аеродинамічними властивостями.

#### 1.1 Методи очищення і сортування насіннєвих матеріалів

Використання для посіву високоякісного насіння кращих сортів – один з найбільш доступних і економічно вигідних способів підвищення врожайності сільськогосподарських та інших культур.

Вирішальну роль в отриманні високоякісного посівного матеріалу сільськогосподарських та інших культур є їх сепарація, яка включає очищення посівного матеріалу від домішок і наступне сортування очищеного матеріалу з метою відбору найбільш якісного насіння для посіву.

За допомогою сепарації насіння вирішуються наступні завдання:

- видалення домішок з вихідного насіннєвого матеріалу згідно з вимогами, передбаченими нормативними документами, і отримання чистого насіння, що належить тільки одній культурі;

- поліпшення фізичних показників насіннєвих матеріалів;

- відбір для посіву тільки самого високоврожайного насіння.

Вирішення цих завдань базується на всебічному використанні відмінностей у фізико-механічних властивостях компонентів насіннєвих матеріалів [33, 34, 35, 36]. Чим глибше будуть вивчені фізичні особливості компонентів насіннєвих матеріалів, тим легше і досконаліше можуть бути здійснені процеси сепарації насіння.

До фізико-механічних властивостей компонентів насіннєвих матеріалів слід віднести:

- геометричні розміри (довжина, ширина і товщина);

- аеродинамічні властивості, які характеризуються коефіцієнтом парусності і критичною швидкістю витання;

- форма насіння, яка визначається як округла або плоска;

- стан поверхні, що визначається як гладка (для здорового насіння) і зморщена (для мертвого, хворого і щуплого насіння), і вимірюється за допомогою коефіцієнта опору ковзання і граничним кутом тертя;

- пружність;

- питому вагу;

- механічну міцність;

- колір;

- магнітно-електричні властивості.

Розділення насіннєвих матеріалів за розмірами є найбільш простим і ефективним, а тому і найбільш поширеним способом [37, 38, 39, 40, 41]. Процес може ґрунтуватися на розділенні насіння за довжиною, шириною і товщиною.

По довжині насіння поділяють на коміркових (трієрних) поверхнях [43].

По ширині поділяють за допомогою решіт з круглими отворами. Дослідження показали, що якщо насіння довге (довжина більше ширини більш ніж в 2 рази), воно практично не може прийняти вертикальне положення, а отже і не може пройти через круглі отвори решіт. Тому, по ширині добре розділяються тільки горох, гречка, просо і т.п.

За товщиною насіння поділяють за допомогою решіт з продовгуватими отворами. У цьому випадку насіння повинно в процесі руху вздовж отворів при горизонтальних коливаннях стати на ребро, і тільки тоді воно може пройти через решето. Так як мінливість насіння по товщині незначна, то таким шляхом можна добре відокремити домішки від основної культури.

Аеродинамічні властивості насіння широко використовують в практиці сепарації насіння, особливо для видалення мертвих домішок (соломи, частинок колосу і т.п.). Такі домішки добре відрізняються за питомою вагою від насіння, мають різну критичну швидкість і легко відокремлюються в повітряному потоці [42, 45, 46, 47, 48]. Однак швидкість витання насіння в значній мірі залежить від їх форми. У кулястого насіння ця швидкість постійна. Її можна використовувати при сепарації. Насіння, яке не має кулястої форми (пшениця, жито і т.п.), надає повітряному потоку змінний опір, залежно від свого положення в потоці. Для такого насіння сепарація за аеродинамічними властивостями менш ефективна.

Сепарація з використанням форми насіння дозволяє розділяти насіння з округлою і плоскою формою. При цьому використовуються нахилені поверхні в машинах типу гірок, змійок і т.п. На таких машинах насіння округлої форми скочується по поверхні, а плоске – ковзає. Тобто в першому випадку виникає тертя кочення, а в другому – тертя ковзання. Коефіцієнт тертя значно менше при коченні, ніж при ковзанні, тому насіння, що має різну форму, добре розділяється [44].

Сепарація насіння за станом поверхні застосовується для виділення з насінневого матеріалу щуплого, хворого, пошкодженого насіння. Для цього

використовують рухомі фрикційні нахилені поверхні (фрикційні транспортери) [49]. Регулюючи нахил, за рахунок різниці в коефіцієнтах тертя, відокремлюють не тільки домішки, але і некондиційне насіння.

За рахунок різниці в прилипанні магнітного порошку до поверхні насіння з різним станом поверхні, заснований магнітний спосіб сепарації [50]. Порошок, що містить окис заліза, погано прилипає до гладкої поверхні, але добре обволікає насіння з шорсткою поверхнею, тому таке насіння добре виділяється за допомогою такого способу.

Сепарація насіння по пружності здійснюється за допомогою відбивних сортувальних столів [51, 52, 53, 54, 55]. Насіння має різну пружність, тобто здатність приймати після деформації первісну форму. Йому властива також і різна здатність відбиватися від поверхні при падінні. Обидві ці властивості насіння використовують для поділу в процесах сепарації.

Сепарація насіння за питомою вагою дуже поширений в практиці насінництва. Існують мокрі і сухі способи. У першому випадку розділення відбувається за фактором спливання насіння з меншою питомою вагою у сольовому розчині певної концентрації. При використанні сухого способу сепарація насіння відбувається на різних колах, де застосовують різні кругові обертальні рухи. У верхньому шарі виявляється більш легке насіння, а в нижньому – важке. Широко використовують пневматичні сортувальні столи [56], де насіння на решетах знаходиться в русі і продувається повітряним потоком. Таким шляхом також вдається розшарувати шар насіння за питомою вагою і відібрати потрібне. Великий інтерес представляє сепарація насіння за питомою вагою за допомогою віброцентрифуги [57]. Експериментальні установки показали велику ефективність і перспективність цього методу.

Близький за ідеєю та результативністю метод сепарації насіння, запропонований Петрусовим А. І. [58], хоча конструктивно ця ідея вирішена дещо по-іншому. Сутність сепарації тут полягає в тому, що насінню шляхом обертання задають обертальну швидкість, а в залежності від питомої ваги і



маси насіння набуває різне прискорення. Під дією відцентрових і коріолісових сил інерції зерно подається на поверхню решета і рухається по ньому зверху вниз під дією сили тяжіння. Виділення прохідної фракції через отвори ротора відбувається під дією відцентрових сил. Машини, що діють за цим принципом, дуже продуктивні й ефективні.

Сепарація насіння за механічною міцністю може бути застосована виключно для очистки насіння від домішок землі [60, 61]. З цією метою вихідний матеріал пропускають через гумові вальці, де грудочки землі роздавлюються і потім видаляються, а насіння проходить без ушкоджень.

Сепарація насіння за кольором використовують як для очищення так і сортування різних культур [62, 63, 64, 65]. Більшою мірою це стосується крупнонасінневих культур (квасоля, боби, горох, соя, соняшник, пшениця). Створені машини, які сепарують насіння на групи за різним забарвленням. Відбите світло від насіння потрапляє на фотоелемент, де збуджується електричний струм, який і приводить в дію виконавчі органи (відкриває клапани і т.п.).

Перспективним методом є сепарація насіння за їх електричними властивостями [66]. Метод ґрунтується на відмінності насіння по їх діелектричній проникності. Якщо незаряджене насіння ввести в однорідне електричне поле, то воно поляризується: орієнтується великою віссю уздовж поля і стає перпендикулярно до площини решета, яке служить одним з електродів. За допомогою такого методу можна здійснювати сепарацію довгого насіння, яке погано розділяється за шириною.

## 1.2 Використання віброфрикційних насінневих сепараторів

Вибір тієї чи іншої технології сепарації залежить від виду оброблюваного насінневого матеріалу, фізико-механічних характеристик насіння в матеріалі і співвідношення характеристик варіаційних рядів. Для насінневих культур з відносно великим насінням, як правило, існує хоча б одна

фізико-механічна характеристика, для якої є чітке рознесення центрів сепарації варіаційних рядів домішок і насіння культури [67]. Для сепарації такого роду насіння може бути використано більшість насіннеочисних машин, що здійснюють поділ за будь-якою однією ознакою.

Для дрібнонасінневих культур не вдається досягти чіткої сепарації за однією ознакою. Варіаційні ряди характеристик різних фракцій дрібнонасінневого матеріалу досить схожі. Тому для отримання необхідного ефекту доводиться застосовувати комплексні методи сепарації. Це призводить до здорожчання кінцевого продукту внаслідок низької продуктивності використовуваних сепараторів, підвищення витрати ресурсів на забезпечення технологічного процесу, а також зниження врожайності внаслідок пошкодження насіння при збільшенні циклів обробки.

Дослідженнями [68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75] встановлено, що більш високий ефект поділу сипучих матеріалів досягається при застосуванні віброфрикційних сепараторів, які одночасно враховують три ознаки сепарації насінневих матеріалів: форму, шорсткість і пружність. Це дає ВФНС значну перевагу в якості сепарації.

Віброфрикційні сепаратори в останні роки знаходять все більш широке застосування в гірничорудній промисловості для збагачення азбестових руд, для сепарації шліфпорошків, алмазних зерен та ін. [76, 77]. З їх використанням досягається значний технічний і технологічний ефект.

Харківським інститутом механізації і електрифікації сільського господарства розроблені ВФНС, які знайшли в сільському господарстві широке застосування при сепарації важкороздільних насінневих матеріалів [78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86].

Робочі органи цих сепараторів здійснюють поступальний або просторовий рух. За типом фрикційної поверхні ВФНС поділяються на сепаратори з плоскими, ступінчастими і криволінійними робочими органами.

На рис. 1.1 представлена схема ВФНС з циліндричним робочим органом.

З пристрою 6 насіння подається в циліндр 3. Під дією вібрації компоненти матеріалу переміщуються уздовж циліндра, піднявшись по його поверхні до тих твірних, до яких дотичні в площинах, перпендикулярних осі циліндра, дорівнюють граничним кутам підйому. Компоненти матеріалу, що мають різні фізико-механічні властивості, поділяються ділильними пластинами 8 і надходять в різні приймачі 7.

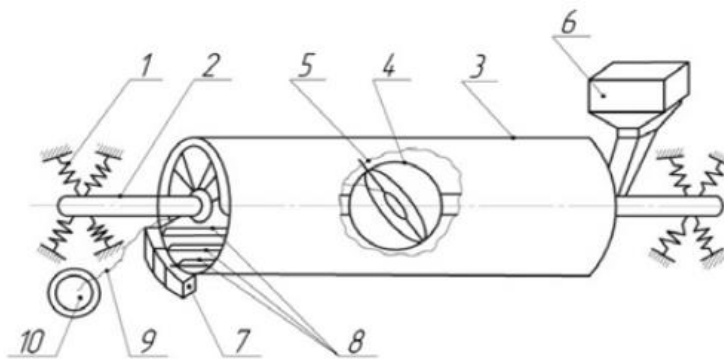
У цьому сепараторі, завдяки вібраційному впливу, через несиметричні форми частинок і мікронерівності їх оболонки, відбуваються також поперечні рухи. Зіткнення частинок і їх надходження до нецільової фракції знижує якість сепарації. Також має місце обмеженість робочої поверхні, на якій відбувається сепарація (тільки нижня частина циліндра) і неможливість нарощування числа робочих поверхонь при заданому діаметрі.

Для усунення цих недоліків пропонується сепаратор, що включає пакет увігнутих фрикційних дек, виконаних зі скосом в напрямку вібрації. Схема такого сепаратора приведена на рис. 1.2.

Більш простими по конструкції є сепаратори з плоским нахиленим робочим органом, що здійснює прямолінійні спрямовані коливання під гострим кутом до напрямку зростання підйому робочої поверхні [87] (рис. 1.3). Насінневий матеріал з пристрою живлення 5 подається на робочу поверхню 1. Під впливом спрямованих коливань, створюваних віброзбудником 3, відбувається поділ насінневого матеріалу. Вгору переміщуються більш плоскі, шорсткі і менш пружні компоненти матеріалу і надходять в приймач 6. Округлі, гладкі і пружні частинки ковзають і скочуються вниз по робочій поверхні і надходять в приймач 7. На цьому сепараторі насінневий матеріал розділяється тільки на дві фракції, тому можливо поділ тільки насінневих матеріалів, компоненти яких сильно відрізняються за ознакою подільності – граничному куту підйому. Але реальні насінневі матеріали зазвичай містять компоненти, фізико-механічні властивості яких змінюються в широких межах. Отримання цільової фракції 100% чистоти є проблемним. Збільшення

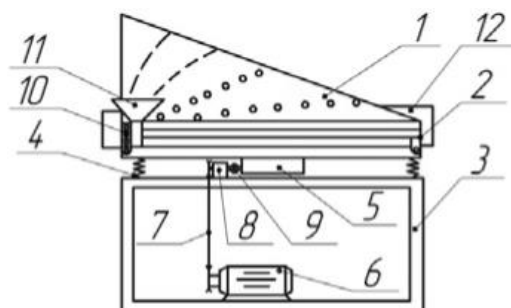
продуктивності сепаратора обмежується явищем зіткнень і взаємозахоплень компонентів матеріалу, що переміщуються в різних напрямках (вгору або вниз) по робочій поверхні.

Підвищення продуктивності та якості сепарації можливо при використанні сепараторів з поздовжньо-поперечним кутом нахилу робочого органу. Конструктивна відмінність цих сепараторів полягає в наявності двох механізмів регулювання положення робочої поверхні (деки) в поздовжньому і поперечному напрямках. Наявність нахилу робочої поверхні в поперечному напрямку призводить до суттєвих змін процесу сепарації насінневих матеріалів.



1 – пружна підвіска; 2 – вісь; 3 – циліндр; 4 – вібробудувач; 5 – дебаланс; 6 – пристрій живлення; 7 – приймачі продуктів поділу; 8 – ділильні планки; 9 – гнучкий вал; 10 – електродвигун

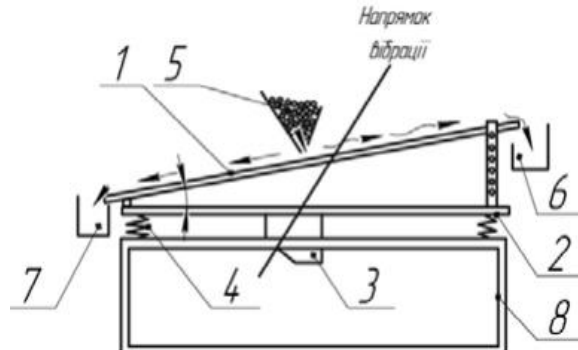
Рисунок 1.1 – Принципова схема сепаратора з циліндричною робочою поверхнею



1 – робочі поверхні; 2 – пакет; 3 – рама; 4 – пружна підвіска; 5 – вібробудувач; 6 – електродвигун; 7 – клинопасова передача; 8 – проміжна передача; 9 – муфта; 10 – механізм установки кута нахилу пакета;

11 – завантажувальний пристрій; 12 – приймачі

Рисунок 1.2 – Конструктивна схема віброфрикційного сепаратора з увігнутим робочим органом



1 – фрикційна поверхня; 2 – вібростіл; 3 – віброзбудник; 4 – пружини; 5 – пристрій живлення; 6, 7 – приймачі продуктів поділу; 8 – основна рама

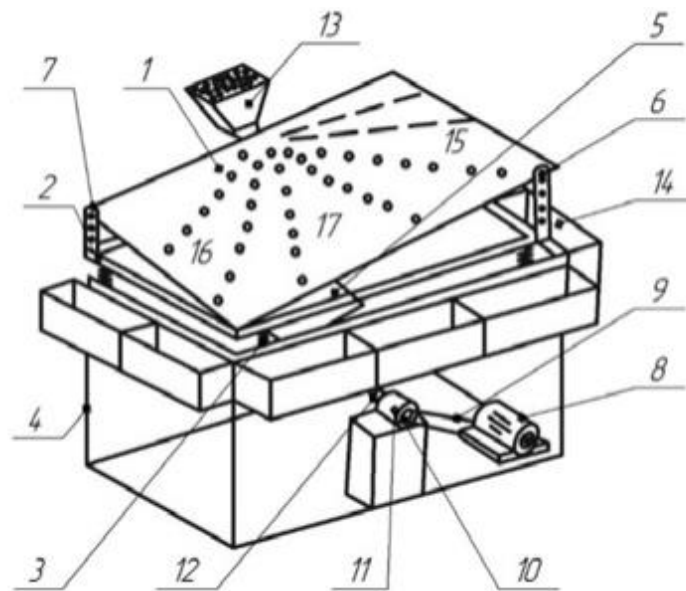
Рисунок 1.3 – Принципова схема сепаратора з плоским робочим органом

У сепараторах з подвійним кутом нахилу робочої поверхні (рис. 1.4) частинки, що відрізняються фізико-механічними властивостями, переміщаються на деці по траєкторіях, які не є зустрічними. При цьому знижується кількість зіткнень і взаємних захоплень частинок різних фракцій, підвищується продуктивність і якість сепарації.

Для покращення ефективності розділення фракцій насінневих матеріалів за формою, для насіння з циліндричною та бочкоподібною формою, робоча поверхня може бути виконана у вигляді набору фрикційних пластин різної шорсткості, що розміщені паралельно подовжній осі робочої площини [88]. На такій робочій поверхні є два види фрикційних пластин різної шорсткості, що чергуються. Орієнтація насіння бочкоподібної форми потрібним чином здійснюється під дією вібраційних сил на межі розділу пластин з різною шорсткістю за рахунок різниці у коефіцієнтах тертя насіння по пластинах різної шорсткості.

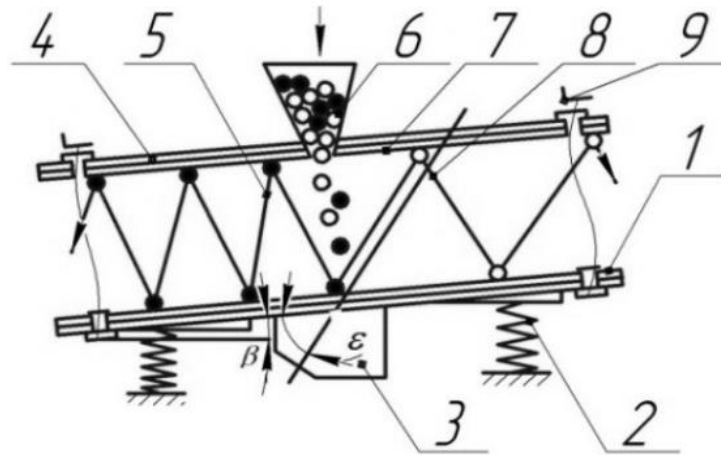
При сепарації за пружними властивостями насіння на віброуючій нахиленій поверхні технологічний процес може бути інтенсифікований за допомогою установки над сепаруючою поверхнею, еквідистантно їй

розташованій, і жорстко з нею пов'язаній відбиваючій поверхні [89] (рис. 1.5). Над робочою поверхнею 1 встановлена відбиваюча поверхня, жорстко з'єднана з робочою. Відстань між поверхнями регулюється. Робоча поверхня надає імпульс насінню, в результаті чого воно відривається від неї і здійснює політ. У фазі підйому насіння зустрічається з відбиваючою поверхнею, яка надає зустрічний ударний імпульс, так як вона коливається синфазно з робочою поверхнею. При цьому насіння більш шорстке, плоске і менш пружне переміщається вгору (траєкторія 6), а менш шорстке та більш пружне – вниз (траєкторія 5). У зв'язку з подвоєнням числа зіткнень насіння в кожному періоді коливань процес сепарації інтенсифікується.



1 – фрикційна поверхня; 2 – вібростіл; 3 – пружини; 4 – корпус; 5 – віброзбудник; 6, 7 – механізми регулювання поздовжнього і поперечного кутів нахилу; 8 – електродвигун; 9 – клинопасова передача; 10 – варіатор; 12 – проміжна передача; 13 – пристрій живлення; 14 – приймачі продуктів поділу

Рисунок 1.4 – Схема сепаратора з поздовжньо-поперечним нахилом робочого органу



1 – робоча поверхня; 2 – пружина; 3 – вібробудник; 4 – відбиваюча поверхня; 5 – траєкторія руху округлого, гладкого насіння; 6 – живильний пристрій; 7 – фрикційний матеріал; 8 – траєкторія руху плоского, шорсткуватого насіння та домішок; 9 – гвинтовий регулювальний пристрій

Рисунок 1.5 – Схема сепаратора з відбиваючою робочою поверхнею

Процес сепарації ще більш інтенсифікований у фрикційному вібросепараторі з криволінійною відбиваючою поверхнею (рис. 1.6). Для збільшення продуктивності відбиваюча поверхня може бути також виконана з більшим коефіцієнтом тертя, ніж робоча.

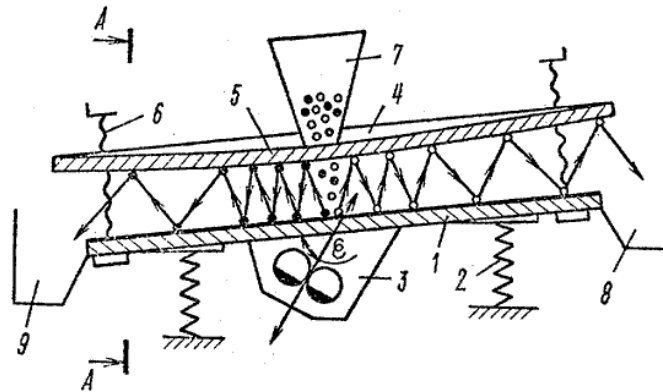
Підвищення продуктивності вібраційних сепараторів через застосування відбиваючих поверхонь викликає, однак, різке збільшення енерговитрат і металоємності.

Таким чином, основним методом збільшення продуктивності вібраційних машин і сепараторів з поздовжньо-поперечним нахилом робочого органу є установка сепаруючих поверхонь одна над іншою і скріплення їх в блоки [90] (рис. 1.7). Збільшення кількості робочих площин в блоці обмежена умовою проходження сили вібрації через центр ваги частини сепаратора, що коливається. При збільшенні кількості площин в блоці центр ваги зміщується вгору і умова порушується, що веде до порушення ідентичності коливань як по самій площині, так і різних площин в блоці.

Ця проблема вирішується шляхом додавання симетричних робочих блоків так, щоб блоки розташовувалися над і під вібробудником. При рівному

збільшенні кількості поверхонь в блоках центр мас вібростолу не змінює положення. Зберігається ідентичність коливань, збільшується продуктивність машини.

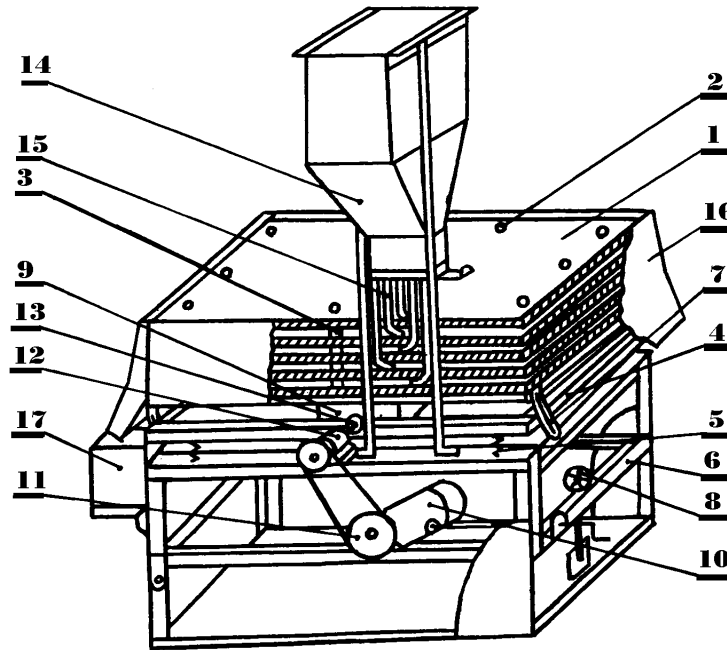
Віброфрикційна машина, яка оснащена блоками сепаруючих поверхонь, усуває основний недолік такого роду машин, а саме їх малу продуктивність. Однак пропонуване технічне нововведення привносить нові чинники, які обумовлюють, в деяких випадках, негативний вплив на якість сепарації (очищення).



1 – робоча поверхня; 2 – пружини; 3 – вібробудник; 4 – рама; 5 – криволінійна відбиваюча поверхня; 6 – гвинтовий пристрій; 7 – завантажувальний пристрій; 8, 9 – приймачі продуктів поділу

Рисунок 1.6 – Принципова схема фрикційного вібросепаратора з криволінійною відбиваючою поверхнею





1 – фрикційна поверхня; 2 – стяжний болт; 3 – тарована втулка; 4 – вібростіл; 5 – пружина; 6 – проміжна рама; 7, 8 – механізми регулювання поперечного та поздовжнього кутів нахилу; 9 – вібророзбудник; 10 – електродвигун; 11 – варіатор; 12 – проміжна опора; 13 – пружна муфта; 14 – бункер; 15 – гнучкі трубки; 16 – напрямні; 17 – приймачі продуктів поділу

Рисунок 1.7 – Конструктивна схема ВФНС з одним блоком фрикційних поверхонь

Дві паралельно розташовані робочі площини утворюють плоский канал. При здійсненні цими паралельними площинами синхронних коливань, що відбуваються при роботі віброфрикційної машини, виникає складний просторовий знакозмінний рух повітря в цьому каналі (рисунок 1.8). Відносні швидкості елементів повітря складаються з тангенціальних і нормальних складових, які змінюються в часі за періодичним законом. Закон змінювання цих складових швидкості повітря обумовлений змінюванням відносних швидкостей елементів повітря на торці повітряної області та на границі її контакту з робочими поверхнями блоку. Коли робочі поверхні рухаються відносно інерційної системи координат, на торцях області повітря, що є між поверхнями, набирає відносну швидкість, напрямком якої є протилежний напрямку коливань блоку. На самих робочих поверхнях виникають області підвищеного та зниженого тиску.

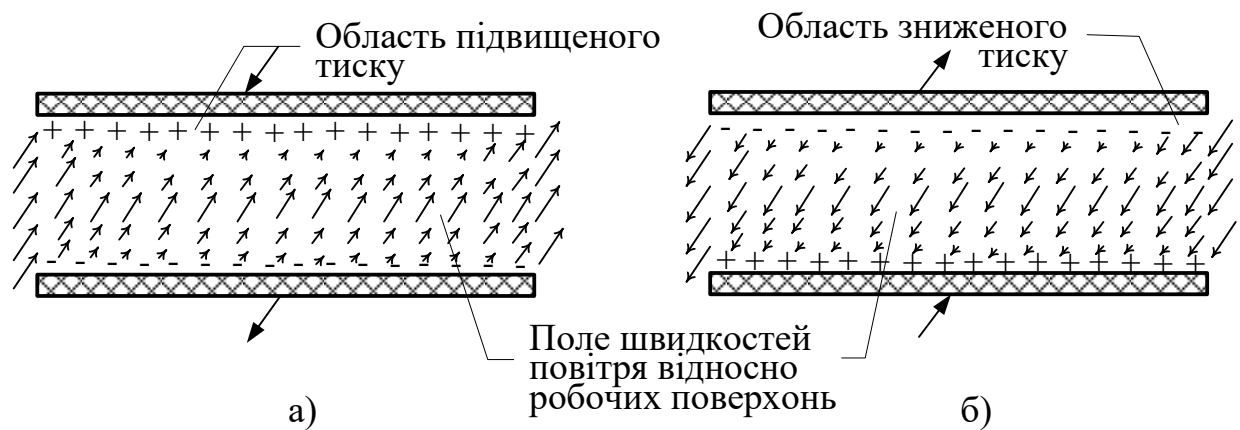


Рисунок 1.8 – Знакозмінний повітряний потік між робочими поверхнями блоку ВФНС при здійсненні коливань: а) робочі поверхні рухаються вниз; б) робочі поверхні рухаються вверх

Суперпозиція дії областей підвищеного та зниженого тиску та областей з ненульовими швидкостями повітря по торцю робочих поверхонь породжує складну картину знакозмінного поля швидкостей всередині області, що знаходиться між робочих поверхонь блоку ВФНС.

Знакозмінний потік впливає на динаміку переміщення насіння, яке рухається відносно робочих поверхонь під впливом вібрації. Для насіння, що має округлу форму і відносно велику масу і щільність, вплив повітря на процес сепарації не позначається. Для насіння, що має виражені аеродинамічні властивості і відносно невелику масу, вплив повітряного потоку позначається більшою мірою. У деяких випадках цей вплив може бути таким, що практично повністю виключає спрямований вібраційний рух насінневого матеріалу. Це відбувається через зависання насіння в повітрі над робочою поверхнею під впливом підйомної сили та зменшення коефіцієнта тертя, за рахунок якого, власне, і реалізується принцип роботи ВФНС. Ефективність сепарації насіння для такого роду насінневого матеріалу низька. Для таких матеріалів відбувається перемішування фракцій за рахунок впливу аеродинамічних сил та моментів на кінематичні параметри вібраційного руху насіння (рисунок 1.9). Сектори можливих траєкторій насіння для відповідних фракцій матеріалу збільшуються, також збільшується ступінь перекриття цих секторів.

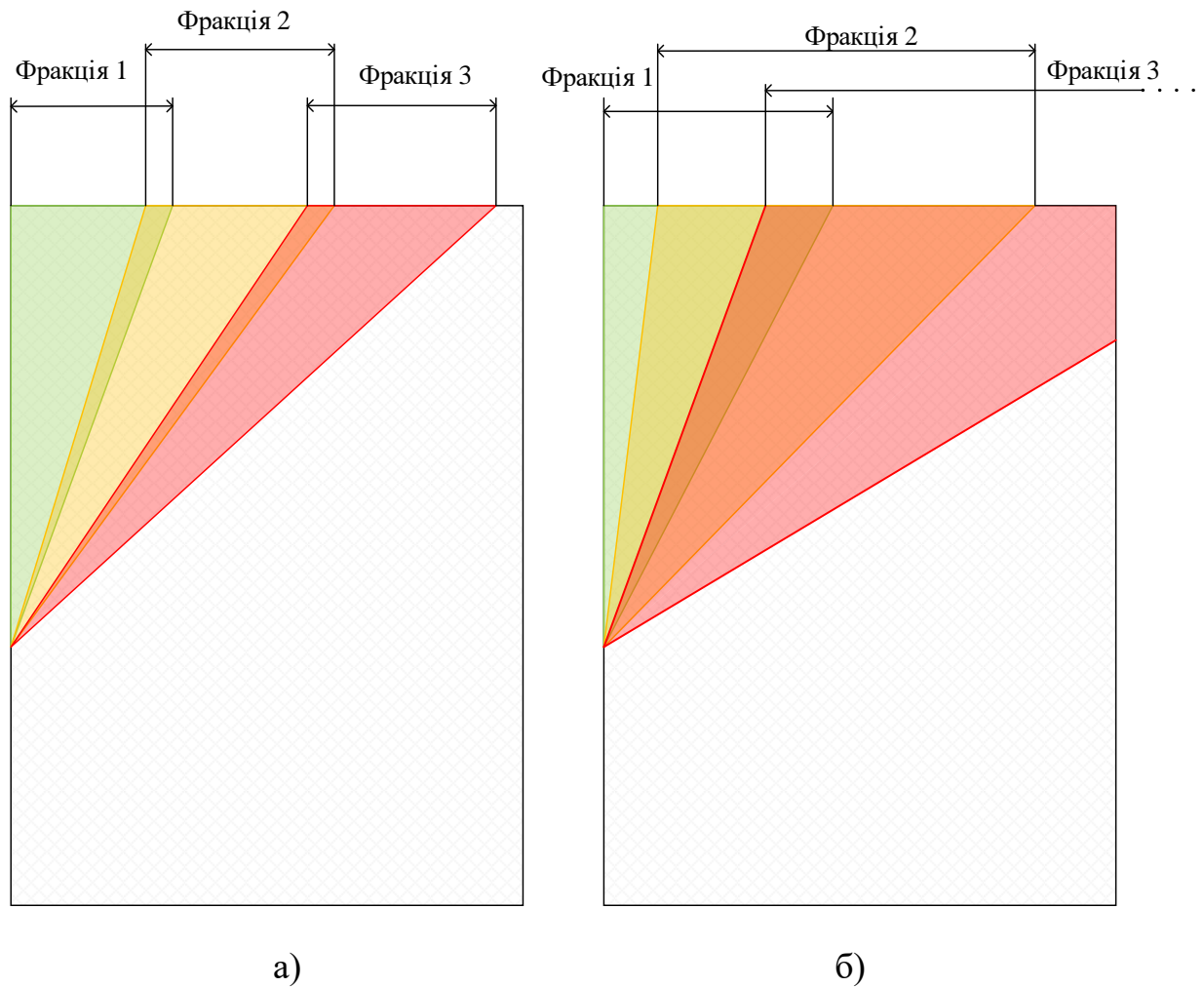


Рисунок 1.9 – Ефективність застосування ВФНС при розділенні насіннєвих матеріалів: а) звичайних; б) чутливих до дії повітряного потоку

Оскільки ВФНС з блоками робочих площин на сьогоднішній день залишається єдиним простим і дешевим засобом для сепарації важкороздільних насіннєвих матеріалів, в тому числі і дрібнонасіннєвих з вираженими аеродинамічними властивостями насіння, то мета подальшого удосконалення конструкції та налаштування режимів роботи таких машин з метою зменшення або зведення до мінімуму впливу знакозмінного повітряного потоку є актуальною.

Є доцільним оснастити блок робочих поверхонь ВФНС спеціальним аеродинамічним екраном (рисунок 1.10). Принцип дії такого екрану полягає в усуненні динаміки повітря по торцю робочих поверхонь. Це дозволить суттєво

знизити або повністю усунути рух повітря відносно робочих поверхонь всередині робочої області.

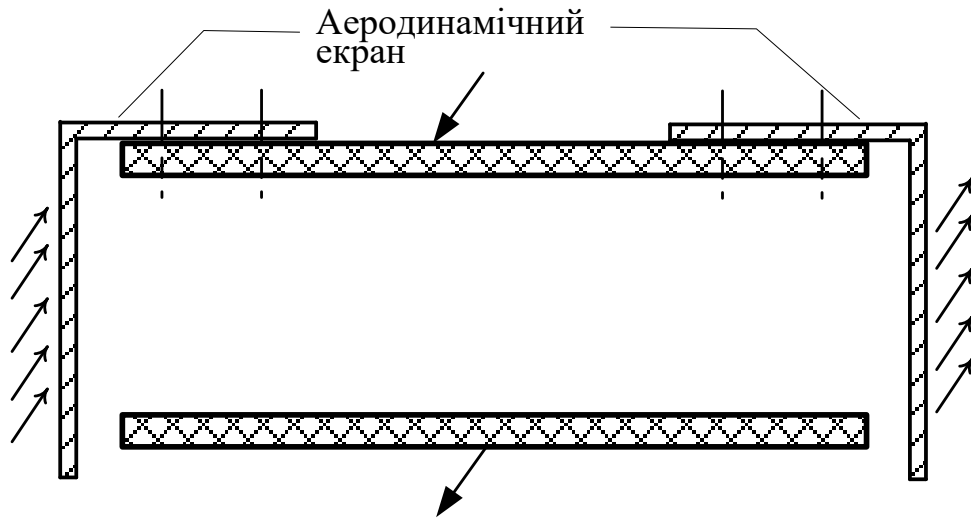


Рисунок 1.10 – Використання аеродинамічного екрану для блоку ВФНС з метою усунення знакозмінного повітряного потоку

Для обґрунтування конструкційно-режимних параметрів ВФНС з аеродинамічним екраном необхідно дослідити процес взаємодії робочих органів віброфрикційної машини з навколишнім повітрям, а також знакозмінного повітряного потоку на кінематичні параметри віброфрикційного руху насіння з вираженими аеродинамічними властивостями.

### 1.3 Аеродинамічні властивості насіння

Аеродинамічні властивості насіння – це особливості його поведінки в повітряному потоці. Насіння, що рухається в повітрі, зустрічає опір (тиск). Під дією цього тиску змінюються кінематичні параметри руху насіння. Ступінь і характер зміни кінематичних параметрів залежать від ряду факторів: форми, абсолютної і відносної маси, а також розподілу щільності щодо центру маси насіння. Фізичні та динамічні характеристики повітряного потоку (повітряного середовища) також впливають на рух насіння в повітрі.

Насіння, яке більшою мірою схильне до впливу повітря, як правило, має невелику масу, а також воно має характерну (аеродинамічну) форму. Приклади такого насіння наведені на рис. 1.11.

Для кількісної оцінки аеродинамічних властивостей насіння використовуються такі аеродинамічні характеристики, як: коефіцієнт парусності; швидкість витання; швидкість відриву [91, 92, 93].

Коефіцієнт парусності обчислюється на підставі наступного співвідношення:

$$K^{\Pi} = \frac{C_{X_0} \rho \cdot S^M}{m}, \quad (1.1)$$

де  $C_{X_0}$  – коефіцієнт гідравлічного (лобового) опору;  $\rho$  – щільність повітря;  $m$  – маса насіння;  $S^M$  – площа міделевого перетину насіння.

Як правило, в якості міделевого перетину береться перетин, який співпадає з проекцією насіння, що має мінімальну площу (рис. 1.12). Зазвичай міделевий перетин проходить поблизу центру маси (ЦМ) насіння.

Насіння, що має довгу характерну аеродинамічну форму (рис. 1.13), при впливі на нього повітряного потоку прагне повернутися навколо свого центру маси в наслідок того, що центр тиску (ЦТ) не збігається з центром ваги. На рис. 1.13 показаний механізм виникнення аеродинамічних сил і моментів, під впливом яких відбувається поворот насіння з вираженою аеродинамічною формою. При обтіканні поверхні насіння повітряним потоком під деяким кутом атаки по поверхні насіння виникає розподіл тиску за рахунок кривизни поверхні. Розподілений тиск припадає до центра тиску (ЦТ), де прикладається аеродинамічна сила  $R$ .

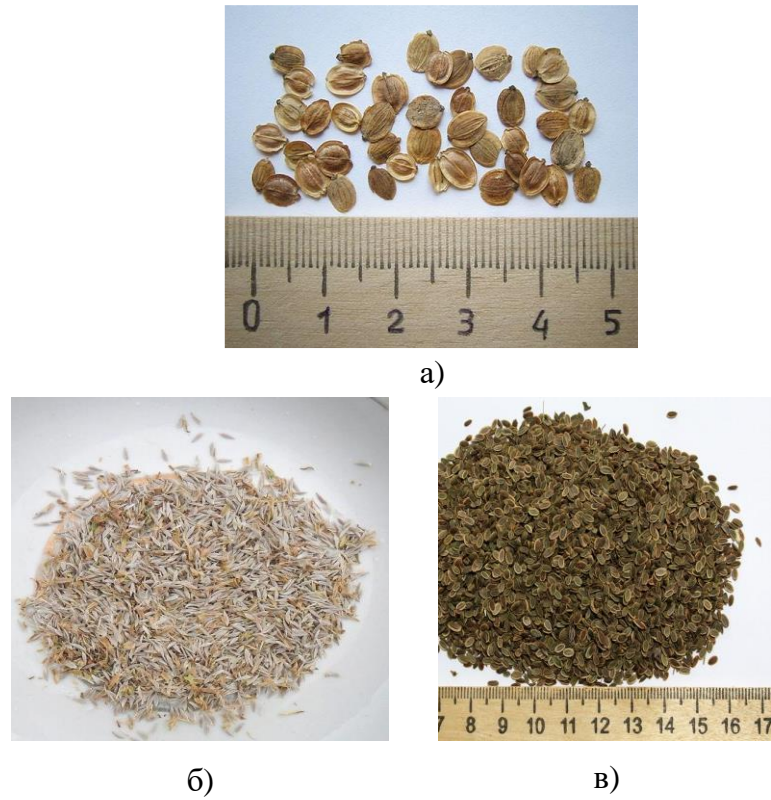


Рисунок 1.11 – Насіння пастернаку (а); салату листкового (б); кропу запашного (в)

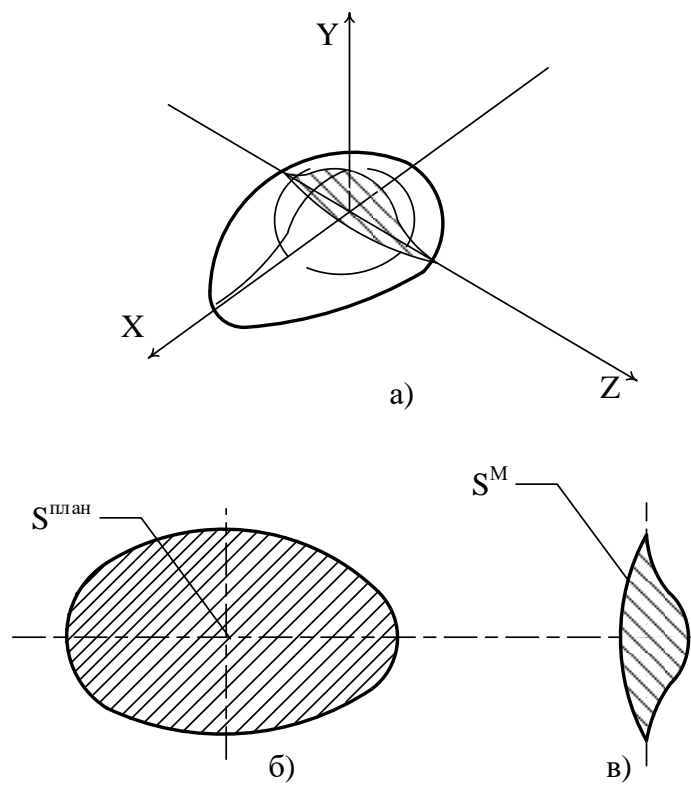


Рисунок 1.12 – Характерні перетини насіння пастернаку (а); перетин в плані (б) і міделевий перетин (в)

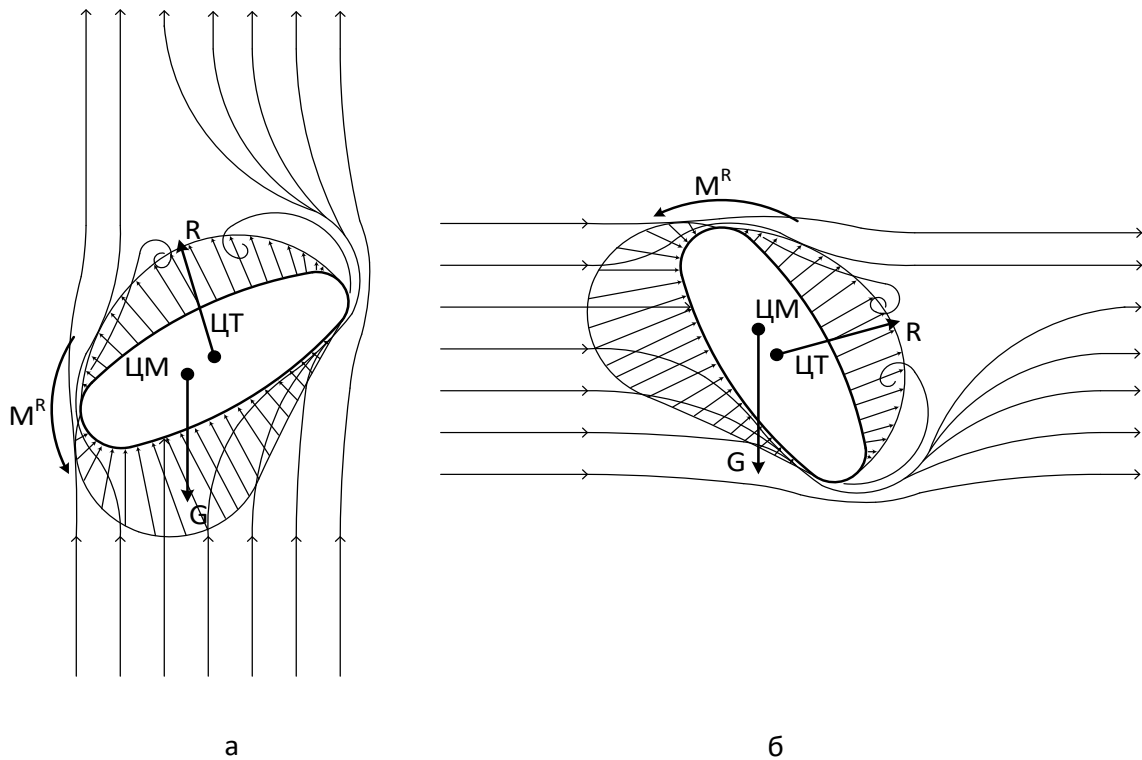


Рисунок 1.13 – Аеродинамічні сили і моменти, що діють на насіння з вираженою аеродинамічною формою у вертикальному (а) і горизонтальному (б) повітряному потоці

Вага насіння  $G$  прикладається до центру маси (ЦМ).

Ця пара сил обумовлює виникнення аеродинамічного моменту  $M^R$ , що провертає насіння навколо його центру маси. У разі, коли центр маси і центр тиску збігаються – насіння знаходиться в динамічно байдужій рівновазі. Виникнення аеродинамічного моменту можливо в разі випадкових флуктуацій в процесі обтікання насіння, коли центр тиску переміщається у будь-який бік від центру маси.

Під швидкістю витання розуміється така швидкість вертикального потоку, при якій сила ваги насіння врівноважується величиною аеродинамічної сили, що діє на насіння під впливом потоку повітря. Величина швидкості витання розраховується як:

$$v^{зв} = \sqrt{\frac{g}{K^П}}, \quad (1.2)$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння.

Швидкість витання, при якій враховано рівновагу сил (рис. 1.14), визначається на підставі наступного виразу:

$$C_X \frac{\rho \cdot v_{зв}^2}{2} \varphi \cdot S^M = mg, \quad (1.3)$$

Оскільки значення площі міделевого перетину насіння в потоці змінюється випадковим чином, неможливо підібрати швидкість повітря, при якій насіння зависало б в потоці. Залежно від положення великої осі насіння до напрямку повітряного потоку воно буде то підніматися вгору, то падати.

Інша аеродинамічна характеристика, яка за своїм фізичним змістом аналогічна швидкості витання, це швидкість відриву  $v^{від}$ . Величина швидкості відриву визначається на підставі рівності сили ваги і підйомної сили з урахуванням напрямку і величини інерційної сили  $F^{ін}$  (рис. 1.15), що виникає при русі насіння по вібруючій поверхні:

$$C_Y \frac{\rho \cdot v^{від}{}^2}{2} \varphi \cdot S^M + F^{ін} = mg, \quad (1.4)$$

де  $C_Y$  – коефіцієнт підйомної сили, що виникає за рахунок нерівномірності швидкостей (тисків) при обтіканні насіння горизонтальним потоком;  $F^{ін}$  – сила інерції, напрямок і величина дії якої на насіння обумовлені характером впливу на насіння робочого органу ВФНС.



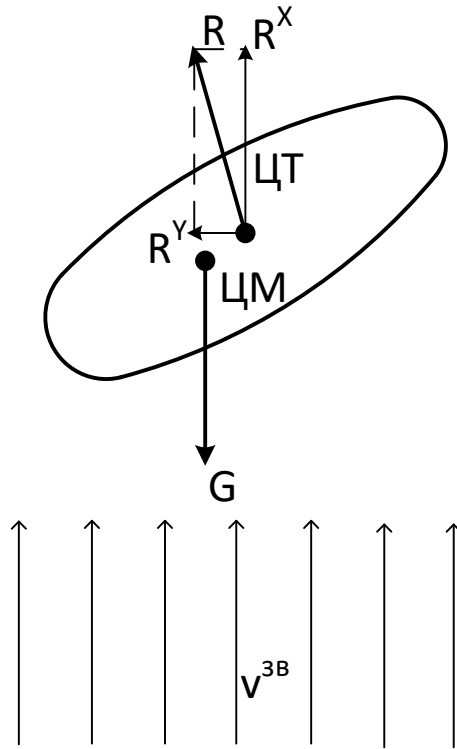


Рисунок 1.14 – Система сил, що враховується при визначенні швидкості витання

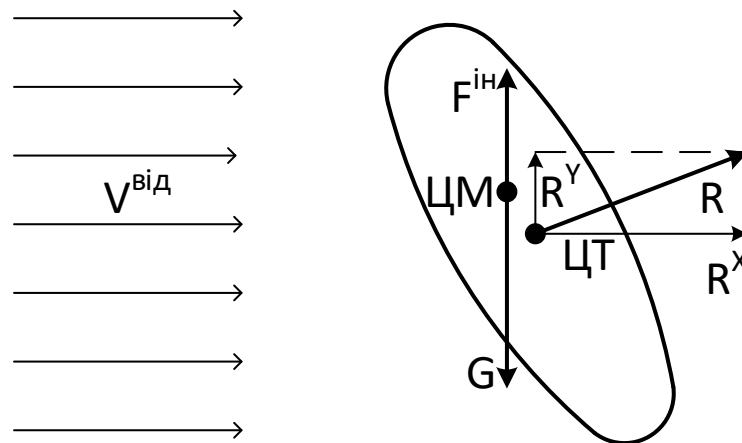


Рисунок 1.15 – Система сил, що враховується при визначенні швидкості відриву

Тобто:

$$v^{\text{від}} = \sqrt{\frac{2(mg - F^{\text{ін}})}{C_Y \rho \cdot \varphi \cdot S^{\text{М}}}} \quad (1.5)$$

Врахування швидкості відриву при дослідженні процесів сепарації насіння є характерним для ВФНС. В даному дослідженні під швидкістю відриву  $v^{\text{від}}$  розуміється така швидкість потоку повітря, при якій відбувається або зліт насіння, або зменшення його тиску на робочу поверхню до такої міри, коли спрямований віброфрикційний рух насінневої маси щодо віброуючої робочої поверхні стає неможливим.

При роботі ВФНС в плоских каналах, утворених паралельними площинами в блоках, відносна швидкість руху повітря досягає значень від 0,1 до 0,8 м/с. Отже на тих культурах, для яких швидкість витання (відриву) насіння має значення менше ніж 1,0 – 2,0 м/с, буде позначатися вплив аеродинамічного фактору. Спільні фракції таких насінневих матеріалів перемішуватимуться. Ефективність вібросепарації буде падати.

В табл. 1.1 наведено значення аеродинамічних характеристик насіння деяких рослинних культур [52].

Таблиця 1.1 – Аеродинамічні характеристики насіння

Назва рослинної культури	Коефіцієнт парусності насіння	Швидкість витання насіння, [м/с]
1. Пастернак	0,8	0,1
2. Салат листковий	0,6	0,15
3. Кріп запашний	0,5	0,25

Як видно з наведених даних (табл. 1.1), та враховуючи особливості геометричної форми насіння (рис. 1.8), такі культури, як: пастернак, салат листковий, кріп запашний, можуть розглядатися як приклад рослинних культур, насіння яких мають виражені аеродинамічні властивості.

#### 1.4 Аналіз теоретичних досліджень вібросепарації насінневих матеріалів з виразними аеродинамічними властивостями

Рух частинок насінневих матеріалів в повітряному середовищі з урахуванням аеродинамічного опору вивчався Василенко П.М. [92]. Розглянуто як лінійний, так і квадратичний аеродинамічний опір руху частинки по відношенню до швидкості повітряного потоку. Однак при цьому параметри повітряного потоку, що виникають в каналах (робочих областях) сепараторів, вважалися постійними, незалежними від режиму роботи машини. Для умов роботи ВФНС дане припущення є занадто грубим, що не дозволяє побудувати адекватну математичну модель робочого процесу.

Подальшим розвитком досліджень в даному напрямку стали результати, отримані:

- Козаченко О.В., щодо обґрунтування параметрів технологічного процесу очищення і сортування насіння тютюну і махорки на вібраційній насіннеочисній машині з урахуванням опору повітря [78]. Зроблено висновок про те, що задача урахування впливу аеродинамічних характеристик на кінематичні параметри віброфрикційного руху включає дві часткові задачі: задачу дослідження механізму взаємодії робочих органів ВФНС з повітряним середовищем і задачу дослідження віброфрикційного руху ізольованого насіння з аеродинамічними властивостями з урахуванням впливу на нього повітряного потоку;

- Бакумом М.В., Манчинським Ю.О., щодо вивчення руху частинок в умовах змінної швидкості повітряного потоку в нахилених повітряних каналах [56, 59, 68, 72, 73, 74, 86];

- Завгороднім О.І., щодо математичного опису руху цілком пружної кулі в постійному повітряному потоці між віброуючими площинами [79];

- Алієвим Е.Б., щодо математичної моделі руху насіння соняшнику у стаціонарному потоці повітря з урахуванням в'язкості (турбулентності) [34];

- Алфьоров О.І., що при моделюванні необхідно враховувати вплив

конструктивно-кінематичних параметрів зерноочисних машин, фізико-механічних властивостей сировини, внутрішньошарових процесів і сил. [98].

В [94, 95] викладені результати теоретичного дослідження з оцінки параметрів знакозмінного повітряного потоку в плоскому каналі, який здійснює коливання. На підставі запропонованої моделі була виділена стаціонарна і пульсуюча складова повітряного потоку. Стаціонарна складова дає уявлення про рух повітря між площинами «в середньому» та є незмінна в часі. Пульсуюча складова швидкості змінюється за величиною і напрямком в залежності від часу. В [96] вказується, що врахування впливу повітряного потоку на процес сепарації тільки за виглядом і величиною стаціонарної складової є некоректним. Роль пульсуючої складової може виявитися для поділу насіннєвого матеріалу вирішальною.

Теорія віброфрикційного переміщення та сепарації досить детально подана в наступних роботах: Заїки П.М. [33, 52, 54, 67, 73, 87], Романова О.М. [97], Василенка П.М. [87], Козаченко А.В. [69, 78], Алієв Е.Б. [34, 48, 55, 62, 70], Степаненко С.П. [46, 94], Галич І.В. [6, 7], Алфьоров О.І. [98], Бакума М.В. [56, 96] Завгороднього А.І. [79], Гудима В.А. [83], Жмай Л.Г. [84], Абдуєва М.М. [41], Манчинського Ю.О. [68], Лук'яненко В.М. [44, 75, 80, 81, 82, 88], Бредихіна В.В. [57, 101], Ольшанського В.П. [99, 102] та ін.,-а також зарубіжних авторів: Zhao Z [103, 104], Markauskas D., Kačianauskas R. [105], Raji A.O., Favier J.F. [106], Yi-ping C. [108].

У названих роботах розглядається рух частинок, ідеалізованих, як правило, у вигляді матеріальної точки в безвідривному режимі руху та в режимі з безперервним підкиданням.

В [48] розглядається рух насінин соняшника у повітряному потоці під дією сил тяжіння, інерції, опору повітря та реакції з боку сусідніх насінин. Насіння розглянуто у вигляді еліпсоїдів, для яких не враховується дія бокових аеродинамічних сил та їх моментів.

Однак при вирішенні великої кількості практичних завдань (особливо,

коли мова йде про насіння з аеродинамічними властивостями) неможливо відмовитися від урахування конкретних форм [109, 110, 111, 112]. Віброфрикційне переміщення такого насінневого матеріалу необхідно розглядати як рух твердих тіл об'ємної форми. В роботі [44,113] висвітлено принцип вібросепарації з урахуванням форми насіння і встановлено, що насіння кулястої форми і частки на відміну від насінин, ідеалізованих у вигляді матеріальної точки, не можуть переміщатися вгору по нахиленій вібруючій площині як в безвідривному режимі, так і при наявності підкидання, і завжди скочуються вниз.

В роботах [33, 35] вивчено вібропереміщення частинок як твердих тіл, що мають переріз у формі: кола, еліпсу, правильного багатокутника, якщо геометричний центр перерізу співпадає з центром ваги. В роботі [114] з метою уточнення впливу геометричних характеристик поперечного перерізу розглянуто плоскопаралельний рух насіння, форма поперечного перерізу якого може бути апроксимовано колом або правильним багатокутником, при цьому центр ваги не збігається з геометричним центром тіла насінини.

В роботах [78, 79, 80] вивчається рух насіння твердих тіл з відривом від вібруючої площини. Для забезпечення максимальної швидкості вібротранспортування частинок в цих роботах проводиться пошук областей існування періодичних режимів руху.

В роботах [115, 116, 117, 118] вивчені питання вібросепарації насіння, форма поперечного перерізу яких апроксимована у вигляді овалу, трикутника і квадрату. У цих роботах встановлено, що форма перерізу істотно впливає на величину і напрямок вібропереміщення частинок. Також визначено параметри коливань і кут нахилу неперфорованої поверхні, при яких можлива їх сепарація.

В роботі [119] явище удару розглядається з урахуванням форми і деформації тіл. Спрощений підхід, заснований на гіпотезах Ньютона, розглянуто в роботах [120, 121]. Цей підхід, хоча і допускає значну

схематизацію процесу, проте дозволяє отримувати прийнятні результати і покладений в основу теорії віброфрикційного переміщення твердих тіл.

Таким чином, існуючі теоретичні моделі і методи, за допомогою яких описуються процеси вібросепарації насінневих матеріалів, дозволяють проводити оцінку показників ефективності процесів сепарації з урахуванням:

- використання безвідривного, відривного і ударного режимів роботи ВФНС;
- впливу на кінематичні параметри руху насіння характеру фрикційної вібруючої поверхні;
- впливу форми насіння (часток) і шорсткості їх поверхні на кінематичні параметри їх руху щодо вібруючої поверхні;
- опору вібраційному руху частинок з боку повітряного середовища, що знаходиться між паралельними вібруючими площинами.

При розгляді впливу повітря на кінематичні параметри в представлених дослідженнях приймалися такі припущення:

- насінини повинні мати форму, близьку до форми кулі. У цьому випадку вплив повітряного потоку на частки насінневого матеріалу враховується шляхом додавання в систему діючих сил лише сили аеродинамічного опору. Бокові аеродинамічні сили та їх моменти, які набувають значної ваги для насіння сочевичної, каплевидної, закрученої та інших характерних форм, тут не враховуються;
- параметри потоку повітря повинні бути заздалегідь задані. Більшість дослідників або приймають параметри повітряного потоку постійними, або підпорядковують закон зміни швидкості повітря за часом гармонійному закону, не досліджуючи детально процес взаємодії робочих поверхонь і повітряної маси.

Однак, як показує практика, не завжди наявний теоретичний внесок достатній для побудови працездатних і адекватних математичних моделей процесів сепарації окремих видів насінневих матеріалів. Так, наприклад,

насіння пастернаку, салату, кропу має виражену аеродинамічну форму. При обдуванні такого насіння потоком повітря, крім сили аеродинамічного опору, також буде виникати підйомна (бокова) сила та повний набір аеродинамічних моментів [7]. Ці аеродинамічні сили і моменти, що діють на частинки насіннєвого матеріалу, що сепарується, істотно впливають на кінематику їх руху. За рахунок дії бокових аеродинамічних сил вплив аеродинамічного фактору буде відчуватися як на режимах віброфрикційного руху з відскоком (віднесення насіння потоком повітря), так і на режимах руху без відриву (зменшення імпульсів від робочої поверхні). Оскільки для насіння такого типу (з аеродинамічними властивостями) більш ефективний безвідривний режим роботи ВФНС, то набуває актуальності завдання урахування дії бокових аеродинамічних сил та їх моментів при безвідривних режимах віброфрикційного руху насіння.

Крім того, для побудови методики обґрунтування конструктивних параметрів ВФНС, в яких передбачаються заходи щодо зниження або корисного використання впливу повітряного потоку на процес вібросепарації, представляє інтерес сам процес взаємодії робочих поверхонь машини і повітря. Для дослідження цього процесу взаємодії необхідна наявність адекватних математичних моделей прогнозування параметрів повітряного потоку щодо вібруючих робочих поверхонь залежно від параметрів режиму роботи і особливостей конструкції ВФНС.

Таким чином, наявна на сьогоднішній день теорія динаміки віброфрикційного руху частинок не в повній мірі враховує вплив аеродинамічних сил на кінематику безвідривного руху частинок насіннєвих матеріалів з аеродинамічними властивостями по вібруючій робочій поверхні, а також не дозволяє досліджувати динаміку параметрів поля швидкостей і тисків для повітряної маси, що рухається під впливом конструктивних елементів ВФНС, залежно від конструктивних особливостей блоків робочих поверхонь цих машин.

## 1.5 Висновки по розділу, мета і завдання дослідження

1. ВФНС є найбільш ефективним та дешевим засобом підготовки насіннєвого матеріалу з важким розділенням фракцій. Однак широке застосування таких машин обмежене їх недостатньою продуктивністю. Тому розвиток конструкцій ВФНС, в основному, пов'язаний з нарощуванням продуктивності.

2. Використання блоків робочих поверхонь в конструкції віброфрикційних машин дозволяє значно підвищити їх продуктивність до прийняттого рівня. Однак робочі поверхні блоків утворюють сукупність плоских каналів, які обумовлюють виникнення знакозмінного повітряного потоку між ними. Це має негативний вплив у відношенні до насіння з аеродинамічними властивостями. Втрачається здатність ВФНС щодо ефективної сепарації насіннєвих матеріалів на фракції.

3. Аеродинамічні властивості насіння обумовлені його характерною геометричною формою та масовими характеристиками. Геометрична форма насіння характеризується розміром міделевого перетину та аеродинамічними властивостями (здібністю створювати нерівномірне розподілення тиску вздовж поверхні насіння при його обтіканні повітряним потоком). До масових характеристик насіння відноситься: його щільність, маса, моменти інерції. Чисельними мірами з оцінки аеродинамічних властивостей насіння є: коефіцієнт парусності, швидкість витання та відриву насіння. Перші дві характеристики вимірюють аеродинамічні властивості насіння щодо дії сили аеродинамічного опору (перенесення насіння повітряним потоком). Швидкість відриву характеризує аеродинамічні властивості щодо дії підйомної (бокової) аеродинамічної сили, яка виникає при нерівномірному розподіленні тиску вздовж поверхні насіння.

4. Вплив знакозмінного повітряного потоку на процес вібросепарації насіння з аеродинамічними властивостями реалізується двояким чином. По-перше, шляхом перенесення насіння повітряним потоком за рахунок роботи



сили повітряного опору. Це характерно для режимів віброфрикційного руху з відскоком. По-друге, шляхом підйому насіння над робочою поверхнею і зменшення величини реакції опору за рахунок роботи підйомної (бокової) аеродинамічної сили. Це характерно для безвідривних режимів віброфрикційного руху, які більш придатні для обробки легких дрібнонасінневих рослинних культур.

5. Аналіз методів та математичних моделей дослідження кінематики віброфрикційного руху насіння показав, що в них не враховується робота бокових аеродинамічних сил та їх моментів. Вплив аеродинамічного фактору присутній тільки для режимів віброфрикційного руху з відскоком, безвідривні режими не розглядаються.

6. На підставі вивчення стану питання з теорії вібросепарації дрібнонасінневих матеріалів науковою задачею даного дисертаційного дослідження є: підвищення ефективності процесу вібросепарації насінневих матеріалів дрібнонасінневих культур шляхом обґрунтування раціональних параметрів та режимів роботи ВФНС з аеродинамічним екраном.

Для вирішення сформульованої науково-прикладної задачі повинні бути вирішені наступні часткові завдання:

– проаналізувати механізм впливу знакозмінного повітряного потоку на процес вібросепарації насіння з виразними аеродинамічними властивостями;

– розробити математичну модель та чисельний алгоритм розрахунку кінематичних параметрів безвідривного віброфрикційного руху насіння з урахуванням процесів: створення знакозмінного повітряного потоку в середині робочого блоку ВФНС; виникнення аеродинамічних сил та моментів на поверхнях насінин; суперпозиції аеродинамічних і механічних сил при вібраційному русі насіння;

– дослідити вплив знакозмінного повітряного потоку з використанням створеної математичної моделі на кінематичні параметри безвідривного віброфрикційного руху та ефективність розділення насіння дрібнонасінневих

культур залежно від конструкційно-режимних параметрів ВФНС. Перевірити адекватність отриманих результатів за допомогою натурального експерименту;

– обґрунтувати конструкційно-режимні параметри ВФНС з аеродинамічним екраном за критерієм мінімізації або виключення впливу знакозмінного повітряного потоку на процес сепарації насіння з виразними аеродинамічними властивостями;

– провести лабораторні випробування з насінням пастернаку за умови використання удосконаленого ВФНС, який оснащений аеродинамічним екраном та реалізує раціональні конструкційно-режимні параметри.

## РОЗДІЛ 2

### ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІБРОФРИКЦІЙНОГО БЕЗВІДРИВНОГО РУХУ НАСІННЯ З УРАХУВАННЯМ ДІЇ АЕРОДИНАМІЧНИХ СИЛ І МОМЕНТІВ

Математична модель віброфрикційного безвідривного руху насіння по нахиленій шорсткій поверхні з урахуванням дії аеродинамічних сил та моментів складається з наступних частин:

- методики розрахунку аеродинамічних характеристик насіння визначеної форми, що обтікається повітряним потоком з визначеними характеристиками;

- методики обчислення поля швидкостей і тиску для елементів повітряного простору, що знаходиться між двох паралельних робочих площин, які синхронно коливаються, залежно від параметрів коливань та крайових умов;

- моделі віброфрикційного руху насіння встановленої форми по нахиленій шорсткій поверхні з ковзанням та перекочуванням з урахуванням дії сил гравітації, реакції опори, моментів опору і аеродинамічних сил та моментів.

Дана модель дозволяє проводити дослідження закономірностей зміння кінематичних параметрів віброфрикційного руху насіння з встановленими геометричними, інерційними та аеродинамічними характеристиками в залежності від амплітуди та частоти коливань віброзбудника ВФНС, особливостей конструкції її робочих блоків.

#### 2.1 Методика розрахунку аеродинамічних характеристик насіння заданої форми

Для розрахунку аеродинамічних характеристик був використаний метод

розбивки насіння на елементарні аеродинамічні профілі за допомогою площин, зорієнтованих на потік повітря. Для кожного елементарного аеродинамічного профілю, одержаного шляхом перетину насіння, що розглядається, відповідної площиною розраховуються коефіцієнти підйомної сили і сили лобового опору (поперечної і поздовжньої сил), аеродинамічного моменту на підставі раніше отриманих результатів продувок типових аеродинамічних профілів при їх різних відносних геометричних характеристиках. Загальна аеродинамічна сила і момент, що діють на насіння в результаті його обтікання потоком повітря, розраховуються шляхом підсумовування аеродинамічних сил і моментів, розрахованих для елементарних аеродинамічних профілів, на які розбивається насіння (тіло).

Методику визначення елементарних аеродинамічних сил і моментів створених перетинів наведено у додатку А методика визначення елементарних аеродинамічних сил і моментів для плоских аеродинамічних профілів-перетинів. Методику визначення параметрів створених перетинів як плоских аеродинамічних профілів наведено у додатку Б методика визначення геометричних характеристик перетинів насіння, що приводяться до характеристик еталонних аеродинамічних профілів.

З урахуванням викладеного вище, методика обчислення аеродинамічних сил і моментів, що діють на насіння (тіло), що знаходиться в потоці повітря, може бути представлена як наступна послідовність дій (рис. 2.1):

- задається (обчислюється) місце розташування тіла і його миттєві кінематичні параметри (вектор лінійної швидкості руху центру маси і кутова швидкість обертання тіла щодо цього ж центру). Для певного напрямку і величини вектора швидкості руху потоку повітря в інерціальній системі координат, з урахуванням просторового розташування і миттєвих кінематичних параметрів тіла, визначається величина і напрямок відносної швидкості обтікання тіла потоком повітря;

- здійснюються із заданим кроком послідовні перетини

досліджуваного тіла. В результаті отримаємо елементарні профілі тіла. Площини, за допомогою яких здійснюються перетини тіла, (пропущено дієслово: будуть...стануть тощо) паралельні вектору швидкості набігаючого потоку повітря;

– для кожного елементарного профілю розраховуються його геометричні характеристики і кут атаки потоку повітря;

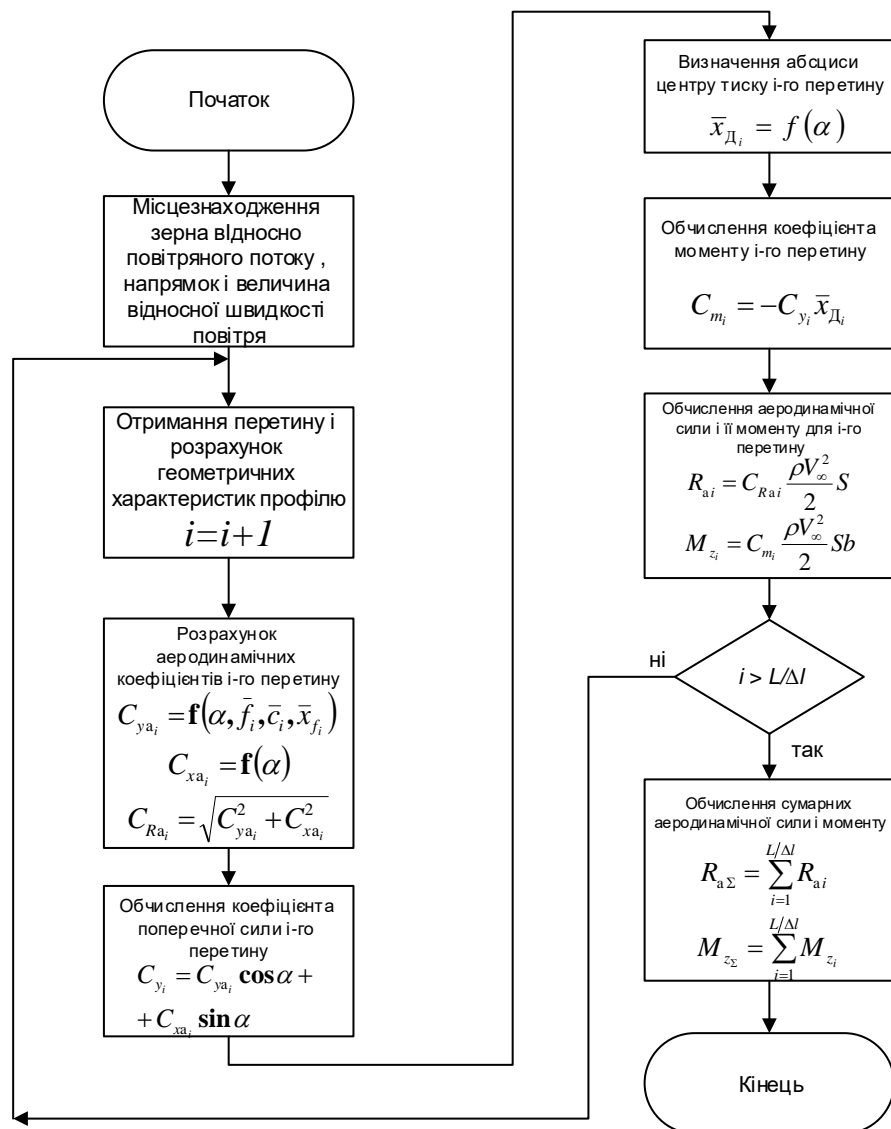


Рисунок 2.1 – Алгоритм розрахунку аеродинамічних сил і моментів методом розбивки зерна на елементарні аеродинамічні профілі

– для відомих  $\alpha$ ,  $\bar{f}$ ,  $\bar{c}$ ,  $\bar{x}_f$  визначається величина коефіцієнта підйомної сили  $C_y$  (Додаток А, рис. А.4, А.5) і сили лобового опору  $C_x$

(Додаток А, рис. А.6). Для відомих коефіцієнтів, за допомогою виразу  $C_R = \sqrt{C_x^2 + C_y^2}$ , визначається коефіцієнт аеродинамічної сили  $C_R$ , діючої на профіль, що розглядається;

– для відомого кута атаки  $\alpha$ , на підставі графіка залежності абсциси центру тиску профілю від кута  $\alpha$  (Додаток А, рис. А.7), визначається величина  $\bar{x}_T$ . При кутах атаки більших або рівних 20 градусам приймається, що  $\bar{x}_T = 0,25$ ;

– на підставі (Додаток А, вираз (А.10)) визначається коефіцієнт моменту аеродинамічної сили  $C_m$ ;

– для відомих коефіцієнтів  $C_R$  і  $C_m$  розраховуються величини аеродинамічної сили і аеродинамічного моменту, що діють на даний  $i$ -ий елементарний профіль:  $R_i = C_{Ri} \left( \rho V_\infty^2 / 2 \right) \cdot [\tilde{S}^M]$ ,  $M_{zi} = C_{mi} \left( \rho V_\infty^2 / 2 \right) \cdot [\tilde{S}^M] \cdot b$ ;

– результуюча аеродинамічної сили і результуючий момент цієї сили відносно передньої кромки тіла, що розглядається, визначаються шляхом підсумовування аеродинамічних сил і моментів, знайдених для елементарних аеродинамічних профілів:  $R_\Sigma = \sum_{i=1}^{L/\Delta l} R_i$ ,  $M_{z\Sigma} = \sum_{i=1}^{L/\Delta l} M_{zi}$ , де  $L$  – довжина тіла уздовж осі, яка перпендикулярна вектору швидкості  $V_\infty$ ,  $\Delta l$  - заданий крок просування уздовж осі  $L$  [2, 3].

## 2.2 Модель руху повітря відносно паралельних пластин, що синхронно коливаються

### 2.2.1 Загальна постановка задачі по розрахунку поля швидкостей в каналі, утвореному двома паралельними пластинами, що синхронно коливаються

Проведений в п.п. 1.4 аналіз свідчить про те, що методи і моделі процесів

взаємодії робочих органів ВФНС з повітрям, що використовуються на цей час, дозволяють обчислювати лише усереднені показники руху повітря в плоских каналах робочих блоків. Це не дозволяє досліджувати вплив різних конструктивних елементів, що застосовуються у віброфрикційній машині на динаміку поля швидкостей, що формуються в робочій області. Зокрема, при використанні покриття віброуючих площин, наприклад аеродинамічного екрану.

Теоретичні моделі та чисельні методи, запропоновані Карвацьким А. Я. [120, 121] та Лимарченко О. С. [122], дозволяють отримувати кінематичні параметри руху повітряної маси в кожній точці повітряного каналу, що коливається.

Рух повітряного середовища під впливом двох паралельних площин, які здійснюють синхронні гармонійні коливання, може бути описано на підставі рівняння Ейлера і рівняння нерозривності для ідеального газу (рідини). Такий вибір математичної моделі динаміки повітряної маси обумовлений наступними міркуваннями.

По-перше, швидкості руху повітря під впливом робочого органу ВФНС є відносно невеликими. Скачки тиску, які при цьому виникають, не перебільшують 0,1 атмосфери. Тому можна знехтувати стисливістю повітря.

По-друге, при моделюванні знакозмінного повітряного потоку нехтуємо процесами гальмування частинок повітря у граничному шарі, що прилягає до робочих поверхонь блоку ВФНС. Зважаючи на це, можна не враховувати в'язкість повітря.

У векторному вигляді рівняння Ейлера для ідеального газу має вигляд:

$$\rho \mathbf{a} = \rho \mathbf{F} - \text{grad } p, \quad (2.1)$$

де  $\mathbf{a} = \frac{dV}{dt}$  – вектор прискорення руху повітряного середовища;  $\mathbf{F}$  – вектор прискорення від дії масових сил (сили тяжіння);  $p$  – тиск повітря в даній точці;  $\rho$  – щільність повітря.

Рівняння нерозривності, записане для ідеального газу, відповідно, може

бути представлено як:

$$\frac{dp}{dt} \cdot \frac{1}{\rho c^2} + \operatorname{div} \mathbf{V} = 0, \quad (2.2)$$

де  $\mathbf{V}$  – вектор швидкості руху повітряного середовища в даній точці;  
 $c$  – швидкість звуку.

На підставі (2.1) і (2.2) може бути записана система рівнянь в координатній формі [12]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = g_x - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = g_y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y}, \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = g_z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z}, \quad (2.5)$$

$$\left[ \frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} + v \frac{\partial p}{\partial y} + w \frac{\partial p}{\partial z} \right] \frac{1}{\rho c^2} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (2.6)$$

$$g_x = g \sin \beta, \quad (2.7)$$

$$g_y = g \operatorname{tg} \alpha \cos \beta \cos \delta, \quad (2.8)$$

$$g_z = -g \cos \delta, \quad (2.9)$$

$$\cos \delta = \frac{\cos \alpha \cos \beta}{\sqrt{\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha \cos^2 \beta}}, \quad (2.10)$$

де  $u, v, w$  – проєкції вектора швидкості руху повітряного середовища  $V$ , відповідно, на осі  $X, Y$  і  $Z$  обраної системи координат;  $g_x, g_y, g_z$  – проєкції прискорення вільного падіння на осі обраної системи координат;  $\alpha, \beta$  – кути, що характеризують нахил, відповідно, поздовжньої і поперечної осей робочої поверхні до поверхні Землі (рис. 2.2);  $\delta$  – кут найбільшого нахилу робочої поверхні.

Система рівнянь (2.3) – (2.6) складається з чотирьох рівнянь. Кількість невідомих параметрів повітряного потоку, які необхідно визначити, теж чотири. Це проєкції вектора швидкості  $u, v$  і  $w$ , а також величина тиску –  $p$ . Отже задача з розрахунку характеристик руху повітря під впливом рухомих



робочих поверхонь може бути розв'язана.

В результаті розв'язання (2.3) – (2.6) для встановлених моментів часу  $t$  для будь-якої точки простору між розглянутими робочими поверхнями з координатами  $(x, y, z)$  будуть отримані значення проєкцій вектора швидкості повітряного потоку  $u$ ,  $v$  і  $w$ , а також тиск повітря  $p$ , в даній точці в заданий момент часу.

Наведена система диференціальних рівнянь (2.3) – (2.6) також може бути записана в матричній формі [3, 12]:

$$\mathbf{I} \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \mathbf{B} \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial x} + \mathbf{C} \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial y} + \mathbf{D} \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial z} = \mathbf{F}, \quad (2.11)$$

$$\mathbf{I} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad (2.12)$$

$$\mathbf{B} = \begin{vmatrix} u & 0 & 0 & c^2 \\ 0 & u & 0 & 0 \\ 0 & 0 & u & 0 \\ 1 & 0 & 0 & u \end{vmatrix}, \quad (2.13)$$

$$\mathbf{C} = \begin{vmatrix} v & 0 & 0 & 0 \\ 0 & v & 0 & c^2 \\ 0 & 0 & v & 0 \\ 0 & 1 & 0 & v \end{vmatrix}, \quad (2.14)$$

$$\mathbf{D} = \begin{vmatrix} w & 0 & 0 & 0 \\ 0 & w & 0 & 0 \\ 0 & 0 & w & c^2 \\ 0 & 0 & 1 & w \end{vmatrix}, \quad (2.15)$$

$$\mathbf{Q} = \begin{vmatrix} u \\ v \\ w \\ p/\rho c^2 \end{vmatrix}, \quad (2.16)$$

$$F = \begin{pmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (2.17)$$

де  $Q$  – вектор-стовпець невідомих параметрів;  $F$  – вектор-стовпець прискорень, обумовлений дією зовнішніх сил (сил гравітації).

В якості системи координат, в якій обчислюються параметри повітряного потоку, обирається система координат, пов'язана з робочими поверхнями (рис. 2.2). Початок системи координат встановлюється в одній з тих точок, що належать поздовжньому ребру нижньої робочої поверхні. Обирається те поздовжнє ребро, яке примикає до живильника ВФНС. Дана умова необхідна для того, щоб одержувані розрахункові дані не доводилося перераховувати, переводячи їх в систему координат, в якій повинні розраховуватися кінематичні параметри руху частинок насінневого матеріалу при моделюванні їх віброфрикційного руху.

Вісь  $Z$  проходить через встановлену точку на поздовжньому ребрі нижньої робочої поверхні і збігається з нормаллю до неї. Напрямок осі  $Z$  є напрямком, який протилежний дії сил гравітації.

Вісь  $X$  перпендикулярна поздовжньому ребру робочої поверхні і спрямована в бік другого поздовжнього ребра, що обмежує робочу поверхню по ширині. Вісь  $Y$  збігається з поздовжнім ребром робочої поверхні і спрямована таким чином, щоб утворилася права трійка осей координат.

Робочі поверхні паралельні одна одній і розташовуються під кутом до горизонтальної площини. Кут  $\alpha$  характеризує нахил поздовжньої осі робочої поверхні до горизонтальної площини, а кут  $\beta$  – поперечної осі.

Для отримання чисельного рішення системи диференціальних рівнянь (2.3) – (2.6) пропонується використовувати метод сіток при заданих крайових умовах [8, 9]. Параметри поля швидкостей повітря розраховуються для обмеженої області  $E$ , що має форму паралелепіпеда. Межами даного паралелепіпеда служать (рис. 2.3):

- зверху і знизу-дві паралельні робочі поверхні (грані А і В);

– з боків-грані, утворені кромками робочих поверхонь (спереду і ззаду: грані С і D, зліва і справа – Е і G).

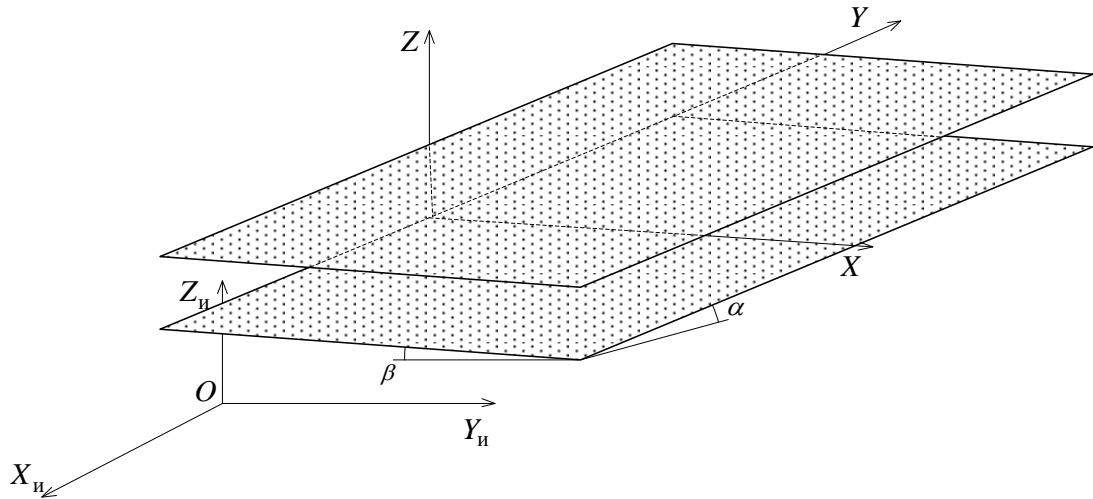


Рисунок 2.2 – Система координат, відносно якої розраховуються характеристики повітряного потоку

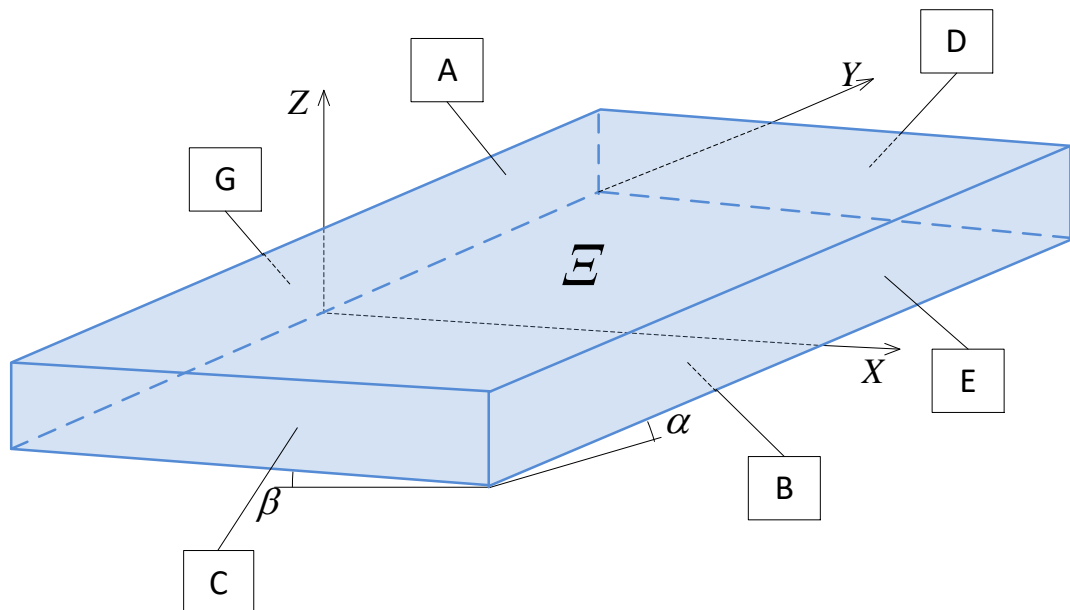


Рисунок 2.3 – Область, всередині якої розраховуються параметри поля швидкостей повітря

Під час роботи віброфрикційної машини робочі поверхні здійснюють синхронні гармонійні коливання. При цьому точки, що належать будь-якій робочій поверхні, переміщуються в просторі (рис. 2.4). Коливання робочої

поверхні здійснюється під нахилом, що задається за допомогою кута нахилу коливань  $\varepsilon$ .

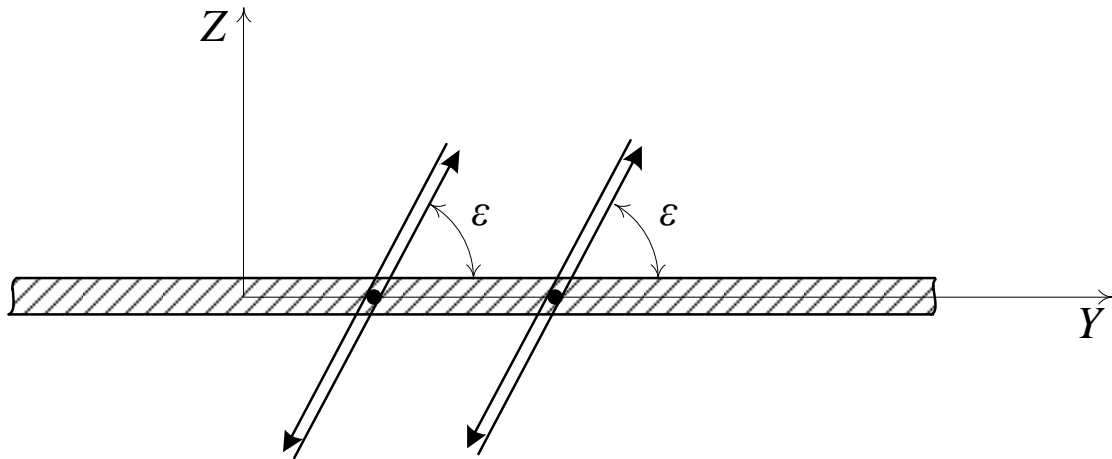


Рисунок 2.4 – Траєкторії руху точок робочої поверхні під час роботи віброфрикційної машини

Повітряна маса, яка перебуває в спокої відносно інерціальної системи координат, рухається по відношенню до системи координат робочої поверхні. Відносний рух повітря є симетричним або дзеркальним по відношенню до руху робочої поверхні щодо інерціальної системи координат. Виходячи з цього, для крайових умов по межі області  $\Xi$  для граней: С, D, E і G, слід записати:

$$\frac{V^{\Pi}(t)}{C, D, E, G} = -V^{\text{K}}(t), \quad (2.18)$$

$$\frac{p^{\Pi}}{C, D, E, G} = p^{\text{атм.}}, \quad (2.19)$$

де  $\frac{V^{\Pi}(t)}{C, D, E, G}$  – вектор швидкості руху повітря, що належать граням С, D, E, G області  $\Xi$ , щодо системи координат робочої поверхні;  $V^{\text{K}}(t)$  – вектор швидкості коливань точок робочої поверхні щодо інерціальної системи координат;  $\frac{p^{\Pi}}{C, D, E, G}$  – тиск повітря по кордону С, D, E, G;  $p^{\text{атм.}}$  – атмосферний тиск.

Уздовж граней  $C, D, E, G$  повітря знаходиться в спокійному стані, на нього не діють робочі поверхні. Тому перепадів тиску по відношенню до тиску атмосфери тут немає. Граничний тиск дорівнює тиску атмосфери.

Проекції вектора швидкості переміщення точок робочої поверхні щодо інерціальної системи координат при здійсненні поверхнею гармонійних коливань обчислюються за допомогою таких виразів:

$$V_x^k = -A \cdot \Omega \cos(\Omega t) \sin \beta \sin(\varepsilon - \alpha) , \quad (2.20)$$

$$V_y^k = -A \cdot \Omega \cos(\Omega t) \left[ \tan \alpha \cos \beta \sin(\varepsilon - \alpha) - \frac{\cos \delta}{\cos \beta} \cos(\varepsilon - \alpha) \right] , \quad (2.21)$$

$$V_z^k = A \cdot \Omega \cos(\Omega t) \cos \delta \frac{\sin \varepsilon}{\cos \alpha} , \quad (2.22)$$

де  $A$  – амплітуда коливань;  $\Omega$  – частота коливань;  $\varepsilon$  – кут нахилу коливань по відношенню до робочої поверхні;  $\alpha, \beta, \delta$  – кути, що характеризують нахил робочої поверхні (рис. 2.2).

З урахуванням (2.20) - (2.22) гранична умова (2.18) прийме наступний вигляд:

$$u(t) /_{C, D, E, G} = A \cdot \Omega \cos(\Omega t) \sin \beta \sin(\varepsilon - \alpha) , \quad (2.23)$$

$$v(t) /_{C, D, E, G} = A \cdot \Omega \cos(\Omega t) \left[ \tan \alpha \cos \beta \sin(\varepsilon - \alpha) - \frac{\cos \delta}{\cos \beta} \cos(\varepsilon - \alpha) \right] , \quad (2.24)$$

$$w(t) /_{C, D, E, G} = -A \cdot \Omega \cos(\Omega t) \cos \delta \frac{\sin \varepsilon}{\cos \alpha} . \quad (2.25)$$

Для граней  $A$  і  $B$  області  $\Xi$ , утворених безпосередньо робочими поверхнями, має місце повне гальмування повітря при його контакті з поверхнею. Точніше кажучи, зупиняється відносний рух повітря, а з точки зору інерціальної системи, навпаки, повітря, що раніше знаходилося в спокої, захоплюється в рух робочою поверхнею, що коливається. Загальмований відносний рух повітря перетворюється в надлишковий або негативний по відношенню до атмосферного тиску перепад тиску. Знак перепаду тиску  $\Delta p$ ,

визначається в залежності від напрямку руху робочої поверхні по відношенню до області  $\Xi$  (назовні або всередину).

Таким чином, граничні умови для граней А і В приймуть такий вигляд:

$$u(t)/_{A,B} = v(t)/_{A,B} = w(t)/_{A,B} = 0, \quad (2.26)$$

$$p(t)/_A = p^{\text{атм.}} + \rho \frac{[V_x^k(t)]^2 + [V_y^k(t)]^2 + [V_z^k(t)]^2}{2} \cdot (-\text{sign}\{V_z^k(t)\}), \quad (2.27)$$

$$p(t)/_B = p^{\text{атм.}} + \rho \frac{[V_x^k(t)]^2 + [V_y^k(t)]^2 + [V_z^k(t)]^2}{2} \cdot \text{sign}\{V_z^k(t)\}, \quad (2.28)$$

$$\text{sign}\{V_z^k(t)\} = \begin{cases} 1, & \text{если } V_z^k(t) \geq 0, \\ -1, & \text{если } V_z^k(t) < 0, \end{cases} \quad (2.29)$$

де  $\rho$  – густина повітря;  $V_x^k(t)$ ,  $V_y^k(t)$ ,  $V_z^k(t)$  – проєкції швидкості коливань, що обчислюються відповідно до виразів (2.23) - (2.25).

На підставі запропонованого підходу по рішенню системи диференціальних рівнянь (2.3) – (2.6) в кінцево-різницевої формі за заданими граничними умовами (2.23) – (2.29) автором був розроблений алгоритм розрахунку, що реалізує метод прогонки для тривимірного випадку [10, 12].

Для чисельного рішення системи рівнянь (2.3)-(2.6) вводиться сітка по осях координат  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  і по осі часу  $t$  (рисунок 2.5).

Вузли даної сітки мають нумерацію  $(i, j, k, \tau)$ . Вузлу, з наведеним номером, відповідає точка області  $\Xi$  з координатами:  $x = i \cdot h$ ,  $y = j \cdot l$ ,  $z = k \cdot s$  і момент часу  $t = \tau \cdot \Delta t$ .

Для даної сітки рівняння (2.3)–(2.6) можуть бути записані в кінцево-різницевої формі:

$$\begin{aligned} & \frac{u_{i,j,k,\tau} - u_{i,j,k,(\tau-1)}}{\Delta t} + u_{i,j,k,(\tau-1)} \frac{u_{(i+1),j,k,\tau} - u_{(i-1),j,k,\tau}}{2h} + \\ & + v_{i,j,k,(\tau-1)} \frac{u_{i,(j+1),k,\tau} - u_{i,(j-1),k,\tau}}{2l} + \\ & + w_{i,j,k,(\tau-1)} \frac{u_{i,j,(k+1),\tau} - u_{i,j,(k-1),\tau}}{2s} + \end{aligned} \quad (2.30)$$

$$+ \frac{1}{\rho} \frac{p_{(i+1),j,k,\tau} - p_{(i-1),j,k,\tau}}{2h} - g \sin \beta = 0 ,$$

$$\begin{aligned} & \frac{v_{i,j,k,\tau} - v_{i,j,k,(\tau-1)}}{\Delta t} + u_{i,j,k,(\tau-1)} \frac{v_{(i+1),j,k,\tau} - v_{(i-1),j,k,\tau}}{2h} + \\ & + v_{i,j,k,(\tau-1)} \frac{v_{i,(j+1),k,\tau} - v_{i,(j-1),k,\tau}}{2l} + \\ & + w_{i,j,k,(\tau-1)} \frac{v_{i,j,(k+1),\tau} - v_{i,j,(k-1),\tau}}{2s} + \end{aligned} \quad (2.31)$$

$$+ \frac{1}{\rho} \frac{p_{i,(j+1),k,\tau} - p_{i,(j-1),k,\tau}}{2l} - g \alpha \cos \beta \cos \delta = 0 ,$$

$$\begin{aligned} & \frac{w_{i,j,k,\tau} - w_{i,j,k,(\tau-1)}}{\Delta t} + u_{i,j,k,(\tau-1)} \frac{w_{(i+1),j,k,\tau} - w_{(i-1),j,k,\tau}}{2h} + \\ & + v_{i,j,k,(\tau-1)} \frac{w_{i,(j+1),k,\tau} - w_{i,(j-1),k,\tau}}{2l} + \\ & + w_{i,j,k,(\tau-1)} \frac{w_{i,j,(k+1),\tau} - w_{i,j,(k-1),\tau}}{2s} + \end{aligned} \quad (2.32)$$

$$+ \frac{1}{\rho} \frac{p_{i,j,(k+1),\tau} - p_{i,j,(k-1),\tau}}{2s} - g \cos \delta = 0 ,$$

$$\begin{aligned} & \frac{p_{i,j,k,\tau} - p_{i,j,k,(\tau-1)}}{\Delta t \rho c^2} + \frac{u_{i,j,k,(\tau-1)}}{\rho c^2} \frac{p_{(i+1),j,k,\tau} - p_{(i-1),j,k,\tau}}{2h} + \\ & + \frac{v_{i,j,k,(\tau-1)}}{\rho c^2} \frac{p_{i,(j+1),k,\tau} - p_{i,(j-1),k,\tau}}{2l} + \\ & + \frac{w_{i,j,k,(\tau-1)}}{\rho c^2} \frac{p_{i,j,(k+1),\tau} - p_{i,j,(k-1),\tau}}{2s} + \end{aligned} \quad (2.33)$$

$$\begin{aligned} & + \frac{u_{(i+1),j,k,\tau} - u_{(i-1),j,k,\tau}}{2h} + \frac{v_{i,(j+1),k,\tau} - v_{i,(j-1),k,\tau}}{2l} + \\ & + \frac{w_{i,j,(k+1),\tau} - w_{i,j,(k-1),\tau}}{2s} = 0 , \end{aligned}$$

$$u_{i,j,k,\tau} = u(x_i, y_j, z_k, t_\tau) ,$$

$$v_{i,j,k,\tau} = v(x_i, y_j, z_k, t_\tau) ,$$

$$w_{i,j,k,\tau} = w(x_i, y_j, z_k, t_\tau) ,$$

(2.34)

$$p_{i,j,k,\tau} = p(x_i, y_j, z_k, t_\tau),$$

$$i = 1, 2, \dots, \left(\frac{b}{h} - 1\right), \quad j = 1, 2, \dots, \left(\frac{a}{l} - 1\right),$$

$$k = 1, 2, \dots, \left(\frac{H}{s} - 1\right), \quad \tau = 0, 1, \dots, \frac{T}{\Delta t} \quad (2.35)$$

де  $b, a$  – поперечний і поздовжній розміри робочої поверхні;  $H$  – відстань між двома паралельними робочими поверхнями;  $T$  – заданий період часу. Оскільки розглядається періодичний рух, то доцільно задавати  $T = 1/\Omega$ , де  $\Omega$  – частота коливань робочих поверхонь ВФНС.

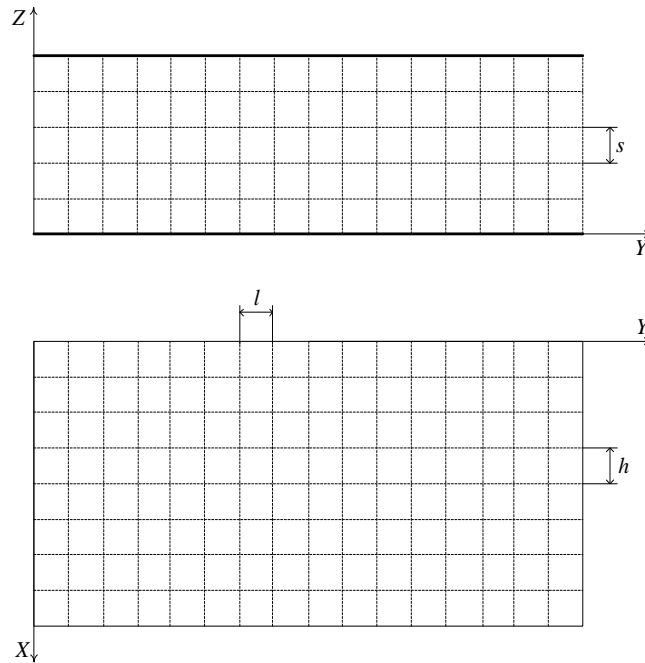


Рисунок 2.5 – Сіткова область, що використовується для вирішення поставленої задачі

Граничні умови в кінцево-різницевої формі приймуть вигляд:

- для грані А:

$$u_{i,j,k,\tau} = 0, \quad v_{i,j,k,\tau} = 0, \quad w_{i,j,k,\tau} = 0, \quad (2.36)$$

$$p_{i,j,k,\tau} = p^{\text{атм.}} + \rho \frac{V_{x,\tau}^2 + V_{y,\tau}^2 + V_{z,\tau}^2}{2} \cdot (-\text{sign}\{V_{z,\tau}^k\}), \quad (2.37)$$



$$i = 1, 2, \dots, \left(\frac{b}{h} - 1\right), \quad j = 1, 2, \dots, \left(\frac{a}{l} - 1\right), \quad (2.38)$$

$$k = \frac{H}{s}, \quad \tau = 0, 1, \dots, \frac{T}{\Delta t}$$

$$V_{x,\tau}^K = -A \cdot \Omega \cos(\Omega\tau\Delta t) \sin \beta \sin(\varepsilon - \alpha), \quad (2.39)$$

$$V_{y,\tau}^K = -A \cdot \Omega \cos(\Omega\tau\Delta t) \left[ \tan \alpha \cos \beta \sin(\varepsilon - \alpha) - \frac{\cos \delta}{\cos \beta} \cos(\varepsilon - \alpha) \right], \quad (2.40)$$

$$V_{z,\tau}^K = A \cdot \Omega \cos(\Omega\tau\Delta t) \cos \delta \frac{\sin \varepsilon}{\cos \alpha}, \quad (2.41)$$

- для грані В:

$$u_{i,j,k,\tau} = 0, \quad v_{i,j,k,\tau} = 0, \quad w_{i,j,k,\tau} = 0, \quad (2.42)$$

$$p_{i,j,k,\tau} = p^{\text{атм.}} + \rho \frac{V_{x,\tau}^{K^2} + V_{y,\tau}^{K^2} + V_{z,\tau}^{K^2}}{2} \cdot (\text{sign}\{V_{z,\tau}^K\}), \quad (2.43)$$

$$i = 1, 2, \dots, \left(\frac{b}{h} - 1\right), \quad j = 1, 2, \dots, \left(\frac{a}{l} - 1\right), \quad (2.44)$$

$$k = 0, \quad \tau = 0, 1, \dots, \frac{T}{\Delta t}$$

- для граней С, D, Е і G:

$$u_{i,j,k,\tau} = A \cdot \Omega \cos(\Omega\tau\Delta t) \sin \beta \sin(\varepsilon - \alpha), \quad (2.45)$$

$$v_{i,j,k,\tau} = A \cdot \Omega \cos(\Omega\tau\Delta t) \left[ \tan \alpha \cos \beta \sin(\varepsilon - \alpha) - \frac{\cos \delta}{\cos \beta} \cos(\varepsilon - \alpha) \right], \quad (2.46)$$

$$w_{i,j,k,\tau} = -A \cdot \Omega \cos(\Omega\tau\Delta t) \cos \delta \frac{\sin \varepsilon}{\cos \alpha}, \quad (2.47)$$

$$p_{i,j,k,\tau} = p^{\text{атм.}}, \quad (2.48)$$

$$C: \quad i = 0, 1, \dots, \frac{b}{h}, \quad j = 0, \quad k = 0, 1, \dots, \frac{H}{s}, \quad (2.49)$$

$$\tau = 0, 1, \dots, \frac{T}{\Delta t},$$

$$D: \quad i = 0, 1, \dots, \frac{b}{h}, \quad j = \frac{a}{l}, \quad k = 0, 1, \dots, \frac{H}{s},$$

$$\tau = 0, 1, \dots, \frac{T}{\Delta t}, \quad (2.50)$$

$$E: \quad i = \frac{b}{h}, \quad j = 0, 1, \dots, \frac{a}{l}, \quad k = 0, 1, \dots, \frac{H}{s},$$

$$\tau = 0, 1, \dots, \frac{T}{\Delta t}, \quad (2.51)$$

$$G: \quad i = 0, \quad j = 0, 1, \dots, \frac{a}{l}, \quad k = 0, 1, \dots, \frac{H}{s},$$

$$\tau = 0, 1, \dots, \frac{T}{\Delta t}. \quad (2.52)$$

Отримана система рівнянь містить  $\left(\frac{b}{h} + 1\right) \times \left(\frac{a}{l} + 1\right) \times \left(\frac{H}{s} + 1\right)$  три алгебраїчні рівняння і кількість невідомих також дорівнює цьому числу. Тобто існує однозначне рішення даної задачі.

Для вирішення отриманої системи рівнянь автором використаний метод прогонки [10, 12].

Прогонка здійснюється уздовж двох осей: осі X і осі Y. Так для прямої прогонки уздовж осі X кожному  $j$ -му вузлу, що належить осі Y, ставиться у відповідність безліч вузлів, що знаходяться на вертикальній осі, яка проходить через  $j$ -ий вузол. Створена ліва межа досліджуваної області по  $j$ -му перетину переганяється до правої межі шляхом її переміщення від площини ZOY вздовж осі OX. Безліч вузлів, що при цьому утворюються  $(i, j, k)$ ,  $i = 0, \dots, \frac{b}{h}$ ,  $k = 0, \dots, \frac{H}{s}$ , також ставляться у відповідність  $j$ -му вузлу осі Y. Далі здійснюється прогін утвореного перерізу до вузла  $j = \frac{a}{l}$  (до торця досліджуваної області або до поєднання з гранню D). Напрямки прямої прогонки уздовж осі X і осі Y показані стрілками на рис. 2.6. Зворотна прогонка здійснюється у зворотному порядку.

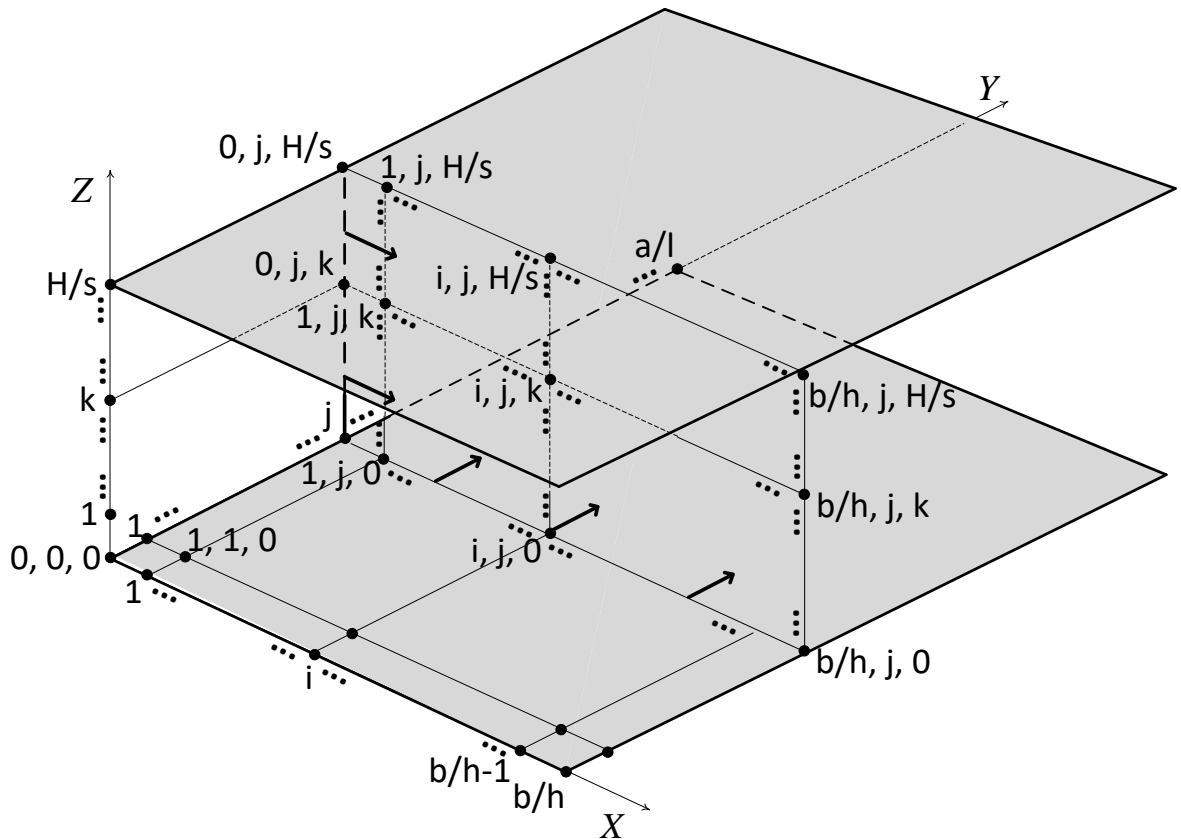


Рисунок 2.6 – Схема прогонки

Таким чином, при здійсненні розрахунку відбувається послідовний перетин досліджуваної області січними площинами, паралельними площинами  $ZOX$ , починаючи від  $j = 0$  і закінчуючи при  $j = \frac{a}{l} - 1$ . Всередині кожної січної площини рух походить від  $i = 0$  до  $i = \frac{b}{h} - 1$ .

Для кожної вертикальної складової сітки розглянутої січної площини перебираються вузли, починаючи від  $k = 0$  і закінчуючи  $k = \frac{H}{s} - 1$ .

Для приведення рівнянь до вигляду, придатного для їх вирішення методом прогонки, виконані подальші перетворення системи рівнянь (2.30)–(2.35).

З урахуванням крайових умов (2.36)–(2.52) кінцево-різнісні рівняння (2.30)–(2.35) приймуть наступний вигляд:

– для крайнього лівого вузла  $i = 1, j = 1, k = 1$ :

$$\begin{aligned}
& \frac{u_{1,1,1,\tau} - u_{1,1,1,(\tau-1)}}{\Delta t} + u_{1,1,1,(\tau-1)} \frac{u_{2,1,1,\tau} - u_{0,1,1,\tau}}{2h} + \\
& \quad + v_{1,1,1,(\tau-1)} \frac{u_{1,2,1,\tau} - u_{1,0,1,\tau}}{2l} + \\
& \quad + w_{1,1,1,(\tau-1)} \frac{u_{1,1,2,\tau} - u_{1,1,0,\tau}}{2s} + \\
& \quad + \frac{1}{\rho} \frac{p_{2,1,1,\tau} - p_{0,1,1,\tau}}{2h} = g \sin \beta ,
\end{aligned} \tag{2.53}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{v_{1,1,1,\tau} - v_{1,1,1,(\tau-1)}}{\Delta t} + u_{1,1,1,(\tau-1)} \frac{v_{2,1,1,\tau} - v_{0,1,1,\tau}}{2h} + \\
& \quad + v_{1,1,1,(\tau-1)} \frac{v_{1,2,1,\tau} - v_{1,0,1,\tau}}{2l} + \\
& \quad + w_{1,1,1,(\tau-1)} \frac{v_{1,1,2,\tau} - v_{1,1,0,\tau}}{2s} + \\
& \quad + \frac{1}{\rho} \frac{p_{1,2,1,\tau} - p_{1,0,1,\tau}}{2l} = g \cos \beta \cos \delta ,
\end{aligned} \tag{2.54}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{w_{1,1,1,\tau} - w_{1,1,1,(\tau-1)}}{\Delta t} + u_{1,1,1,(\tau-1)} \frac{w_{2,1,1,\tau} - w_{0,1,1,\tau}}{2h} + \\
& \quad + v_{1,1,1,(\tau-1)} \frac{w_{1,2,1,\tau} - w_{1,0,1,\tau}}{2l} + \\
& \quad + w_{1,1,1,(\tau-1)} \frac{w_{1,1,2,\tau} - w_{1,1,0,\tau}}{2s} + \\
& \quad + \frac{1}{\rho} \frac{p_{1,1,2,\tau} - p_{1,1,0,\tau}}{2s} = g \cos \delta ,
\end{aligned} \tag{2.55}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{p_{1,1,1,\tau} - p_{1,1,1,(\tau-1)}}{\Delta t \rho c^2} + \frac{u_{1,1,1,(\tau-1)}}{\rho c^2} \frac{p_{2,1,1,\tau} - p_{0,1,1,\tau}}{2h} + \\
& \quad + \frac{v_{1,1,1,(\tau-1)}}{\rho c^2} \frac{p_{1,2,1,\tau} - p_{1,0,1,\tau}}{2l} + \\
& \quad + \frac{w_{1,1,1,(\tau-1)}}{\rho c^2} \frac{p_{1,1,2,\tau} - p_{1,1,0,\tau}}{2s} + \\
& \quad + \frac{u_{2,1,1,\tau} - u_{0,1,1,\tau}}{2h} + \frac{v_{1,2,1,\tau} - v_{1,0,1,\tau}}{2l} + \\
& \quad + \frac{w_{1,1,2,\tau} - w_{1,1,0,\tau}}{2s} = 0 ,
\end{aligned} \tag{2.56}$$

$$\begin{aligned}
u_{0,1,1,\tau} = u_{1,0,1,\tau} &= A \cdot \Omega \cos(\Omega\tau\Delta t) \sin \beta \sin(\varepsilon - \alpha) , \\
u_{1,1,0,\tau} &= 0 ,
\end{aligned} \tag{2.57}$$

$$\begin{aligned}
v_{0,1,1,\tau} = v_{1,0,1,\tau} &= A\Omega \cos(\Omega\tau\Delta t) \times \\
&\times \left[ \tan \alpha \cos \beta \sin(\varepsilon - \alpha) - \frac{\cos \delta}{\cos \beta} \cos(\varepsilon - \alpha) \right] , \\
v_{1,1,0,\tau} &= 0 ,
\end{aligned} \tag{2.58}$$

$$\begin{aligned}
w_{0,1,1,\tau} = w_{1,0,1,\tau} &= -A \cdot \Omega \cos(\Omega\tau\Delta t) \cos \delta \frac{\sin \varepsilon}{\cos \alpha} , \\
w_{1,1,0,\tau} &= 0 ,
\end{aligned} \tag{2.59}$$

$$\begin{aligned}
p_{0,1,1,\tau} = p_{1,0,1,\tau} &= p^{\text{atm.}} , \\
p_{1,1,0,\tau} &= p^{\text{atm.}} + \rho \left[ \frac{(A \cdot \Omega \cos(\Omega\tau\Delta t) \sin \beta \sin(\varepsilon - \alpha))^2}{2} + \right. \\
&+ \left. \frac{(A \cdot \Omega \cos(\Omega\tau\Delta t) \left[ \tan \alpha \cos \beta \sin(\varepsilon - \alpha) - \frac{\cos \delta}{\cos \beta} \cos(\varepsilon - \alpha) \right])^2}{2} + \right. \\
&+ \left. \frac{(A\Omega \cos(\Omega\tau\Delta t) \cos \delta \cdot \frac{\sin \varepsilon}{\cos \alpha})^2}{2} \right] \times \\
&\times \left( \text{sign} \left\{ A \cdot \Omega \cos(\Omega\tau\Delta t) \cos \delta \frac{\sin \varepsilon}{\cos \alpha} \right\} \right) ,
\end{aligned} \tag{2.60}$$

– для проміжного вузла  $i = 2, \dots, \frac{b}{h} - 2, j = 2, \dots, \frac{a}{l} - 2, k = 2, \dots, \frac{H}{s} - 2$  використовуються співвідношення (2.30)-(2.34);

– для крайнього правого вузла  $i = \frac{b}{h} - 1 = i^*, j = \frac{a}{l} - 1 = j^*, k = \frac{H}{s} - 1 = k^*$ :

$$\begin{aligned}
&\frac{u_{i^*,j^*,k^*,\tau} - u_{i^*,j^*,k^*,(\tau-1)}}{\Delta t} + u_{i^*,j^*,k^*,(\tau-1)} \frac{u_{\frac{b}{h},j^*,k^*,\tau} - u_{(i^*-1),j^*,k^*,\tau}}{2h} + \\
&+ v_{i^*,j^*,k^*,(\tau-1)} \frac{u_{i^*,\frac{a}{l},k^*,\tau} - u_{i^*,(j^*-1),k^*,\tau}}{2l} +
\end{aligned} \tag{2.61}$$

$$\begin{aligned}
& +w_{i^*,j^*,k^*,(\tau-1)} \frac{u_{i^*,j^*,\frac{H}{S},\tau} - u_{i^*,j^*,(k^*-1),\tau}}{2s} + \\
& + \frac{1}{\rho} \frac{p_{\frac{h}{h},j^*,k^*,\tau} - p_{(i^*-1),j^*,k^*,\tau}}{2h} = g \sin \beta ,
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{v_{i^*,j^*,k^*,\tau} - v_{i^*,j^*,k^*,(\tau-1)}}{\Delta t} + u_{i^*,j^*,k^*,(\tau-1)} \frac{v_{\frac{b}{h},j^*,k^*,\tau} - v_{(i^*-1),j^*,k^*,\tau}}{2h} + \\
& + v_{i^*,j^*,k^*,(\tau-1)} \frac{v_{i^*,\frac{a}{l},k^*,\tau} - v_{i^*,(j^*-1),k^*,\tau}}{2l} + \\
& + w_{i^*,j^*,k^*,(\tau-1)} \frac{v_{i^*,j^*,\frac{H}{S},\tau} - v_{i^*,j^*,(k^*-1),\tau}}{2s} + \\
& + \frac{1}{\rho} \frac{p_{i^*,\frac{a}{l},k^*,\tau} - p_{i^*,(j^*-1),k^*,\tau}}{2l} = g \cos \beta \cos \delta ,
\end{aligned} \tag{2.62}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{w_{i^*,j^*,k^*,\tau} - w_{i^*,j^*,k^*,(\tau-1)}}{\Delta t} + u_{i^*,j^*,k^*,(\tau-1)} \frac{w_{\frac{b}{h},j^*,k^*,\tau} - w_{(i^*-1),j^*,k^*,\tau}}{2h} + \\
& + v_{i^*,j^*,k^*,(\tau-1)} \frac{w_{i^*,\frac{a}{l},k^*,\tau} - w_{i^*,(j^*-1),k^*,\tau}}{2l} + \\
& + w_{i^*,j^*,k^*,(\tau-1)} \frac{w_{i^*,j^*,\frac{H}{S},\tau} - w_{i^*,j^*,(k^*-1),\tau}}{2s} + \\
& + \frac{1}{\rho} \frac{p_{i^*,j^*,\frac{H}{S},\tau} - p_{i^*,j^*,(k^*-1),\tau}}{2s} = g \cos \delta ,
\end{aligned} \tag{2.63}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{p_{i^*,j^*,k^*,\tau} - p_{i^*,j^*,k^*,(\tau-1)}}{\Delta t \rho c^2} + \frac{u_{i^*,j^*,k^*,(\tau-1)}}{\rho c^2} \frac{p_{\frac{b}{h},j^*,k^*,\tau} - p_{(i^*-1),j^*,k^*,\tau}}{2h} + \\
& + \frac{v_{i^*,j^*,k^*,(\tau-1)}}{\rho c^2} \frac{p_{i^*,\frac{a}{l},k^*,\tau} - p_{i^*,(j^*-1),k^*,\tau}}{2l} + \\
& + \frac{w_{i^*,j^*,k^*,(\tau-1)}}{\rho c^2} \frac{p_{i^*,j^*,\frac{H}{S},\tau} - p_{i^*,j^*,(k^*-1),\tau}}{2s} + \\
& + \frac{u_{\frac{b}{h},j^*,k^*,\tau} - u_{(i^*-1),j^*,k^*,\tau}}{2h} + \frac{v_{i^*,\frac{a}{l},k^*,\tau} - v_{i^*,(j^*-1),k^*,\tau}}{2l} +
\end{aligned} \tag{2.64}$$

$$+ \frac{W_{i^*,j^*,\frac{H}{S},\tau} - W_{i^*,j^*,(k^*-1),\tau}}{2s} = 0 ,$$

$$u_{\frac{b}{h},j^*,k^*,\tau} = u_{i^*,\frac{a}{l},k^*,\tau} = A \cdot \Omega \cos (\Omega \tau \Delta t) \sin \beta \sin (\varepsilon - \alpha) ,$$

$$u_{i^*,j^*,\frac{H}{S},\tau} = 0 , \quad (2.65)$$

$$v_{\frac{b}{h},j^*,k^*,\tau} = v_{i^*,\frac{a}{l},k^*,\tau} = A \Omega \cos (\Omega \tau \Delta t) \times \\ \times \left[ \tan \alpha \cos \beta \sin (\varepsilon - \alpha) - \frac{\cos \delta}{\cos \beta} \cos (\varepsilon - \alpha) \right] ,$$

$$v_{i^*,j^*,\frac{H}{S},\tau} = 0 , \quad (2.66)$$

$$w_{\frac{b}{h},j^*,k^*,\tau} = w_{i^*,\frac{a}{l},k^*,\tau} = -A \cdot \Omega \cos (\Omega \tau \Delta t) \cos \delta \frac{\sin \varepsilon}{\cos \alpha} ,$$

$$w_{i^*,j^*,\frac{H}{S},\tau} = 0 , \quad (2.67)$$

$$p_{\frac{b}{h},j^*,k^*,\tau} = p_{i^*,\frac{a}{l},k^*,\tau} = p^{\text{атм.}} ,$$

$$p_{i^*,j^*,\frac{H}{S},\tau} = p^{\text{атм.}} + \rho \left[ \frac{(A \cdot \Omega \cos (\Omega \tau \Delta t) \sin \beta \sin (\varepsilon - \alpha))^2}{2} + \right. \\ \left. + \frac{(A \cdot \Omega \cos (\Omega \tau \Delta t) \left[ \tan \alpha \cos \beta \sin (\varepsilon - \alpha) - \frac{\cos \delta}{\cos \beta} \cos (\varepsilon - \alpha) \right])^2}{2} + \right. \\ \left. + \frac{(A \cdot \Omega \cos (\Omega \tau \Delta t) \cos \delta \cdot \frac{\sin \varepsilon}{\cos \alpha})^2}{2} \right] \times \\ \times \left( -\text{sign} \left\{ A \cdot \Omega \cos (\Omega \tau \Delta t) \cos \delta \frac{\sin \varepsilon}{\cos \alpha} \right\} \right) . \quad (2.68)$$

У матричній формі кінцево-різниці співвідношення (2.30)-(2.35), з урахуванням (2.11), запишуться в наступному вигляді:

$$\frac{1}{2h} \mathbf{B}_{(i+1),j,k,(\tau-1)} \mathbf{Q}_{(i+1),j,k,\tau} + \frac{1}{2l} \mathbf{C}_{i,(j+1),k,(\tau-1)} \mathbf{Q}_{i,(j+1),k,\tau} + \quad (2.69)$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{2z} \mathbf{D}_{i,j,(k+1),(\tau-1)} \mathbf{Q}_{i,j,(k+1),\tau} + \frac{1}{\Delta t} \mathbf{I} \mathbf{Q}_{i,j,k,\tau} - \\
& - \frac{1}{2h} \mathbf{B}_{(i-1),j,k,(\tau-1)} \mathbf{Q}_{(i-1),j,k,\tau} - \frac{1}{2l} \mathbf{C}_{i,(j-1),k,(\tau-1)} \mathbf{Q}_{i,(j-1),k,\tau} - \\
& - \frac{1}{2z} \mathbf{D}_{i,j,(k-1),(\tau-1)} \mathbf{Q}_{i,j,(k-1),\tau} = \mathbf{F} + \frac{1}{\Delta t} \mathbf{I} \mathbf{Q}_{i,j,k,(\tau-1)},
\end{aligned}$$

$$\mathbf{B}_{i,j,k,\tau} = \left\| \begin{array}{cccc} u_{i,j,k,\tau} & 0 & 0 & c^2 \\ 0 & u_{i,j,k,\tau} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & u_{i,j,k,\tau} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & u_{i,j,k,\tau} \end{array} \right\|, \quad (2.70)$$

$$\mathbf{C}_{i,j,k,\tau} = \left\| \begin{array}{cccc} v_{i,j,k,\tau} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & v_{i,j,k,\tau} & 0 & c^2 \\ 0 & 0 & v_{i,j,k,\tau} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & v_{i,j,k,\tau} \end{array} \right\|, \quad (2.71)$$

$$\mathbf{D}_{i,j,k,\tau} = \left\| \begin{array}{cccc} w_{i,j,k,\tau} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & w_{i,j,k,\tau} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & w_{i,j,k,\tau} & c^2 \\ 0 & 0 & 1 & w_{i,j,k,\tau} \end{array} \right\|, \quad (2.72)$$

$$\mathbf{Q}_{i,j,k,\tau} = \left\| \begin{array}{c} u_{i,j,k,\tau} \\ v_{i,j,k,\tau} \\ w_{i,j,k,\tau} \\ p_{i,j,k,\tau}/\rho c^2 \end{array} \right\|, \quad (2.73)$$

де  $I$  – одинична матриця розмірністю  $4 \times 4$ ;  $F$  – вектор-стовпець прискорень (2.17).

Далі вираз (2.69) зручно записати таким чином, щоб були окремо виділені члени, які стосуються  $(j+1)$ ,  $j$  і  $(j-1)$ . Це необхідно для того, щоб побудувати алгоритм прогону в (напрямку) вздовж осі ОУ. Згідно зі схемою, наведеною на рис. 2.6, вісь ОУ обрана в якості тієї осі, вздовж якої прогонюється площина перетину в напрямку від грані С до грані D досліджуваного простору (рис. 2.3).

Вираз (2.69) з перегрупованими складовими прийме наступний вигляд:

$$\frac{1}{2l} \mathbf{C}_{i,(j+1),k,(\tau-1)} \mathbf{Q}_{i,(j+1),k,\tau} + \frac{1}{2h} \mathbf{B}_{(i+1),j,k,(\tau-1)} \mathbf{Q}_{(i+1),j,k,\tau} + \quad (2.74)$$



$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{2z} \mathbf{D}_{i,j,(k+1),(\tau-1)} \mathbf{Q}_{i,j,(k+1),\tau} + \frac{1}{\Delta t} \mathbf{I} \mathbf{Q}_{i,j,k,\tau} - \\
& - \frac{1}{2z} \mathbf{D}_{i,j,(k-1),(\tau-1)} \mathbf{Q}_{i,j,(k-1),\tau} - \frac{1}{2h} \mathbf{B}_{(i-1),j,k,(\tau-1)} \mathbf{Q}_{(i-1),j,k,\tau} - \\
& - \frac{1}{2l} \mathbf{C}_{i,(j-1),k,(\tau-1)} \mathbf{Q}_{i,(j-1),k,\tau} = \mathbf{F} + \frac{1}{\Delta t} \mathbf{I} \mathbf{Q}_{i,j,k,(\tau-1)} .
\end{aligned}$$

Центральна група додатків, що відноситься до  $j$ -го вузла:

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{2h} \mathbf{B}_{(i+1),j,k,(\tau-1)} \mathbf{Q}_{(i+1),j,k,\tau} + \\
& + \frac{1}{2z} \mathbf{D}_{i,j,(k+1),(\tau-1)} \mathbf{Q}_{i,j,(k+1),\tau} + \frac{1}{\Delta t} \mathbf{I} \mathbf{Q}_{i,j,k,\tau} - \\
& - \frac{1}{2z} \mathbf{D}_{i,j,(k-1),(\tau-1)} \mathbf{Q}_{i,j,(k-1),\tau} - \frac{1}{2h} \mathbf{B}_{(i-1),j,k,(\tau-1)} \mathbf{Q}_{(i-1),j,k,\tau} ,
\end{aligned} \tag{2.75}$$

також розділена на групи, які відносяться до  $(i+1)$ ,  $i$  та  $(i-1)$  або характеризують прогонку уздовж осі ОХ.

Ввівши в розгляд вектор вузлів сітки розбиття досліджуваної області, що належать вертикальній лінії сітки, яка проходить через  $i$ ,  $j$ -ий вузол сітки розбивки в площині ОХУ досліджуваної області.

$$\boldsymbol{\Psi}_{i,j,\tau} = \left\| \begin{array}{c} \mathbf{Q}_{i,j,0,\tau} \\ \mathbf{Q}_{i,j,1,\tau} \\ \dots \\ \mathbf{Q}_{i,j,H/s,\tau} \end{array} \right\| , \tag{2.76}$$

вираз (2.77) може бути записаний у вигляді:

$$\begin{aligned}
& \mathbf{A} \mathbf{A}_{i,(j+1),(\tau-1)}^+ \boldsymbol{\Psi}_{i,(j+1),\tau} + \mathbf{A}_{(i+1),j,(\tau-1)}^+ \boldsymbol{\Psi}_{(i+1),j,\tau} + \\
& \mathbf{A}_{i,j,(\tau-1)}^0 \boldsymbol{\Psi}_{i,j,\tau} - \mathbf{A}_{(i-1),j,(\tau-1)}^- \boldsymbol{\Psi}_{(i-1),j,\tau} - \\
& - \mathbf{A} \mathbf{A}_{i,(j-1),(\tau-1)}^- \boldsymbol{\Psi}_{i,(j-1),\tau} = \check{\mathbf{F}}_{i,j,(\tau-1)} ,
\end{aligned} \tag{2.77}$$

$$\mathbf{A} \mathbf{A}_{i,j,\tau}^+ = \left\| \begin{array}{c} 0 \\ 1/2l \mathbf{C}_{i,j,1,\tau} \\ \dots \\ 1/2l \mathbf{C}_{i,j,H/s,\tau} \end{array} \right\| , \tag{2.78}$$

$$\mathbf{A} \mathbf{A}_{i,j,\tau}^- = \left\| \begin{array}{c} 1/2l \mathbf{C}_{i,j,0,\tau} \\ 1/2l \mathbf{C}_{i,j,1,\tau} \\ \dots \\ 0 \end{array} \right\| , \tag{2.79}$$

$$\mathbf{A}_{i,j,\tau}^+ = \left\| \begin{array}{c} 0 \\ 1/2h \mathbf{B}_{i,j,1,\tau} \\ \dots \\ 1/2h \mathbf{B}_{i,j,H/s,\tau} \end{array} \right\|, \quad (2.80)$$

$$\mathbf{A}_{i,j,\tau}^- = \left\| \begin{array}{c} 1/2h \mathbf{B}_{i,j,0,\tau} \\ 1/2h \mathbf{B}_{i,j,1,\tau} \\ \dots \\ 0 \end{array} \right\|, \quad (B.81)$$

$$\mathbf{A}_{i,j,\tau}^0 = \left\| \begin{array}{ccccccc} -\frac{1}{2s} \mathbf{D}_{i,j,0,\tau} & \frac{1}{\Delta t} \mathbf{I} & \frac{1}{2s} \mathbf{D}_{i,j,2,\tau} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2s} \mathbf{D}_{i,j,1,(\tau-1)} & \frac{1}{\Delta t} \mathbf{I} & \frac{1}{2s} \mathbf{D}_{i,j,3,\tau} & 0 & \dots & 0 \\ & & \dots & & & \dots & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{1}{2s} \mathbf{D}_{i,j,\frac{H}{s},\tau} \end{array} \right\|, \quad (2.82)$$

$$\tilde{\mathbf{F}}_{i,j,\tau} = \left\| \begin{array}{c} \mathbf{F} + \frac{1}{\Delta t} \mathbf{I} \mathbf{Q}_{i,j,0,\tau} \\ \mathbf{F} + \frac{1}{\Delta t} \mathbf{I} \mathbf{Q}_{i,j,1,\tau} \\ \dots \\ \mathbf{F} + \frac{1}{\Delta t} \mathbf{I} \mathbf{Q}_{i,j,H/s,\tau} \end{array} \right\|. \quad (2.83)$$

Далі, ввівши в розгляд січну площину:

$$\tilde{\Xi}_{j,\tau} = \left\| \begin{array}{c} \Psi_{0,j,\tau} \\ \Psi_{1,j,\tau} \\ \dots \\ \Psi_{b/h,j,\tau} \end{array} \right\|, \quad (2.84)$$

вираз (2.77) може бути приведений до вигляду:

$$\begin{aligned} \mathbf{A} \mathbf{A} \mathbf{A}_{(j+1),(\tau-1)}^+ \tilde{\Xi}_{(j+1),\tau} + \mathbf{A} \mathbf{A}_{j,(\tau-1)}^0 \tilde{\Xi}_{j,\tau} - \\ - \mathbf{A} \mathbf{A} \mathbf{A}_{(j-1),(\tau-1)}^- \tilde{\Xi}_{(j-1),\tau} = \tilde{\mathbf{F}}_{j,(\tau-1)}, \end{aligned} \quad (2.85)$$

$$\mathbf{A} \mathbf{A} \mathbf{A}_{j,\tau}^+ = \left\| \begin{array}{c} 0 \\ \mathbf{A} \mathbf{A}_{1,j,\tau}^+ \\ \dots \\ \mathbf{A} \mathbf{A}_{b/h,j,\tau}^+ \end{array} \right\|, \quad (2.86)$$

$$AAA_{j,\tau}^- = \left\| \begin{array}{c} AA_{0,j,\tau}^+ \\ AA_{1,j,\tau}^+ \\ \dots \\ 0 \end{array} \right\|, \quad (2.87)$$

$$AA_{j,\tau}^0 = \left\| \begin{array}{ccccccc} -A_{0,j,\tau}^- & A_{1,j,\tau}^0 & A_{2,j,\tau}^+ & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -A_{1,j,\tau}^- & A_{2,j,\tau}^0 & A_{3,j,\tau}^+ & 0 & \dots & 0 \\ & & \dots & & & \dots & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & A_{\frac{b}{h},j,\tau}^+ \end{array} \right\|, \quad (2.88)$$

$$\check{F}_{j,\tau} = \left\| \begin{array}{c} \check{F}_{0,j,\tau} \\ \check{F}_{1,j,\tau} \\ \dots \\ \check{F}_{\frac{b}{h},j,\tau} \end{array} \right\|. \quad (2.89)$$

Задача прогонки буде вирішуватися для крайнього лівого при  $j = (0 - 1)$ , і крайнього правого при  $j = \left(\frac{a}{l} + 1\right)$  положень січної площини  $\Xi_{j,\tau}$ .

Граничні умови для крайнього лівого положення січної площини мають вигляд:

$$C_{0,(\tau-1)}^{XZ} \Xi_{-1,\tau} = \left[ C_{0,(\tau-1)}^{XZ} + \frac{l}{\Delta t} I^{XZ} \right] \Xi_{0,\tau} + l \cdot \check{F}_{0,\tau}. \quad (2.90)$$

$$C_{0,(\tau-1)}^{XZ} = \left\| \begin{array}{c} C_{0,0,0,(\tau-1)} \\ C_{0,0,1,(\tau-1)} \\ \vdots \\ C_{0,0,k,(\tau-1)} \\ \vdots \\ C_{0,0,H/s,(\tau-1)} \\ C_{1,0,0,(\tau-1)} \\ \vdots \\ C_{\frac{b}{h},0,H/s,(\tau-1)} \end{array} \right\| \quad (2.91)$$

де  $C_{0,(\tau-1)}^{XZ}$  – вектор коефіцієнтів-матриць  $C_{i,j,k,(\tau-1)}$  (вираз (2.71)) для положення січного перерізу  $\Xi$ , що відповідає грані С (рис. 2.3) ( $j = 0$ );  $I^{XZ}$  – одинична матриця розмірністю  $([b/h + H/s] \times [b/h + H/s])$ .

Граничні умови для крайнього правого положення січної площини мають вигляд:

$$\mathbf{C}_{a/l,(\tau-1)}^{XZ} \bar{\Xi}_{(a/l-1),\tau} = \left[ \mathbf{C}_{a/l,(\tau-1)}^{XZ} + \frac{l}{\Delta t} \mathbf{I}^{XZ} \right] \bar{\Xi}_{a/l,\tau} + l \cdot \check{\check{\mathbf{F}}}_{a/l,\tau} . \quad (2.92)$$

Отримана система рівнянь:

$$\begin{aligned} \bar{\Xi}_{-1,\tau} &= \left[ \mathbf{C}_{0,(\tau-1)}^{XZ} + \frac{l}{\Delta t} \mathbf{I}^{XZ} \right] (\mathbf{C}_{0,(\tau-1)}^{XZ})^{-1} \bar{\Xi}_{0,\tau} + l (\mathbf{C}_{0,(\tau-1)}^{XZ})^{-1} \check{\check{\mathbf{F}}}_{0,\tau} = \\ &= \mathbf{X}_{0,\tau} \bar{\Xi}_{0,\tau} + \mathbf{y}_{0,\tau} , \end{aligned} \quad (2.93)$$

$$\mathbf{X}_{0,\tau} = \left[ \mathbf{C}_{0,(\tau-1)}^{XZ} + \frac{l}{\Delta t} \mathbf{I}^{XZ} \right] (\mathbf{C}_{0,(\tau-1)}^{XZ})^{-1} , \quad (2.94)$$

$$\mathbf{y}_{0,\tau} = l (\mathbf{C}_{0,(\tau-1)}^{XZ})^{-1} \check{\check{\mathbf{F}}}_{0,\tau} , \quad (2.95)$$

$$\begin{aligned} \bar{\Xi}_{(j+1),\tau} &= -\mathbf{A}\mathbf{A}_{j,(\tau-1)}^0 (\mathbf{A}\mathbf{A}\mathbf{A}_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} \bar{\Xi}_{j,\tau} + \\ &+ \mathbf{A}\mathbf{A}\mathbf{A}_{(j-1),(\tau-1)}^- (\mathbf{A}\mathbf{A}\mathbf{A}_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} \bar{\Xi}_{(j-1),\tau} + \\ &+ \check{\check{\mathbf{F}}}_{j,(\tau-1)} (\mathbf{A}\mathbf{A}\mathbf{A}_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} , \end{aligned} \quad (2.96)$$

$$\begin{aligned} \bar{\Xi}_{(a/l-1),\tau} &= \left[ \mathbf{C}_{a/l,(\tau-1)}^{XZ} + \frac{l}{\Delta t} \mathbf{I}^{XZ} \right] (\mathbf{C}_{a/l,(\tau-1)}^{XZ})^{-1} \bar{\Xi}_{a/l,\tau} + \\ &+ l (\mathbf{C}_{a/l,(\tau-1)}^{XZ})^{-1} \check{\check{\mathbf{F}}}_{a/l,\tau} = \\ &= \mathbf{X}_{a/l,\tau} \bar{\Xi}_{a/l,\tau} + \mathbf{y}_{a/l,\tau} , \end{aligned} \quad (2.97)$$

$$\mathbf{X}_{a/l,\tau} = \left[ \mathbf{C}_{a/l,(\tau-1)}^{XZ} + \frac{l}{\Delta t} \mathbf{I}^{XZ} \right] (\mathbf{C}_{a/l,(\tau-1)}^{XZ})^{-1} , \quad (2.98)$$

$$\mathbf{y}_{a/l,\tau} = l (\mathbf{C}_{a/l,(\tau-1)}^{XZ})^{-1} \check{\check{\mathbf{F}}}_{a/l,\tau} , \quad (2.99)$$

вирішується методом прогонки.

Пряма прогонка буде здійснена у тому випадку, коли будуть знайдені  $X_{j,\tau}$  і  $y_{j,\tau}$ ,  $j = 0, \dots, \frac{a}{l}$ , як такі, щоб виконувалася рівність:

$$\bar{\Xi}_{(j-1),\tau} = \mathbf{X}_{j,\tau} \bar{\Xi}_{j,\tau} + \mathbf{y}_{j,\tau} . \quad (2.100)$$

Для відшукування  $\mathbf{X}_{j,\tau}$  і  $\mathbf{y}_{j,\tau}$  в (2.96) підставляється  $\bar{\Xi}_{(j-1),\tau}$  з (2.100)

$$\begin{aligned} \bar{\Xi}_{(j+1),\tau} &= -\mathbf{A}\mathbf{A}_{j,(\tau-1)}^0 (\mathbf{A}\mathbf{A}\mathbf{A}_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} \bar{\Xi}_{j,\tau} + \\ &+ \mathbf{A}\mathbf{A}\mathbf{A}_{(j-1),(\tau-1)}^- (\mathbf{A}\mathbf{A}\mathbf{A}_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} (\mathbf{X}_{j,\tau} \bar{\Xi}_{j,\tau} + \mathbf{y}_{j,\tau}) + \\ &+ \check{\check{\mathbf{F}}}_{j,(\tau-1)} (\mathbf{A}\mathbf{A}\mathbf{A}_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} , \end{aligned} \quad (2.101)$$

Після запису (2.101) у формі, аналогічній (2.100), отримано вираз:

$$\bar{\Xi}_{j,\tau} = \quad (2.102)$$

$$\begin{aligned}
&= \left\{ -\mathbf{AA}_{j,(\tau-1)}^0 (\mathbf{AAA}_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} + \right. \\
&+ \mathbf{AAA}_{(j-1),(\tau-1)}^- (\mathbf{AAA}_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} \mathbf{X}_{j,\tau} \left. \right\}^{-1} \Xi_{(j+1),\tau} - \\
&\quad - \mathbf{AAA}_{(j-1),(\tau-1)}^- (\mathbf{AAA}_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} \times \\
&\quad \times \left\{ -\mathbf{AA}_{j,(\tau-1)}^0 (\mathbf{AAA}_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} + \right. \\
&+ \mathbf{AAA}_{(j-1),(\tau-1)}^- (\mathbf{AAA}_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} \mathbf{X}_{j,\tau} \left. \right\}^{-1} \mathbf{y}_{j,\tau} - \\
&\quad - \check{\mathbf{F}}_{j,(\tau-1)} (\mathbf{AAA}_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} \times \\
&\quad \times \left\{ -\mathbf{AA}_{j,(\tau-1)}^0 (\mathbf{AAA}_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} + \right. \\
&+ \mathbf{AAA}_{(j-1),(\tau-1)}^- (\mathbf{AAA}_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} \mathbf{X}_{j,\tau} \left. \right\}^{-1},
\end{aligned}$$

з якого виходить:

$$\begin{aligned}
\mathbf{X}_{(j+1),\tau} &= \left\{ -\mathbf{AA}_{j,(\tau-1)}^0 (\mathbf{AAA}_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} + \right. \\
&+ \mathbf{AAA}_{(j-1),(\tau-1)}^- (\mathbf{AAA}_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} \mathbf{X}_{j,\tau} \left. \right\}^{-1}, \tag{2.103}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{y}_{(j+1),\tau} &= -\mathbf{AAA}_{(j-1),(\tau-1)}^- (\mathbf{AAA}_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} \times \\
&\quad \times \left\{ -\mathbf{AA}_{j,(\tau-1)}^0 (\mathbf{AAA}_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} + \right. \\
&+ \mathbf{AAA}_{(j-1),(\tau-1)}^- (\mathbf{AAA}_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} \mathbf{X}_{j,\tau} \left. \right\}^{-1} \mathbf{y}_{j,\tau} - \\
&\quad - \check{\mathbf{F}}_{j,(\tau-1)} (\mathbf{AAA}_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} \times \\
&\quad \times \left\{ -\mathbf{AA}_{j,(\tau-1)}^0 (\mathbf{AAA}_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} + \right. \\
&\quad + \mathbf{AAA}_{(j-1),(\tau-1)}^- (\mathbf{AAA}_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} \mathbf{X}_{j,\tau} \left. \right\}^{-1} = \\
&= -\mathbf{AAA}_{(j-1),(\tau-1)}^- (\mathbf{AAA}_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} \mathbf{X}_{(j+1),\tau} \mathbf{y}_{j,\tau} - \\
&\quad - \check{\mathbf{F}}_{j,(\tau-1)} (\mathbf{AAA}_{(j+1),(\tau-1)}^+)^{-1} \mathbf{X}_{(j+1),\tau}. \tag{2.104}
\end{aligned}$$

Так як  $\mathbf{X}_{0,\tau}$  і  $\mathbf{y}_{0,\tau}$  відомі з крайових умов для граней С, В і G, то за допомогою рекурентних співвідношень (2.103), (2.104) можуть бути визначені  $\mathbf{X}_{j,\tau}$  і  $\mathbf{y}_{j,\tau}$  для всіх  $j = 0, \dots, \frac{a}{l}$ .

На основі (2.97) визначається  $\Xi_{\frac{a}{l},\tau}$ .

Для відомих значень елементів матриці-вектору  $\Xi_{\frac{a}{l},\tau}$ , на підставі знайдених значень  $\mathbf{X}_{j,\tau}$  і  $\mathbf{y}_{j,\tau}$ ,  $j = 0, \dots, \frac{a}{l}$ , за допомогою рекурентного

співвідношення (2.93) розраховуються  $\mathbf{E}_{j,\tau}$ ,  $j = \frac{a}{l} - 1, \frac{a}{l} - 2, \dots, 1$ .

Виконується зворотна прогонка.

Результати розрахунку поля швидкостей в елементах досліджуваного простору при різних режимах роботи ВФНС приведені на рис. 2.7 – 2.9. На рисунках зображено розрахункову область повітря, яка знаходиться під впливом двох паралельних робочих площин вібромашини, що синхронно коливаються. Область розбита на дискретні вузли шляхом введення сіток розбивки по всім трьом осям системи координат, яка пов'язана з пакетом робочих площин. Для кожного вузлу за допомогою алгоритму обчислені значення вектору швидкості та тиску повітря.

Величини та напрямлення векторів швидкості повітря зображені за допомогою променів відповідної довжини та напрямку, що виходять з дискретних вузлів розрахункової області. З наведених результатів видно, що напрямок руху повітря практично співпадає з напрямком коливань робочих площин.

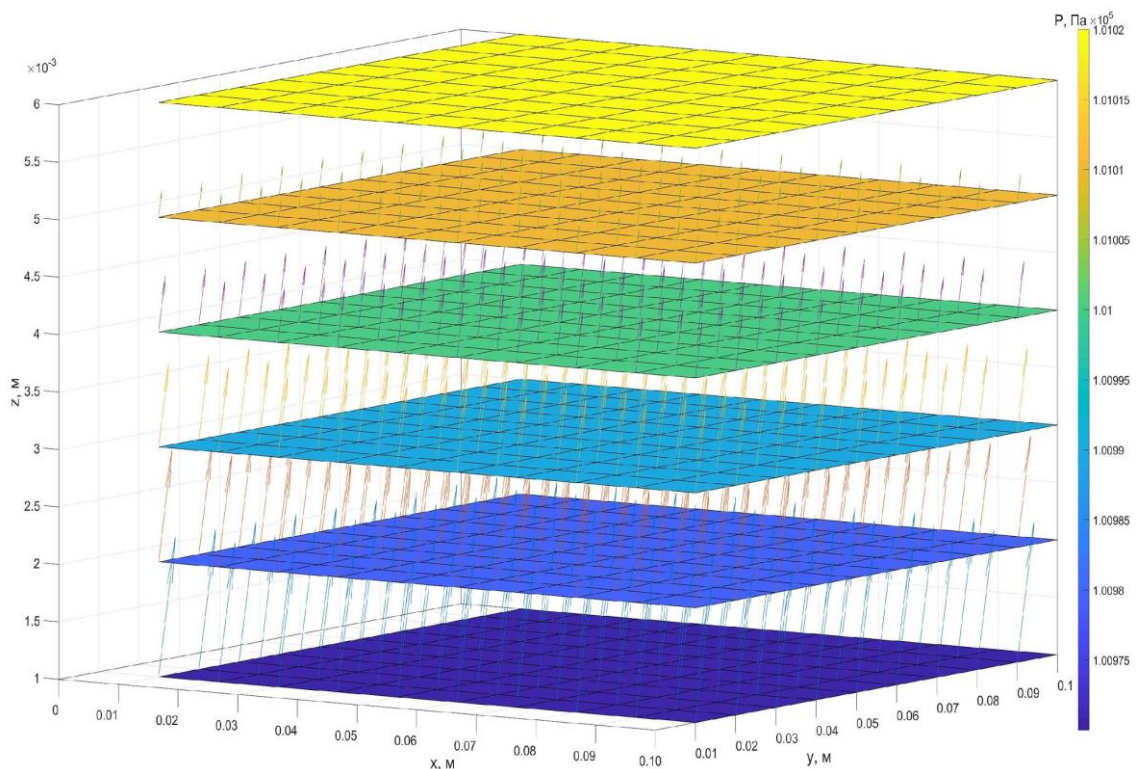


Рисунок 2.7 – Розрахункове поле швидкостей та тиску при проходженні нейтрального положення: рух вниз

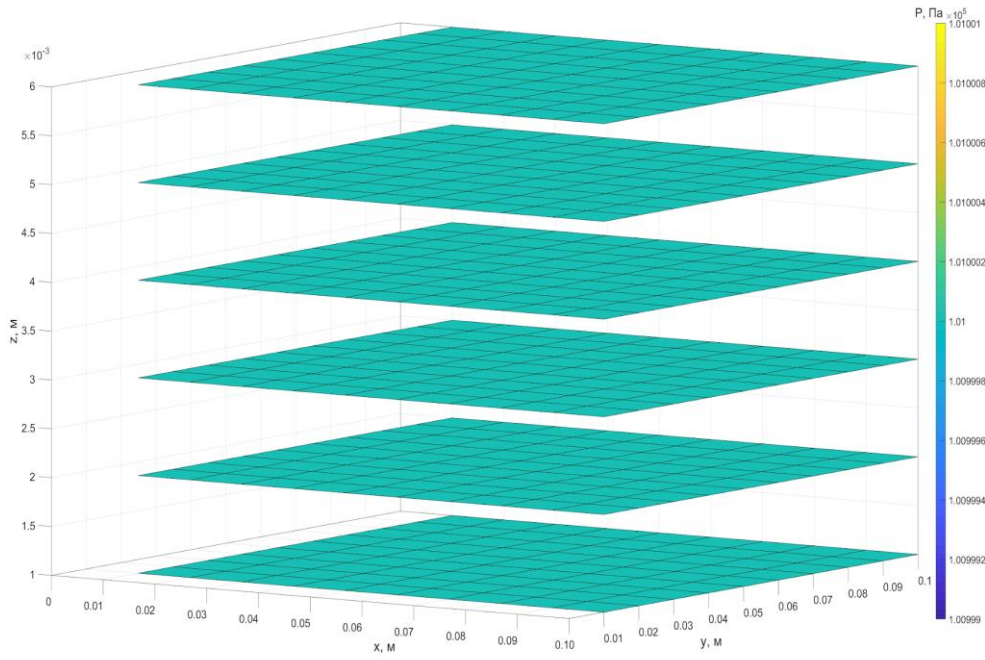


Рисунок 2.8 – Розрахункове поле швидкостей та тиску при проходженні граничного нижнього положення

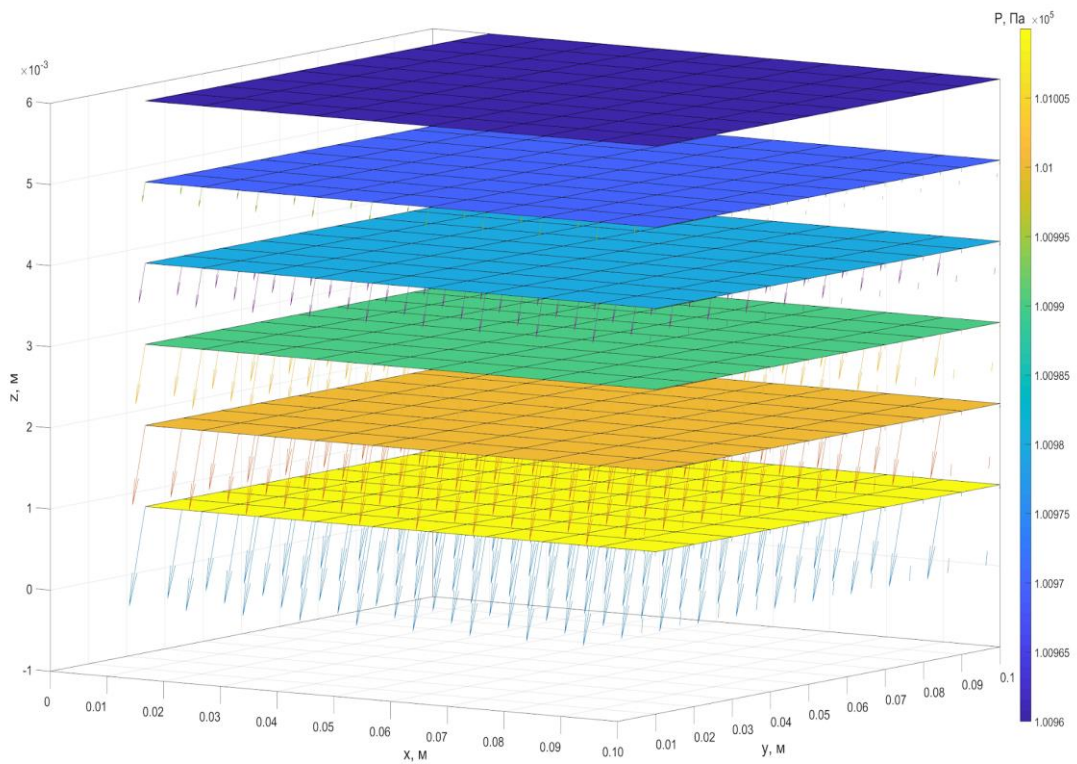


Рисунок 2.9 – Розрахункове поле швидкостей та тиску при проходженні нейтрального положення: рух ввєрх

Величини тиску показані за допомогою кольору, яким зафарбовані області з однаковим тиском. Видно, що області з однаковим тиском розташовані паралельно робочим площинам ВФНС. Найбільший тиск присутній в області, що прилягає до площини, яка набігає на повітряну область. Найменший тиск – біля площини, яка відходить від області.

2.2.2 Дослідження впливу конструктивних характеристик робочих блоків та режиму роботи ВФНС на динаміку повітря між робочими площинами

В якості конструктивних характеристик робочих блоків та параметрів режиму роботи ВФНС, для яких досліджувався вплив на динаміку повітря між робочими площинами, розглядалися:

- вертикальний зазор (висота) між робочими площинами в блоці;
- амплітуда коливань робочих площин.

Збільшення відстані між робочими площинами спочатку (до величин 6 - 8 мм) призводить до зростання тангенціальних швидкостей повітря, а потім (понад 8 мм) відбувається незначне зменшення цих складових швидкості (рис. 2.10 – 2.12).

Найменші значення тангенціальних швидкостей спостерігаються при зазорі 4 мм. Збільшення зазору до 6 мм призводить до різкого зростання даних складових відносної швидкості повітря. При зазорі 16 мм тангенціальні швидкості повітря в деякій мірі знижуються, але не так вагомо як при зазорі 4 мм. Таке різке зменшення тангенціальних швидкостей повітряної маси пояснюється замиканням плоского каналу при зближенні площин. Біля площини, що здійснює набігання на повітряну область між площинами, утворюється перепад тиску. При невеликих відстанях між пластинами цей перепад поширюється до сусідньої площини і, тим самим, замикає робочу область для тангенціального руху повітряної маси.



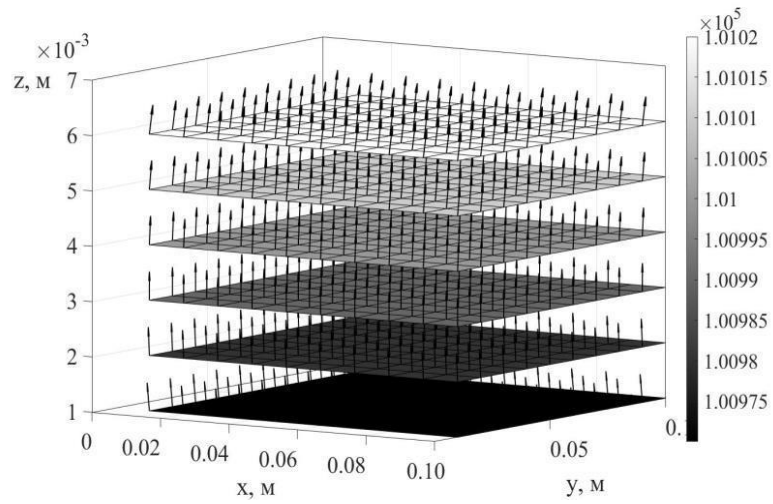


Рисунок 2.10 – Поле швидкостей при відстані між робочими площинами 4 мм (фаза коливань: початок руху вниз)

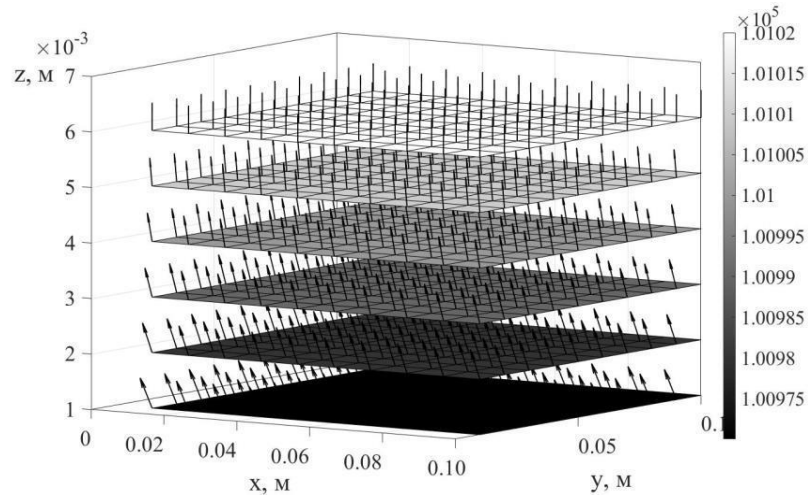


Рисунок 2.11 – Поле швидкостей при відстані між робочими площинами 8 мм (фаза коливань: початок руху вниз)

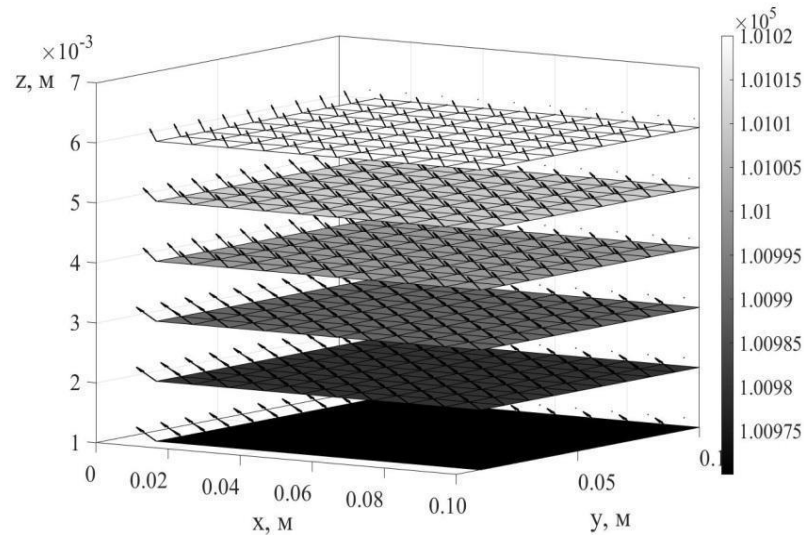


Рисунок 2.12 – Поле швидкостей при відстані між робочими площинами 16 мм (фаза коливань: початок руху вниз)

Таким чином, для зниження впливу аеродинамічного фактора при вібросепарації, слід зменшувати зазор між робочими площинами менше ніж 6 мм. На практиці це не можливо через обмеження експлуатаційного характеру – блокування руху між пластинами великих частинок сміття, труднощі в очищенні робочих поверхонь. Збільшення зазору більше 10 мм не настільки ефективно. Зниження тангенціальних швидкостей відбувається, але не в такій значній мірі, як потрібно. Після 20 мм спостерігається ефект досягнення критичного максимуму – подальше зниження тангенціальних швидкостей не відбувається.

При зростанні амплітуди коливань відбувається пропорційне збільшення відносних швидкостей повітря. На рис. 2.13 – 2.15 наведені результати моделювання, що демонструють таку залежність.

Як видно з наведених результатів, в порівнянні з амплітудою 1 мм, при амплітуді 2 мм тангенціальні швидкості повітря збільшуються приблизно на 15 – 25%. Зростання швидкостей повітря при збільшенні амплітуди коливань пояснюється великими лінійними швидкостями руху робочих поверхонь ВФНС при одних і тих самих частотах коливань.

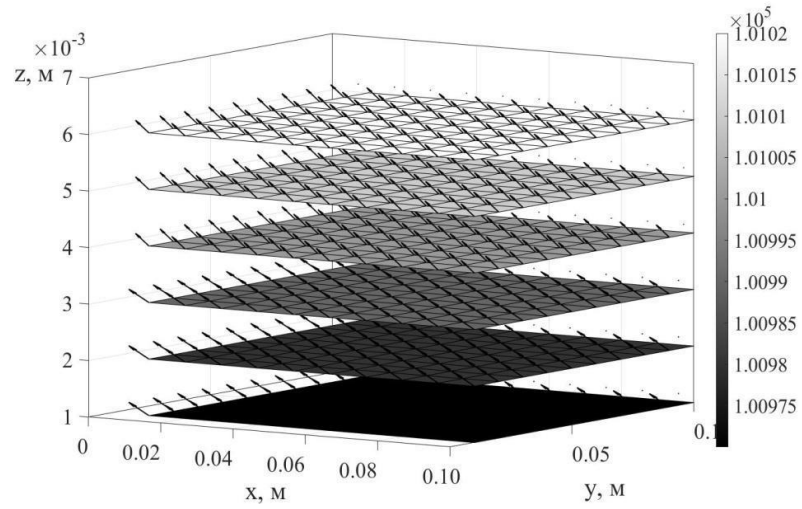


Рисунок 2.13 – Поле швидкостей при амплітуді коливань 1 мм (фаза коливань: початок руху вниз)

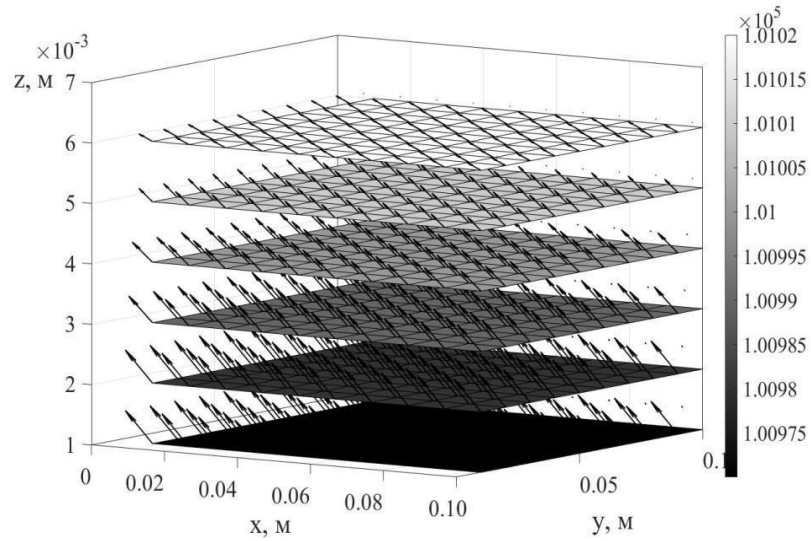


Рисунок 2.14 – Поле швидкостей при амплітуді коливань 1,5 мм (фаза коливань: початок руху вниз)

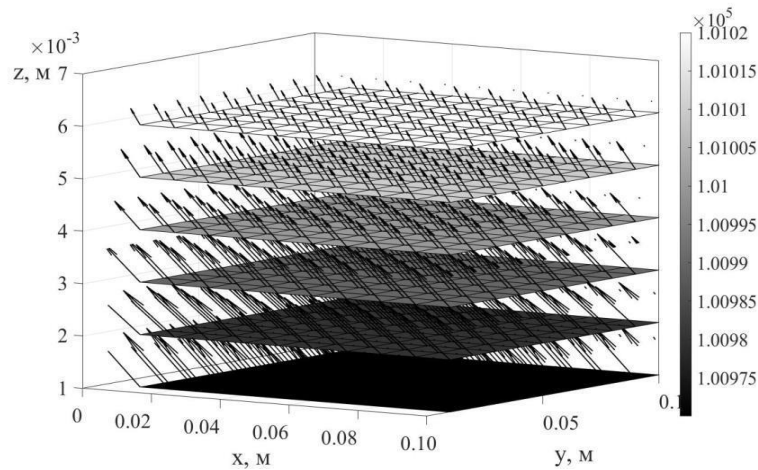


Рисунок 2.15 – Поле швидкостей при амплітуді коливань 2 мм (фаза коливань: початок руху вниз)

### 2.2.3 Граничні умови, які враховує аеродинамічний екран

За рахунок використання аеродинамічного екрану на торцевих гранях робочої області виникають ділянки аеродинамічного затінення та ділянки «затікання», де має місце відносний рух повітря. Так на рис. 2.16 показано такі ділянки на прикладі граней С і D досліджуваної області. Фізична картина для граней Е і G принципово не поміняється.

Для грані С має місце ділянка «затікання», яка розповсюджується вгору від нижньої поверхні на висоту  $H_{гр. С} = \bar{H}_{гр. С} \cdot H$ , де  $\bar{H}_{гр. С} = H/H_{гр. С}$  – коефіцієнт «затікання» для грані С. Екранована область розповсюджується вниз від верхньої поверхні на глибину, відповідно,  $H - H_{гр. С} = (1 - \bar{H}_{гр. С}) \cdot H$ . Звідси, граничні умови для грані С мали вигляд:

$$\forall i = 0, 1, \dots, \frac{b}{h}; j = 0; k = 0, 1, \dots, \frac{H_{гр.С}H}{s}; \tau = 0, 1, \dots, \frac{T}{\Delta t}, \quad (2.105)$$

$$u_{i,j,k,\tau} = A \cdot \Omega \cos(\Omega\tau\Delta t) \sin \beta \sin(\varepsilon - \alpha), \quad (2.106)$$

$$v_{i,j,k,\tau} = A \cdot \Omega \cos(\Omega\tau\Delta t) \left[ \tan \alpha \cos \beta \sin(\varepsilon - \alpha) - \frac{\cos \delta}{\cos \beta} \cos(\varepsilon - \alpha) \right], \quad (2.107)$$

$$w_{i,j,k,\tau} = -A \cdot \Omega \cos(\Omega\tau\Delta t) \cos \delta \frac{\sin \varepsilon}{\cos \alpha}, \quad (2.108)$$

$$p_{i,j,k,\tau} = p^{\text{атм.}}, \quad (2.109)$$

$$\forall i = 0, 1, \dots, \frac{b}{h}; j = 0; k = \frac{H_{\text{гр. C}} H}{s}, \dots, \frac{H}{s}; \tau = 0, 1, \dots, \frac{T}{\Delta t}, \quad (2.110)$$

$$u_{i,j,k,\tau} = v_{i,j,k,\tau} = w_{i,j,k,\tau} = 0, \quad p_{i,j,k,\tau} = p^{\text{атм.}}, \quad (2.111)$$

де  $b$ ,  $a$  – поперечний і поздовжній розміри робочої поверхні;  $H$  – висота зазору між паралельними робочими поверхнями;  $T = \frac{1}{\Omega}$  – розглянутий період часу;  $\Omega$  – частота коливань.

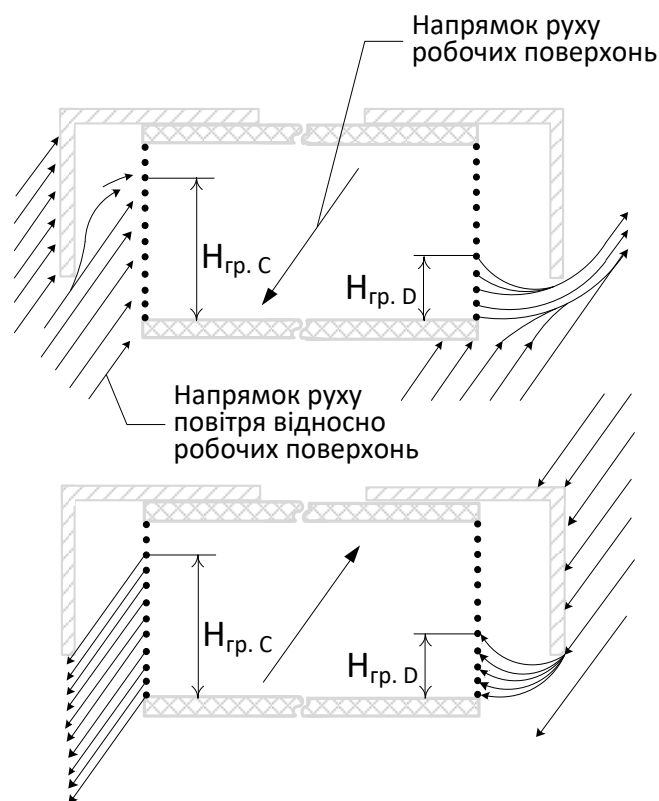


Рисунок 2.16 – Граничні умови з урахуванням наявності аеродинамічного екрану

Граничні умови для граней D, E і G мали вигляд, аналогічний граничним умовам (2.105) – (2.111) за винятком коефіцієнта «затікання», який змінює

своє значення залежно від типу грані, що розглядається. Для кожної грані використовувався свій коефіцієнт:  $\bar{H}_{\text{гр. D}}$ ,  $\bar{H}_{\text{гр. E}}$  або  $\bar{H}_{\text{гр. G}}$ , відповідно.

Значення вказаних коефіцієнтів обчислюються за допомогою наступних виразів:

$$\bar{H}_{\text{гр. C}} = 1 - \frac{d - z \cdot \text{tg} \varepsilon_{ZY}}{H}, \quad (2.112)$$

$$\bar{H}_{\text{гр. D}} = \bar{H}_{\text{гр. G}} = 1 - \frac{d}{H}, \quad (2.113)$$

$$\bar{H}_{\text{гр. E}} = 1 - \frac{d - z \cdot \text{tg} \varepsilon_{ZX}}{H}, \quad (2.114)$$

де  $\varepsilon_{ZY}$ ,  $\varepsilon_{ZX}$  – кути нахилу коливань відносно робочої поверхні у площинах ZY та ZX, відповідно.

Для граничних умов  $\bar{H}_{\text{гр. C}} = \bar{H}_{\text{гр. D}} = 0,5$  було проведено розрахунок поля швидкостей повітря між робочих площин ВФНС, між якими є зазор 7 мм. На рис. 2.17 наведені результати розрахунку.

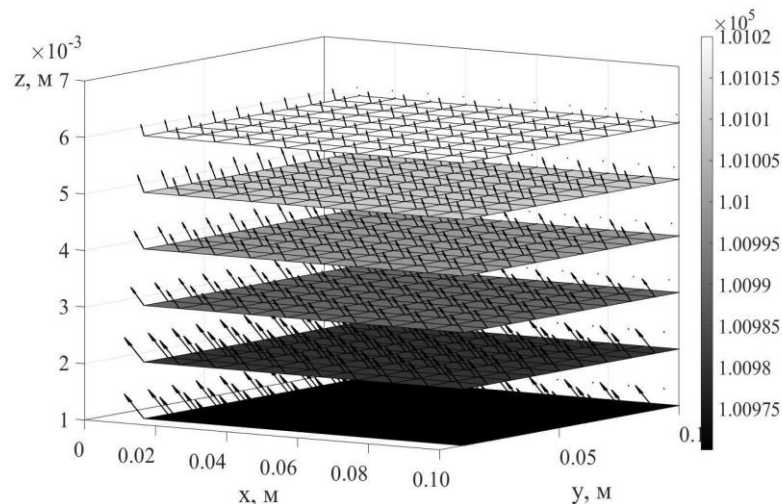


Рисунок 2.17 – Поле швидкостей для повітряної області, утвореної паралельно розташованими на відстані 7 мм двома робочими поверхнями і аеродинамічним екраном

На рис. 2.18 наведені результати розрахунку поля швидкостей для того ж режиму роботи ВФНС і для тієї ж відстані між робочими площинами, але

без аеродинамічного екрану (використовуються граничні умови (2.36) – (2.52)).

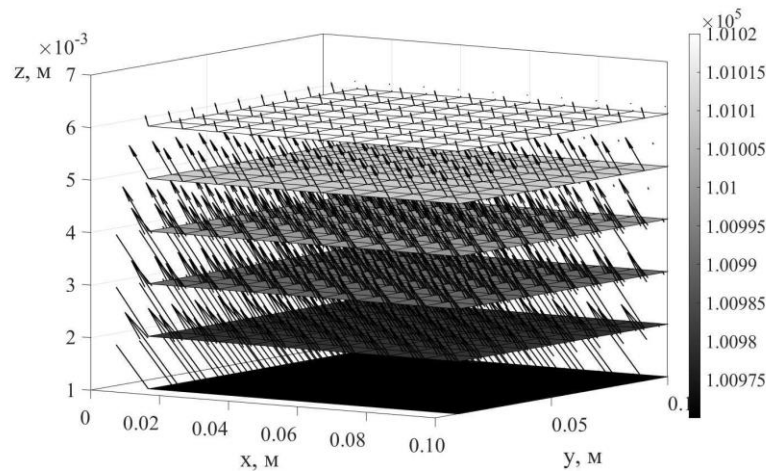


Рисунок 2.18 – Поле швидкостей для повітряної області, утвореної паралельно розташованими на відстані 7 мм двома робочими поверхнями, без аеродинамічного екрану

З наведених результатів чисельного експерименту, швидкість повітря у вузлах робочої області, при використанні аеродинамічного екрану (рис. 2.17), практично відсутні. За винятком шарів повітря, що безпосередньо прилягають до робочих поверхонь ВФНС, основна маса повітря знаходиться в стані спокою відносно системи координат робочої поверхні. Значення тангенціальних складових швидкості повітря для граничного шару істотно нижче (в 1,5 – 2 рази) аналогічних складових для випадку без застосування аеродинамічного екрану.

2.3 Модель віброфрикційного безвідривного руху насіння по нахиленій шорсткій поверхні з урахуванням дії аеродинамічних сил та моментів

### 2.3.1 Система диференційних рівнянь

Для моделювання віброфрикційного руху насіння використана модель безвідривного руху твердого тіла еліпсоїдної форми з перекочуванням і проковзуванням. Рух відбувається під дією сили тяжіння, вібрації (гармонійних поштовхів), що передається тілу від робочої поверхні, а також

аеродинамічних сил і моментів, що виникають внаслідок руху повітря відносно робочої поверхні, що коливається. Кінематичні параметри руху тіла (вектор швидкості переміщення центру тяжіння тіла  $\mathbf{u}_c$  і вектор його кутової швидкості обертання  $\mathbf{\Omega}$ ) визначаються шляхом рішення системи рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{L}_I}{dt} = \mathbf{F}, \\ \frac{d\mathbf{H}_I}{dt} = \mathbf{M}_I, \end{cases} \quad (2.115)$$

де  $\mathbf{L}_I$  – кількість руху тіла в прийнятій інерціальній системі координат;  $\mathbf{H}_I$  – момент кількості руху тіла в інерціальній системі координат;  $\mathbf{F}$  – рівнодіюча зовнішніх сил, прикладених до даного тіла;  $\mathbf{M}_I$  – рівнодіючий момент від зовнішніх сил, прикладених до тіла, який обчислюється відносно початку інерціальної системи координат.

Математична модель, що описує безвідривний рух (кочення з проковзуванням) по нахиленій шорсткій вібруючій поверхні твердого тіла під дією сил гравітації і реакції опори (без урахування впливу аеродинамічних сил), представлена в [87].

Форма насіння апроксимується (описується) за допомогою еліпсоїду з півосями  $a$ ,  $b$  і  $c$ . Для приведення неголономних кінематичних зв'язків насіння, що розглядається, з робочою поверхнею до голономних зв'язків, його поверхня розбивається на дискретні ділянки контакту. Кожна дискретна ділянка контакту на поверхні еліпсоїда приводиться до єдиної контактної точки (рис. 2.19).

Кожну встановлену контактну точку, що належить поверхні насіння (еліпсоїду), нумеруємо за допомогою індексів  $l$  і  $m$ , де індекс  $l$  визначає номер меридіана і значення кута довготи, що дискретно міняється  $\xi$ , а індекс  $m$  – номер паралелі і значення кута широти, що дискретно міняється  $\zeta$  в полярній системі координат.



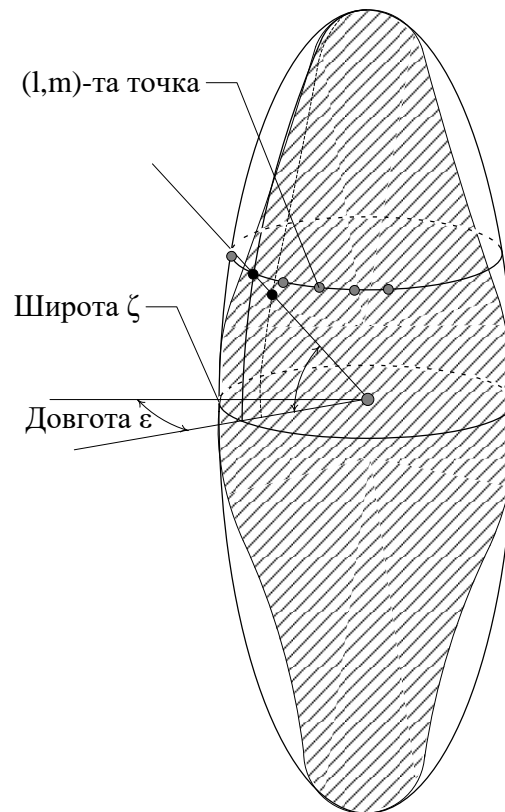


Рисунок 2.19 – Задання форми окремого насіння за допомогою дискретних точок контакту

Між індексами  $l$ ,  $m$  і значеннями кутів  $\zeta$ ,  $\xi$  існують співвідношення:

$$l = 1 + \frac{\xi}{\Delta\xi}, \quad \xi \in [-90^\circ; 90^\circ], \quad (2.116)$$

$$m = 1 + \frac{\zeta}{\Delta\zeta}, \quad \zeta \in [0^\circ; 360^\circ[ \quad (2.117)$$

де  $\Delta\xi, \Delta\zeta$  – крок розбиття інтервалів зміни кутів широти і довготи, відповідно.

Прикладення зусиль до насіння з боку робочої поверхні (іншого, взаємодіючого насіння) відбувається тільки у встановлених дискретних точках контакту. При цьому точка контакту, за допомогою якої здійснюється взаємодія насіння з робочою поверхнею в даний момент часу, служить миттєвим центром обертання тіла [123].

Рух насіння відносно робочої поверхні розглядається як суперпозиція рухів його обертання відносно точки контакту  $K$  і поступального переміщення миттєвого центру обертання. Обертання насіння характеризується величиною кутової швидкості  $\omega$ , яка змінює напрям радіус-вектора  $R_C$  у системі координат робочої поверхні. Поступальне переміщення характеризується величиною вектору швидкості  $V_K$  в інерціальній (нерухомій) системі координат. Поступальний рух насіння обумовлений періодичними коливаннями робочої поверхні, які передаються йому через точку контакту.

Для обчислення кінематичних параметрів руху ізольованого насіння розглядаємо три системи координат (рис. 2.20):

- власна система координат  $CX'Y'Z'$ , пов'язана з насінням і така, що має початок в його центрі маси. Для зручності приймаємо, що осі,  $CY'$  і  $CZ'$  співпадають з головними осями інерції насіння, що розглядається;
- система координат  $K_0XYZ$ , пов'язана з робочою поверхнею і така, що має початок в т.  $K_0$ , яка є точкою подачі насіння на робочу поверхню;
- інерційна (нерухома) система координат  $OX_IY_I Z_I$ .

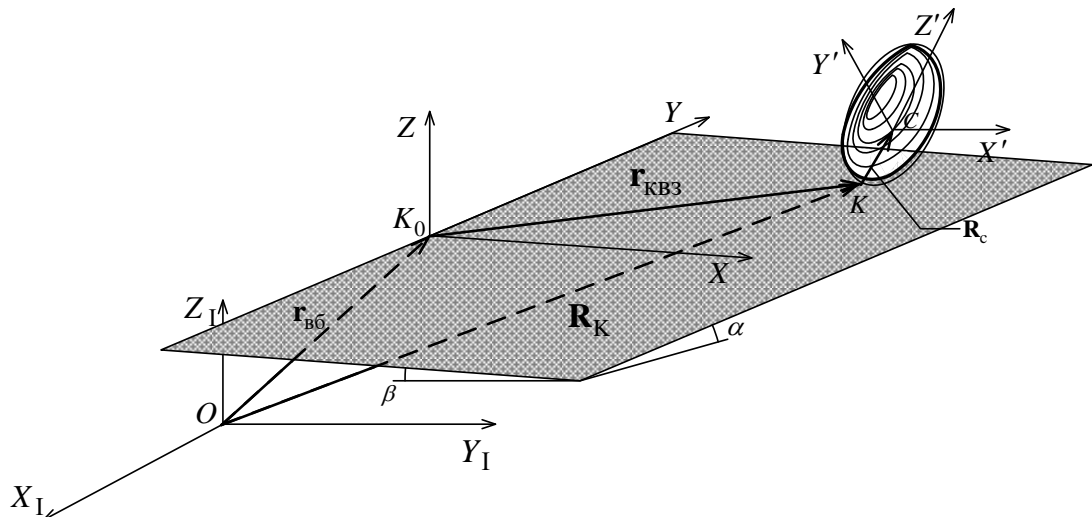


Рисунок 2.20 – Встановлені системи координат для розрахунку кінематичних параметрів руху насіння

Робоча поверхня нахилена по відношенню до інерціальній системі координат в двох площинах. Нахил задаємо двома кутами  $\alpha$  і  $\beta$ . Кут  $\alpha$

характеризує нахил поздовжньої осі робочої поверхні до площини горизонту. Кут  $\beta$  характеризує нахил поперечної осі робочої поверхні до площини горизонту.

Положення робочої поверхні відносно інерціальної системи координат  $Ox_1Y_1Z_1$  задаємо радіус-вектором  $r_{вб}$ , який визначає місце розташування т.  $K_0$ . Похідна  $\dot{r}_{вб}$  характеризує гармонійні коливання, які здійснює робоча поверхня під дією вібробудника.

Радіус-вектор  $r_{вб}$  задає місце розташування точки контакту насіння з робочою поверхнею відносно початку системи координат  $K_0XYZ$  робочої поверхні. Похідна  $\dot{r}_{квз}$  характеризує рух проковзування насіння відносно робочої поверхні.

Місце розташування точки контакту відносно початку інерціальної системи координат задає радіус-вектор  $R_K$ . Похідна радіус-вектора  $\dot{R}_K$  характеризує рух насіння відносно інерціальної (нерухомої) системи координат.

Місце розташування центру маси насіння відносно точки його контакту з робочою поверхнею задає радіус-вектор  $R_C$ .

Кількість руху окремого насіння в інерціальній (нерухомій) системі координат обчислюється за допомогою виразу:

$$L_I = m(\dot{r}_{вб} + \dot{r}_{квз} + \omega \times R_C), \quad (2.118)$$

де  $m$  – маса насіння.

Кінетичний момент насіння відносно інерціальної системи координат має вигляд:

$$H_I = (R_K + R_C) \times m(\dot{R}_K + \omega \times R_C) + H_C, \quad (2.119)$$

де  $H_C$  – кінетичний момент насіння відносно його центру маси, який (момент) розглядається в інерціальній системі координат.

З урахуванням (2.43) і (2.44) система (2.40) набере вигляду:

$$m \frac{d\omega_y}{dt} R_{Cz} - m \frac{d\omega_z}{dt} R_{Cy} + m(\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{R}_C)\omega_x - m\omega^2 R_{Cx} + m\ddot{x}_{KB3} +$$

$$+ m\ddot{r}_{B\bar{6}.x} = G_x - N \cdot f \frac{\dot{x}_{KB3}}{\sqrt{\dot{x}_{KB3}^2 + \dot{y}_{KB3}^2}} + R_x^{aep.}, \quad (2.120)$$

$$m \frac{d\omega_z}{dt} R_{Cx} - m \frac{d\omega_x}{dt} R_{Cz} + m(\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{R}_C)\omega_y - m\omega^2 R_{Cy} +$$

$$+ m\ddot{y}_{KB3} + m\ddot{r}_{B\bar{6}.y} = G_y - N \cdot f \frac{\dot{y}_{KB3}}{\sqrt{\dot{x}_{KB3}^2 + \dot{y}_{KB3}^2}} + R_y^{aep.}, \quad (2.121)$$

$$mR_C^2 \frac{d\omega_x}{dt} - mR_{Cx} \left( \mathbf{R}_C \cdot \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} \right) + m(\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{R}_C)(R_{Cy}\omega_z - R_{Cz}\omega_y) +$$

$$+ H_x - mR_{Cz}\ddot{y}_{KB3} + mR_{Cy}\ddot{r}_{B\bar{6}.z} - mR_{Cz}\ddot{r}_{B\bar{6}.y} =$$

$$= R_{Cy}G_z - R_{Cz}G_y + M_{кч.x} - M_{aep.x}, \quad (2.122)$$

$$mR_C^2 \frac{d\omega_y}{dt} - mR_{Cy} \left( \mathbf{R}_C \cdot \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} \right) + m(\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{R}_C)(R_{Cz}\omega_x - R_{Cx}\omega_z) +$$

$$+ H_y + mR_{Cz}\ddot{x}_{CK} + mR_{Cz}\ddot{r}_{B\bar{6}.x} - mR_{Cx}\ddot{r}_{B\bar{6}.z} =$$

$$= R_{Cz}G_x - R_{Cx}G_z + M_{кч.y} - M_{aep.y}, \quad (2.123)$$

$$mR_C^2 \frac{d\omega_z}{dt} - mR_{Cz} \left( \mathbf{R}_C \cdot \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} \right) + m(\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{R}_C)(R_{Cx}\omega_y - R_{Cy}\omega_x) +$$

$$+ H_z + mR_{Cx}\ddot{y}_{KB3} - mR_{Cy}\ddot{x}_{KB3} + mR_{Cx}\ddot{r}_{B\bar{6}.y} - mR_{Cy}\ddot{r}_{B\bar{6}.x} =$$

$$= R_{Cx}G_y - R_{Cy}G_x - M_{aep.z}, \quad (2.124)$$

$$N = m \frac{d\omega_x}{dt} R_{Cy} - m \frac{d\omega_y}{dt} R_{Cx} + m(\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{R}_C)\omega_z -$$

$$- m\omega^2 R_{Cz} + m\ddot{r}_{B\bar{6}.z} - G_z - R_z^{aep.}, \quad (2.125)$$

де  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  – проєкції вектора кутової швидкості обертання тіла щодо миттєвого центру обертання  $K$  на осі системи координат, зв'язаної з робочою поверхнею. Тут і далі розглядаємо проєкції в системі координат робочої поверхні;  $R_{Cx}, R_{Cy}, R_{Cz}$  – проєкції радіус-вектора  $\mathbf{R}_C$ ;  $\dot{x}_{CK}, \dot{y}_{CK}$  – проєкції швидкості проковзування насіння щодо робочої поверхні;  $\ddot{x}_{CK}, \ddot{y}_{CK}$  – проєкції

прискорення проковзування насіння;  $\ddot{r}_{вб.х}, \ddot{r}_{вб.у}, \ddot{r}_{вб.з}$  – проєкції прискорення робочої поверхні при здійсненні гармонійних коливань під впливом віброзбудника;  $G_x, G_y, G_z$  – проєкції сили ваги насіння;  $N$  – величина реакції опору, що діє на насіння;  $f$  – коефіцієнт тертя ковзання;  $M_{кч.х}, M_{кч.у}$  – проєкції вектора моменту опору кочення при перекочуванні насіння по робочій поверхні;  $M_{аер.х}, M_{аер.у}, M_{аер.з}$  – проєкції вектора аеродинамічного моменту насіння, що виникає при його обдуванні потоком повітря. Повітряний потік створюється за рахунок коливань робочих поверхонь ВФНС;  $R_x^{аер.}, R_y^{аер.}, R_z^{аер.}$  – проєкції аеродинамічної сили, що діє на насіння, яке знаходиться в потоці повітря;  $H_x, H_y, H_z$  – проєкції кінетичного моменту насіння.

Величини проєкцій вектора кутової швидкості  $\omega$  визначаються як:

$$\omega_x = \dot{\theta} \cos \psi + \dot{\varphi} \sin \theta \sin \psi, \quad (2.126)$$

$$\omega_y = \dot{\theta} \sin \psi - \dot{\varphi} \sin \theta \cos \psi, \quad (2.127)$$

$$\omega_z = \dot{\psi} + \dot{\varphi} \cos \theta, \quad (2.128)$$

де  $\theta, \psi, \varphi$  – кути повороту осей системи координат, зв'язаної з насінням, щодо системи координат, зв'язаної з робочою поверхнею.

Скалярну величину вектора кутової швидкості  $\omega$  розраховуємо як:

$$\omega = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2}. \quad (2.129)$$

З урахуванням (2.51) – (2.53) проєкції похідної вектора кутової швидкості за часом приймуть вигляд:

$$\frac{d\omega_x}{dt} = \ddot{\theta} \cos \psi - \dot{\theta} \dot{\psi} \sin \psi + \ddot{\varphi} \sin \theta + \dot{\varphi} \dot{\theta} \cos \theta + \dot{\varphi} \dot{\psi} \sin \theta, \quad (2.130)$$

$$\frac{d\omega_y}{dt} = \ddot{\theta} \sin \psi + \dot{\theta} \dot{\psi} \cos \psi - \ddot{\phi} \sin \theta - \dot{\phi} \dot{\theta} \cos \theta + \dot{\phi} \dot{\psi} \sin \theta, \quad (2.131)$$

$$\frac{d\omega_z}{dt} = \ddot{\psi} + \ddot{\phi} \cos \theta - \dot{\phi} \dot{\theta} \sin \theta. \quad (2.132)$$

Скалярний добуток вектора кутової швидкості  $\boldsymbol{\omega}$  і радіус-вектора  $\mathbf{R}_C$  має вигляд:

$$(\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{R}_C) = \omega_x R_{Cx} + \omega_y R_{Cy} + \omega_z R_{Cz}. \quad (2.133)$$

Скалярний добуток радіус-вектора  $R_C$  і вектора похідної кутової швидкості за часом  $\frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt}$  має вигляд:

$$\mathbf{R}_C \cdot \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} = R_{Cx} \frac{d\omega_x}{dt} + R_{Cy} \frac{d\omega_y}{dt} + R_{Cz} \frac{d\omega_z}{dt}. \quad (2.134)$$

Проекції вектора сили ваги  $\mathbf{G}$  на осі системи координат, зв'язаної з робочою поверхнею, обчислюємо за допомогою виразів, які мають вигляд:

$$G_x = mg \cdot \sin \beta, \quad (2.135)$$

$$G_y = mg \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos \beta \cdot \cos \delta, \quad (2.136)$$

$$G_z = -mg \cdot \cos \delta, \quad (2.137)$$

$$\cos \delta = \frac{\cos \alpha \cos \beta}{\sqrt{\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha \cos^2 \beta}}, \quad (2.138)$$

де  $\delta$  – кут найбільшого нахилу робочої поверхні.

Величини проєкцій кінетичного моменту насіння  $\mathbf{H}_C$  на осі системи координат робочої поверхні розраховуємо за допомогою виразів:

$$H_x = H'_x l_1 + H'_y l_2 + H'_z l_3, \quad (2.139)$$

$$H_y = H'_x m_1 + H'_y m_2 + H'_z m_3, \quad (2.140)$$

$$H_z = H'_x n_1 + H'_y n_2 + H'_z n_3, \quad (2.141)$$

$$H'_x = J'_x \cdot \frac{d\omega'_x}{dt} + (J'_z - J'_y) \omega'_y \cdot \omega'_z, \quad (2.142)$$

$$H'_y = J'_y \cdot \frac{d\omega'_y}{dt} + (J'_x - J'_z) \omega'_x \cdot \omega'_z, \quad (2.143)$$

$$H'_z = J'_z \cdot \frac{d\omega'_z}{dt} + (J'_y - J'_x) \omega'_x \omega'_y, \quad (2.144)$$

$$l_1 = \cos\psi \cos\varphi - \cos\theta \sin\psi \sin\varphi, \quad (2.145)$$

$$l_2 = -\cos\psi \sin\varphi - \cos\theta \sin\psi \cos\varphi, \quad (2.146)$$

$$l_3 = \sin\theta \sin\psi, \quad (2.147)$$

$$m_1 = \sin\psi \cos\varphi + \cos\theta \cos\psi \sin\varphi, \quad (2.148)$$

$$m_2 = \cos\theta \cos\psi \cos\varphi - \sin\psi \sin\varphi, \quad (2.149)$$

$$m_3 = -\sin\theta \cos\psi, \quad (2.150)$$

$$n_1 = \sin\theta \sin\varphi, \quad (2.151)$$

$$n_2 = \sin\theta \cos\varphi, \quad (2.152)$$

$$n_3 = \cos\theta, \quad (2.153)$$

$$\omega'_x = \dot{\psi} \sin\theta \sin\varphi + \dot{\theta} \cos\varphi, \quad (2.154)$$

$$\omega'_y = \dot{\psi} \sin\theta \cos\varphi - \dot{\theta} \sin\varphi, \quad (2.155)$$

$$\omega'_z = \dot{\varphi} + \dot{\psi} \cos\theta, \quad (2.156)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\omega'_x}{dt} &= \ddot{\psi} \sin\theta \sin\varphi + \dot{\psi} \dot{\theta} \cos\theta \sin\varphi + \\ &+ \dot{\psi} \dot{\varphi} \sin\theta \cos\varphi + \ddot{\theta} \cos\varphi - \dot{\theta} \dot{\varphi} \sin\varphi, \end{aligned} \quad (2.157)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\omega'_y}{dt} &= \ddot{\psi} \sin\theta \cos\varphi + \dot{\psi} \dot{\theta} \cos\theta \cos\varphi - \\ &- \dot{\psi} \dot{\varphi} \sin\theta \sin\varphi - \ddot{\theta} \sin\varphi - \dot{\theta} \dot{\varphi} \cos\varphi, \end{aligned} \quad (2.158)$$

$$\frac{d\omega'_z}{dt} = \ddot{\varphi} + \ddot{\psi} \cos\theta - \dot{\psi} \dot{\theta} \sin\theta, \quad (2.159)$$

де  $H'_x, H'_y, H'_z$  – проєкції кінетичного моменту насіння щодо його головних осей інерції  $CX'Y'Z'$ ;  $J'_x, J'_y, J'_z$  – моменти інерції насіння щодо його головних осей;  $\omega'_x, \omega'_y, \omega'_z$  – проєкції кутової швидкості обертання насіння щодо миттєвого центру на осі власної системи координат;  $l_1, l_2, l_3$  – направляючі косинуси осі  $CX'$  щодо осей системи координат робочої поверхні;  $m_1, m_2, m_3$  – направляючі косинуси осі  $CY'$ ;  $n_1, n_2, n_3$  – направляючі косинуси осі  $CZ'$ .

Проєкції прискорення робочої поверхні при здійсненні гармонійних коливань під впливом віброзбудника обчислюються як:

$$\ddot{r}_{\text{вб.х}} = r_0 \Omega^2 \sin(\Omega t) \cdot \sin \beta \cdot \sin(\varepsilon - \alpha), \quad (2.160)$$

$$\ddot{r}_{\text{вб.у}} = r_0 \Omega^2 \sin(\Omega t) \cdot \left[ \operatorname{tg} \alpha \cos \beta \cos \delta \sin(\varepsilon - \alpha) - \frac{\cos \delta}{\cos \beta} \cos(\varepsilon - \alpha) \right], \quad (2.161)$$

$$\ddot{r}_{\text{вб.з}} = -r_0 \Omega^2 \sin(\Omega t) \cdot \cos \delta \cdot \frac{\sin \varepsilon}{\cos \alpha}, \quad (2.162)$$

де  $r_0$  – амплітуда коливань;  $\Omega$  – кутова швидкість обертання вала віброзбудника;  $\varepsilon$  – кут між напрямком вібрації і робочою поверхнею (кут спрямованості коливань).

Від співвідношень, за допомогою яких розраховуємо величину моменту опору кочення, залежить від обраної моделі взаємодії насіння з поверхнею. Якщо в якості моделі взаємодії приймаємо модель вдавлювання твердого тіла в м'яку поверхню на встановлену глибину  $\Delta h$ , то вирази, за допомогою яких розраховуємо проєкції моменту опору, мають вигляд:

$$M_{\text{кх}} = -f_{\text{к}} N \cos \mu_{\omega\text{к}}, \quad (2.163)$$

$$M_{\text{кy}} = -f_{\text{к}} N \sin \mu_{\omega\text{к}}, \quad (2.164)$$



$$\mu_{\omega_k} = \operatorname{arctg}\left(\frac{\omega_y}{\omega_x}\right), \quad (2.165)$$

де  $f_k$  – відстань від межі заглиблення насіння до його центру миттєвого обертання (точки контакту);  $\mu_{\omega_k}$  – кут між напрямком перекочування насіння (дотичною складовою вектора кутової швидкості) і віссю  $K_0X$  системи координат робочої поверхні;  $N$  – реакція опору, що обчислюється за допомогою (2.125).

На наведеній схемі  $\Delta h$  є глибина вдавнення твердого насіння в м'яку робочу поверхню. При цьому точка  $K_0$ , від якої відміряється плече дії реакції опору  $N$  щодо миттєвого центру обертання  $K$ , лежить в точці проведення дотичної, яка паралельна вектору кутової швидкості перекочування насіння (вектору дотичної складової кутової швидкості обертання  $\boldsymbol{\omega}_k$ ), до лінії контуру його вдавнення в робочу поверхню. Контур вдавнення має вигляд еліпса, який утворений перетином еліпсоїда насіння площиною, що проходить паралельно робочій поверхні на висоті заглиблення  $\Delta h$  відносно точки  $K$ . Точка  $K$ , в якості миттєвого центру обертання, має для насіння, що розглядається, найменшу за значенням координату  $Z$  в системі координат робочої поверхні.

Напрямок перекочування тіла щодо робочої поверхні визначаємо шляхом проведення осі, перпендикулярної до вектора дотичної складової кутової швидкості обертання  $\boldsymbol{\omega}_k$ .

При розрахунках напрямок перекочування насіння задається за допомогою кута  $\mu_{\omega_k}$ , який має вектор  $\boldsymbol{\omega}_k$  по відношенню до осі  $X$  системи координат робочої поверхні. Напрямок моменту опору коченню  $\mathbf{M}_k$  протилежно напрямку вектора дотичної складової кутової швидкості обертання  $\boldsymbol{\omega}_k$ .

Плече  $f_k$ , яке використовується при визначенні величини моменту опору коченню, обчислюємо на підставі тригонометричних співвідношень, наведених в [124, 125]

$$f_k = |C_h K_u| \cdot \cos(\mu_e - \nu_e), \quad (2.166)$$

$$|C_h K_u| = \sqrt{a_e^2 \cos^2 \nu_e + b_e^2 \sin^2 \nu_e}, \quad (2.167)$$

де  $|C_h K_u|$  – відстань між центром еліпса перетину насіння і точкою докладання реакції опору  $N$ ;  $a_e, b_e$  – півосі еліпса перетину насіння;  $\nu_e$  – кут між напрямком більшої півосі еліпса і відрізком  $|C_h K_u|$ ;  $\mu_e$  – кут між напрямком тиску насіння на кромку його сліду, при вдавлюванні в робочу поверхню, і відрізком  $|C_h K_u|$ . Напрямок тиску насіння на кромку його сліду визначається як перпендикуляр до дотичної складової вектора обертання  $\omega_k$ .

Величини кутів  $\nu_e$  і  $\mu_e$  розраховуються за допомогою виразів:

$$\mu_e = \mu - \alpha_e, \quad (2.168)$$

$$\mu = \frac{\pi}{2} - \mu_{\omega k}, \quad (2.169)$$

$$\nu_e = \arctg\left(\frac{b_e}{a_e} \operatorname{tg} \mu_e\right), \quad (2.170)$$

де  $\mu$  – кут між віссю  $Y_m$  і віссю  $X$  системи координат робочої поверхні;  $\alpha_e$  – кут повороту навколо осі  $Z$  осей системи координат робочої поверхні до їх суміщення з осями системи координат  $X_e Y_e Z_e$ .

Величини  $\alpha_e, a_e$  і  $b_e$  розраховуються за допомогою таких виразів:

$$\alpha_e = \operatorname{arctg} \left( \frac{c_{\text{kn}} - a_{\text{kn}} + \sqrt{(c_{\text{kn}} - a_{\text{kn}})^2 - 4b_{\text{kn}}^2}}{2b_{\text{kn}}} \right), \quad (2.171)$$

$$a_e = \sqrt{\frac{\Delta_{\text{kn}}}{a_1 \delta_{\text{kn}}}}, \quad (2.172)$$

$$b_e = \sqrt{\frac{\Delta_{\text{kn}}}{a_2 \delta_{\text{kn}}}}, \quad (2.173)$$

$$a_1 = \frac{a_{\text{kn}} + c_{\text{kn}} + \sqrt{(a_{\text{kn}} - c_{\text{kn}})^2 + 4b_{\text{kn}}^2}}{2}, \quad (2.174)$$

$$a_2 = \frac{a_{\text{kn}} + c_{\text{kn}} - \sqrt{(a_{\text{kn}} - c_{\text{kn}})^2 + 4b_{\text{kn}}^2}}{2}, \quad (2.175)$$

$$\Delta_{\text{kn}} = a_{\text{kn}} c_{\text{kn}} f_{\text{kn}} + b_{\text{kn}} e_{\text{kn}} d_{\text{kn}} + d_{\text{kn}} b_{\text{kn}} e_{\text{kn}} - d_{\text{kn}}^2 c_{\text{kn}} - e_{\text{kn}}^2 a_{\text{kn}} - b_{\text{kn}}^2 f_{\text{kn}}, \quad (2.176)$$

$$\delta_{\text{kn}} = a_{\text{kn}} c_{\text{kn}} - b_{\text{kn}}^2, \quad (2.177)$$

$$a_{\text{kn}} = \frac{l_1^2}{b^2} + \frac{l_2^2}{a^2} + \frac{l_3^2}{c^2}, \quad (2.178)$$

$$b_{\text{kn}} = \frac{l_1 m_1}{b^2} + \frac{l_2 m_2}{a^2} + \frac{l_3 m_3}{c^2}, \quad (2.179)$$

$$c_{\text{kn}} = \frac{m_1^2}{b^2} + \frac{m_2^2}{a^2} + \frac{m_3^2}{c^2}, \quad (2.180)$$

$$d_{\text{kn}} = (\Delta h - z_{\text{K}}) \cdot \left( \frac{l_1 n_1}{b^2} + \frac{l_2 n_2}{a^2} + \frac{l_3 n_3}{c^2} \right), \quad (2.181)$$

$$e_{\text{kn}} = (\Delta h - z_{\text{K}}) \cdot \left( \frac{m_1 n_1}{b^2} + \frac{m_2 n_2}{a^2} + \frac{m_3 n_3}{c^2} \right), \quad (2.182)$$

$$f_{\text{кн}} = (\Delta h - z_{\text{к}}) \cdot \left( \frac{n_1^2}{b^2} + \frac{n_2^2}{a^2} + \frac{n_3^2}{c^2} \right) - 1, \quad (2.183)$$

де  $l_1, l_2, \dots, n_3$  – направляючі косинуси осей власної системи координат насіння (еліпсоїда) щодо осей системи координат робочої поверхні;  $\Delta h$  – задана величина заглиблення твердого насіння в робочу поверхню;  $z_{\text{к}}$  – апліката точки  $K$  миттєвого центру обертання насіння в даний момент часу  $t$  в системі координат робочої поверхні;  $a, b, c$  – півосі еліпсоїда, які є моделлю форми насіння.

Проекції радіус-вектора  $\mathbf{R}_{\text{C}}$  у системі координат робочої поверхні розраховуємо за допомогою наступних виразів:

$$R_{\text{Cx}} = -x'_{\text{к}}l_1 - y'_{\text{к}}l_2 - z'_{\text{к}}l_3, \quad (2.184)$$

$$R_{\text{Cy}} = -x'_{\text{к}}m_1 - y'_{\text{к}}m_2 - z'_{\text{к}}m_3, \quad (2.185)$$

$$R_{\text{Cz}} = -x'_{\text{к}}n_1 - y'_{\text{к}}n_2 - z'_{\text{к}}n_3, \quad (2.186)$$

де  $x'_{\text{к}}, y'_{\text{к}}, z'_{\text{к}}$  – координати точки контакту (миттєвого центру обертання) насіння з робочою поверхнею у власній системі координат. Точка контакту  $K$  визначається як та дискретна точка тіла, при заданому кроці розбиття еліпсоїда на дискретні ділянки, яка на даний момент часу  $t$  має найменше значення координати по осі  $Z$  у системі координат робочої поверхні. Перерахунок координат встановлених дискретних точок розбиття поверхні еліпсоїда з власної системи координат  $X'Y'Z'$  у систему координат робочої поверхні  $XYZ$  здійснюється аналогічно перерахунку координат радіус-вектора  $\mathbf{R}_{\text{C}}$ :

$$x_{1\text{м}} = x'_{1\text{м}}l_1 + y'_{1\text{м}}l_2 + z'_{1\text{м}}l_3, \quad (2.187)$$

$$y_{1\text{м}} = x'_{1\text{м}}m_1 + y'_{1\text{м}}m_2 + z'_{1\text{м}}m_3, \quad (2.188)$$

$$z_{1\text{м}} = x'_{1\text{м}}n_1 + y'_{1\text{м}}n_2 + z'_{1\text{м}}n_3, \quad (2.189)$$

де  $x_{1m}, y_{1m}, z_{1m}$  – координати точки поверхні насіння, яка встановлена шляхом перетину 1-го меридіана і  $m$ -ої паралелі, в системі координат робочої поверхні;  $x'_{1m}, y'_{1m}, z'_{1m}$  – координати відповідної точки поверхні насіння в його власній системі координат  $X'Y'Z'$ .

Значення координат точок розбиття поверхні насіння в його власній системі координат розраховуємо за допомогою наступних виразів:

$$x'_{1m} = l_{1m} \cdot a \cdot b \cdot c \cdot A_1, \quad (2.190)$$

$$y'_{1m} = m_{1m} \cdot a \cdot b \cdot c \cdot A_1, \quad (2.191)$$

$$z'_{1m} = n_{1m} \cdot a \cdot b \cdot c \cdot A_1, \quad (2.192)$$

$$A_1 = \sqrt{\frac{1}{a^2 c^2 l_{1m}^2 + b^2 c^2 m_{1m}^2 + a^2 b^2 n_{1m}^2}}, \quad (2.193)$$

$$l_{1m} = \cos[(l-1)\Delta\xi] \cdot \sin[(m-1)\Delta\zeta], \quad (2.194)$$

$$m_{1m} = \sin[(l-1)\Delta\xi] \cdot \sin[(m-1)\Delta\zeta], \quad (2.195)$$

$$n_{1m} = -\cos[(m-1)\Delta\zeta], \quad (2.196)$$

де  $l, m$  – номери індексів, що визначають меридіан і паралель, за допомогою яких здійснено розбиття поверхні еліпсоїда на дискретні ділянки;  $\Delta\xi, \Delta\zeta$  – кутовий крок розбиття насіння по довготі і широті, відповідно;  $l_{1m}, m_{1m}, n_{1m}$  – направляючі косинуси радіус-векторів, проведених з центру маси насіння в дискретну точку на поверхні, яка утворена перетином  $l$ -го меридіана і  $m$ -ої паралелі.

Для розрахунку аеродинамічних сил і моментів, що діють на насіння в потоці повітря, застосовується методика підсумовування сил опору, бічних сил, а також повертаючих аеродинамічних моментів, розрахованих для плоских перерізів насіння. Плоскі перерізи отримуються шляхом покрокового розбиття насіння, що займає певне положення в просторі, при просуванні уздовж осей координат системи координат робочої поверхні. Значення

перерахованих аеродинамічних характеристик для утворюваних плоских перерізів насіння розраховуються за допомогою методики, викладеної в додатку А.

Розрахунок аеродинамічних характеристик ведеться окремо для кожної проєкції вектору швидкості повітряного потоку в точці розташування центру тяжіння насіння. Поле швидкостей, залежно від часу для об'єму повітря, що знаходиться між двома паралельними робочими площинами ВФНС, розраховується за допомогою методики, викладеної в п. 2.2.

Для кожної проєкції вектора швидкості повітря в точці робочого простору, що розглядається, розбивка насіння на паралельні плоскі перерізи ведеться в двох перпендикулярних площинах. На рис. 2.21 наведений приклад такого розбиття для проєкції швидкості повітря на вісь  $Y$  у точці місця розташування центру тяжіння насіння (у точці  $C$ )  $v_C$ .

Відбувається покрокове розбиття насіння за допомогою площин, паралельних осям  $Z$  і  $Y$  (вертикальні площини), і площин, паралельних осям  $X$  і  $Y$  (горизонтальні площини). Для вертикальних перерізів  $i=1, \dots, L_X/\Delta L$ , де  $L_X$  – максимальний горизонтальний габаритний розмір проєкції насіння на площину  $Z, X, \Delta L$ ,  $\Delta L$  – крок просування по осі  $X$ , при отриманні плоских паралельних перерізів насіння, розраховується:

$$- \text{сила аеродинамічного опору } R_i^{\text{оп.}(zy)} = \frac{\rho \cdot v_C^2}{2} \cdot C_x(\alpha_i^{(zy)}) \cdot \Delta L \cdot b_i^{(zy)}, \text{ де}$$

$\rho$  – щільність повітря,  $C_x(\alpha_i^{(zy)})$  – аеродинамічний коефіцієнт сили опору плоского профілю, розташованого до повітряного потоку під кутом атаки  $\alpha_i^{(zy)}$ ,  $b_i^{(zy)}$  – хорда утвореного перерізу насіння;

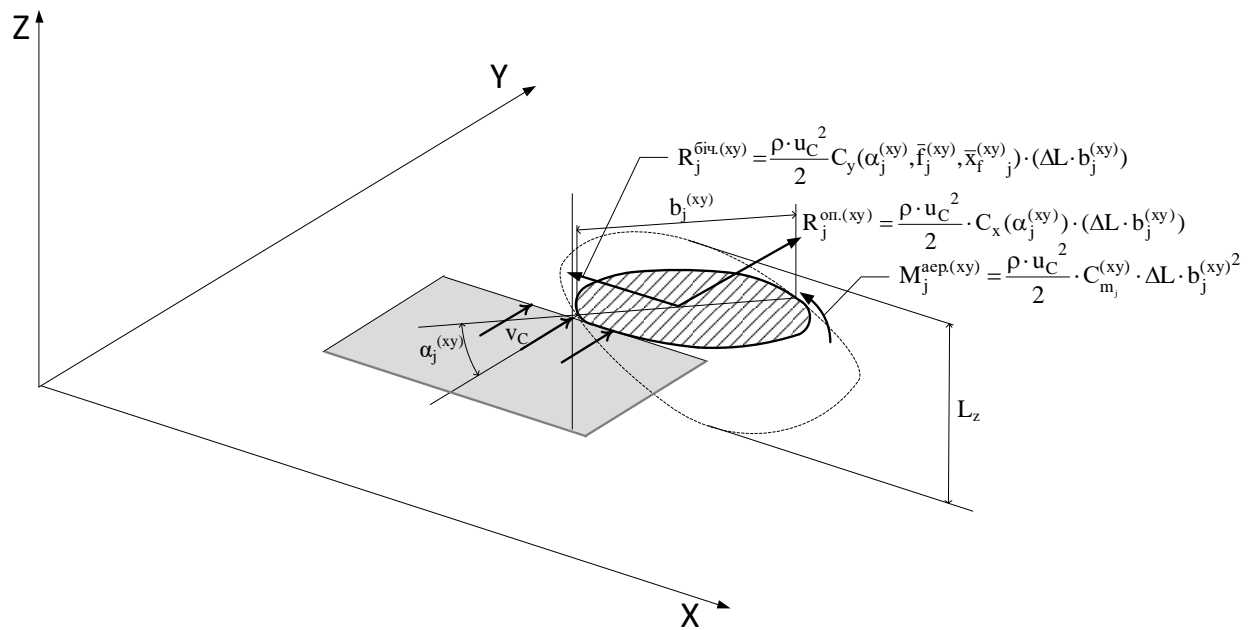
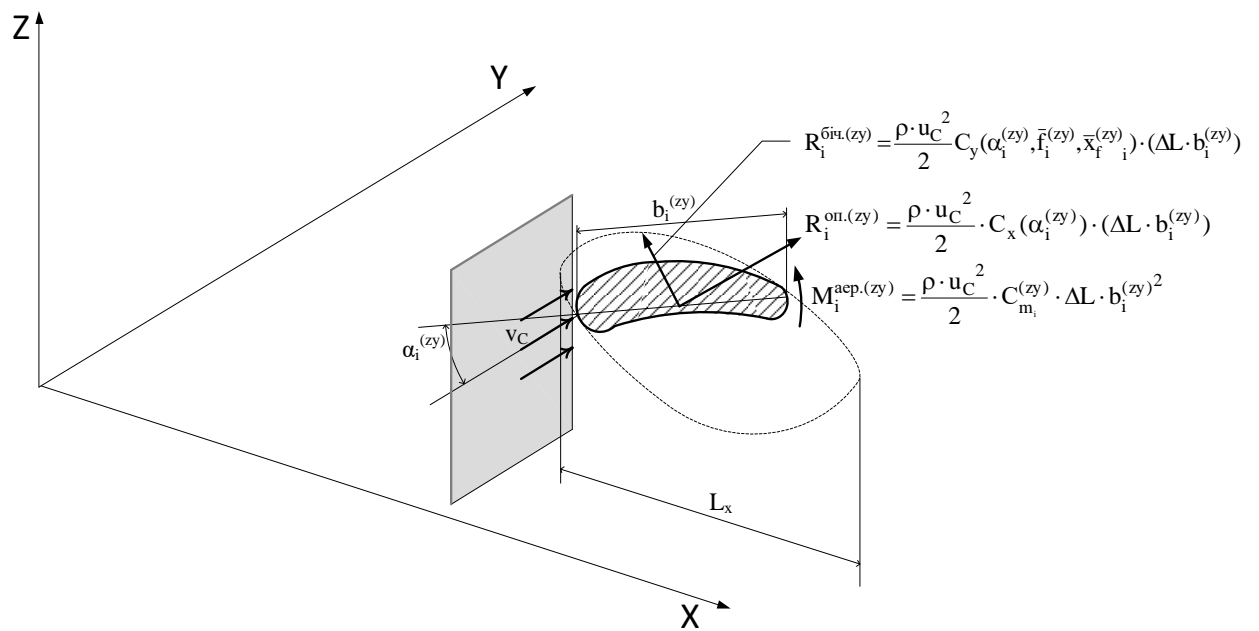


Рисунок 2.21 – Розрахунок аеродинамічних сил і моментів для проєкції швидкості повітря на вісь Y системи координат робочої поверхні

– бічна сила  $R_i^{\text{біч.}(zy)} = \frac{\rho \cdot v C^2}{2} \cdot C_y(\alpha_i^{(zy)}, \bar{f}_i^{(zy)}, \bar{x}_{f_i}^{(zy)}) \cdot \Delta L \cdot b_i^{(zy)}$ , де

$C_y(\alpha_i^{(zy)}, \bar{f}_i^{(zy)}, \bar{x}_{f_i}^{(zy)})$  – аеродинамічний коефіцієнт підйомної (бічної) сили, що діє на плоский профіль (переріз насіння), який має, по відношенню до потоку, кут атаки  $\alpha_i^{(zy)}$ , кривизну профілю  $\bar{f}_i^{(zy)}$  і відносне віддалення від носка місця розташування максимальної кривизни профілю  $\bar{x}_{f_i}^{(zy)}$ ;

– аеродинамічний момент  $M_i^{\text{аер.}(zy)} = \frac{\rho \cdot v C^2}{2} \cdot C_{m_i}^{(zy)} \cdot \Delta L \cdot b_i^{(zy)^2}$ , де

$C_{m_i}^{(zy)}$  – коефіцієнт аеродинамічного моменту, що повертає плоский профіль з вказаними характеристиками навколо осі, паралельній осі  $X$ .

Для горизонтальних перерізів  $j=1, \dots, L_z/\Delta L$ , де  $L_z$  – максимальний вертикальний габаритний розмір проєкції насіння на площину  $Z, X$ , розраховується:

– сила аеродинамічного опору  $R_j^{\text{оп.}(xy)} = \frac{\rho \cdot v C^2}{2} \cdot C_x(\alpha_j^{(xy)}) \cdot \Delta L \cdot b_j^{(xy)}$ , де

$C_x(\alpha_j^{(xy)})$  – аеродинамічний коефіцієнт сили опору плоского профілю, паралельного площині  $XU$  і поверненого до повітряного потоку під кутом атаки  $\alpha_j^{(xy)}$ ;  $b_j^{(xy)}$  – хорда цього перерізу насіння (паралельного площині  $XU$ );

– бічна сила  $R_j^{\text{біч.}(xy)} = \frac{\rho \cdot v C^2}{2} \cdot C_y(\alpha_j^{(xy)}, \bar{f}_j^{(xy)}, \bar{x}_{f_j}^{(xy)}) \cdot \Delta L \cdot b_j^{(xy)}$ , де

$C_y(\alpha_j^{(xy)}, \bar{f}_j^{(xy)}, \bar{x}_{f_j}^{(xy)})$  – аеродинамічний коефіцієнт бічної сили, що діє на горизонтальний переріз насіння, який має кут атаки  $\alpha_j^{(xy)}$ , кривизну профіля



$\bar{f}_j^{(xy)}$  і відносне віддалення від носка місця розташування максимальної кривизни  $\bar{x}_{f_j}^{(xy)}$ ;

– аеродинамічний момент  $M_j^{\text{аер.}(xy)} = \frac{\rho \cdot v_C^2}{2} \cdot C_{m_j}^{(xy)} \cdot \Delta L \cdot b_j^{(xy)^2}$ , де

$C_{m_j}^{(xy)}$  – коефіцієнт аеродинамічного моменту, що повертає плоский горизонтальний профіль навколо осі, паралельній осі  $Z$ .

Геометричні характеристики плоских перерізів: хорда  $b_i^{(zy)}$  і  $b_j^{(xy)}$ ; відносна кривизна  $\bar{f}_i^{(zy)}$  і  $\bar{f}_j^{(xy)}$ , а також віддалення від носка місця розташування максимальної кривизни  $\bar{x}_{f_i}^{(zy)}$  і  $\bar{x}_{f_j}^{(xy)}$ , розраховуються за допомогою співвідношень, які приведені в додатку Б "Методика визначення геометричних характеристик перерізів насіння, що приводяться до характеристик еталонних аеродинамічних профілів".

Кути атаки для вертикальних і горизонтальних перерізів по відношенню до проєкції вектора швидкості  $v_C$ , розраховуються за допомогою співвідношень, які мають вигляд:

$$\alpha_i^{(zy)} = \arccos \left( \frac{\max_{k=1, \dots, K} \{y_{i,k}^{(zy)}\} - \min_{k=1, \dots, K} \{y_{i,k}^{(zy)}\}}{b_i^{(zy)}} \right), \quad (2.197)$$

$$\alpha_j^{(xy)} = \arccos \left( \frac{\max_{s=1, \dots, S} \{y_{j,s}^{(xy)}\} - \min_{s=1, \dots, S} \{y_{j,s}^{(xy)}\}}{b_j^{(xy)}} \right), \quad (2.198)$$

де  $y_{i,k}^{(zy)}, k = 1, \dots, K, y_{j,s}^{(xy)}, s = 1, \dots, S$  – ординати (у системі координат робочої поверхні) точок ламаної, що утворює контур вертикального, на  $i$ -му кроці розбивки, і, відповідно, горизонтального, на  $j$ -му кроці розбивки,

перетину насіння;  $K, S$  – кількість вузлів, що утворюють контури вертикального і горизонтального перерізів.

Використовувані в (2.197), (2.198) координати точок контурів плоских перерізів об'ємного тіла, яке утворене з безліч трикутних або трапецієвидних граней, розраховуються за допомогою виразів (Б.1) – (Б.8) у додатку Б. При цьому значення координат вузлових точок граней об'ємного тіла, поверненого і зміщеного відносно системи координат робочої поверхні, визначаються за допомогою формул (2.187) – (2.189).

Для проєкцій швидкості повітря на вісь  $X$  і вісь  $Z$ ,  $u_C$  і  $w_C$ , відповідно, також розраховуються аеродинамічні характеристики перерізів.

В цілому для насіння сумарні аеродинамічні сили і моменти, записані в системі координат робочої поверхні, можуть бути визначені за допомогою наступних співвідношень.

Аеродинамічна сила, що діє уздовж осі  $Y$ , представлена сумою: сили опору від дії складової швидкості повітря уздовж осі  $Y$ ,  $v_C$ ; бічної сили від дії складової швидкості повітря уздовж осі  $Z$ ,  $w_C$ ; бічної сили від дії складової швидкості повітря уздовж осі  $X$ ,  $u_C$ :

$$\begin{aligned}
 R_y^{\text{аер.}} = & \frac{\rho \cdot v_C^2}{2} \cdot \sum_{j=1}^{L_x/\Delta L} C_x(\alpha_j^{(zy)}) \cdot \Delta L \cdot b_j^{(zy)} + \\
 & + \frac{\rho \cdot w_C^2}{2} \cdot \sum_{j=1}^{L_x/\Delta L} C_y(\alpha_j^{(yz)}, \bar{f}_j^{(yz)}, \bar{x}_{f_j}^{(yz)}) \cdot \Delta L \cdot b_j^{(yz)} + \\
 & + \frac{\rho \cdot u_C^2}{2} \cdot \sum_{j=1}^{L_z/\Delta L} C_y(\alpha_j^{(xy)}, \bar{f}_j^{(xy)}, \bar{x}_{f_j}^{(xy)}) \cdot \Delta L \cdot b_j^{(xy)}.
 \end{aligned} \quad (2.199)$$

Оскільки величина сили аеродинамічного опору насіння від дії складової швидкості повітря уздовж осі  $Y$ , при її обчисленні за допомогою розбиття на горизонтальні або вертикальні перерізи, не змінюється, то в (2.114) можна використати будь-який спосіб обчислення цього аеродинамічного компонента:

$$\sum_{i=1}^{L_x/\Delta L} R_i^{\text{опр.}(zy)} = \sum_{j=1}^{L_z/\Delta L} R_j^{\text{опр.}(xy)}$$

або

$$\frac{\rho \cdot v_C^2}{2} \cdot \sum_{i=1}^{L_x/\Delta L} C_x(\alpha_i^{(zy)}) \cdot \Delta L \cdot b_i^{(zy)} = \frac{\rho \cdot v_C^2}{2} \cdot \sum_{j=1}^{L_z/\Delta L} C_x(\alpha_j^{(xy)}) \cdot \Delta L \cdot b_j^{(xy)}.$$

Аеродинамічний момент, що повертає насіння навколо осі, паралельній осі  $Y$ , обчислюється як сума: аеродинамічного моменту від дії складової швидкості повітря, спрямованої уздовж осі  $X$ ,  $u_C$  і аеродинамічного моменту від дії складової швидкості повітря, спрямованої уздовж осі  $Z$ ,  $w_C$ :

$$M_y^{\text{аер.}} = \frac{\rho \cdot u_C^2}{2} \cdot \sum_{j=1}^{L_y/\Delta L} C_{m_j}^{(xz)} \cdot \Delta L \cdot b_j^{(xz)^2} + \frac{\rho \cdot w_C^2}{2} \cdot \sum_{j=1}^{L_y/\Delta L} C_{m_j}^{(zx)} \cdot \Delta L \cdot b_j^{(zx)^2}. \quad (2.200)$$

По аналогії з (2.199) і (2.200) можна записати:

$$R_x^{\text{аер.}} = \frac{\rho \cdot u_C^2}{2} \cdot \sum_{j=1}^{L_y/\Delta L} C_x(\alpha_j^{(xz)}) \cdot \Delta L \cdot b_j^{(xz)} + \frac{\rho \cdot v_C^2}{2} \cdot \sum_{j=1}^{L_z/\Delta L} C_y(\alpha_j^{(yz)}, \bar{f}_j^{(yz)}, \bar{x}_{f_j}^{(yz)}) \cdot \Delta L \cdot b_j^{(yz)} + \frac{\rho \cdot w_C^2}{2} \cdot \sum_{j=1}^{L_y/\Delta L} C_y(\alpha_j^{(xz)}, \bar{f}_j^{(xz)}, \bar{x}_{f_j}^{(xz)}) \cdot \Delta L \cdot b_j^{(xz)}. \quad (2.201)$$

$$R_z^{\text{аер.}} = \frac{\rho \cdot w_C^2}{2} \cdot \sum_{j=1}^{L_y/\Delta L} C_x(\alpha_j^{(xz)}) \cdot \Delta L \cdot b_j^{(xz)} + \frac{\rho \cdot u_C^2}{2} \cdot \sum_{j=1}^{L_y/\Delta L} C_y(\alpha_j^{(xz)}, \bar{f}_j^{(xz)}, \bar{x}_{f_j}^{(xz)}) \cdot \Delta L \cdot b_j^{(xz)} + \frac{\rho \cdot v_C^2}{2} \cdot \sum_{j=1}^{L_z/\Delta L} C_y(\alpha_j^{(yz)}, \bar{f}_j^{(yz)}, \bar{x}_{f_j}^{(yz)}) \cdot \Delta L \cdot b_j^{(yz)}. \quad (2.202)$$

$$M_x^{\text{аер.}} = \frac{\rho \cdot v_C^2}{2} \cdot \sum_{j=1}^{L_x/\Delta L} C_{mj}^{(yz)} \cdot \Delta L \cdot b_j^{(yz)^2} + \frac{\rho \cdot w_C^2}{2} \cdot \sum_{j=1}^{L_x/\Delta L} C_{mj}^{(zy)} \cdot \Delta L \cdot b_j^{(zy)^2}. \quad (2.203)$$

$$M_z^{\text{аер.}} = \frac{\rho \cdot v_C^2}{2} \cdot \sum_{j=1}^{L_z/\Delta L} C_{mj}^{(yx)} \cdot \Delta L \cdot b_j^{(yx)^2} + \frac{\rho \cdot u_C^2}{2} \cdot \sum_{j=1}^{L_z/\Delta L} C_{mj}^{(xy)} \cdot \Delta L \cdot b_j^{(xy)^2}. \quad (2.204)$$

Вирази (2.115) – (2.204), приведені вище, у своїй сукупності, є математичною моделлю безвідривного руху насіння з вираженими аеродинамічними характеристиками по нахилій віброуючій поверхні з урахуванням дії з боку повітря. Рух насіння може відбуватися в двох режимах:

- з коченням і проковзуванням;
- з коченням без проковзування.

У разі розгляду режиму руху з коченням без проковзування, з рівнянь (2.120) – (2.125) виключаються складові  $\ddot{x}_{\text{ск}}(t)$  і  $\ddot{y}_{\text{ск}}(t)$ , які прирівнюються до нуля. В результаті рішення рівнянь руху визначаються тільки значення кутів повороту осей власної системи координат тіла  $\theta(t)$ ,  $\psi(t)$  і  $\varphi(t)$ .

У разі розгляду другого режиму руху (з коченням і проковзуванням) вирішується повна система рівнянь і визначаються як характеристики проковзування, так і характеристики кочення.

В якості критерію для визначення режиму руху тіла використовується наступне співвідношення.

Проковзування в точці контакту відбувається в тому випадку, якщо величина сили зсуву  $F_{\text{зс}}$  перевищує силу тертя, яка утримує тіло від зсуву. Утримуючу силу тертя визначасмо за допомогою коефіцієнта тертя спокою  $f_{\text{сп}}$ . Тобто, умова вибору режиму руху насіння з проковзуванням і коченням може бути записана як:

$$F_{3c} > N \cdot f_{\text{сп}}. \quad (2.205)$$

Умова руху насіння без проковзування, тільки з коченням, набуде вигляду:

$$F_{3c} \leq N \cdot f_{\text{сп}}. \quad (2.206)$$

Величину сили зсуву  $F_{3c}$  обчислюємо за допомогою виразів:

$$F_{3c} = \sqrt{F_{3cx}^2 + F_{3cy}^2}, \quad (2.207)$$

$$F_{3cx} = G_x - m \frac{d\omega_y}{dt} R_{Cz} + m \frac{d\omega_z}{dt} R_{Cy} - m(\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{R}_C) \omega_x + m\omega^2 R_{Cx} - m\ddot{r}_{\text{вб.х}} + R_x^{\text{аер.}}, \quad (2.208)$$

$$F_{3cy} = G_y - m \frac{d\omega_z}{dt} R_{Cx} + m \frac{d\omega_x}{dt} R_{Cz} - m(\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{R}_C) \omega_y + m\omega^2 R_{Cy} - m\ddot{r}_{\text{вб.у}} + R_y^{\text{аер.}}. \quad (2.209)$$

Система алгебраїчних рівнянь у кінцево-різницевої формі та алгоритм розрахунку щодо розв'язання системи диференціальних рівнянь (2.120) – (2.125) наведено у додатку В система алгебраїчних рівнянь в кінцево-різницевої формі та алгоритм розрахунку.

### 2.3.2 Результати моделювання вібраційного руху насінини з урахуванням дії аеродинамічних сил та моментів

Для ілюстрування працездатності запропанованої математичної моделі вібраційного руху насіння проведено моделювання руху насінини визначеної форми з встановленою масою. Насінина розміщувалась в точці початку системи координат робочої поверхні,  $X_0, Y_0$ . Для неї задавалась початкова орієнтація відносно робочої площини за допомогою кутів Ейлера  $\theta_0, \psi_0, \varphi_0$ . Ці дані відповідали нульовому моменту часу,  $t_0=0$ . Відбувалось інтегрування віброфрикційного руху насіння по нахилій шорсткій поверхні без урахування аеродинаміки:  $R_x^{\text{аер.}}(t) = R_y^{\text{аер.}}(t) = R_z^{\text{аер.}}(t) = 0$  і  $M_x^{\text{аер.}}(t) = M_y^{\text{аер.}}(t) =$

$M_z^{\text{aep.}}(t) = 0$  та з урахуванням аеродинаміки: значення аеродинамічних сил та моментів обчислювалися за допомогою (2.199) – (2.204).

На рис. 2.22 наведено результати моделювання віброфрикційного руху насінини пастернаку без урахування та з урахуванням аеродинаміки.

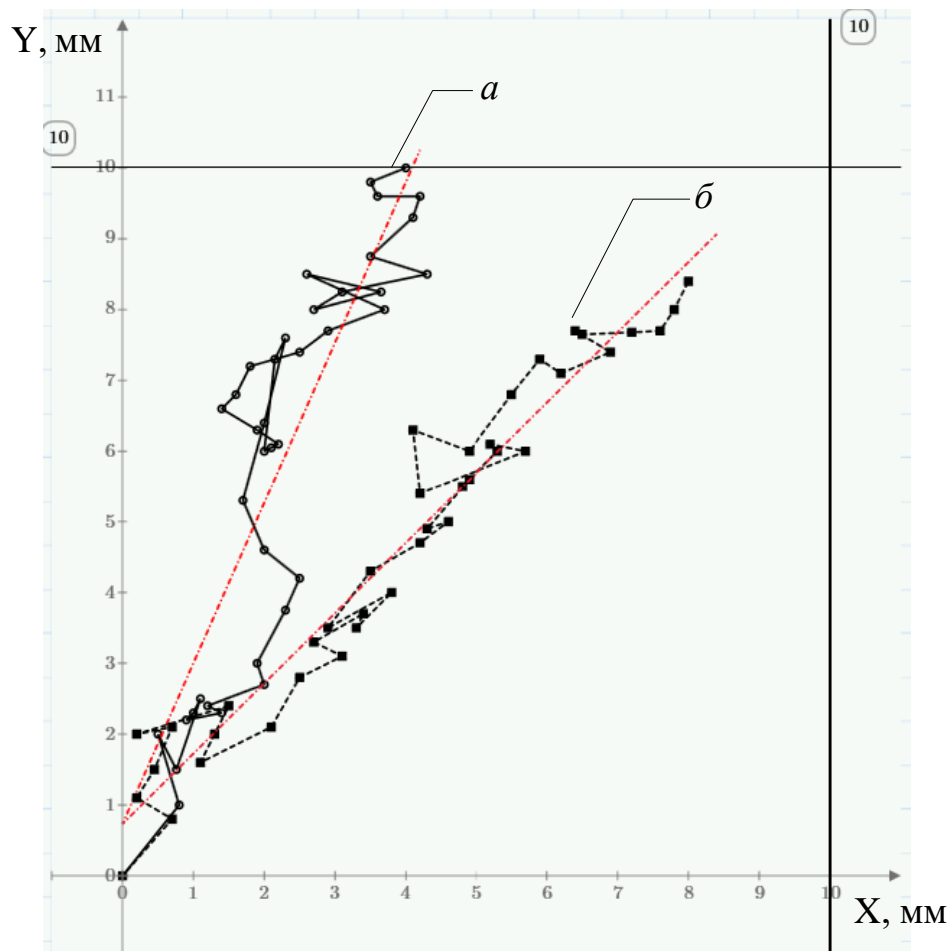


Рисунок 2.22 – Результати моделювання віброфрикційного руху насінини пастернаку: а) без урахування та б) з урахуванням аеродинамічних сил та моментів

Напрямок руху насіння апроксимований за допомогою прямої лінії (червона штрихпунктирна лінія на рис. 2.22):

$$Y = a_0 + a_1 X, \quad (2.210)$$

де  $a_0$ ,  $a_1$  – постійні коефіцієнти, значення яких обчислюються за допомогою методу найменших квадратів:

$$a_1 = \frac{N \sum_{i=1}^N X_i Y_i - \sum_{i=1}^N X_i \sum_{i=1}^N Y_i}{N \sum_{i=1}^N X_i^2 - \left( \sum_{i=1}^N X_i \right)^2}, \quad (2.211)$$

$$a_0 = \frac{\sum_{i=1}^N Y_i - a_1 \sum_{i=1}^N X_i}{N}, \quad (2.212)$$

де  $(X_i; Y_i)$  – координати місцезнаходження центра маси насіння в системі координат робочої площини на  $i$ -му кроці обчислень;  $N$  – кількість кроків інтегрування системи рівнянь віброфрикційного руху.

Як видно, з наведених результатів, вплив знакозмінного повітряного потоку ускладнює просування насіння відносно робочої поверхні під дією вібраційних імпульсів. Траєкторія руху насіння, де враховано дію аеродинамічних сил та моментів (траєкторія руху, утворена позначками у вигляді чорних квадратів та позначена літерою «б»), складається з помітно більшої кількості кроків-переміщень. Кожен такий крок, що отримується під впливом імпульсу руху робочої поверхні має меншу довжину. Також в результаті впливу знакозмінного повітряного потоку, спостерігається більше відхилення апроксимуючої осі в сторону скоочування насіння. Має місце менш гострий кут апроксимуючої осі руху насіння по відношенню до осі  $Y$ . Різниця кутів апроксимуючих ліній руху насіння по відношенню до осі  $Y$  без урахування і з урахуванням аеродинаміки становить 15-25% [7].

Отримані результати пояснюються тим, що при впливі рухомого повітря на насіння, спостерігається зростання опору ковзання або кочення, особливо в напрямку дії віброфрикційного імпульсу внаслідок спрямованості поля швидкостей повітря. Наприклад, при русі робочих поверхонь ВФНС вгору, на насінину діє механічний імпульс руху, який передається за рахунок дії сили тертя ковзання,  $F^T$  (рис. 2.23). Чим більше сила тертя, тим більший імпульс руху передається за рахунок вібрації. Разом з цим, в цій фазі коливань блоку робочих поверхонь виникає відносний рух повітря, тангенційна складова якого спрямована у протилежний бік. Виникає аеродинамічний опір віброфрикційному руху частинок домішок та насіння. Цей опір викликаний,

по-перше, дією аеродинамічної сили лобового опору,  $F^l$  та, по-друге, дією аеродинамічної підйомної сили,  $F^п$ . Перша складова ускладнює віброфрикційний рух та змушує частинки домішок та насіння рухатися за повітряним потоком. Друга складова зменшує силу реакції опори ( $N$ ) за рахунок підйому частинок домішок та насіння. Зменшується дія сил тертя. Внаслідок цього зменшується імпульс руху, що передається за рахунок вібрації. Чим більш виражені аеродинамічні властивості частинок насінневого матеріалу, тим більший опір для їх віброфрикційного переміщення завдають аеродинамічні сили та моменти.

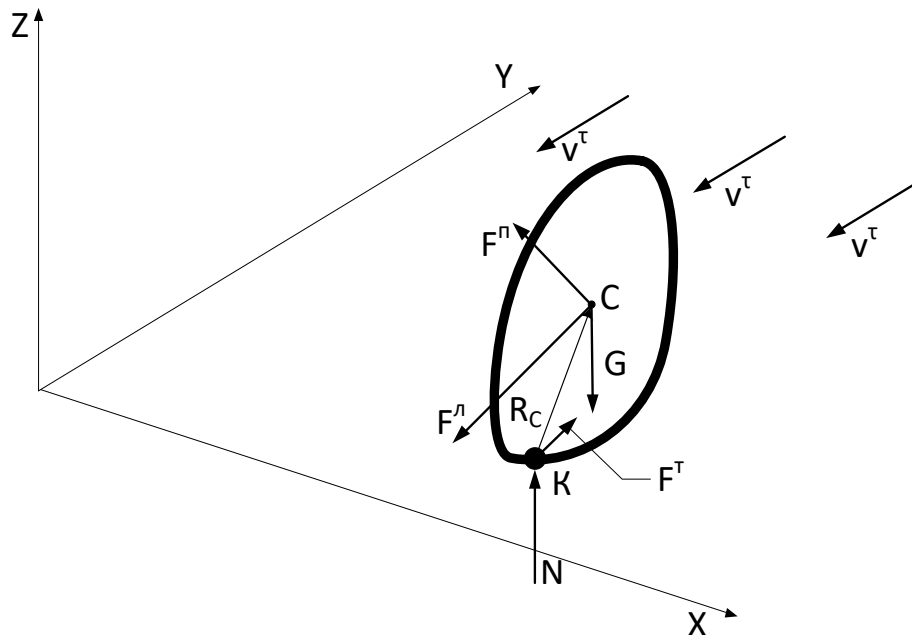


Рисунок 2.23 – Аеродинамічний опір віброфрикційному переміщенню насінини з боку аеродинамічних сил та моментів

Це призводить до зниження ефективності розділення насінневого матеріалу за допомогою ВФНС. Відбувається збільшення кутів розкриття секторів можливих траєкторій віброфрикційного руху насінин, що належать відповідним фракціям насінневого матеріалу. Збільшується перекриття секторів можливих траєкторій та, внаслідок цього, перемішування насінини з різних фракцій. Ефективність ВФНС щодо розділення насіння падає.



## 2.4 Висновки по розділу

1. Представлена математична модель віброфрикційного руху насіння з аеродинамічними властивостями по нахиленій шорсткій поверхні з урахуванням дії аеродинамічних сил і моментів. Модель складається з наступних складових елементів:

- визначення аеродинамічних сил і моментів, що діють на насіння довільної форми, яке знаходиться в потоці повітря;
- визначення параметрів руху повітря під впливом паралельних робочих площин ВФНС, що коливаються синхронно;
- визначення параметрів віброфрикційного руху насіння по нахиленій шорсткій поверхні, що здійснює гармонічні коливання, з урахуванням впливу на насіння аеродинамічних сил і моментів.

2. Для визначення аеродинамічних сил і моментів, що діють на насіння довільної (встановленої) форми, запропоновано використовувати відому аналітичну методику оцінки аеродинамічних характеристик плоских аеродинамічних профілів. Насіння розглядається як сукупність плоских аеродинамічних профілів (перетинів), одержуваних шляхом перетину насіння площинами, паралельними вектору швидкості набігаючого повітряного потоку. Для кожного плоского перетину, за допомогою відомих аналітичних залежностей, визначаються коефіцієнти аеродинамічних сил (сили опору і бічної (підйомної) сили), а також аеродинамічного моменту. Загальна аеродинамічна сила і загальний аеродинамічний момент визначаються шляхом підсумовування елементарних аеродинамічних сил і моментів.

3. Для визначення параметрів руху повітря в області між двома паралельними робочими площинами, що синхронно коливаються, запропоновано здійснювати за допомогою рівняння Ейлера, що описує процес руху ідеального газу, а також співвідношення нерозривності суцільного середовища. Отримана система диференціальних рівнянь газодинаміки в часткових похідних приводиться до крайової задачі з граничними умовами,

записаними для кінематичних параметрів гармонійного руху робочих площин ВФНС. Чисельне рішення сформульованої крайової задачі здійснюється методом прогонки. На основі розробленої методики створено розрахунковий алгоритм, що дозволяє обчислювати тривимірне поле швидкостей і тисків повітряної області, що змінюється за часом і розміщене між робочими площинами блоку ВФНС.

4. За допомогою газодинамічної моделі визначення поля швидкостей та тиску повітря, шляхом варіювання граничних умов для крайової задачі, досліджений вплив конструкційно-режимних параметрів ВФНС на характеристики знакозмінного повітряного потоку в робочій області. Показано, що на поле швидкостей повітря впливають: відстань між робочими площинами, амплітуда коливань та конструкція аеродинамічних екранів. Враховуючи те, що варіювання перших двох параметрів обмежене вимогами налаштування параметрів технологічного процесу вібросепарації насіння, аеродинамічні екрани залишаються єдиним засобом усунення впливу знакозмінного потоку повітря.

5. При визначенні кінематичних параметрів руху насіння по нахиленій шорсткій поверхні, що здійснює гармонічні коливання з урахуванням впливу на насіння аеродинамічних сил і моментів, використано математичну модель механіки руху насіння в режимі перекочування з проковзуванням. Систему диференціальних рівнянь складено на основі балансу сил і моментів твердого тіла встановленої форми, що рухається по шорсткій поверхні та доповнено аеродинамічними силами і моментами, які обчислюються за допомогою представлених в роботі часткових методик. Цей підхід надає формалізований опис механізму впливу аеродинамічних сил та моментів на кінематичні параметри віброфрикційного руху насіння.

6. Вплив знакозмінного повітряного потоку проявляється як збільшення кутів розкриття секторів можливих траєкторій насінин з однієї фракції та збільшення кутів перекриття секторів для різних фракцій насінневого

матеріалу. На підставі цих даних можна побудувати показник вимірювання ступеня зниження ефективності ВФНС щодо розділення дрібнонасінневих матеріалів за рахунок впливу знакозмінного повітряного потоку.

7. Створена комплексна модель віброфрикційного безвідривного руху насіння з урахуванням дії аеродинамічних сил та моментів дозволяє кількісно обґрунтовувати раціональні конструкційно-режимні параметри ВФНС з метою підвищення ефективності вібросепарації насінневого матеріалу з аеродинамічними властивостями.

РОЗДІЛ 3  
 ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНО-РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ  
 ВІБРОФРИКЦІЙНОГО НАСІННЕВОГО СЕПАРАТОРА

3.1 Методика обґрунтування конструкційно-режимних параметрів ВФНС з аеродинамічним екраном

В якості конструкційно-режимних параметрів ВФНС з аеродинамічним екраном маються на увазі:

- конструкційні параметри аеродинамічного екрану:  $d/H$  – висота вертикальної стінки екрану у відношенні до вертикального зазору між двома робочими поверхнями блоку ВФНС;  $z/H$  – відстань аеродинамічного екрану від торця робочого блоку у відношенні до вертикального зазору (рис. 3.1);
- вертикальний зазор між двома робочими поверхнями робочого блоку,  $H$ ;
- амплітуда коливань,  $A$ .

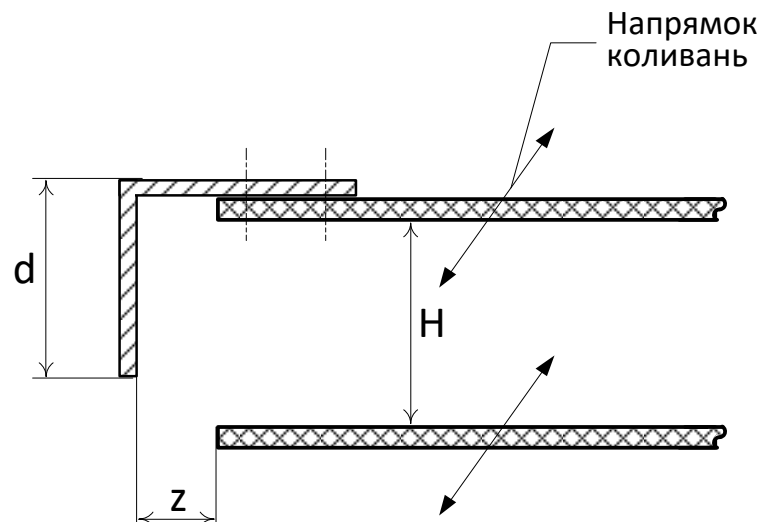


Рисунок 3.1 – Конструкційні характеристики аеродинамічного екрану

Обґрунтування раціональних конструкційно-режимних параметрів ВФНС здійснюється за критерієм мінімізації ступеня впливу знакозмінного повітряного потоку на якість вібросепарації насінневого матеріалу при

урахуванні обмежень на припустимі діапазони змінювання конструкційно-режимних параметрів:

$$K(\mathbf{X}) = \min, \quad \mathbf{X} \in \mathbf{X}^{\text{пр}}, \quad (3.1)$$

де  $K(\mathbf{X})$  – показник вимірювання відносного змінення ступеня впливу знакозмінного повітряного потоку на якість вібросепарації насінневого матеріалу у відношенні до встановленого еталону (процесу вібросепарації, де аеродинамічні сили та моменти відсутні);  $\mathbf{X} = \{d/H; z/H; H; A\}$  – вектор конструкційно-режимних параметрів;  $\mathbf{X}^{\text{пр}}$  – область припустимих значень конструкційно-режимних параметрів.

Показник вимірювання відносного змінення ступеню впливу аеродинамічного фактору обчислюється за допомогою наступного виразу:

$$K(\mathbf{X}) = \frac{\sum_{i=1}^{N^{\Phi}} (\delta_i^a + \Delta_i^a)}{\sum_{i=1}^{N^{\Phi}} (\delta_i^b + \Delta_i^b)}, \quad (3.2)$$

$$\Delta_i = \begin{cases} (\varphi_i + \delta_i) - (\varphi_{i+1} + \delta_{i+1}), & \text{якщо } (\varphi_i + \delta_i) - (\varphi_{i+1} + \delta_{i+1}) \geq 0, \\ 0, & \text{якщо } (\varphi_i + \delta_i) - (\varphi_{i+1} + \delta_{i+1}) < 0 \text{ або } i = N^{\Phi}, \end{cases} \quad (3.3)$$

де  $\Delta_i$  – кут сектора перекриття секторів можливих траєкторій насіння  $i$ -ої та  $i+1$ -ої фракцій насінневого матеріалу;  $\varphi_i$  – математичне очікування кута відхилення середньої осі віброфрикційного руху насіння  $i$ -ої фракції відносно осі  $Y$ ;  $\delta_i$  – половинний кут сектору можливих траєкторій насіння  $i$ -ої фракції;  $N^{\Phi}$  – кількість фракцій насінневого матеріалу, що досліджується. Позначки «б» та «а», що є у виразі, визначають параметри, які отримано без урахування та з урахуванням аеродинамічних сил та моментів, відповідно.

Фізичний зміст показника (3.2) полягає в тому, що він показує в скільки разів зростає відносне перекриття секторів можливих траєкторій насіння різних фракцій для встановлених параметрів настроювання технологічного

процесу вібросепарації у відношенні до перекриття секторів, що є у випадку відсутності аеродинамічних сил та моментів (рисунок 3.2).

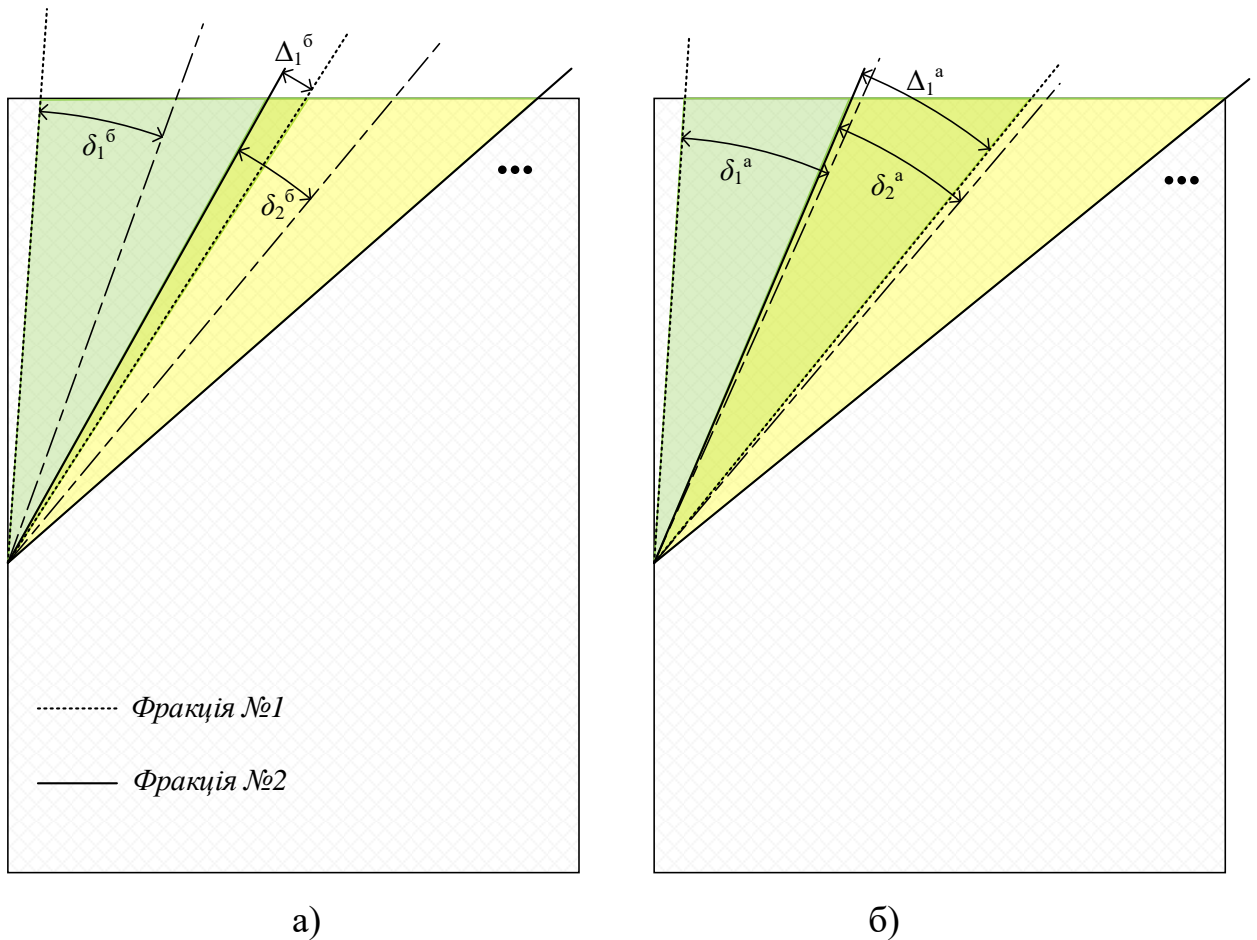


Рисунок 3.2 – Суперпозиція секторів можливих траєкторій віброфрикційного руху насіння різних фракцій, якщо: а) дія аеродинамічних сил та моментів відсутня; б) діють аеродинамічні сили та моменти

З цього, коли показник (3.2) дорівнює одиниці, вплив знакозмінного повітряного потоку на кінематичні параметри віброфрикційного руху насіння відсутній.

За критерієм (3.1) визначаються раціональні конструкційно-режимні параметри ВФНС з аеродинамічним екраном для визначеного насінневого матеріалу (задані геометричні та фізико-механічні властивості насінин для встановлених фракцій матеріалу).

Схема методики наведена на рис. 3.3. Спочатку вводяться дані щодо геометричних та фізико-механічних характеристик насіння для різних фракцій насінневого матеріалу, що досліджується (блок 2).

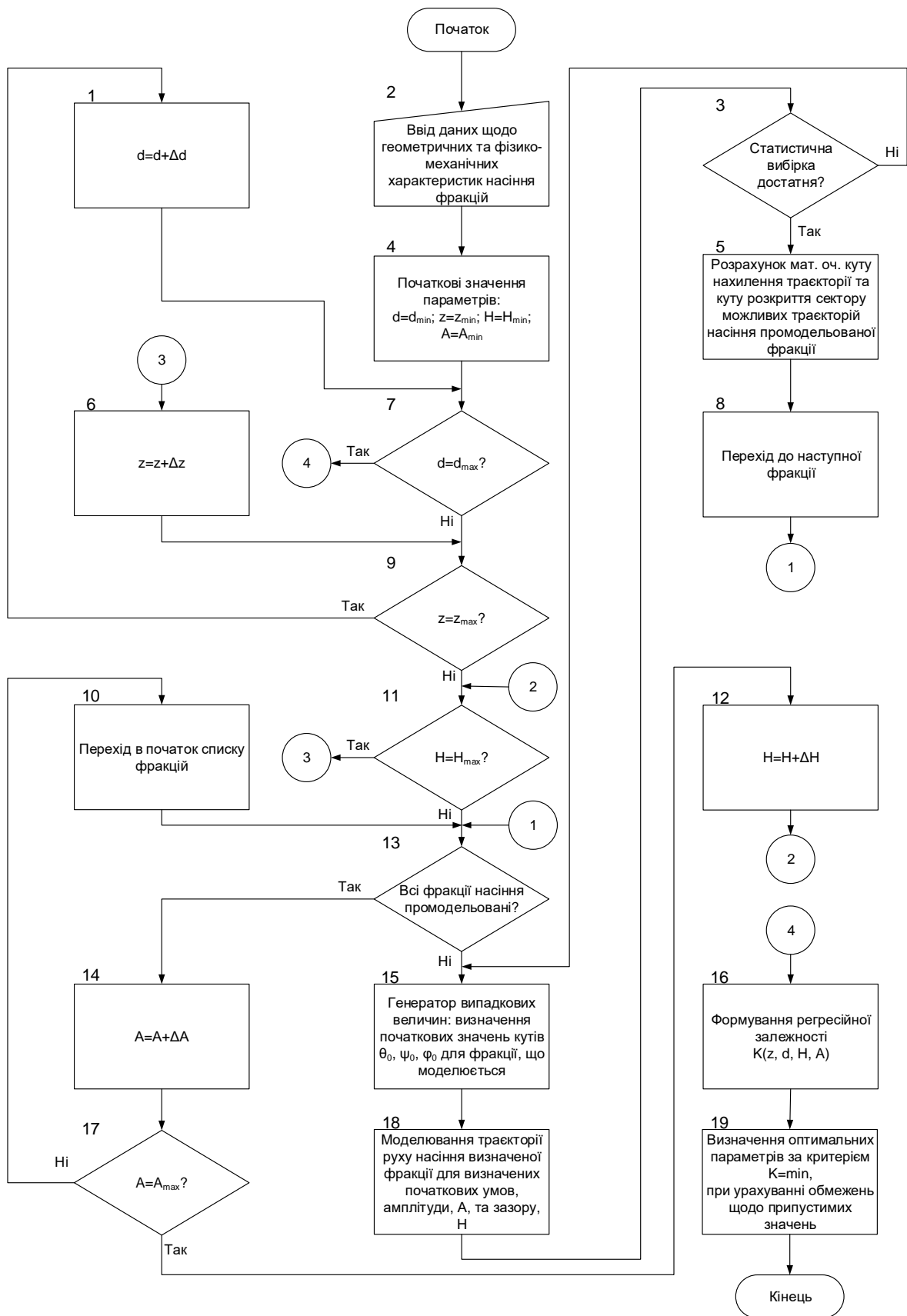


Рисунок 3.3 – Схема методики обґрунтування раціональних конструкційно-режимних параметрів ВФНС з аеродинамічним екраном

Потім встановлюються діапазони припустимих значень параметрів настроювання процесу вібросепарації (блок 4).

Далі відбувається покрокове змінення значень досліджуваних параметрів (висоти вертикальної стінки екрану, зазору між екраном та границією робочих поверхонь, вертикального зазору між робочими поверхнями, амплітуди коливань). Змінення відбувається шляхом виконання вкладеного циклу обчислень, в середині якого виконується процедура моделювання віброфрикційного руху насіння різних фракцій (блок 18). Віброфрикційний рух моделюється з урахуванням аеродинамічних сил та моментів для встановленого сполучення параметрів настроювання процесу.

За результатами моделювання обчислюються математичні очікування кутів нахилу середніх осей руху та половинні кути секторів можливих траєкторій руху насіння різних фракцій матеріалу (блок 5).

На підставі отриманих даних формується таблиця спостережень, де кожному сполученню параметрів настроювання процесу ставиться у відповідність значення показника зменшення ступеня впливу аеродинамічного фактору. На підставі цих даних визначаються коефіцієнти регресії для регресійного рівняння залежності показника зменшення ступеня впливу аеродинамічного фактору від досліджуваних параметрів (блок 16).

За допомогою отриманого регресійного рівняння здійснюється обґрунтування раціональних параметрів аеродинамічного екрану, величини вертикального зазору між робочими поверхнями та амплітуда коливань, при яких досягається мінімальне значення показника рівня впливу аеродинамічного фактору [1].

### 3.2 Результати чисельного моделювання щодо обґрунтування раціональних конструкційно-режимних параметрів ВФНС з екраном

Параметричний та регресійний аналіз за результатами чисельного моделювання проводився для наступних діапазонів варіювання



конструкційно-режимних параметрів:

– відносна висота вертикальної стінки екрану для одиничного робочого блоку (робочого блоку, що складається з двох робочих поверхонь):

$$\frac{d}{H} \in [0; 1,5], \quad (3.1)$$

– відносна відстань вертикальної стінки екрану від кромки робочої поверхні:

$$\frac{z}{H} \in [0,3; 1], \quad (3.2)$$

– вертикальний зазор між двома робочими поверхнями робочого блоку ВФНС:

$$H \in [6; 15], [\text{мм}], \quad (3.3)$$

– амплітуда коливань:

$$A \in [0,5; 3], [\text{мм}]. \quad (3.4)$$

Для зручності проведення регресійного аналізу визначені конструкційно-режимні параметри приводилися до єдиного інтервалу варіювання – нормувалися. Нормування показників здійснювалось за наступними формулами

$$\bar{z} = \frac{z/H - 0,3}{1 - 0,3} = \frac{z/H - 0,3}{0,7}, \quad (3.5)$$

$$\bar{d} = \frac{d/H - 0}{1,5 - 0} = \frac{d/H}{1,5}, \quad (3.6)$$

$$\bar{H} = \frac{H - 6}{15 - 6} = \frac{H - 6}{9}, \quad (3.7)$$

$$\bar{A} = \frac{A - 0,5}{3 - 0,5} = \frac{A - 0,5}{2,5}, \quad (3.8)$$

де  $\bar{z}$ ,  $\bar{d}$ ,  $\bar{H}$ ,  $\bar{A}$  – нормовані значення конструкційно-режимних параметрів. Всі нормовані параметри змінюються на інтервалі  $[0; 1]$  та є безрозмірними.

Чисельний експеримент проводився для насіння пастернаку, салату листового, кропу запашного. Далі насіннєві матеріали розділялися на фракції №1 – №4. Фракція №4 є фракція некондиція (частинки насіння та сухого стебла). Геометричні та фізико-механичні характеристики насіння за їх видами та фракціями наведено у додатку Г.

В якості параметрів відгуку при проведенні чисельного експерименту брались кути відхилення апроксимуючих осей траєкторій віброфрикційного руху насіння визначених фракцій,  $\varphi_i, i=1, \dots, N_\phi$ , де  $N_\phi$  – кількість фракцій насіннєвого матеріалу, та половинні кути секторів можливих траєкторій цих фракцій,  $\delta_i, i=1, \dots, N_\phi$ .

Чисельний експеримент проводився за чотирьохфакторним трирівневим планом [128], який представлений у додатку Д (план проведення чисельного експерименту). Згідно плану експериментальних досліджень за допомогою чисельного моделювання визначалися математичні очікування кутів нахилу траєкторій та половинних кутів секторів можливих траєкторій насіння пастернаку, кропу і салату листового за фракціями цих насіннєвих матеріалів.

По кожному пункту плану експерименту для кожної фракції насіннєвого матеріалу проводилось двадцять прогонів математичної моделі віброфрикційного руху насіння з початковими значеннями кутів орієнтації насіння, які визначалися випадковим чином. Математичні очікування кутів нахилу траєкторій для різних фракцій насіннєвих матеріалів обчислювалось як:

$$[\varphi_{i,f}] = \frac{\sum_{n=1}^{20} \varphi_{i,f,n}}{20}, \quad (3.9)$$

де

$$\varphi_{i,f,n} = \arctg \left( \frac{S \sum_{s=1}^S X_{i,f,n,s} Y_{i,f,n,s} - \sum_{s=1}^S X_{i,f,n,s} \sum_{s=1}^S Y_{i,f,n,s}}{S \sum_{s=1}^S X_{i,f,n,s}^2 - \left( \sum_{s=1}^S X_{i,f,n,s} \right)^2} \right) \cdot 57, [\text{град.}], \quad (3.10)$$

де  $[\varphi_{i,f}]$  – математичне очікування куту нахилення траєкторії віброфрикційного руху насіння  $f$ -ої фракції насіннєвого матеріалу  $i$ -го виду;  $\varphi_{i,f,n}$  – кут нахилу траєкторії насінини, реалізований для  $n$ -го варіанту випадково визначених початкових кутів його орієнтації;  $X_{i,f,n,s}, Y_{i,f,n,s}$  – координати місцезнаходження центра маси насінини  $i$ -го виду  $f$ -ої фракції на  $s$ -му кроці обчислень для  $n$ -го варіанту реалізації початкових кутів орієнтування насінини;  $S$  – задана кількість кроків при інтегруванні системи диференціальних рівнянь віброфрикційного руху насінини.

Половинні кути секторів можливих траєкторій насінин обчислювались як:

$$\delta_{i,f} = 3\sqrt{\sigma_{\varphi_{i,f}}^2} = 3\sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{20} ([\varphi_{i,f}] - \varphi_{i,f,n})^2}{20-1}}, \quad (3.11)$$

де  $\delta_{i,f}$  – половинний кут сектору можливих траєкторій насіння  $f$ -ої фракції насіннєвого матеріалу  $i$ -го виду. Значення цього кута визначається як потрійне середньоквадратичне відхилення від математичного очікування кута нахилу траєкторії  $[\varphi_{i,f}]$ . Оскільки вірогідна величина кута нахилу траєкторії має нормальний закон розподілення вірогідності, тоді всі можливі випадкові значення цього кута мають знаходитися в межах інтервалу, який дорівнює потрійному середньоквадратичному відхиленню (СКВ) цієї величини у кожен бік;  $\sigma_{\varphi_{i,f}}$  – СКВ кут відхилення траєкторії віброфрикційного руху насіння  $f$ -ої фракції насіннєвого матеріалу  $i$ -го виду.

Отримані експериментальні значення кутів нахилу траєкторій та половинних кутів секторів розкриття можливих траєкторій фракцій насіннєвих матеріалів в умовах дії знакозмінного повітряного потоку, а також нормативні значення цих характеристик (за відсутності руху повітря) та значення показника ступеня впливу знакозмінного повітряного потоку на якість вібросепарації (3.2), наведено у табл. Е.1 - Е.3 додатку Е (результати

чисельного експерименту з оцінки показнику ступеня впливу знакозмінного повітряного потоку на якість вібросепарації залежно від конструкційно-режимних параметрів ВФНС з аеродинамічним екраном). Також в таблицю додано віднормовані значення показників (3.2), які обчислювались згідно:

$$k_{i,n} = \frac{K_{i,n} - K_i^{\min}}{K_i^{\max} - K_i^{\min}}, \quad k_{i,n} \in [0; 1], \quad (3.12)$$

де  $k_{i,n}$  – віднормоване значення показника (3.2) для  $i$ -ої культури, який отриманий для  $n$ -го чисельного експерименту;  $K_{i,n}$  – ненормоване значення показника (3.2), що належить встановленому інтервалу його варіювання  $K_{i,n} \in [K_i^{\min}; K_i^{\max}]$ .

Використання нормованих значень відгуків для таблиці спостережень більш зручне щодо порівняльного аналізу якості створюваних регресійних моделей.

Для здійснення параметричного аналізу за допомогою створених регресійних рівнянь зручніше скористатися регресійними моделями, що дають ненормовані значення показника впливу знакозмінного повітряного потоку на якість віброфрикційного розділення насіннєвих матеріалів. Регресійні моделі дозволяють оцінювати вплив аеродинамічних сил та моментів на єдиному інтервалі значень аеродинамічного показника для різних насіннєвих культур.

Отже в дисертаційному дослідженні спочатку здійснено побудову та порівняльний аналіз регресійних рівнянь для нормованого відгуку. Потім сформовані оптимальні регресійні моделі перетворено до виду, які оцінюють ненормовані значення показника впливу знакозмінного потоку на якість віброфрикційного розділення насіннєвих матеріалів.

На підставі отриманих експериментальних даних, за допомогою методу найменших квадратів, будувалися регресійні рівняння залежності нормованого показника впливу знакозмінного повітряного потоку на якість віброфрикційного розділення фракцій насіннєвих матеріалів визначених

рослинних культур, від досліджуваних конструкційно-режимних параметрів. Регресійні рівняння будувалися у вигляді поліному другого порядку

$$k_i = a_{i,0} + a_{i,1}\bar{x}_1 + \dots + a_{i,4}\bar{x}_4 + a_{i,5}\bar{x}_1\bar{x}_2 + \dots + a_{i,7}\bar{x}_1\bar{x}_4 + a_{i,8}\bar{x}_2\bar{x}_3 + a_{i,9}\bar{x}_2\bar{x}_4 + a_{i,10}\bar{x}_3\bar{x}_4 + a_{i,11}\bar{x}_1^2 + \dots + a_{i,14}\bar{x}_4^2, \quad (3.13)$$

де  $k_i$  – нормований показник оцінки впливу знакозмінного повітряного потоку на якість віброфрикційного розділення фракцій насіння  $i$ -го виду;  $a_{i,m}$ ,  $m = 0, 1, \dots, 14$  – коефіцієнти регресії. В якості змінних до складу рівняння входять конструкційно-режимні параметри, що досліджуються;  $\bar{x}_p$ ,  $p = 1, \dots, 4$  – віднормовані конструкційно-режимні параметри:  $\bar{x}_1 = \bar{z}$ ,  $\bar{x}_2 = \bar{d}$ ,  $\bar{x}_3 = \bar{H}$ ,  $\bar{x}_4 = \bar{A}$ .

Остаточний вигляд регресійних рівнянь визначався на підставі:

- перевірки гіпотези про нульові значення коефіцієнтів регресії для факторів регресії (3.13). Перевірка здійснювалась за допомогою t-критерію Ст'юдента;
- перевірки умови статистичної значимості сформованого рівняння регресії за допомогою критерію Фішера;
- критерію максимізації індексу кореляції (коефіцієнту детермінації) сформованого регресійного рівняння.

Коефіцієнти регресії для рівняння (3.13) визначалися на підставі розв'язання наступної системи рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \sum_{v=1}^V (k_{i,v} - \hat{k}_{i,v})^2}{\partial a_{i,0}} = 0, \\ \frac{\partial \sum_{v=1}^V (k_{i,v} - \hat{k}_{i,v})^2}{\partial a_{i,1}} = 0, \\ \dots \\ \frac{\partial \sum_{v=1}^V (k_{i,v} - \hat{k}_{i,v})^2}{\partial a_{i,M}} = 0, \end{array} \right. \quad (3.14)$$

де  $\hat{k}_{i,v}$ ,  $v = 1, \dots, V$  – значення показника впливу знакозмінного повітряного потоку на якість віброфрикційного розділення насіння  $i$ -го виду, яке визначено за допомогою регресійного рівняння для значень параметрів для  $v$ -го випробування;  $k_{i,v}$  – експериментальне значення показника впливу знакозмінного повітряного потоку на якість віброфрикційного розділення насіння  $i$ -го виду для  $v$ -го випробування;  $V$  – кількість випробувань;  $a_{i,k}$ ,  $k = 0, 1, \dots, M$  – коефіцієнти рівняння регресії. Тут  $M$  – кількість факторів, що входять до регресії.

Система рівнянь (3.14) у перетвореному виді запишеться як:

$$\begin{aligned}
 & a_{i,0}V + a_{i,1} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{1,v} + \dots + a_{i,4} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{4,v} + a_{i,5} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{1,v} \bar{x}_{2,v} + \dots + a_{i,7} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{1,v} \bar{x}_{4,v} + \\
 & + a_{i,8} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{2,v} \bar{x}_{3,v} + a_{i,9} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{2,v} \bar{x}_{4,v} + a_{i,10} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{3,v} \bar{x}_{4,v} + a_{i,11} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{1,v}^2 + \dots + \\
 & + a_{i,14} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{4,v}^2 = \sum_{v=1}^V K_{i,v} , \\
 & a_{i,0} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{1,v} + a_{i,1} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{1,v}^2 + \dots + a_{i,4} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{4,v} \bar{x}_{1,v} + a_{i,5} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{1,v}^2 \bar{x}_{2,v} + \dots + a_{i,7} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{1,v}^2 \bar{x}_{4,v} + \\
 & + a_{i,8} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{2,v} \bar{x}_{3,v} \bar{x}_{1,v} + a_{i,9} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{2,v} \bar{x}_{4,v} \bar{x}_{1,v} + a_{i,10} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{3,v} \bar{x}_{4,v} \bar{x}_{1,v} + \\
 & + a_{i,11} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{1,v}^3 + a_{i,12} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{2,v}^2 \bar{x}_{1,v} + \dots + a_{i,14} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{4,v}^2 \bar{x}_{1,v} = \sum_{v=1}^V K_{i,v} \bar{x}_{1,v} , \\
 & \dots \\
 & a_{i,0} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{1,v} \bar{x}_{2,v} + a_{i,1} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{1,v}^2 \bar{x}_{2,v} + \dots + a_{i,4} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{4,v} \bar{x}_{1,v} \bar{x}_{2,v} + a_{i,5} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{1,v}^2 \bar{x}_{2,v}^2 + \dots \\
 & \dots + a_{i,7} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{1,v}^2 \bar{x}_{2,v} \bar{x}_{4,v} + a_{i,8} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{2,v}^2 \bar{x}_{1,v} \bar{x}_{3,v} + a_{i,9} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{2,v}^2 \bar{x}_{1,v} \bar{x}_{4,v} + \\
 & + a_{i,10} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{3,v} \bar{x}_{4,v} \bar{x}_{1,v} \bar{x}_{2,v} + a_{i,11} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{1,v}^3 \bar{x}_{2,v} + a_{i,12} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{2,v}^3 \bar{x}_{1,v} + \dots \\
 & \dots + a_{i,14} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{4,v}^2 \bar{x}_{1,v} \bar{x}_{2,v} = \sum_{v=1}^V K_{i,v} \bar{x}_{1,v} \bar{x}_{2,v} , \\
 & \dots \\
 & a_{i,0} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{4,v}^2 + a_{i,1} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{1,v} \bar{x}_{4,v}^2 + \dots + a_{i,4} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{4,v}^3 + a_{i,5} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{1,v} \bar{x}_{2,v} \bar{x}_{4,v}^2 + \dots \\
 & \dots + a_{i,7} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{1,v} \bar{x}_{4,v}^3 + a_{i,8} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{2,v} \bar{x}_{3,v} \bar{x}_{4,v}^2 + a_{i,9} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{2,v} \bar{x}_{4,v}^3 + \\
 & + a_{i,10} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{3,v} \bar{x}_{4,v}^3 + a_{i,11} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{1,v}^2 \bar{x}_{4,v}^2 + a_{i,12} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{2,v}^2 \bar{x}_{4,v}^2 + \dots \\
 & \dots + a_{i,14} \sum_{v=1}^V \bar{x}_{4,v}^4 = \sum_{v=1}^V K_{i,v} \bar{x}_{4,v}^2 .
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

Система рівнянь містить чотирнадцять невідомих коефіцієнтів та таку ж кількість алгебраїчних рівнянь. Рівняння є лінійними відносно невідомих коефіцієнтів регресії, тому для розв'язання системи (3.15) можна використати метод Крамера [145], коли

$$a_{i,k} = \frac{\Delta_{i,k}}{\Delta}, \quad (3.16)$$

де  $\Delta$  – визначник матриці коефіцієнтів системи рівнянь (3.15);  $\Delta_{i,k}$  – визначник матриці коефіцієнтів системи рівнянь (3.15),  $k$ -ий стовбчик якої замінений на вектор правих частин системи рівнянь.

Для визначених коефіцієнтів повнофакторної регресійної моделі (3.13) проводилась їх оцінка значимості. Перевірялась гіпотеза їх відмінності від нульових значень. Така перевірка здійснювалась за допомогою  $t$ -критерію Ст'юдента:

$$t_{i,k}^p \geq t^{\text{табл.}}, \quad (3.17)$$

де  $t_{i,k}^p$  – розрахункове значення  $t$ -критерію для  $k$ -го коефіцієнту регресії, що описує результати випробувань насінневого матеріалу  $i$ -го виду;  $t^{\text{табл.}}$  – табличне значення  $t$ -критерію для відповідного числа ступенів свободи і визначеного ступеня статистичної значимості [146].

Число ступенів свободи для статистичної вибірки щодо побудови регресійного рівняння обчислюється як:

$$nf = V - M - 1, \quad (3.18)$$

де  $V$  – кількість випробувань;  $M$  – кількість факторів, що входять у регресійне рівняння.

Якщо кількість дослідів 81, то для повнофакторної регресійної моделі другого порядку число ступенів свободи дорівнює:

$$nf = V - M - 1 = 81 - 14 - 1 = 66, \quad (3.19)$$

якщо враховується тільки один фактор та використовується регресія першого порядку, тоді:

$$nf = V - M - 1 = 81 - 1 - 1 = 79. \quad (3.20)$$

Ступінь статистичної значимості, для якого визначалось порогове



значення  $t$ -критерію, брався 0,05. В табл. 3.1, згідно [146], наведено порогові значення  $t$ -критерію для цього рівню статистичної значущості.

Таблиця 3.1 – Порогові значення  $t$ -критерію для рівня статистичної значимості 0,05

Число ступенів свободи	t-критерій	Число ступенів свободи	t-критерій	Число ступенів свободи	t-критерій
66	1,9965082	71	1,9939434	76	1,9916726
67	1,9960084	72	1,9934636	77	1,9912544
68	1,9954689	73	1,9929971	78	1,9908471
69	1,9949454	74	1,9925435	79	1,9904502
70	1,9944371	75	1,9921022		

Фактичне значення  $t$ -критерію для коефіцієнта регресії  $k$ -го фактора регресійного рівняння обчислюється як:

$$t_{i,k}^p = \frac{|a_{i,k}|}{\sigma_{a_{i,k}}}, \quad (3.21)$$

де  $|a_{i,k}|$  – модуль  $k$ -го коефіцієнта регресії, що визначений для  $i$ -го регресійного рівняння;  $\sigma_{a_{i,k}}$  – середньоквадратичне відхилення коефіцієнта регресії.

СКВ коефіцієнта регресії розраховується за допомогою наступного рівняння:

$$\sigma_{a_{i,k}} = \sqrt{\frac{\sum_{v=1}^V (K_{i,v} - \hat{K}_{i,v})^2}{V - M_i - 1}} \cdot \frac{1}{\sum_{v=1}^V (p_{i,k,v} - \bar{p}_{i,k})^2}, \quad (3.22)$$

де  $K_{i,v}, \hat{K}_{i,v}$  – значення показника оцінки впливу знакозмінного повітряного потоку на якість віброфрикційного розділення фракцій насіння  $i$ -го виду, які, відповідно, отримано при проведенні експерименту та визначено на підставі сформованого регресійного рівняння;  $M_i$  – кількість факторів, що враховані при побудові  $i$ -го регресійного рівняння;  $p_{i,k,v}$  –  $k$ -ий фактор у складі  $i$ -го регресійного рівняння. Даний параметр приймає значення:  $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots$ ,

$\bar{x}_1\bar{x}_2, \dots, \bar{x}_3\bar{x}_4, \bar{x}_1^2, \dots, \bar{x}_4^2$ ;  $\bar{p}_{i,k} = \sum_{v=1}^V p_{i,k,v}/V$  – середнє значення  $k$ -го фактора.

Якщо коефіцієнт регресії задовольняє  $t$ -критерію (3.17), тоді вважається, що статистично значимо відрізняється від нуля. Якщо не задовольняє, вважається, що такий коефіцієнт не значимо відрізняється від нуля. Він виключається з регресійного рівняння.

Для перевірки статистичної значимості рівняння регресії використовувався критерій Фішера, який має наступний вигляд:

$$F_i^p \geq F^{\text{табл.}}, \quad (3.23)$$

де  $F_i^p$  – розрахункове значення критерія Фішера для  $i$ -го регресійного рівняння;  $F^{\text{табл.}}$  – табличне значення критерія Фішера.

Обчислення критерія Фішера для сформованого регресійного рівняння здійснюється за допомогою виразу:

$$F_i^p = \frac{\sum_{v=1}^V (K_{i,v} - \hat{K}_{i,v})^2}{\sum_{v=1}^V (K_{i,v} - \bar{K}_i)^2} \frac{V - M_i - 1}{M_i}, \quad (3.24)$$

де  $\bar{K}_i = \sum_{v=1}^V K_{i,v}/V$  – середнє значення показника оцінки впливу знакозмінного повітряного потоку на якість віброфрикційного розділення насіння  $i$ -го виду за результатами експериментів.

Табличне значення критерія Фішера визначалось для рівня статистичної значимості 0,05, якщо число ступенів свободи меншої дисперсії приймало значення 60, 70 та 80, а для більшої дисперсії бралось більше 24.

Якщо отримане регресійне рівняння задовольняє критерій Фішера (3.23), то вважається, що рівняння є статистично значимим. Дисперсія відхилень регресії відносно даних експерименту є значимо меншою, ніж дисперсія

експериментальних даних по відношенню до середнього.

Якщо рівняння не задовольняло критерій (3.23), тоді вважалось, що замість регресії краще використовуватиме середнє значення показника впливу знакозмінного повітряного потоку на якість віброфрикційного розділення фракцій насіння.

Таблиця 3.2 – Табличні значення критерію Фішера для статистичної значимості 0,05 та числа ступенів свободи більшої дисперсії більше 24

Число ступенів свободи для меншої дисперсії	Критерій Фішера
60	1,39
70	1,35
80	1,31

За допомогою t-критерію здійснювалась відбраковка регресійних факторів з повнофакторної регресійної моделі (3.13). Коли всі статистично незначні фактори були виключені, подальше покращення регресійної моделі відбувалось за допомогою критерія Фішера. Здійснювалось подальше скорочення регресійних факторів за умовою збільшення розрахункового критерія Фішера (3.24) та (або) скорегованого коефіцієнту детермінації:

$$R_i = \sqrt{1 - \left( 1 - \frac{\sum_{v=1}^V (K_{i,v} - \hat{K}_{i,v})^2}{\sum_{v=1}^V (K_{i,v} - \bar{K}_i)^2} \right) \frac{V-1}{V-M_i-1}}, \quad (3.25)$$

де  $R_i$  – скорегований коефіцієнт детермінації для  $i$ -го регресійного рівняння.

В таблицях Ж.1 – Ж.3 Додатку Ж наведено результати з формування регресійних рівнянь оцінки впливу аеродинаміки для розділення фракцій досліджуваних насінневих матеріалів. Показано кроки перетворення повнофакторних регресійних моделей (3.13), що отримано за результатами чисельного моделювання процесів розділення досліджуваних насінневих матеріалів, шляхом виключення статистично незначних регресорів.

Остаточні регресійні моделі з оцінки нормованих значень показника

впливу знакозмінного повітряного потоку на якість розділення фракцій насіння мають наступний вигляд:

- насіння пастернака:

$$k_1 = 0,304 - 0,139\bar{z} - 0,37\bar{d} + 0,383\bar{H} + 0,408\bar{A} + 0,405\bar{z}\bar{d} + 0,081\bar{z}\bar{H} - 0,14\bar{d}\bar{H} - 0,368\bar{d}\bar{A} + 0,119\bar{H}\bar{A} + 0,106\bar{z}^2 - 0,203\bar{H}^2, \quad (3.26)$$

- насіння салату листкового:

$$k_2 = 0,23 - 0,124\bar{z} - 0,28\bar{d} + 0,348\bar{H} + 0,442\bar{A} + 0,371\bar{z}\bar{d} + 0,051\bar{z}\bar{H} - 0,202\bar{d}\bar{H} - 0,41\bar{d}\bar{A} + 0,146\bar{H}\bar{A} + 0,105\bar{z}^2 - 0,126\bar{H}^2, \quad (3.27)$$

- насіння кропу запашного:

$$k_3 = 0,117 - 0,02\bar{z} - 0,148\bar{d} + 0,343\bar{H} + 0,271\bar{A} + 0,286\bar{z}\bar{d} + 0,039\bar{z}\bar{H} + 0,042\bar{z}\bar{A} - 0,219\bar{d}\bar{H} - 0,423\bar{d}\bar{A} + 0,217\bar{H}\bar{A} - 0,109\bar{H}^2 + 0,172\bar{A}^2. \quad (3.28)$$

Коефіцієнти рівнянь (3.26) – (3.28) отримані для нормованих значень показника впливу знакозмінного повітряного потоку на якість віброфрикційного розділення насіння. Нормування показників по кожній рослинній культурі здійснювалось для унікальних інтервальних значень. Виходячи з цього, некоректно проводити порівняльний аналіз заходів для різних насінневих матеріалів за допомогою (3.26) – (3.28). Треба використовувати скореговані регресійні рівняння, які дають ненормовані значення показника. Корегування коефіцієнтів регресійних рівнянь (3.26) – (3.28) для отримання ненормованих значень показника впливу знакозмінного повітряного потоку на якість розділення насіння здійснюється за допомогою наступних рівнянь:

$$a'_{0,i} = a_{0,i} (K_i^{\max} - K_i^{\min}) + K_i^{\min}, \quad (3.29)$$

$$a'_{k,i} = a_{k,i} (K_i^{\max} - K_i^{\min}), \quad k = 1, \dots, M_i, \quad (3.30)$$

де  $a'_{0,i}$ ,  $a'_{k,i}$  – скорегований вільний член та коефіцієнти регресії для  $i$ -ої культури;  $a_{0,i}$ ,  $a_{k,i}$  – коефіцієнти лінійної регресії, що є у (3.26) – (3.28);

$K_i^{\min}, K_i^{\max}$  – мінімальне та максимальне значення ненормованого показника впливу знакозмінного повітряного потоку на якість віброфрикційного розділення, що отримано при проведенні чисельного ексерименту для  $i$ -ої культури;  $M_i$  – кількість регресорів, що включено до регресійної моделі для  $i$ -ої культури.

Скореговані регресійні рівняння мають наступний вигляд:

- насіння пастернака:

$$K_1 = 1,109 - 0,046 \bar{z} - 0,123 \bar{d} + 0,127 \bar{H} + 0,135 \bar{A} + 0,134 \bar{z}\bar{d} + 0,027 \bar{z}\bar{H} - 0,046 \bar{d}\bar{H} - 0,122 \bar{d}\bar{A} + 0,04 \bar{H}\bar{A} + 0,035 \bar{z}^2 - 0,067 \bar{H}^2, \quad (3.31)$$

- насіння салату листкового:

$$K_2 = 1,066 - 0,034 \bar{z} - 0,076 \bar{d} + 0,094 \bar{H} + 0,12 \bar{A} + 0,101 \bar{z}\bar{d} + 0,014 \bar{z}\bar{H} - 0,055 \bar{d}\bar{H} - 0,111 \bar{d}\bar{A} + 0,04 \bar{H}\bar{A} + 0,028 \bar{z}^2 - 0,034 \bar{H}^2, \quad (3.32)$$

- насіння кропу запашного:

$$K_3 = 1,028 - 0,004 \bar{z} - 0,033 \bar{d} + 0,076 \bar{H} + 0,06 \bar{A} + 0,064 \bar{z}\bar{d} + 0,009 \bar{z}\bar{H} + 0,009 \bar{z}\bar{A} - 0,049 \bar{d}\bar{H} - 0,094 \bar{d}\bar{A} + 0,048 \bar{H}\bar{A} - 0,024 \bar{H}^2 + 0,038 \bar{A}^2. \quad (3.33)$$

За допомогою регресійних рівнянь (3.31) – (3.33) проаналізовано характер впливу конструкційно-режимних параметрів на показник впливу знакозмінного повітряного потоку на якість віброфрикційного розділення насінневого матеріалу для трьох рослинних культур. Результати параметричних досліджень подано у вигляді тривимірних графіків на рис. 3.4 – 3.12.

На рис. 3.4 – 3.6 представлено графіки функції показника впливу знакозмінного повітряного потоку на якість віброфрикційного розділення насіння досліджуваних культур від конструкційних параметрів аеродинамічного екрану при заданих: вертикальному зазорі між робочими поверхнями та амплітуді коливань.

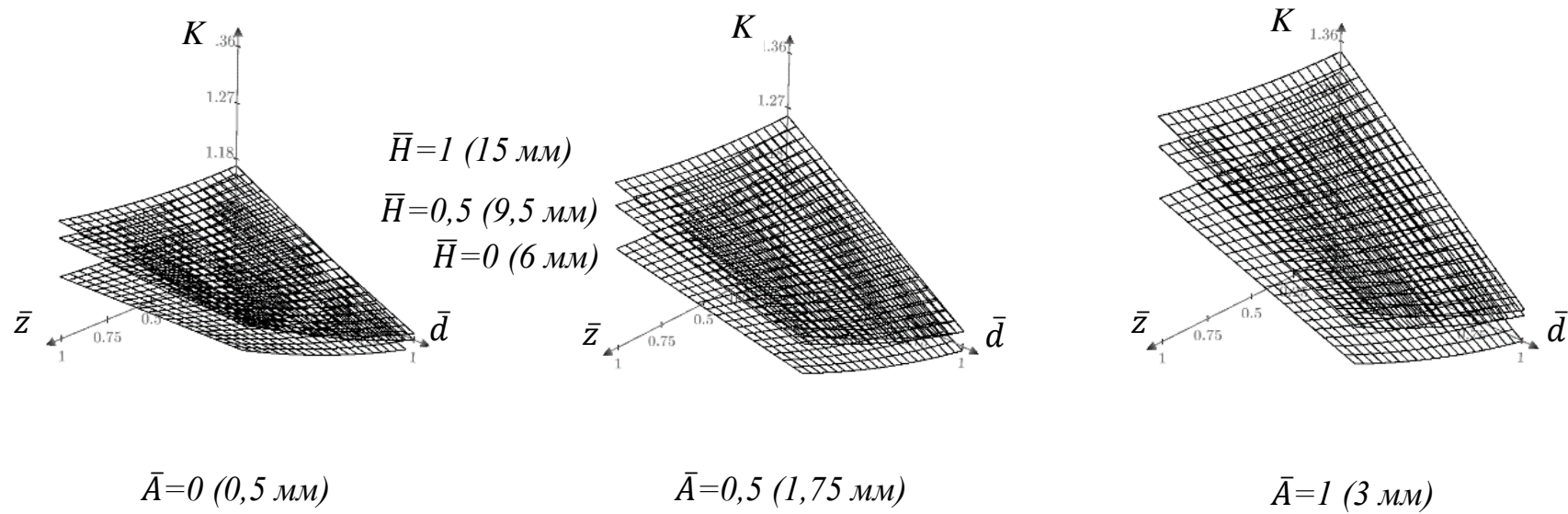


Рисунок 3.4 – Залежність показника впливу знакозмінного повітряного потоку на ефективність розділення насіння пастернаку від конструкційних параметрів аеродинамічного екрану при заданих: вертикальному зазорі та амплітуді коливань

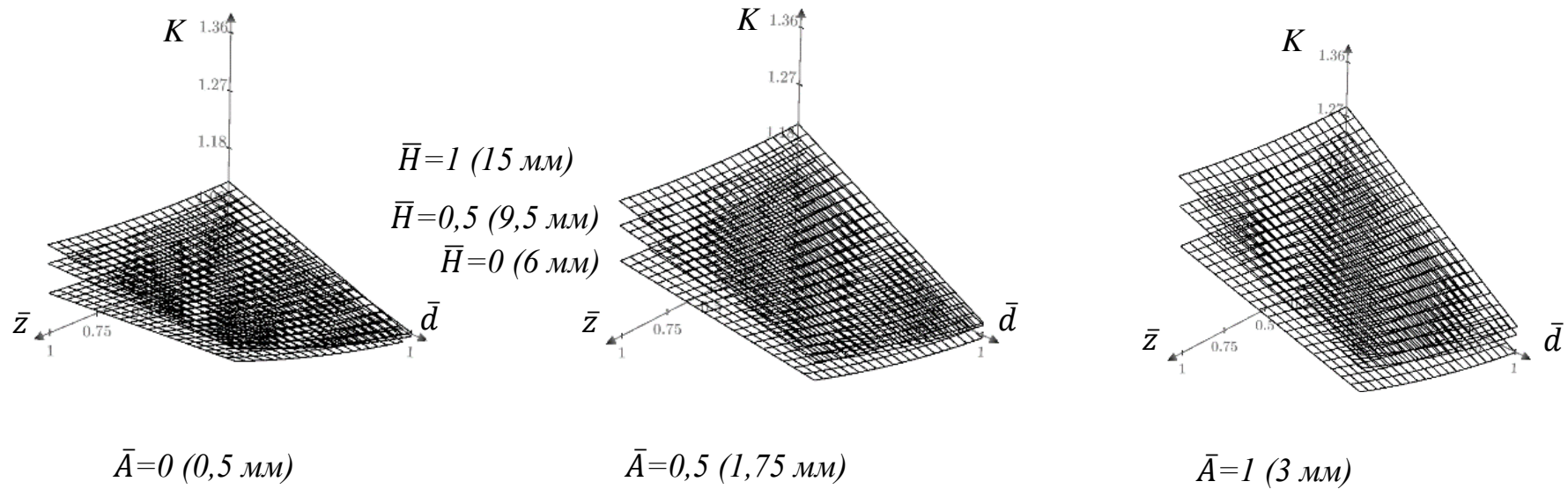


Рисунок 3.5 – Залежність показника впливу знакозмінного повітряного потоку на ефективність розділення насіння салату листового від конструкційних параметрів аеродинамічного екрану при заданих: вертикальному зазорі та амплітуді коливань

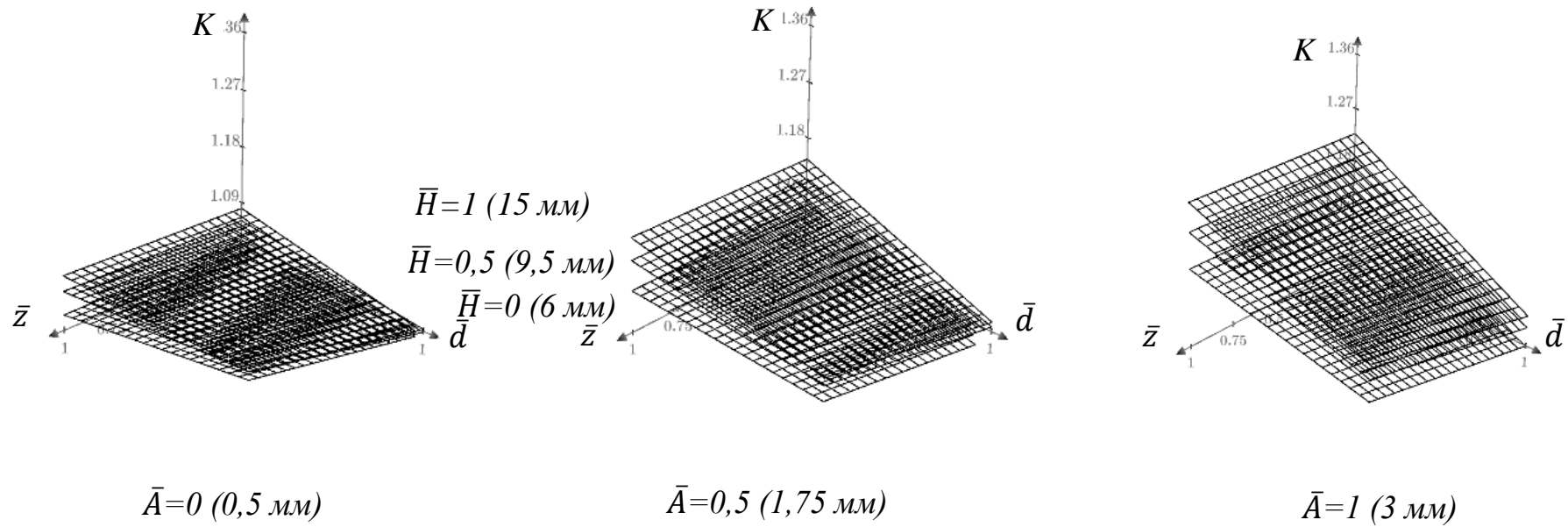


Рисунок 3.6 – Залежність показника впливу знакозмінного повітряного потоку на ефективність розділення насіння кропу запашного від конструкційних параметрів аеродинамічного екрану при заданих: вертикальному зазорі та амплітуді КОЛИВАНЬ



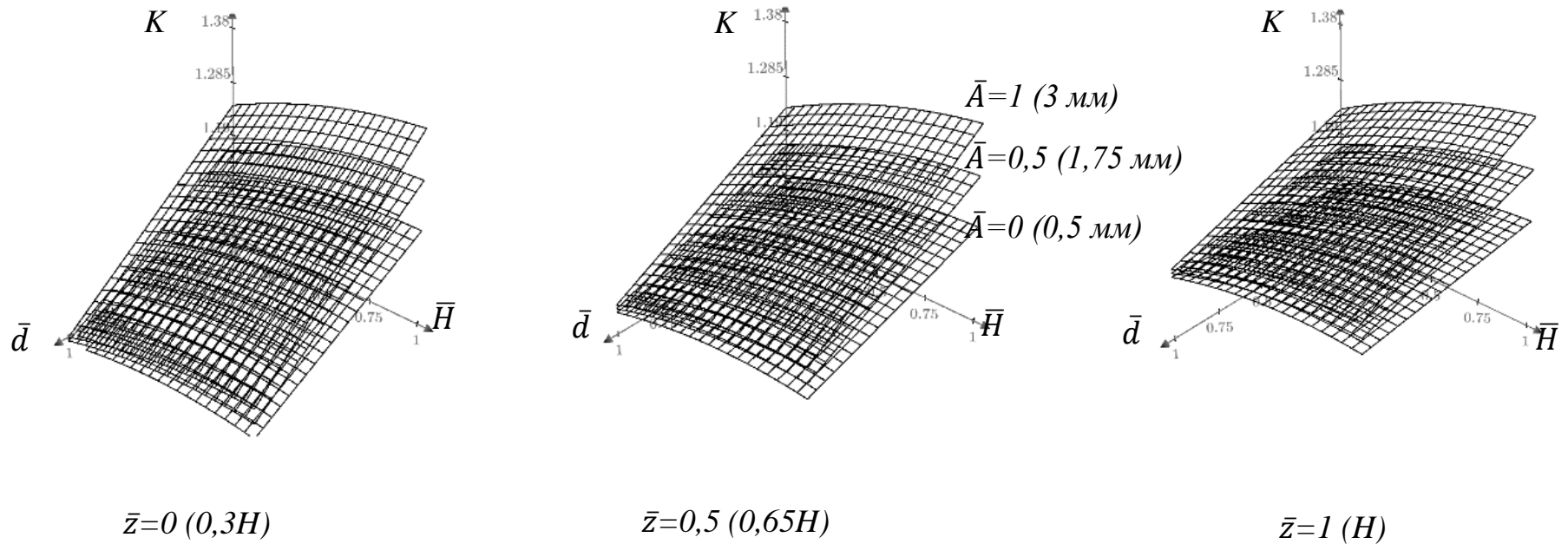


Рисунок 3.7 – Залежність показника впливу знакозмінного повітряного потоку на ефективність розділення насіння пастернаку від висоти аеродинамічного екрану і вертикального зазору між робочими поверхнями при встановлених відстані екрану від торцю робочого блоку та амплітуді коливань

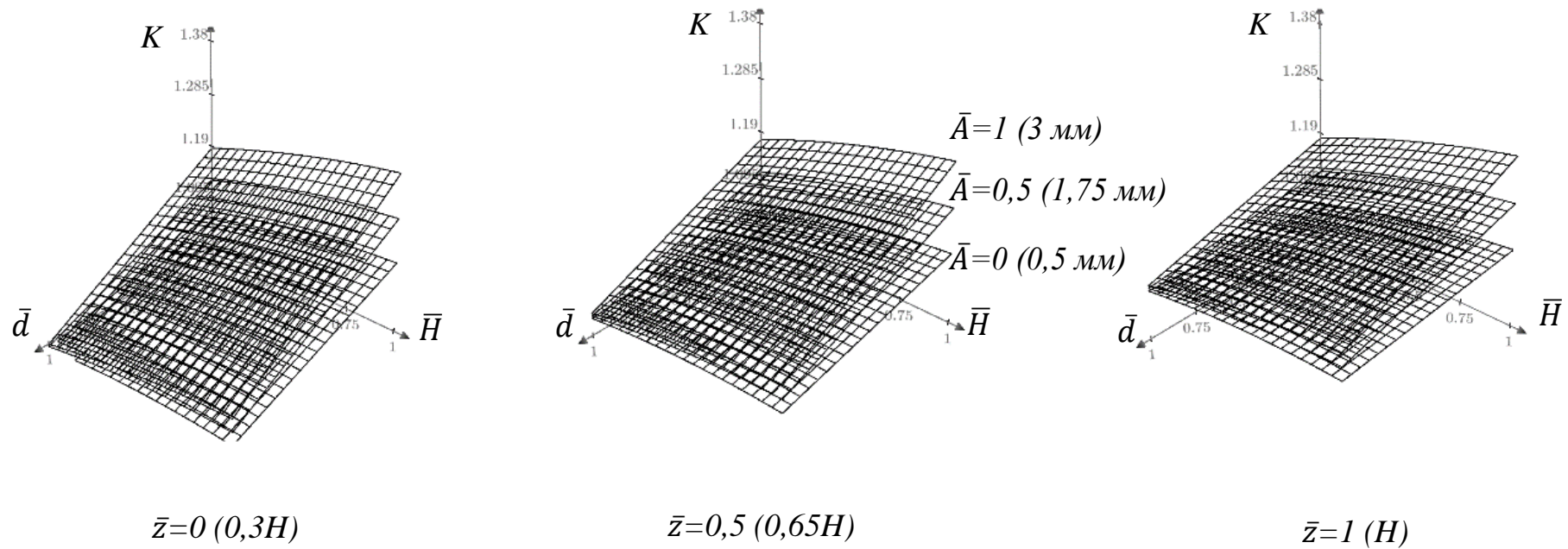


Рисунок 3.8 – Залежність показника впливу знакозмінного повітряного потоку на ефективність розділення насіння салату листкового від висоти аеродинамічного екрану і вертикального зазору між робочими поверхнями при встановлених відстані екрану від торцю робочого блоку та амплітуді коливань

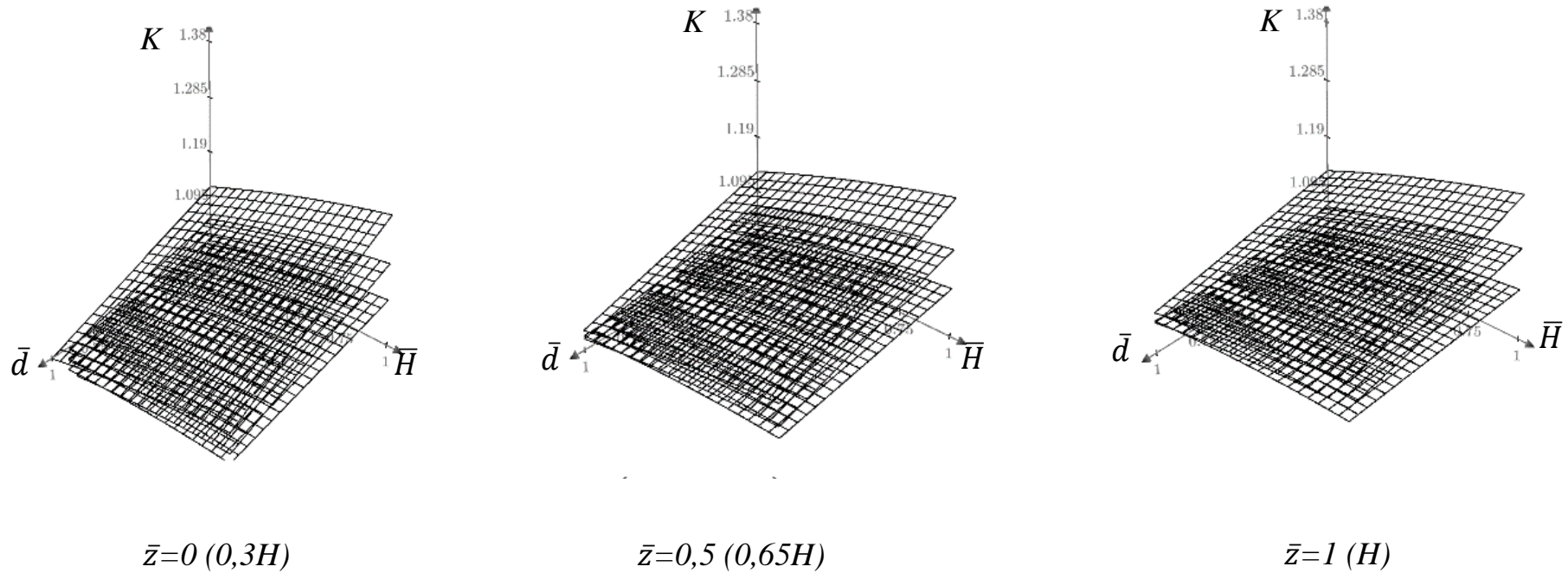


Рисунок 3.9 – Залежність показника впливу знакозмінного повітряного потоку на ефективність розділення насіння кропу запашного від висоти аеродинамічного екрану і вертикального зазору між робочими поверхнями при встановлених відстані екрану від торцю робочого блоку та амплітуді коливань

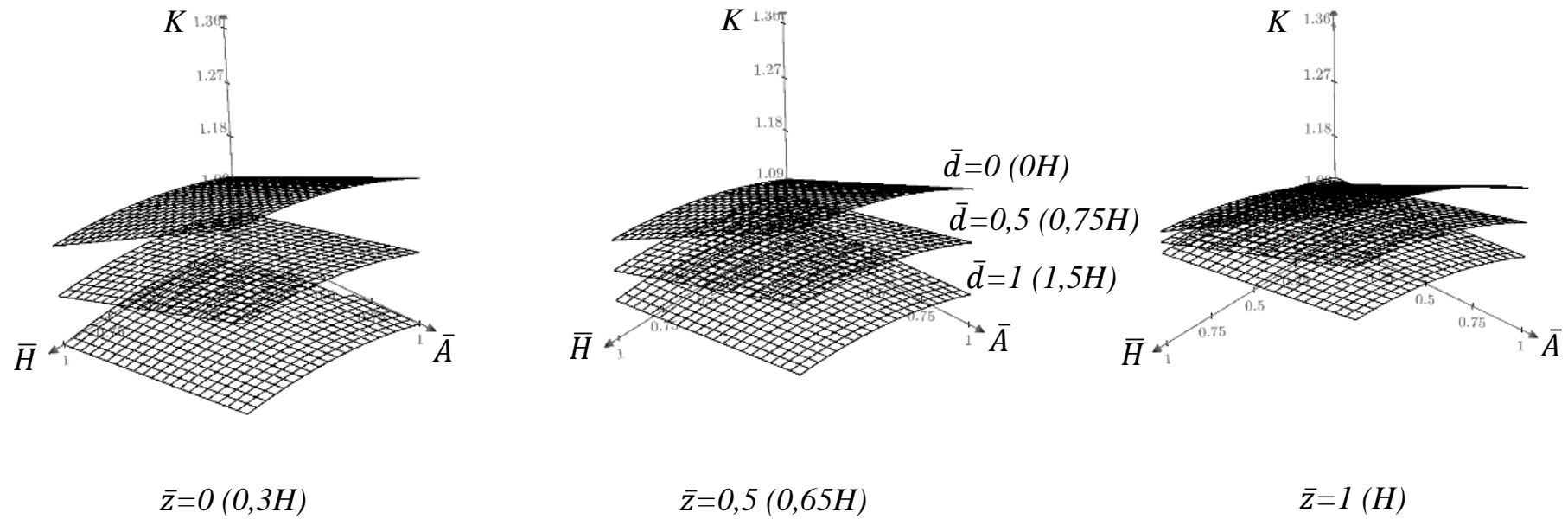


Рисунок 3.10 – Залежність показника впливу знакозмінного повітряного потоку на ефективність розділення насіння пастернаку від вертикального зазору між робочими поверхнями та амплітуди коливань при встановлених конструкційних параметрах екрану

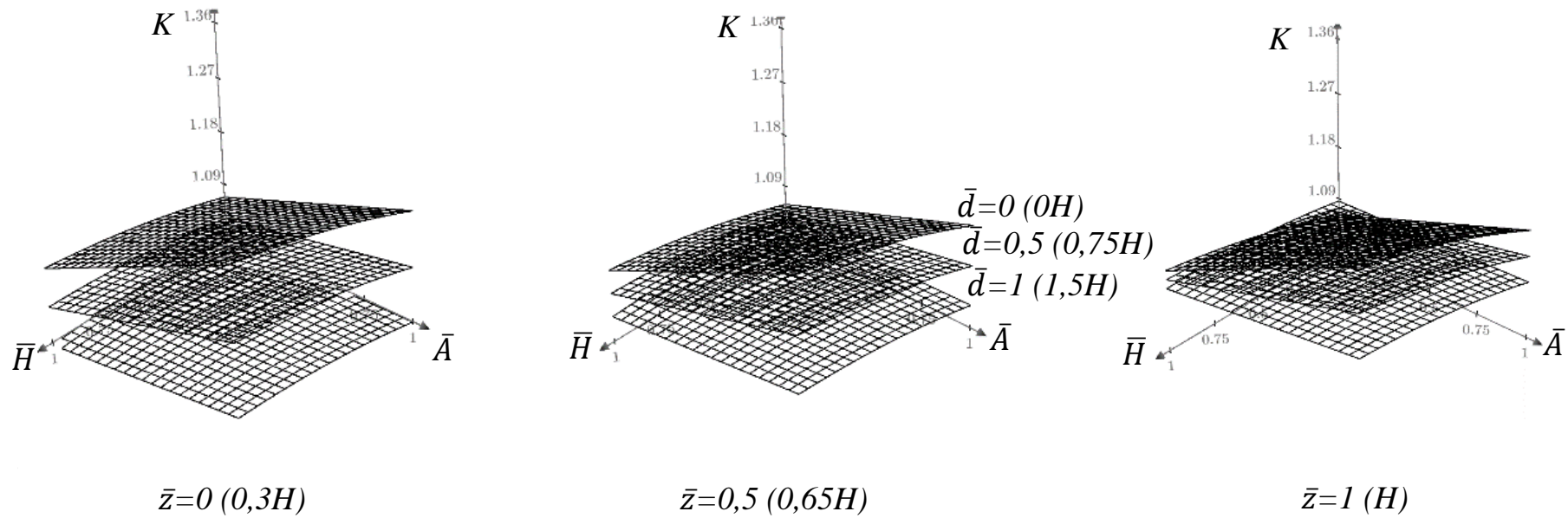


Рисунок 3.11 – Залежність показника впливу знакозмінного повітряного потоку на ефективність розділення насіння салату листового від вертикального зазору між робочими поверхнями та амплітуди коливань при встановлених конструкційних параметрах екрану

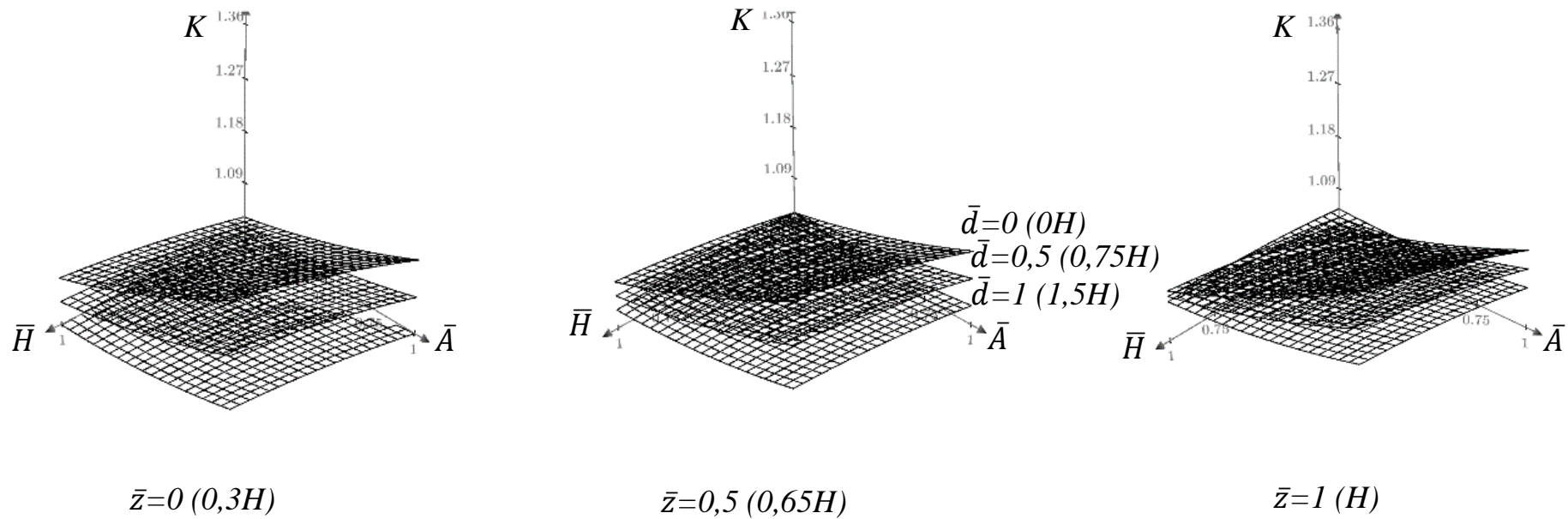


Рисунок 3.12 – Залежність показника впливу знакозмінного повітряного потоку на ефективність розділення насіння кропу запашного від вертикального зазору між робочими поверхнями та амплітуди коливань при встановлених конструкційних параметрах екрану

При зростанні амплітуди спостерігається більш значний вплив знакозмінного повітряного потоку на якість сепарування. Значення показника  $K$  досягають величини 1,34 (для насіння пастернаку, коли висота екрану  $d$  дорівнює нулю та вертикальний зазор між робочими поверхнями є максимальний). Для насіння салату листового та кропу запашного  $K$  в цій точці досягає значень 1,27 і 1,22, відповідно.

При зростанні висоти екрану та із зменшенням його відстані від кромки робочого блоку максимально зменшується вплив знакозмінного повітряного потоку. При амплітуді коливань 0,5 мм значення  $K$  для кропу та салату дорівнює 1 (вплив повітря відсутній), а для пастернака – 1,05.

При варіюванні висоти аеродинамічного екрану та вертикального зазору між робочими поверхнями (рис. 3.7 – 3.9) спостерігається практично лінійний характер зменшення коефіцієнту  $K$ . Найбільш інтенсивне зростання коефіцієнту  $K$  за зменшенням  $d$  відбувається при максимальній амплітуді коливань.

При варіюванні зазору між екраном та торцем робочого блоку нахил функції залишається майже без змін. Але має місце вплив знакозмінного потоку при максимальному значенні висоти екрану. Якщо цей зазор дорівнює величині вертикального зазору між робочими поверхнями ( $\bar{z}=1$ ), то коефіцієнт  $K$  дорівнює 1,12, для пастернака, 1,1 – для салата, 1,08 – для кропу. При зменшенні  $\bar{z}$  до мінімального значення (0,3H) коефіцієнт  $K$  в цієї точці зменшується до 1.

При збільшенні вертикального зазору до 8–10 мм між робочими поверхнями вплив знакозмінного потоку зростає інтенсивно, потім градієнт поверхні зменшується. Для пастернака такий характер змінювання коефіцієнту  $K$  більш виражений, для салата та кропу – менш помітний.

Вплив висоти екрану та вертикального зазору між робочими поверхнями на рівень впливу знакозмінного повітряного потоку збільшується при зростанні амплітуди коливань. При амплітуді коливань 0,5 мм вплив знакозмінного потоку досить незначний. За відсутності аеродинамічного

екрану коефіцієнт  $K$  не перебільшує 1,02–1,07 для  $H=6$  мм і 1,05–1,12 для  $H=15$  мм.

На рис. 3.10-3.12 відображено характер змінювання показника впливу знакозмінного повітряного потоку на якість віброфрикційного розділення насіннєвого матеріалу від амплітуди коливань та вертикального зазору між робочими поверхнями при заданих конструкційних параметрах екрану.

Показник впливу знакозмінного потоку зменшується до мінімальних значень при повному перекритті вертикального зазору між робочими поверхнями екраном. При частковому перекритті вертикального зазору екраном відбувається збільшення коефіцієнта  $K$  при зростанні відстані екрану від торця робочого блоку.

За амплітудою коефіцієнт  $K$  змінюється практично лінійно. За вертикальним зазором  $H$  – має місце зменшення градієнту після 8 мм.

Для пастернака та салата спостерігається більш суттєва дія аеродинамічного екрану у порівнянні з кропом.

### 3.3 Обґрунтування раціональних конструкційно-режимних параметрів ВФНС з аеродинамічним екраном на підставі сформованих регресійних моделей

Наведені результати свідчать про відсутність екстремуму функції  $K = f(\bar{d}, \bar{z}, \bar{H}, \bar{A})$ , яка має характер поступового наближення до 1 (усунення впливу знакозмінного повітряного потоку).

Практично повністю вплив знакозмінного потоку виключається при  $\bar{z} = 65\%$  та  $\bar{d} \geq 100\%$  при будь-яких амплітудах коливань та величинах вертикального зазору між робочими площинами. При зменшенні амплітуди та (або) вертикального зазору припускається збільшення величини  $\bar{z}$  та зменшення перекриття  $\bar{d}$ .

В якості раціональних конструкційних параметрів аеродинамічного



екрану слід вибрати зазор між вертикальною стінкою екрану та кромкою робочої поверхні  $50\div 65\%$ , а перекриття вертикального зазору слід вибрати  $100-110\%$  від величини вертикального зазору між робочими поверхнями блоку ВФНС.

Вертикальний зазор між робочими поверхнями слід встановлювати якомога менший. Тобто –  $H = 4 \dots 6$  мм. Аналогічний підхід слід застосувати щодо обґрунтування раціонального режиму роботи ВФНС за амплітудою коливань. Тобто –  $A = 0,5$  мм.

Доцільна конструкція аеродинамічного екрану представлена на рис. 3.13.

Отримані рекомендації щодо доцільної конструкції аеродинамічного екрану впроваджено в освітній процес Державного біотехнологічного університету (місто Харків) та у ПАТ КМЗ з метою покращення технології вібросепарації насінневих матеріалів чутливих до руху повітря (Додаток К акти впровадження).

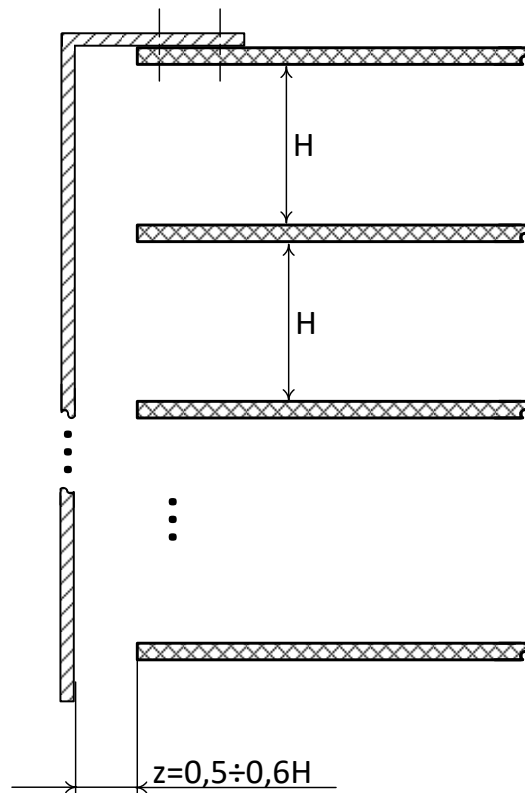


Рисунок 3.13 – Доцільна конструкція аеродинамічного екрану

Конструкцію ВФНС з аеродинамічним екраном, що регулюється, внесено до національного реєстру патентів України [28].

### 3.4 Висновки по розділу

1. Обґрунтування раціональних конструкційно-режимних параметрів ВФНС здійснено за критерієм мінімізації або виключення впливу знакозмінного потоку повітря на якість вібросепарації фракцій насінневих матеріалів шляхом проведення чисельного експерименту.

2. В якості показника вимірювання ступеня впливу знакозмінного повітряного потоку на якість віброфрикційної сепарації насінневих матеріалів використане відношення сум кутів розкриття і перекриття секторів можливих траєкторій насіння різних фракцій, що отримані при діючих та відсутніх аеродинамічних силах та моментах. Складові показника є залежними від конструкційно-режимних параметрів ВФНС з аеродинамічним екраном.

3. За результатами регресійного аналізу залежність показника впливу знакозмінного повітряного потоку на якість розділення насінневих матеріалів має нелінійний характер та описується регресійним рівнянням другого порядку. Найбільш впливовими виявилися конструкційні характеристики екрану та вертикальний зазор між робочими поверхнями. При цьому, оскільки змінення вертикального зазору між робочими поверхнями, а також амплітуди коливань обмежене вимогами налагодження процесу вібросепарації конкретної культури, то єдиним дієвим засобом зменшення впливу знакозмінного потоку повітря на якість розділення насіння є екран.

4. На підставі параметричного аналізу за допомогою регресійних рівнянь обґрунтовано раціональні значення конструкційно-режимних параметрів ВФНС. Для практично повного виключення впливу знакозмінного повітряного потоку доцільно мати аеродинамічний екран з висотою його вертикальної стінки  $100\div 110\%$  та з відстанню цієї стінки від кромки блоку  $50\div 65\%$  від величини наявного вертикального зазору між робочими

поверхнями блоку ВФНС. Вертикальний зазор між робочим поверхнями та амплітудою коливань ВФНС бажано мати такими, що наближаються до лівої границі встановлених інтервалів варіювання цих величин. Відповідно, 4...6 мм та 0,5 мм.

## РОЗДІЛ 4

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІБРОФРИКЦІЙНОГО СЕПАРАТРУ З АЕРОДИНАМІЧНИМ ЕКРАНОМ

#### 4.1 Програма лабораторних випробувань

Метою експериментальних досліджень є доповнення і перевірка правильності висновків та пропозицій щодо раціональних конструкційно-режимних параметрів ВФНС з аеродинамічним екраном, які сформульовані за результатами чисельного експерименту.

У відповідності із програмою цих досліджень було потрібно:

- підтвердити та кількісно оцінити вплив знакозмінного потоку повітря в середині робочих блоків ВФНС на якість сепарації насінневого матеріалу пастернаку;
- провести порівняльну оцінку конструкційно-режимних рекомендацій за даними чисельного та натурного експериментів;
- оцінити ступінь підвищення чистоти досліджуваного насінневого матеріалу після його обробки за допомогою удосконаленого ВФНС.

Для досягнення сформульованих цілей проводилися дослідження конструктивно-режимних параметрів ВФНС, що оснащена робочим блоком з аеродинамічним екраном. Результати досліджень порівнювалися з результатами чисельного експерименту. Лабораторні випробування проводилися з використанням відомих методів експериментальних досліджень [147, 148].

Загальна схема лабораторних досліджень включала наступні етапи:

- перший етап – експериментальні дослідження впливу конструкційно-режимних параметрів ВФНС на параметри віброфрикційного руху фракцій насінневого матеріалу пастернаку;

- другий етап – порівняльна оцінка результатів чисельного і натурального експериментів, визначення рівня адекватності математичної моделі;
- третій етап – лабораторні дослідження. Оцінка ступеню підвищення чистоти насінневого матеріалу після його обробки на удосконаленій ВФНС.

На першому етапі:

- шляхом натурального моделювання з використанням ВФНС з аеродинамічним екраном з різними конструкційно-режимними параметрами перевірялась гіпотеза про можливість зменшення впливу знакозмінного повітряного потоку на якість віброфрикційного розділення насіння пастернаку;
- формувалась регресійна модель з оцінки показника ступеня впливу знакозмінного повітряного потоку на якість віброфрикційного розділення насіння пастернаку залежно від конструкційно-режимних параметрів ВФНС з екраном при постійному вертикальному зазорі між робочими поверхнями.

На другому етапі:

- зрівнювались отримані результати натурального експерименту з результатами, які сформовані на підставі проведення чисельного експерименту.

На третьому етапі:

- шляхом проведення лабораторних випробувань удосконаленої ВФНС оцінювалось підвищення показника сортової чистоти контрольної вибірки насінневого матеріалу за рахунок зменшення впливу знакозмінного потоку повітря.

### 4.3 Методика лабораторних випробувань

#### 4.3.1 Методика варіювання та вимірювання конструкційних параметрів аеродинамічного екрану

Експериментальні дослідження проводилися за допомогою ВФНС з блоками, один з яких був оснащений аеродинамічним екраном (рис. 4.1).

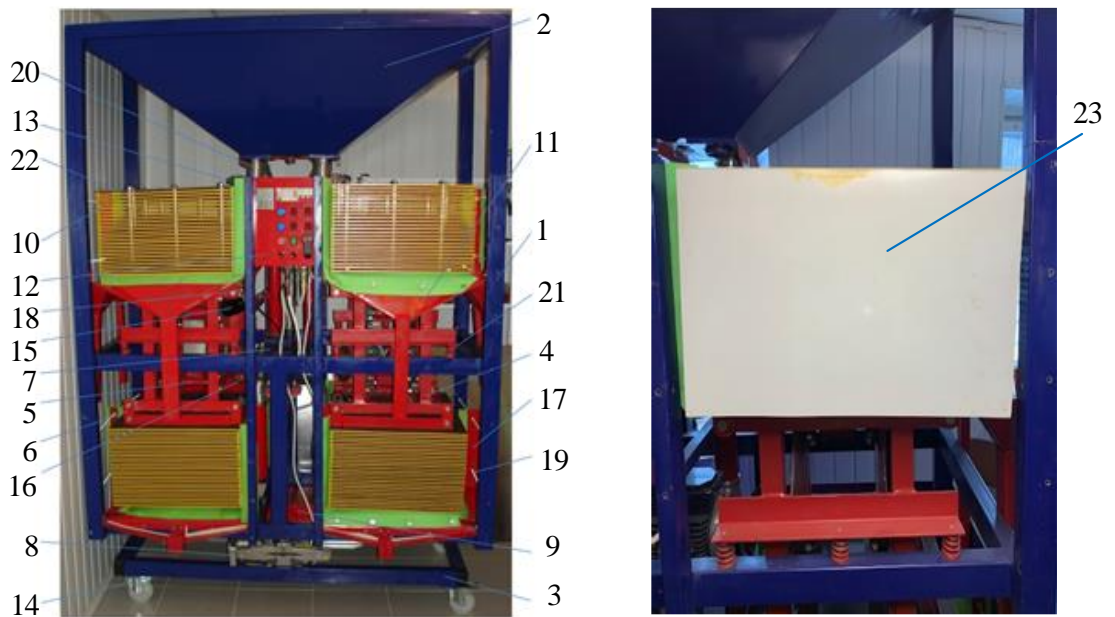


Рисунок 4.1. Загальний вигляд експериментальної установки:

- а) без екрану: 1 – проміжна рама; 2 – бункер насіння; 3 – платформа; 4 – рама вібробуджувача; 5 – вібробуджувач; 6 – рама площин; 7 – електродвигун; 8 – електродомкрат; 9 – блок живлення; 10 – сепаруючі площини; 11 – напрямні; 12 – блок управління; 13 – живильник; 14 – колісний механізм; 15 – мотор-редуктор; 16 – муфта; 17 – ділильна планка; 18 – муфта приводу живильника; 19 – гвинтові напрямні; 20 – гнучкий патрубок; 21 – пружини; 22 – таровані шайби;
- б) блок ВФНС обладнаний аеродинамічним екраном: 23 – аеродинамічний екран.

Аеродинамічний екран для блоку робочих поверхонь утворювався за допомогою конструкційного елемента, зовнішній вигляд якого представлений на рис. 4.2.

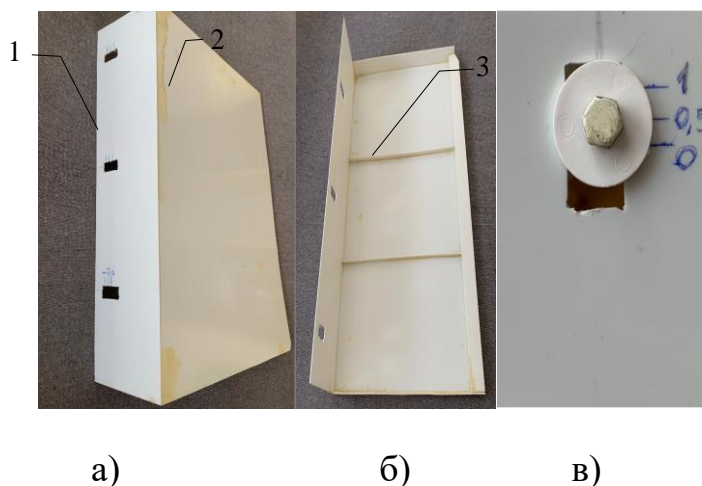


Рисунок 4.2 – Зовнішній вигляд аеродинамічного екрану: *а* – вид ззовні (1 – горизонтальна полиця з регулюючими отворами; 2 – вертикальна стінка); *б* – вид зсередини (3 – ребра жорсткості, що регулюють відстань екрану від торцю робочого блоку); *в* – регулювання відстані вертикальної стінки екрану від торцю робочого блоку

Для регулювання відстані вертикальної стінки екрану використовувалися спеціальні регулюючі проточки для кріплення горизонтальної полиці екрану (рис. 4.2 *в*) та ребра жорсткості на вертикальній стінці (рис. 4.2 *б*, позиція 3).

Аеродинамічний екран у вигляді вертикальних стінок з горизонтальними полицями закріплений вздовж кожної сторони блоку робочих поверхонь ВФНС. Для збільшення відстані кожна стінка аеродинамічного екрану відсувалась від відповідного торцю робочої поверхні. Для зменшення – наближалась. Для фіксації необхідного положення екрану затягувалися кріпильні гвинти, які притискали горизонтальну полицю екрану до верхньої робочої поверхні робочого блоку ВФНС.

Для регулювання висоти вертикальної стінки екрану здійснювалась заміна стінок. При проведенні експериментів використовувалися два комплекти вертикальних стінок з горизонтальними полицями: комплект, який перекривав вертикальний зазор між двома верхніми робочими поверхнями блоку на 75%, та комплект, який перекривав на 150%. Експеримент, який

повинен був проводитися для випадку нульового перекриття екраном вертикального зазору, проводився без аеродинамічного екрану.

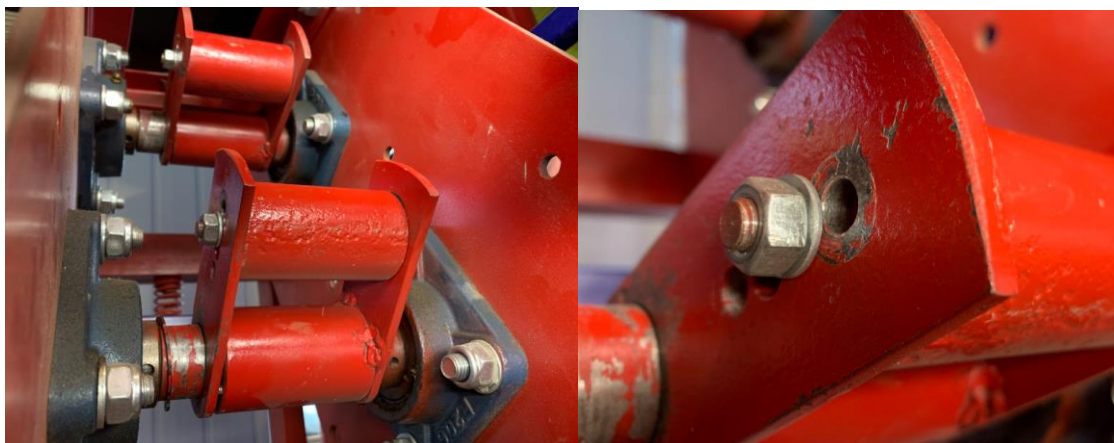
Дослідження впливу знакозмінного повітряного потоку проводилися для перших двох робочих поверхонь блоку. Для цього приймач розділених фракцій насіння кріпився безпосередньо під другою робочою поверхнею блоку. Насіння для віброфрикційного розділення подавалося тільки на другу поверхню.

#### 4.3.2 Методика варіювання та вимірювання амплітуди коливань

Амплітуда коливань варіювалася в діапазоні від 0,5 до 3 мм. Для регулювання величини амплітуди здійснювалася зміна характеристик віброзбудника (рис. 4.3). Регулювання віброзбудника здійснювалася шляхом заміни комплектів регулюючих дебалансів та їх відстані від осі обертання віброзбудника.

При збільшенні маси та відстані від осі обертання регулюючих дебалансів відбувалася збільшення амплітуди коливань. При зменшенні маси та наближенні дебалансів до осі обертання – зменшення амплітуди коливань.

Для вимірювання амплітуди коливань використовувався метод оптичного стробування (рис. 4.4). Суть методу полягає у наступному.



а)

б)





в)

Рисунок 4.3 – Вібробудник ВФНС: а) – загальний вигляд конструкції вібробудника; б) – регулювання відстані дебаланси від осі обертання; в) – змінні дебаланси з різною вагою

На конструкцію робочого органу ВФНС наносилися дві лінії, які утворювали деякий кут. Нижня лінія наносилась таким чином, щоб утворювати прямий кут з напрямком коливань. Під нижньою лінією розміщувалася шкала вимірювання амплітуди коливань. Відстань, що вимірювалась за допомогою шкали, пропорційна відстані між двома лініями, якщо цю відстань вимірювати вздовж перпендикуляру до нижньої лінії, яка відкладена від точки перетинання ліній на відстані, що дорівнює відстані на шкалі.

Коли здійснювалися коливання з амплітудою  $A$ , то на певній відстані від точки перетинання двох ліній створювалось зображення стробу, висота якого дорівнювала значенню амплітуди. Інші ділянки ліній були розмитими.

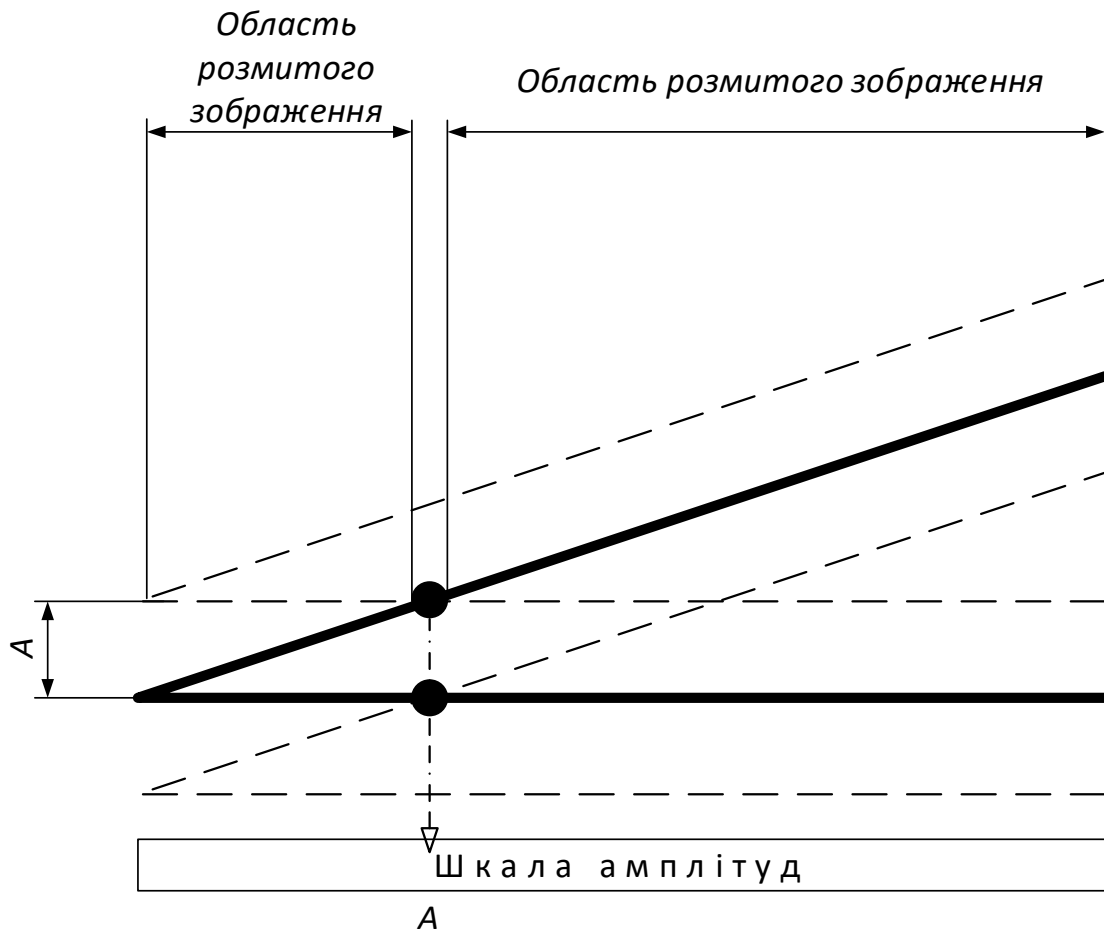


Рисунок 4.4 – Вимірювання амплітуди коливань методом оптичного стробування

Відстань стробу від точки перетинання ліній вимірювалась за допомогою шкали вимірювання амплітуди. Вимірні значення мало лінійну залежність від амплітуди коливань. Коефіцієнт пропорційності залежав від значення кута між встановленими лініями.

#### 4.3.3 Методика вимірювання кінематичних параметрів віброфрикційного руху насіння

Методика проведення лабораторних випробувань ВФНС по обґрунтуванню її використання для сепарування насіннєвого матеріалу пастернаку полягала в наступному:

– досліджуваний насіннєвий матеріал проходив доочищення і сортування на робочому органі ВФНС;

– відповідно до стандарту ДСТУ 7160-2020 виконувався аналіз вихідного і розділеного по фракціях насінневого матеріалу і визначались: вміст насіння основної культури, засміченість насінням інших рослин і домішками, наявність травмованого насіння, маса 1000 насінин;

– при проведенні лабораторно-експериментальних досліджень на блок сепаруючих пластин машини кріпились спеціально виготовлені приймачі продуктів поділу і, при сепарації насінневого матеріалу пастернаку, результати поділу збирались в 10 приймачів (рис. 4.5).



Рисунок 4.5 – Приймач фракцій насінневого матеріалу після віброфрикційного розділення

Шляхом статистичної обробки насінневого матеріалу, який утворювався у встановлених приймачах, визначалися кінематичні параметри віброфрикційного руху фракцій насінневого матеріалу та показник впливу знакозмінного потоку повітря.

В якості кінематичних параметрів розглядалися:

– середні статистичні значення кутів відхилення середньої осі віброфрикційного руху насіння першої, другої та третьої фракцій відносно осі  $Y$ ;

– половинні кути секторів можливих траєкторій насіння всіх трьох фракцій (кути максимального відхилення траєкторій насіння однієї фракції від середньостатистичного кута).

Середньостатистичні кути розглянутих фракцій насіння обчислювалися як:

$$[\varphi_i] = \sum_{k=1}^{10} \frac{m_{ik}}{M \cdot \gamma_i} \varphi_k, \quad \sum_{k=1}^{10} \frac{m_{ik}}{M \cdot \gamma_i} = 1, \quad (4.1)$$

де  $[\varphi_i]$  – середньостатистичне значення куту відхилення осі віброфрикційного руху насіння  $i$ -ої фракції відносно осі  $Y$ ;  $m_{ik}$  – кількість насінин  $i$ -ої фракції, що потрапили до  $k$ -ої секції приймача;  $M$  – загальна кількість частинок, що складає насіннєвий матеріал;  $\gamma_i$  – масовий коефіцієнт, який визначає частку, що складає насіння  $i$ -ої фракції у матеріалі;  $\varphi_k$  – кут сектору, що з'єднує точку розташування живильника з серединою  $k$ -ої секції насіннєвого приймача.

Сума відношень  $m_{ik}/M \cdot \gamma_i$  по всім десяти секціям приймача, складає 1.

Половинний кут сектору можливих траєкторій насіння  $i$ -ої фракції обчислюється як:

$$[\delta_i] = \frac{([\varphi_i] - \varphi_i^{\min}) + (\varphi_i^{\max} - [\varphi_i])}{2}, \quad (4.2)$$

де  $\varphi_i^{\min}, \varphi_i^{\max}$  – мінімальне та максимальне значення кутів, які визначають відповідні приймачі насіння, де кількість насіння  $i$ -ої фракції не дорівнює нулю.

Для отриманих значень  $[\varphi_i], [\delta_i], i=1, \dots, 3$  за допомогою (3.3) обчислюються кути перекриття секторів віброфрикційного руху насіння розглянутих фракцій (насіння першої, другої групи та некондиція).

Для відомих  $[\varphi_i]$  та кутів перекриття  $i$ -ої та  $i+1$ -ої фракції,  $\Delta_i$ , за допомогою (3.2) обчислювався показник впливу знакозмінного повітряного потоку на якість віброфрикційного розділення:

$$\frac{\sum_{i=1}^3 (\delta_i + \Delta_i)}{\sum_{i=1}^3 (\delta_i^* + \Delta_i^*)}, \quad (4.3)$$

де  $\delta_i, \delta_i^*$  – отриманий при проведенні натурального експерименту та нормативні половинні кути секторів розсіювання траєкторій насіння (частинок) розглянутих фракцій;  $\Delta_i, \Delta_i^*$  – експериментальне та нормативне перекриття секторів фракцій насінневого матеріалу.

Експериментальні та нормативні значення кутів  $\delta_i, \delta_i^*, \Delta_i, \Delta_i^*$ , а також відповідні їм значення показників вимірювання впливу знакозмінного повітряного потоку на якість віброфрикційного розділення наведено у таблиці 3.2 додатку 3.

#### 4.3.4 Методика планування і проведення багатофакторного експерименту

Під час випробувань проводився трифакторний трирівневий натурний експеримент. Методика планування і проведення експерименту аналогічна методиці, яка використовувалась при проведенні чотирифакторного трирівневого чисельного експерименту (п.п. 3.2).

#### 4.3.5 Методика проведення лабораторних випробувань з оцінки ефективності сепарації насіння пастернаку за допомогою ВФНС, оснащеного аеродинамічним екраном

З метою оцінки ефективності використання ВФНС, оснащеного аеродинамічним екраном, були проведені лабораторні випробування щодо

сепарації насіннєвого матеріалу пастернаку. Ефективність оцінювалася за допомогою показника сортової чистоти отриманих розділених фракцій насіннєвого матеріалу пастернака.

Лабораторні досліді проводилися за такою методикою:

1) виконувався попередній лабораторний аналіз вхідного насіннєвого матеріалу, яким визначався вміст щуплого, ураженого хворобами насіння пастернака, побічних домішок, а також можливість їх виділення на робочому органі ВФНС;

2) за результатами лабораторного аналізу складалася технологічна схема роботи ВФНС з очищення і сортування даного насіннєвого матеріалу, визначалися параметри роботи машини;

3) досліджуваний насіннєвий матеріал сепарувався на ВФНС;

4) проводився аналіз вихідного насіннєвого матеріалу і кожної фракції з метою визначення вмісту насіння основної культури, маси 1000 насінин, наявності щуплого та хворого насіння, побічних домішок (сухого стебла, насіння бур'янів).

Для насіння пастернаку встановлено наступні норми якості насіннєвого матеріалу, які утворюють наступні групи (сорта):

– перша група: оригінальне та елітне насіння з показником сортової чистоти не менш 97% та масою 1000 насінин 3 – 4 г;

– друга група: репродукційне насіння з показником чистоти не менш 95% та масою 1000 насінин не менш 3 г;

– треття група: щупле та хворе насіння, насіння бур'янів, сухе стебло.

Господарський ефект від застосування модернізованої ВФНС може бути кількісно визначений за допомогою величини збільшення показника сортової чистоти обробленого матеріалу:

$$\Delta K^{\text{чст}} = K_{\text{обр.}}^{\text{чст}} - K_0^{\text{чст}}, \quad (4.4)$$

$$K_{\text{обр.}}^{\text{чст}} = \left( \sum_{i=1}^{N^{\text{кндц}}} \gamma_i k_i^{\text{чст}} \right) \cdot \left( \sum_{i=1}^{N^{\text{кндц}}} \gamma_i \right)^{-1}, \quad (4.5)$$

де  $K_{\text{обр.}}^{\text{чст}}, K_0^{\text{чст}}$  – показники сортової чистоти обробленого та вхідного насіннєвого матеріалу, відповідно;  $\Delta K^{\text{чст}}$  – змінення показника сортової чистоти насіннєвого матеріалу внаслідок його обробки на ВФНС;  $N^{\text{кндц}}$  – кількість приймачів ВФНС, в яких, після виконання віброфрикційного розділення, виявився насіннєвий матеріал з показником чистоти не менш 95% та масою 1000 насінин не менш 3 г;  $\gamma_i = m_i/m$  – ваговий коефіцієнт насіннєвого матеріалу, що потрапив в  $i$ -ий приймач ВФНС;  $m_i$  – маса насіннєвого матеріалу, який потрапив в  $i$ -ий приймач ВФНС;  $m$  – загальна маса насіннєвого матеріалу, який оброблявся на ВФНС.

Оскільки показник сортової чистоти насіннєвого матеріалу береться тільки для кондиційних груп, підраховується з урахуванням вибраку некондиційного насіннєвого матеріалу, то вагові коефіцієнти виділених фракцій корегуються. Їх вагові коефіцієнти діляться на сумарний ваговий коефіцієнт кондиційного насіннєвого матеріалу (вираз (4.5)).

#### 4.4 Результати лабораторних випробувань

##### 4.4.1 Оцінка впливу конструкції аеродинамічного екрану та амплітуди коливань на параметри віброфрикційного руху насіння пастернаку

Вплив конструкції аеродинамічного екрану та амплітуди коливань на параметри віброфрикційного руху насіння пастернаку оцінювався на підставі проведення натурного експерименту, план проведення якого представлений у табл. 3.1 Додатку 3.

Експеримент проводився для постійного вертикального зазору між робочими поверхнями блоку, який дорівнював 10 мм.

Значення показників:  $\bar{d}$ ,  $\bar{z}$  та  $\bar{A}$  обчислювались за допомогою (3.6), (3.5) і (3.8).

Інтервали змінювання конструкційних параметрів аеродинамічного екрану складали:

– відносна висота вертикальної стінки екрану:  $\frac{d}{H} \in [0; 1,5]$ ;

– відносна відстань екрану від торцю робочого блоку:  $\frac{z}{H} \in [0,3; 1]$ .

Інтервал змінювання амплітуди коливань:  $A \in [0,5; 3]$ , [мм].

Результати оцінки впливу конструкційних параметрів аеродинамічного екрану та амплітуди коливань на параметри віброфрикційного руху насіння пастернаку наведено у табл. 3.2 Додатку 3.

На підставі даних, що наведено у табл. 3.2 Додатку 3, для нормованих значень коефіцієнту впливу знакозмінного потоку повітря на якість розділення насіннєвого матеріалу, згідно (3.13) – (3.16), побудовано регресійну модель. В таблицях I.1, I.2 додатку I показано кроки перетворення повнофакторної регресійної моделі до моделі з виключеними статистично незначними регресорами.

В табл. I.1, I.2 Додатку I позначено:

- під регресором  $\bar{x}_1$  – відносну віднормовану висоту вертикальної стінки аеродинамічного екрану,  $\bar{d}$ ;

- під регресором  $\bar{x}_2$  – відносну віднормовану відстань вертикальної стінки екрану від торцю робочої поверхні,  $\bar{z}$ ;

- під регресором  $\bar{x}_3$  – віднормовану амплітуду коливань,  $\bar{A}$ .

З наведених результатів, найбільш точною є регресійна модель за номером 2. Для неї критерій Фішера є максимальним та складає значення 199, а коефіцієнт детермінації – 0,987.

Остаточна регресійна модель з оцінки нормованих значень показника



впливу знакозмінного повітряного потоку на якість розділення насіння пастернаку має наступний вигляд:

$$k = 0,269 - 0,29\bar{d} - 0,037\bar{z} + 0,463\bar{A} + 0,304\bar{z}\bar{d} - 0,607\bar{d}\bar{A} + 0,079\bar{z}\bar{A} + 0,257\bar{A}^2 . \quad (4.6)$$

Регресійне рівняння, скореговане для визначення ненормованих значень показника впливу, має наступний вигляд:

$$K = 1,053 - 0,054\bar{d} - 0,007\bar{z} + 0,087\bar{A} + 0,057\bar{z}\bar{d} - 0,113\bar{d}\bar{A} + 0,015\bar{z}\bar{A} + 0,048\bar{A}^2 . \quad (4.7)$$

Отриману за результатами проведення натурного експерименту регресійну модель (4.7) зіставлено з регресійною моделлю (3.31), що отримано за результатами проведення чисельного експерименту. На рис. 4.6 наведено графіки залежності показника впливу знакозмінного повітряного потоку на якість розділення насіння пастернаку від конструкційно-режимних параметрів ВФНС, що побудовано за допомогою (3.31) (рис. 4.6 а) та за допомогою (4.7) (рис. 4.6 б). Графік, який побудований за допомогою (3.31) (регресійне рівняння за результатами чисельного експерименту), обчислювався при  $\bar{H} = 0,44$  або  $H = 10$  мм .

З наведених графіків видно, що математична модель перебільшує ступінь впливу знакозмінного повітряного потоку на кінематичні параметри віброфрикційного руху насіння. При чому величина помилки математичної моделі залежить від локалізації значень конструкційно-режимних параметрів. При зростанні висоти вертикальної стінки аеродинамічного екрану та при її наближенні до торцю робочого блоку ВФНС адекватність математичної моделі зростає. Також величина помилки зменшується, якщо зменшується амплітуда коливань. В таблиці 4.1 наведено оцінки відносної помилки математичної моделі для різних значень конструкційно-режимних параметрів  $\bar{z}$ ,  $\bar{d}$  і  $\bar{A}$  (вертикальний зазор  $\bar{H}$  не змінювався та дорівнював 0,44). Відносна помилка обчислювалась як:

$$\Delta = \frac{|K^{\text{н.екс.}} - K^{\text{ч.екс.}}|}{K^{\text{н.екс.}}} \cdot 100\%, \quad (4.8)$$

де  $K^{\text{н.екс.}}$ ,  $K^{\text{ч.екс.}}$  – показник впливу знакозмінного повітряного потоку на якість віброфрикційного розділення насіння, що обчислений за допомогою регресійних рівнянь побудованих за результатами натурального та чисельного експериментів, відповідно.

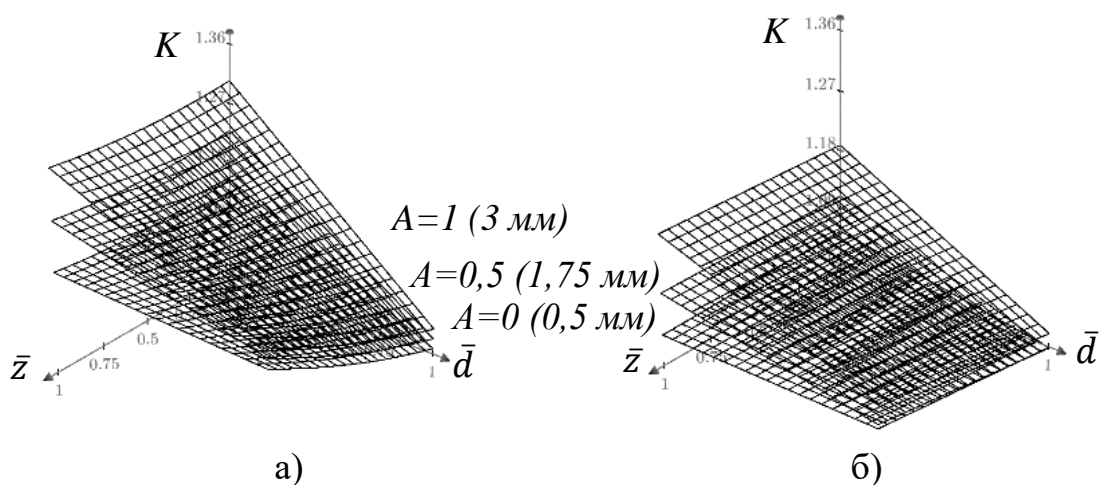


Рисунок 4.6 – Регресійна залежність показника впливу знакозмінного повітряного потоку на якість сепарації насіння пастернаку від конструкційних характеристик аеродинамічного екрану та амплітуди коливань: а) за результатами чисельного експерименту; б) за результатами натурального експерименту

При максимальному перекритті екраном вертикального зазору між робочими поверхнями блоку, при мінімальному наближенні вертикальної стінки екрану до торцю блоку ВФНС, а також при мінімальній амплітуді коливань ( $\bar{d} = 1$ ;  $\bar{z} = 0$ ;  $\bar{A} = 0$ ) – помилка математичної моделі складає 1%.

Максимальна помилка (10,8%) математичної моделі відповідає таким конструкційно-режимним параметрам, коли аеродинамічний екран відсутній ( $\bar{d} = 0$ ), а амплітуда коливань знаходиться всередині встановленого інтервалу її варіювання ( $\bar{A} = 0,5$  (1,75 мм)).

Таблиця 4.1 – Відносна помилка математичної моделі в порівнянні з натурним експериментом для різних локалізацій конструкційно-режимних параметрів ВФНС ( $\bar{H} = 0,44$ )

$\Delta, \%$	$\bar{d}$	$\bar{z}$	$\bar{A}$
1	1	0	0
2,6	1	0	0,5
1,8	1	0	1
4,2	1	0,5	0
5,4	1	0,5	0,5
4,2	1	0,5	1
9	1	1	0
9,8	1	1	0,5
8,1	1	1	1
5,3	0,5	0	0
6,9	0,5	0	0,5
6,1	0,5	0	1
6,6	0,5	0,5	0
7,8	0,5	0,5	0,5
6,6	0,5	0,5	1
9,6	0,5	1	0
10,3	0,5	1	0,5
8,7	0,5	1	1
9,4	0	0	0
10,8	0	0	0,5
9,8	0	0	1
9	0	0,5	0
10	0	0,5	0,5
8,7	0	0,5	1
10,2	0	1	0
10,8	0	1	0,5
9,2	0	1	1

Отже розроблена чисельна модель віброфрикційного руху насіння з урахуванням аеродинамічних сил та моментів перебільшує вплив знакозмінного повітряного потоку на кінематичні параметри руху насіння до 11%. Це більшою мірою проявляється, коли аеродинамічний екран відсутній (тобто тангенційні швидкості у робочому просторі, що присутні в математичній моделі, мають максимальні значення). В цілому адекватність математичної моделі задовольняє точності, яку потребують інженерні задачі щодо проєктування ВФНС з аеродинамічними екранами.

#### 4.4.2 Оцінка приросту показника сортової чистоти насіння з контрольної вибірки за рахунок зменшення впливу знакозмінного повітряного потоку

Аналіз вхідного насінневого матеріалу пастернаку показав, що він є некондиційним. В ньому містилося 460 шт/100 г насіння бур'янів та інших рослин, в тому числі насіння: підмаренника – 60 шт/100 г, гречишки – 240 шт/100 г, пікульника – 120 шт/100 г. Показник сортової чистоти (вміст кондиційного насіння) складав 82% при мінімально-припустимому значенні 95% згідно ДСТУ 7160-2020. Для сепарації насінневого матеріалу пастернаку до посівних кондицій було використано ВФНС без аеродинамічного екрану та з екраном.

Установчі кінематичні параметри обох машин були наступними: поздовжній кут нахилу робочих поверхонь –  $5,50^\circ$ ; поперечний –  $2^\circ$ ; амплітуда коливань – 1,2 мм; кут спрямованості коливань –  $30^\circ$ ; частота коливань – 190 рад/с. Робочі поверхні були облицьовані абразивним полотном. Продуктивність одної поверхні складала 5,3 кг/хв.

Результати обробки насіння, отримані за допомогою ВФНС без аеродинамічного екрану, представлені в табл. 4.2, з аеродинамічним екраном – в табл. 4.3.

Аналіз отриманих результатів показує, що:

– для ВФНС без аеродинамічного екрану не вдалось виділити жодної фракції насіння, яка відповідає нормам, встановленим для насінневого матеріалу першої групи (оригінальне та елітне насіння з показником сортової чистоти не менш 97%), виділено три фракції насіння другої групи (репродукційне насіння з показником сортової чистоти не менш 95%) і шість фракцій некондиційного насіння (показник сортової чистоти менш 95% та маса 1000 насінин менш 3 г). У відсотках дані фракції складають, відповідно: 56,03% і 43,97% від загального обсягу вхідного насінневого матеріалу;

– для ВФНС, обладнаного аеродинамічним екраном, отримано чотири фракції насіння першої групи, одну фракцію насіння другої групи і п'ять

фракцій некондиційного насіння. У відсотках дані фракції складають, відповідно: 80,65%; 12,43% и 6,92% від загального об'єму вхідного насіннєвого матеріалу;

– для ВФНС з аеродинамічним екраном, у порівнянні з немодернізованою машиною: за рахунок фракцій насіння другої групи і некондиційного насіння отримано насіння першої групи; масова частка насіння другої групи зменшена на 43,6%; некондиційного насіння – на 37,05%.

Виходячи з даних, отриманих в ході лабораторних досліджень, встановлено, що:

– показник сортової чистоти вхідного насіннєвого матеріалу складає:

$$K_0^{\text{чст}} = 85,0\% , \quad (4.9)$$

– показник сортової чистоти насіннєвого матеріалу після його сепарації на ВФНС, який не обладнаний аеродинамічним екраном, складає:

$$K_{\text{обр.}}^{\text{чст}} = \left( \sum_{i=1}^{N_{\text{кндц}}} \gamma_i k_i^{\text{чст}} \right) \cdot \left( \sum_{i=1}^{N_{\text{кндц}}} \gamma_i \right)^{-1} = \frac{1}{0,56} (0,186 \cdot 95,7 + 0,206 \cdot 95,1 + 0,169 \cdot 95,2) = 95,5\% , \quad (4.10)$$

де  $\gamma_i, k_i^{\text{чст}}$  – вагові коефіцієнти, коефіцієнти вмісту основної культури виділених фракцій, значення яких наведено в табл. 4.2;

Таблиця 4.2 - Результати сепарації насіння пастернаку за допомогою ВФНС без аеродинамічного екрану

Найменування показників	Вхідний матеріал	Номера приймачів ВФНС									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Розподіл насіння за фракціями, %	100	18,57	20,58	16,88	21,62	12,93	4,85	2,25	0,85	0,87	0,60
Розподіл насіння зростаючим підсумком, %	100	18,57	39,15	56,03	77,65	90,58	95,43	97,68	98,53	99,4	100
Вміст насіння основної культури, %	85,0	95,7	95,1	95,2	90,8	89,0	86,2	84,7	83,6	80,6	68,8
Вміст домішок, шт/100 г	460	–	–	–	–	880	1200	2300	5400	11400	36400
Маса 1000 насінин, г	3,21	3,3	3,25	3,42	2,95	2,98	2,72	2,65	2,68	2,63	2,52
Якість сепарації	не конд.	2-я гр.	2-я гр.	2-я гр.	не кондиційні						

Таблиця 4.3 - Результати сепарації насіння пастернаку за допомогою ВФНС з аеродинамічним екраном

Найменування показників	Вхідний матеріал	Номера приймачів ВФНС									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Розподіл насіння за фракціями, %	100	21,07	27,64	16,62	15,32	12,43	3,35	1,95	0,75	0,56	0,31
Розподіл насіння зростаючим підсумком, %	100	21,07	48,71	65,33	80,65	93,08	96,43	98,38	99,13	99,69	100
Вміст насіння основної культури, %	85,0	99,4	99,6	99,4	97,8	95,2	87,2	84,3	83,6	80,6	68,8
Вміст домішок, шт/100 г	460	–	–	–	–	–	1200	2300	5400	11400	36400
Маса 1000 насінин, г	3,21	3,50	3,46	3,42	3,35	3,1	2,72	2,65	2,68	2,63	2,52
Якість сепарації	не конд.	1-я гр.	1-я гр.	1-я гр.	1-я гр.	2-я гр.	не кондиційні				

– показник сортової чистоти насіннєвого матеріалу після його сепарації на ВФНС з аеродинамічним екраном складає:

$$K_{\text{обр.екр.}}^{\text{чст}} = \left( \sum_{i=1}^{N_{\text{кндц}}} \gamma_i^{\text{екр.}} \cdot k_i^{\text{чст.екр.}} \right) \cdot \left( \sum_{i=1}^{N_{\text{кндц}}} \gamma_i^{\text{екр.}} \right)^{-1} = \frac{1}{0,931} (0,211 \cdot 99,4 + 0,276 \cdot 99,6 + 0,166 \cdot 99,4 + 0,153 \cdot 97,8 + 0,124 \cdot 95,2) = 98,5\%, \quad (4.11)$$

де  $\gamma_i^{\text{екр.}} \cdot k_i^{\text{чст.екр.}}$  – вагові коефіцієнти, коефіцієнти вмісту основної культури виділених фракцій, значення яких наведено в табл. 4.3;

– змінення показника сортової чистоти насіння внаслідок його сепарації на ВФНС без аеродинамічного екрану складає:

$$\Delta K^{\text{чст}} = K_{\text{обр.}}^{\text{чст}} - K_0^{\text{чст}} = 95,5 - 85,0 = 10,5\%, \quad (4.12)$$

– змінення показника сортової чистоти насіння внаслідок його сепарації на ВФНС з аеродинамічним екраном складає:

$$\Delta K_{\text{екр.}}^{\text{чст}} = K_{\text{обр.екр.}}^{\text{чст}} - K_0^{\text{чст}} = 98,5 - 85,0 = 13,5\%. \quad (4.13)$$

Як бачимо, з наведених результатів застосування звичайного ВФНС для доведення вхідного насіннєвого матеріалу пастернаку до кондиційного вигляду (показник сортової чистоти більше 95%; маса 1000 насінин 3 – 4 г) є недостатньо ефективним. За рахунок впливу динаміки повітря знижується ефективність сепарації фракцій насіння. Фракційні групи мають значну частку некондиційного насіннєвого матеріалу. Не вдається виділити насіння оригінальної та елітної груп. Оброблений матеріал має сортову чистоту не вище насіння репродуктивної групи. Відбраковується значний обсяг матеріалу як некондиційний. Для відібраного кондиційного насіннєвого матеріалу показник сортової чистоти підвищується, у порівнянні з вхідним матеріалом, на 10,5%.

Обробка матеріалу на ВФНС з аеродинамічним екраном дає певний ефект. З вхідного матеріалу виділяються фракції з досить високим вмістом основної культури. Вдається отримати значний обсяг насіннєвого матеріалу (до 65% від вхідного матеріалу), який за показником сортової чистоти

відповідає оригінальному та елітному сортам насіння. Обсяг фракцій, що відбраковуються, є незначним – до 7%. Показник сортової чистоти відібраного кондиційного насіннєвого матеріалу, у порівнянні з вхідним матеріалом, підвищується на 13,5%. Це на 3% більше, ніж показник чистоти, який отриманий на ВФНС без екрана, не говорячи про те, що значно зменшується частка насіннєвого матеріалу, яка іде у відходи.

В цілому представлений на випробування дослідний зразок ВФНС може бути рекомендований до використання в господарствах як машина, що призначена для сепарації насіннєвих матеріалів з аеродинамічними властивостями (пастернак, салат листковий, кріп запашний та ін.).

#### 4.5 Висновки по розділу

1. За результатами натурального експерименту доведено адекватність математичної моделі віброфрикційного руху насіння з урахуванням аеродинамічних сил і моментів. Показник вимірювання рівня впливу знакозмінного повітряного потоку на якість віброфрикційного розділення насіння з виразними аеродинамічними властивостями, який отриманий на підставі чисельного моделювання, збігається з результатами натурального експерименту. Чисельна модель у відношенні до натурних випробувань переоцінює вплив знакозмінного повітряного потоку на якість розділення насіння до 11%. Така точність є прийнятною при розв'язанні інженерних задач з розвитку ВФНС з аеродинамічними екранами.

2. Результати проведених лабораторних випробувань підтвердили прийняту гіпотезу про те, що при сепарації дрібного насіння з малою вагою на ВФНС має місце вплив знакозмінного повітряного потоку, який призводить до перемішування фракцій матеріалу. Обладнання ВФНС аеродинамічним екраном суттєво знижує вплив даного фактору і дозволяє покращити процес сепарації насіння за їх фізико-механічними властивостями.

3. Сепарація посівного матеріалу на удосконаленому ВФНС забезпечує



покращення якості насіннєвого матеріалу. Спостерігається збільшення показника сортової чистоти отриманого матеріалу та зменшення частки відходів.

4. При сепарації насіння пастернаку на ВФНС з аеродинамічним екраном забезпечується отримання, з некондиційного вхідного матеріалу, кондиційний посівний матеріал, що відповідає оригінальним, елітним та репродуктивним групам насіння пастернаку при рівні відходів не більш 7%. Показник сортової чистоти обробленого матеріалу зростає на 13,5% (з 85% до 98,5%).

## РОЗДІЛ 5

### РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 5.1 Впровадження результатів досліджень

Дослідження, що складають основу дисертації, проведено в Державному біотехнологічному університеті (ДБТУ) згідно з планом науково-дослідної роботи: «Розробка та удосконалення мехатронних машино-технологічних систем, що відповідають вимогам ергономіки, технічної естетики та охорони праці для механізованого виробництва сільськогосподарської продукції на основі енергозберігаючих та економічно безпечних технологій», ДР № 0123U101678, 2023-2025 рр. Додаток К акти впровадження.

З метою підвищення ефективності очистки та сепарування дрібнонасіньових матеріалів пропонується використовувати новий пакет вібраційних поверхонь, який обладнений аеродинамічним екраном.

Спільними виробничими випробуваннями з ПрАТ «Карлівський машинобудівний завод» ВФНС обладненого аеродинамічним екраном підтвердили ефективність використання аеродинамічних екранів при сепарації дрібного насіння (пастернаку) в якості засобу зниження впливу знакозмінного повітряного потоку на якість відріфрікційного розділення насіння. Отримано збільшення на 3%, порівняно зі звичайним ВФНС, середньозваженого показника сортової чистоти кондиційної частки вихідного насінневого матеріалу: з 95,5% до 98,5%. При цьому частка некондиційного матеріалу знизилась на 37%: з 44% до 7% від загального обсягу матеріалу. Також ВФНС з екраном, на відміну від звичайного сепаратору, дозволив виділити фракції насіння, які належать групам оригінального, елітного та репродуктивного насіння, в той час як обробка на звичайному ВФНС виділяла тільки групу репродуктивного насіння. (Додаток К акти впровадження).

Результати науково-технічної роботи у вигляді конструкторської та

технічної документації ВФНС впроваджені і використані на виробництві ПрАТ «Карлівський машинобудівний завод» для виготовлення відповідного дослідного зразка. Отримана документація буде використовуватися для проведення дослідно-виробничих випробувань ВФНС з метою поставлення його на серійне виробництво.

## 5.2 Техніко-економічна ефективність застосування ВФНС з аеродинамічним екраном

Економічний ефект від застосування удосконаленої ВФНС може бути оцінений за допомогою наступного показника відносного збільшення товарної ціни обробленого насінневого матеріалу:

$$K^{\text{ек.}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{фр.}}} \gamma_i c_i - C_0}{C_0} \cdot 100 \% , \quad (5.1)$$

де  $C_0$  – вартість одного кілограму вхідного насінневого матеріалу;  
 $\gamma_i$  – ваговий коефіцієнт насінневого матеріалу, зібраного в  $i$ -ому приймачеві ВФНС;  $c_i$  – ринкова вартість одного кілограму насіння  $i$ -ої фракції (зібраних насінин в  $i$ -ому приймачеві).

Для насіння пастернаку у цінах 2024 року вартість кілограму матеріала складає:

- оригінальна та елітна групи насіння – 6 000 грн/кг;
- репродуктивна група насіння – 5 000 грн/кг;
- некондиційне насіння – 3 000 грн/кг;
- вхідний насінневий матеріал – 3 000 грн./кг.

Фактичний економічний ефект може бути оцінений як річний прибуток господарства за рахунок використання удосконаленої ВФНС для сепарації насінневого матеріалу:

$$C^{\text{річн.}} = \left( \frac{K^{\text{ек.}}}{100} - 1 \right) \cdot M \cdot C_0, \quad (5.2)$$

де  $C^{\text{річн.}}$  – річний прибуток агропідприємства за рахунок використання удосконаленої ВФНС;  $M$  – середньостатистична маса річного врожаю насінневої культури, якість якої покращується за допомогою удосконаленої ВФНС.

Для насінневого матеріалу пастернаку, обробленого за допомогою ВФНС без аеродинамічного екрану, отримано наступну середньозважену вартість одного кілограму матеріалу:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{N_{\text{фр}}} \gamma 1_i c 1_i &= (0,186 + 0,206 + 0,169) \cdot 5 \cdot 10^3 + \\ &+ (0,216 + 0,049 + 0,022 + 0,009 + 0,009 + 0,006) \cdot 3 \cdot 10^3 = 3738, \text{ [грн/кг]} \end{aligned} \quad (5.3)$$

де  $\gamma 1_i, i = 1, \dots, 10$  – вагові коефіцієнти фракцій, взяті з табл. 4.2;  $c 1_i, i = 1, \dots, 10$  – ринкова вартість насінневого матеріалу з рівнем якості, яка відповідає фракціям з табл. 4.2.

Економічний ефект від обробки вхідного насінневого матеріалу на ВФНС без аеродинамічного екрану дорівнює:

$$K 1^{\text{ек}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{фр}}} \gamma 1_i c 1_i - C_0}{C_0} \cdot 100\% = \frac{3738 - 3000}{3000} \cdot 100\% = 25\%. \quad (5.4)$$

Для насінневого матеріалу, обробленого за допомогою ВФНС з аеродинамічним екраном, отримано середньозважену вартість одного кілограму матеріалу:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{N_{\text{фр}}} \gamma 2_i c 2_i &= 0,807 \cdot 6 \cdot 10^3 + 0,124 \cdot 5 \cdot 10^3 + \\ &+ (0,034 + 0,02 + 0,008 + 0,006 + 0,003) \cdot 3 \cdot 10^3 = 5675, \text{ [грн/кг]} \end{aligned} \quad (5.5)$$

де  $\gamma 2_i, i = 1, \dots, 10$  – вагові коефіцієнти фракцій, узяті з табл.4.3;  
 $c 2_i, i = 1, \dots, 10$  – ринкова вартість насінневого матеріалу з рівнем якості, яка відповідає фракціям з табл. 4.3.

Економічний ефект від обробки вхідного насінневого матеріалу на вібраційній машині з аеродинамічним екраном дорівнює:

$$K 2^{\text{ек}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{фр}}} \gamma 2_i c 2_i - C_0}{C_0} \cdot 100\% = \frac{5675 - 3000}{3000} \cdot 100\% = 89\% . \quad (5.6)$$

Фактичний економічний ефект від застосування удосконаленої ВФНС у господарстві зі середньостатистичним обсягом насіння пастернаку 500 кг буде дорівнювати:

$$C^{\text{річн}} = \frac{K 2^{\text{ек}}}{100\%} \cdot M \cdot C_0 = \frac{89}{100} \cdot 500 \cdot 3000 = 1\,335\,000, [\text{грн/рік}]. \quad (5.7)$$

### 5.3 Висновки по розділу

1. Результати науково-технічної роботи у вигляді конструкторської та технічної документації ВФНС впроваджені і використані на виробництві ПрАТ «Карлівський машинобудівний завод» для виготовлення відповідного дослідного зразка. Отримана документація буде використовуватися для проведення дослідно-виробничих випробувань ВФНС з метою поставлення його на серійне виробництво.

2. При обробці насінневих культур чутливих до дії знакозмінного повітряного потоку на ВФНС з аеродинамічним екраном зростає товарна ціна обробленого насінневого матеріалу. Наприклад, для насіння пастернаку це зростання складає 89%, тобто на 2 675 грн./кг більше його базової вартості. Це на 64%, тобто на 1 937 грн./кг, перевершує аналогічний ВФНС без екрану.

3. Фактичний економічний ефект від застосування ВФНС з екраном при сепарації насіння пастернаку у господарстві зі середньостатистичним обсягом річного врожаю насіння у 500 кг складає 1 335 000 грн. на рік (в цінах 2024 року).

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертації представлено теоретичне узагальнення і нове вирішення науково-прикладної задачі, яка направлена на підвищенні ефективності вібросепарації насіння дрібнонасінневих матеріалів шляхом вдосконалення конструкції робочого блоку та обґрунтування раціональних параметрів ВФНС. На основі проведеного дослідження зроблені наступні висновки:

1. Аналіз існуючих методів і моделей підвищення продуктивності і якості віброфрикційної сепарації дрібнонасінневих матеріалів овочевих та лікарських рослин, показав, що має місце недостатньо повне теоретичне вивчення процесів сепарації цих матеріалів з урахуванням дії знакозмінного повітряного потоку всередині блоків робочих поверхонь ВФНС. Є актуальним завдання щодо дослідження: процесів взаємодії робочих поверхонь ВФНС з повітрям, насіння з робочою поверхнею в умовах виникнення знакозмінного повітряного потоку; механізмів зменшення інтенсивності знакозмінного повітряного потоку залежно від конструкційно-режимних параметрів ВФНС з екраном.

2. Розроблена комплексна математична модель дозволяє обчислювати точки траєкторії віброфрикційного безвідривного руху окремої насінини по робочій поверхні ВФНС в умовах дії знакозмінного поля швидкостей повітря. Модель встановлює функціональний зв'язок між конструкційно-режимними параметрами ВФНС з аеродинамічним екраном та відносним показником ступеня впливу знакозмінного повітряного потоку на якість розділення дрібнонасінневих матеріалів деяких рослинних культур.

3. Здійснено чисельне моделювання вібраційного руху насінин пастернаку, кропу запашного та салату листового. На підставі отриманих результатів побудовано регресійні рівняння другого порядку залежності показника впливу знакозмінного повітряного потоку на якість сепарації даних насінневих матеріалів від конструкційно-режимних параметрів ВФНС з

аеродинамічним екраном (3.31) – (3.33). Регресійні рівняння побудовані для наступних діапазонів варіювання конструкційно-режимних параметрів: відносного перекриття вертикального зазору між робочими поверхнями – [0; 1,5]; відстані екрану від торцю блоку – [3; 10] мм; амплітуди коливань – [0,5; 3] мм; вертикального зазору між робочими поверхнями – [6; 15] мм. Інтервал змінювання показника впливу знакозмінного повітряного потоку на якість розділення насінневого матеріалу складав – [1; 1,23]. Оцінки коефіцієнтів детермінації побудованих регресійних рівнянь складали, відповідно: 0,96, 0,967 і 0,956.

4. Для мінімізації показника впливу знакозмінного повітряного потоку на якість вібросепарації насінневого матеріалу необхідно мати: блок ВФНС з відстанями між робочими поверхнями 6 мм; аеродинамічний екран з висотою вертикальної стінки, що повністю перекриває вертикальні зазори між поверхнями блоку та яка відстоїть від торцю блоку на  $3 \div 4$  мм; амплітуду коливань – 0,5 мм.

5. Для підтвердження адекватності створеної математичної моделі здійснено порівняння регресійного рівняння для насіння пастернаку, що побудоване на підставі чисельного експерименту (3.31), з регресійним рівнянням для цієї культури, що отримане за результатами натурного експерименту (4.7). Регресія (4.7) побудована на інтервалах варіювання конструкційно-режимних параметрів, які є аналогічними інтервалам параметрів для (3.31), крім вертикального зазору між робочими поверхнями блоку, який був постійним та дорівнював 10 мм. Відхилення значень показника впливу знакозмінного потоку повітря на якість сепарації насіння, що визначався на підставі регресії (3.31) та регресії (4.7), складала величину від 5 до 11 % (залежно від значень конструкційно-режимних параметрів). Така точність математичної моделі є задовільною для інженерних задач.

6. За результатами експериментальних досліджень виконано оцінку ефективності застосування ВФНС з аеродинамічним екраном у порівнянні з



ВФНС без екрану. При обробці насінневого матеріалу пастернаку на ВФНС з екраном отримано: фракцію оригінального та елітного насіння з часткою 65% від загального обсягу матеріалу; фракцію репродуктивного насіння з часткою 28 %; фракцію відходів – 7 %. При застосуванні ВФНС без екрану отримано: фракцію репродуктивного насіння – 56 %; фракцію відходів – 44%. Застосування ВФНС з екраном забезпечило збільшення показнику сортової чистоти кондиційного насіння, що відбирається, на 13,5% (з 85 %, для вхідного матеріалу, до 98,5 %). Це на 3% більше, ніж показник чистоти, який отриманий на ВФНС без екрана (95,5 %). Також на ВФНС з екраном збільшено частку кондиційного насінневого матеріалу, що відбирається, на 37 % (93 % проти 56 % для звичайного ВФНС).

7. Економічний ефект від впровадження результатів дисертаційного дослідження полягає у збільшенні товарної ціни вхідного насінневого матеріалу пастернаку на 89%, (що орієнтовно складає 2 675 грн./кг) за рахунок зменшення відходів та збільшення чистоти товарних фракцій. Це, для господарства з річним обсягом врожаю насіння пастернаку у 500 кг, дає додатковий прибуток понад 1,335 мільйона гривень на рік, у цінах 2024 року.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. **Anton Nykyforov**, Roman Antoshchenkov, Ivan Halych, Liliia Kis-Korkishchenko, Victor Kis, Alla Dombrovska, Inna Kilimnik (2023). Regression models for assessing the efficiency of vibratory separation of parsnip seeds taking into account air dynamics based on numerical simulation and field experiment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* [this link is disabled](#), 2 (1-122). P 40–51.
2. **Anton Nykyforov**, Roman Antoshchenkov, Ivan Halych, Victor Kis, Pavlo Polyansky, Vitalii Koshulko, Dmytro Tymchak, Alla Dombrovska, Inna Kilimnik (2022). Construction of a regression model for assessing the efficiency of separation of lightweight seeds on vibratory machines involving measures to reduce the harmful influence of the aerodynamic factor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. ISSN 1729-3774. P 24-34.
3. **Nykyforov A.**, Nykyforova A., Antoshchenkov, R., Antoshchenkova, V., Diundik, S., & Mazanov, V. (2021). Development of a mathematical model of vibratory non-lift movement of light seeds taking into account the aerodynamic forces and moments. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. No 3 (111). P 70–78.
4. Roman Antoshchenkov, **Anton Nykyforov**, Ivan Halych, Victor Tolstolutskyi, Vitalina Antoshchenkova, Sergey Diundik (2020). Solution of the system of gas-dynamic equations for the processes of interaction of vibrators with the air. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol 2, No 7 (104). P. 67–73.
5. Лук'яненко В. М., **Никифоров А. О.**, Галич І. В. (2013). Підвищення продуктивності вібраційної насінноочисної машини з неперфорованими робочими площинами. *Motrol. Commision of motorization and energetics in agriculture*. – *Lublin-Rzeszow*. Vol. 15, No 7. С 185–190.

6. Галич І. В., **Никифоров А. О.** (2015). Мехатронна вібраційна насіннеочисна машина. Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка. Харків, Вип. 156. С 413–419.

7. Лук'яненко В. М., **Никифоров А. О.**, Галич І. В. (2015). Метод розрахунку аеродинамічних характеристик об'ємних фігур неправильної форми. Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка. Харків, Вип. 156. С. 459–464.

8. Лук'яненко В. М., **Никифоров А. О.** (2017). Постановка задачі розрахунку поля швидкостей повітряного середовища між двома еквідістантними площинами при здійсненні ними синхронних гармонійних коливань. Науковий журнал «Інженерія природокористування», No 2 (8). С 33–38.

9. Лук'яненко В. М., Петрик А. П., **Никифоров А. О.** (2017). Метод розрахунку поля швидкостей повітряного середовища між двома еквідістантними площинами при здійсненні ними синхронних гармонійних коливань. Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Харків., Вип 180. С 100–105.

10. Лук'яненко В. М., **Никифоров А. О.**, Кісь В. М. (2018). Розрахунок поля швидкостей повітряного середовища між двома еквідістантними площинами під час здійснення ними синхронних гармонійних коливань методом прогонки. Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка. Харків. Вип. 190. С. 337–345.

11. Лук'яненко В. М., **Никифоров А. О.**, Лук'яненко О. В., Никифорова А. П. (2019). Конструктивні заходи, щодо інтенсифікації процесу сепарування насінневих сумішей на вібраційних насіннеочисних машинах. Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка. Харків, Вип. 198 С. 277–283.

12. Лук'яненко В. М., **Никифоров А. О.**, Никифорова А. П. (2019). Використання метода прогонки при розрахунку тривимірного поля швидкостей повітряного середовища, що знаходяться між двох синхронно коливальних робочих площин вібромашини. Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка. Харків. Вип. 198 С. 214–226.

13. **Никифоров А. О.** (2020). Дослідження ефективності застосування аеродинамічних екранів при обробці на вібраційних машинах насіння з вираженими аеродинамічними властивостями. The 7 th International scientific and practical conference “Science, society, education: topical issues and development prospects” (June 7-9) SPC “Sci-conf.com.ua”, Kharkiv, Ukraine. С 31–38.

14. Степаненко С. П., **Никифоров А. О.** (2024). Дослідження впливу знакозмінного повітряного потоку на якість віброфрикційного розділення дрібнонасінневих матеріалів. Науковий журнал «Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів». Харків. № 24. С 52-68.

15. **Никифоров А. О.** (2016). Постановка задачі розрахунку поля швидкостей повітряного середовища між двома еквідистантними площинами при здійсненні ними синхронних гармонійних коливань. Міжнародна науково – практична конференція молодих вчених «Технічний прогрес в АПК».

16. Лук'яненко В. М., **Никифоров А. О.**, Галич І. В. (2017). Універсальний віброзбуджувач коливань. Міжнародна науково – практична конференція молодих вчених «Технічний прогрес в АПК».

17. Лук'яненко В. М., **Никифоров А. О.** (2017). Метод розрахунку поля швидкостей повітряного середовища між двома еквідистантними площинами при здійсненні ними синхронних гармонійних коливань. Міжнародна науково – практична конференція молодих вчених «Технічний прогрес в АПК».

18. **Никифоров А. О.** (2017). Основні фактори впливу на показники ефективності віброочищення. Міжнародна науково – практична конференція молодих вчених «Технічний прогрес в АПК».

19. Лук'яненко В. М., **Никифоров А. О.**, Петрик А. П. (2018). Расчёт поля скоростей воздушной среды между двумя эквидистантными плоскостями при совершении ими синхронных гармонических колебаний методом

прогонки. Міжнародна науково – практична конференція молодих вчених «Технічний прогрес в АПК».

20. Лук'яненко В. М., **Никифоров А. О.**, Никифорова А. П. (2019). Використання метода прогонки при розрахунку тривимірного поля швидкостей повітряного середовища, що знаходяться між двох синхронно коливальних робочих площин вібромашини. Міжнародна науково – практична конференція молодих вчених «Технічний прогрес в АПК».

21. Лук'яненко В. М., Галич І. В., **Никифоров А. О.** (2020). Регулювання технологічного процесу сепарації вібраційних насіннесочисних машин. Інноваційні розробки в аграрній сфері: матеріали Міжнар. наук. - практ. конф., м. Харків, 3-4 груд. 2020 р. ХНТУСГ, 2020. Т. 1.

22. V. Lukjanenko, **A. Nykyforov**, A. Nykyforova. (2020). Numerical solution of the system of equations of gas dynamics using the sweep method for the three-dimensional. Сучасні проблеми землеробської механіки: матеріали XXI Міжнар. наук. конф., присвяч. 90-річчю ХНТУСГ, м. Харків, 17-18 жовтня 2020 р.

23. Лук'яненко В. М., **Никифоров А. О.**, Никифорова А. П. (2020). Методи оцінки ефективності використання аеродинамічних екранів. Science and education: problems, prospects and innovations: the 1 st International scientific and practical conference, Kyoto, October 7-9, 2020.

24. **Никифоров А. О.** (2022). Порівняльний аналіз регресійних моделей оцінки шкідливого впливу аеродинамічного фактора на ефективність віброфрикційного розділення насіння пастернаку, що отримано на підставі чисельного та натурного експериментів. Сучасна інженерія агропромислових харчових виробництв. Харків, 24–25 листопада 2022 року.

25. **Никифоров А. О.** (2023). Математична модель віброфрикційного безвідривного руху насіння з урахуванням дії аеродинамічних сил і моментів. Матеріали XIX міжнародного форуму молоді "Молодь і індустрія 4.0 в XXI столітті". Харків, 06-07 квітня 2023 року.

26. **Никифоров А. О.** (2023). Критерій вдосконалення технологічного процесу віброфрикційного розділення насінневих матеріалів чутливих до руху повітря. Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції «ТЕХНІЧНИЙ ПРОГРЕС В АПВ». Харків 9-10 травня 2023 року.

27. Степаненко С. П., **Никифоров А. О.** (2024). Комплексна модель віброфрикційного руху насіннини по нахиленій шорсткій поверхні з урахуванням впливу знакозмінного повітряного потоку повітря у блоці віброфрикційного сепаратора. Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції «ТЕХНІЧНИЙ ПРОГРЕС В АПВ». Харків 21-22 травня 2024 року.

28. Степаненко С. П., **Никифоров А. О.** (2024). Обґрунтування параметрів віброфрикційного сепаратора дрібнонасінневих матеріалів. Матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Новітні технології в АПК: проблеми та перспективи впровадження». Полтава 27-28 червня 2024 року.

29. Степаненко С. П., **Никифоров А. О.** (2024). Дослідження моделі віброфрикційного безвідривного руху насіння по нахиленій шорсткій поверхні з урахуванням дії аеродинамічних сил. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Досягнення та перспективи галузі виробництва, переробки і зберігання сільськогосподарської продукції». Кропивницький, 21 квітня 2024 року.

30. Лук'яненко В. М., **Никифоров А. О.**, Галич І. В. (2014) Патент на корисну модель №88048 Україна, В03С1/10. Універсальний віброзбудник. заявник Лук'яненко В. М. u201312141; заяв. 17.10.2013; надрук. 25.02.2014, Бюл. № 25. Опубл. 25.02.2014 р. Бюл. № 4.

31. Козаченко О. В., **Никифоров А. О.**, Бакум М. В., Кречот М. М., Піх Е. О. (2021). Патент на корисну модель №149837 Україна. В07В13/00. Вібраційна насіннеочисна машина. заявник Козаченко О.В. u202103892; заяв. 05.07.2021 надрук. 08.12.2021 р. Бюл. № 49.

32. Лук'яненко В. М., **Никифоров А. О.**, Галич І. В. (2022) Патент на корисну модель 151223 Україна, МПК (2022.01) В07В 13/00. Спосіб підвищення продуктивності вібраційних насіннеочисних машин з блоками неперфарованих вібруючих поверхонь. Заявник Лук'яненко В. М. у 2021 05954; заяв. 23.10.2021; надрук. 22.06.2022, Бюл. № 25.

33. Заика П.М., Мазнев Г.Е. Сепарация семян по комплексу физико-механических свойств. – М.: Колос, 1978. – 287 с.

34. Алієв Е.Б. Фізико-математичні моделі процесів прецизійної сепарації насінневого матеріалу соняшнику: *монографія*. Запоріжжя: СТАТУС, 2019. 196 с. ISBN 978-617-7759-32-3.

35. Заїка П.М. Теорія сільськогосподарських машин. Очистка і Сепарация насіння. Харків, 2006. Око. 407 с.

36. Ковалишин С., Паранюк В., Дадак В., Соколюк В. Оцінка та виявлення нових ознак подільності дрібнонасінневих сумішей сільськогосподарських культур. *Motrol: Motorization and power industry in agriculture*. Lublin: Commision of motorization and power industry in agriculture. Vol. 14D. 2012. P. 95-103.

37. Тищенко, Л.Н., Мазоренко, Д.И., Пивень, М.В., Харченко, С.А. и др. Моделирование процессов зерновых сепараторов: *монографія*. Харків, 2010: Міськдрук. 360 с.

38. Колодій О.С., Кюрчев С.В. Методики исследования параметров сепаратора семян предложенного типа / С.В.Кюрчев, О.С. Колодій // *Motrol "Motorization and energetics in agriculture"*, Lublin-Rzeszow, 2013 Vol.15, No2. p. 205-213.

39. Сало В.М. Технічне забезпечення підготовки зерна до зберігання: *монографія*. В.М. Сало, П.Г. Лузан, Д.В. Богатирьов. – Кіровоград: СПДФО Лисенко В.Ф., 2013.- 148 с. ISBN 978-966-2570-84-7.

40. Тищенко Л.Н., Миняйло А.В., Пивень М.В., Харченко С.А. Исследования послыного движения зерновых смесей на плоских

вибрационных решетках, *Механізація с.г. виробництва: Вісник ХНТУСГ*. Харків. 2007, С. 69-76.

41. Абдуєв М.М. Обґрунтування параметрів сепаратора з нахиленим повітряним каналом для розділення зернових сумішей: *Автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук*, Харків, 2007. 22 с.

42. Харченко С.О., Гаск Є.А. Ефективність очищення запиленого повітряного потоку циклонами на зернопереробних підприємствах. *Науковий журнал «Інженерія природокористування»*. Харків, 2020. 1(9), с. 79-82.

43. Котов Б.І. Тенденції розвитку конструкцій машин та обладнання для очищення і сортування зерноматеріалів [Текст] / Б.І. Котов, С.П. Степаненко, М.Г. Пастушенко // *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. Вип. 33. – Кіровоград, 2003.

44. Лукьяненко В.М. Сепарация трудноразделимых семенных смесей. *Scientific Proceedings III International Scientific and Technical Conference "Agricultural Machinery"*, 2015. Volume 1. P. 95-98.

45. Ковалишин С., Дадак В., Соколюк В., Жолобка В. Пути усовершенствования послеуборочной подготовки семян мелкосеменных культур. *Commission of Motorization and energetics in agriculture*, 2014. Vol. 16. № 4. С. 38-44.

46. Степаненко С.П. Дослідження процесу пневматичної сепарації насіння в кільцевому зигзагоподібному сепараторі. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка*. Випуск 75. «Механізація сільськогосподарського виробництва». - Харків: ХНТУСГ. – 2008. - ТІ. - С. 59-65.

47. Кирпа Н.Я. Принципы и способы сепарирования зерновых масс. *Хранение и переработка зерна*. Днепропетровск, 2011. -№ 4 (142). С 33-36.

48. Алієв Е.Б., Яропуд, В.М. Фізико-математичний апарат руху насіння в повітряному потоці. *Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка*,



*енергетика, транспорт АПК*». Редколегія: Калетнік Г.М. (головний редактор) та інші. Вінниця, 2017. №2 (97). С. 19-23.

49. Vasylykovskiy, O., Vasylykovska, K., Moroz, S., Sviren, M. & Storozhyk, L. The influence of basic parameters of separating conveyor operation on grain cleaning quality. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 2019. 57(1), 63-70.

50. Basiry M., & Esehaghbeygi A. Cleaning and charging of seeds with an electrostatic separator. *Applied Engineering in Agriculture*, 2012. 28(1), 143- 147. <https://doi.org/10.13031/2013.41274>.

51. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: Підручник/ О.М.Царенко, Д.Г.Войтюк, В.М.Швайко та ін.; За ред. С.С.Яцуна. – К.: Мета, 2003. – 448 с.

52. Заїка П.М., Бакум М.В., Михайлов А.Д., Козій О.Б. (2012). Сепарація насіння льону на вібраційних сепараторах. Вібрації в техніці та технологіях. № 3 (67). С. 106-111.

53. Богомолів О.О. Аналіз конструкцій сепараторів для сепарації важкороздільних зернових сумішей. *Інженерія переробних і харчових виробництв*, 2017. 1, 47-51.

54. Заїка П.М., Кросовицкий Ю.И. Моделирование материальной точкой процессов перемещения семенных смесей. Конструирование и технология производства сельскохозяйственных машин: *Республиканский межведомственный научно-технический сборник*, 1991. Вып. 21. Киев: Техника. С. 36–40.

55. Алієв Е.Б. Фізико-математична модель процесу переміщення насінневого матеріалу олійних культур під дією віброуючої поверхні. *Всеукраїнський науково-технічний журнал «Вібрації в техніці та технологіях»*. 2018. Вінниця: ВНАУ. № 1 (88). С. 54-59.

56. Бакум М.В. Дослідження впливу основних параметрів пневматичного сепаратора на якість очищення насіння редиски.

*Сільськогосподарські машини*: Зб. наук. ст. – 2009. – Вип. 18. Луцьк: ЛНТУ, 2009. – С. 14-19.

57. Бредихін В.В. Обґрунтування параметрів процесу вібропневмовідцентрового розділення насінневих сумішей за густиною насіння. // автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук. / Бредихін В.В. Харків, 2003. – 21 с.

58. Петрусов А.І. Зернообробні високочастотні вібраційні машини. Машинобудування, 1975.

59. Мазоренко Д.І., Бакум М.В., Козій О.Б., Михайлов А.Д., Абдуєв М.М., Крекот М.М. До 55-річчя науково-дослідної лабораторії вібраційних насіннеочисних машин, *Науковий журнал «Інженерія природокористування»*, 2015 2(4), – С. 57-64.

60. Бугайов В.Д. Сучасні технології виробництва насіння багаторічних трав / В.Д. Бугайов, С.Ф. Антонів. Посібник українського хлібороба. 2012. – С. 156 – 161.

61. Новітні агротехнології у рослинництві: Підручник / В.Д. Паламарчук, І.С. Поліщук, В.А. Мазур, О.Д. Паламарчук. – Вінниця, 2017. – 602 с.

62. Алієв Е.Б. Модель системи фотоелектронного сепаратора насінневого матеріалу. *Вісник Степу. Науковий збірник. «Стан та перспективи розвитку агропромислового виробництва України»*. 2017. Вип. 14. Кіровоград, КОД. С. 135-138.

63. Kiratiratanapruk K., Sinthupinyo W. (2011). Color and texture for corn seed classification by machine vision. *Int. Symp. Intell. Signal Process. Commun. Syst. "The Decad. Intell. Green Signal Process. Commun. ISPACS*. P. 7-11.

64. Ronge R.V., Sardeshmukh M.M. (2014). Comparative analysis of Indian wheat seed classification. *Icacci'14*. P. 937-942.

65. Солдатенко Л.С. Особливості конструкції і застосування фотоелектронного обладнання для розділення зерна і зернопродуктів на

фракції за ознакою кольору. *Зернові продукти і комбікорми*, 2018. 18(2), 45-50. <https://doi.org/10.15673/gpmf.v18i2.970>.

66. Гапонюк О.И., Мосиенко Г.А. Классификация основных способов сепарирования трудноразделимых смесей (Classification of the main methods of separation of difficult-to-separate mixtures). *ВосточноЕвропейский журнал передовых технологий*, 2012. 6/10 (60), 55-57.

67. Заїка П.М. Теорія сільськогосподарських машин. Очистка і Сепарація насіння. Т. III, розділ 7. – Харків: Око, 2006. – 407 с.

68. Манчинський Ю.О. Обґрунтування параметрів розділення насіннєвих сумішей на віброуючій поверхні: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д - ра техн. наук / Ю.О. Манчинський. – К., 2000. -35 с.

69. Козаченко О.В., Алієв ЕБ., Бакум М.В., Михайлов А.Д., Кречот М.М. Обґрунтування ефективності використання віброфрикційного сепаратора при підготовці насіннєвого матеріалу гірчиці. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН* 31, 2021. 142-151. <https://doi.org/10.36710/ioc-2021-31-13>.

70. Aliiev E., Gavrilchenko A., Tesliuk H., Tolstenko A., Koshul'ko V. Improvement of the sunflower seed separation process efficiency on the vibrating surface. *Acta Periodica Technologica*, 2019. APTEFF, 50, 12-22. <https://doi.org/10.2298/APT1950012A>.

71. Тищенко Л.Н. *Интенсификация сепарирования зерна (Intensification of grain separation)*, 2004. Харьков: Основа.

72. Михайлов А.Д., Бакум М.В., Челапко Д.О. Розділення компонентів насіннєвої суміші коріандру за граничним кутом підйому. *Матеріали XIX міжнародного форуму молоді "Молодь і індустрія 4.0 в XXI столітті"*. 06-07. 04. 2023. Харків. 22 с.

73. Заїка П.М., Бакум М.В., Михайлов А.Д. Вібраційна насіннєочисна машина для доочищення насіння сільськогосподарських культур. *Журнал Пропозиція. № 6*, 2005. с. 102.

74. Михайлов А.Д., Пастухов В.І., Бакум М.В. Машини, агрегати та комплекси для післязбиральної обробки зерна і насіння. – Харків: Навчальне видання, 2012. – 95 с.

75. Лук'яненко В.М. Обґрунтування параметрів процесу сепарації насіння ріпака і суріпиці на вібраційній машині: автореф. дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук / В.М. Лук'яненко. – Харків, 2001. – 20 с.

76. Громадський А.С. Проектування, формування та використання комплексів гірничорудного механізованого обладнання: Навч. посібник / А.С. Громадський, Ю.Г. Горбачов, О.С. Ліфенцов. – Кривий Ріг: КНУ, 2017. – 229 с.

77. Білецький В.С., Олійник Т.А., Смирнов В.О., Скляр Л.В. Техніка та технологія збагачення корисних копалин Кривий Ріг 2019. – 87 с.

78. Козаченко А.В. Обоснование параметров технологического процесса очистки и сортирования семян табака и махорки на вибрационной семяочистительной машине: автореф. дис. на соиск. степени канд. техн. наук / А.В. Козаченко. – Харьков, 1984 – 20 с. 3.

79. Завгородний А.И., Синяева О. В. Движение шара в воздушном потоке между вибрирующими плоскостями. *Вібрації в техніці та технологіях: Всеукраїнський науково-технічний журнал*, №3(67) – Вінниця: ВНАУ, 2012.– С. 20-27.

80. Лукьяненко В.М. Математическое моделирование вибросепарирования семенных смесей на неперфорированных поверхностях. *Вісник Харківського технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. Випуск 148 «Механізація сільськогосподарського виробництва»*, Харків. ХНТУСГ, 2014. С. 342 – 348.

81. Лук'яненко В.М. Спосіб чисельного рішення системи рівнянь безвідривного руху ізольованого тіла по похилій віброуючій поверхні. *Вібрації в техніці та технологіях*, 2012. т.№ 3.-С.48-53.

82. Лук'яненко В.М. Перспективна модель вібраційної насіннеочисної машини. *Матеріали ІХ-ї міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки»*. – Кіровоград, 7 – 8 листопада 2013. С. 116 – 118.

83. Гудым В.А. Обоснование параметров технологического процесса очистки и сортирования семян лекарственных культур на виброфрикционных сепараторах: автореф. дис. канд. техн. наук. – Харьков, 1986. – 22с.

84. Жмай Л.Г. Обоснование параметров технологического процесса очистки и сортирования семян овощных культур на вибрационной семеноочистительной машине: автореф. дис. канд. техн. наук. – Харьков, 1990. – 24с.

85. Михайлов А.Д. Обоснование параметров технологического процесса очистки и сортирование семян сахарной свеклы на вибрационной семяочистительной машине: автореф. дис. канд. техн. наук. - Харьков, 1994. – 24с.

86. Манчинський Ю.О. Математична модель руху компонентів насінневих сумішей по робочій площині. *Механізація та електрифікація сільськогосподарства*. Глеваха, 2008. – Вип. 92. – С. 156–162.

87. Заика П.М. Вибрационное перемещение твердых и сыпучих тел в сельскохозяйственных машинах / П. М. Заика. – К.: Узд-во УСХА, 1998. – 625 с.

88. Лукьяненко В.М. Способ численного решения системы уравнений отрывного движения изолированного тела по наклонной вибрирующей поверхности. *Журн. «Вібрації в техніці та технологіях»*. 2013. №2 (70). С 46-52.

89. Лукьяненко, В.М. Математическая модель движения семян по наклонной вибрирующей поверхности с учётом их взаимодействия. *Журн. «Вібрації в техніці та технологіях»*, 2012. №1 (65). С. 115-118.

90. Лук'яненко В.М., Галич І.В., Никифоров А.О. Мехатронна вібраційна насіннеочисна машина. *Вісник 278, Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2015. – №. 156. – С. 413 – 419.

91. Сметанін Ю.О. Аеродинаміка // Енциклопедія Сучасної України [Електронний ресурс] / Редкол.: І М. Дзюба, А.І. Жуковський, М.Г. Железняк [та ін.]; НАН України, НТШ. – К.: Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2001. – Режим доступу: <https://esu.com.ua/article-42702>.

92. Василенко П.М. Теория движения частицы по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин. 1960. – К.: УАСХН, – 284 с. 2.

93. Boris Kotov, S Stepanenko, Oleh Tsurkan, Volodymyr Hryshchenko, Yurii Pantsyr, Ihor Garasymchuk, Anatolii Spirin, Ihor Kupchuk. Fractioning of grain materials in the vertical ring air channel during electric field imposition. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2023. Vol. 99 (1). P. 100-104. DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2023.01.19>.

94. Котов Б.І., Степаненко С.П., Швидя В.О. Технологічні аспекти сепарації зерна у вертикальному каналі. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. Вип. 46. 2016. С. 154-159.

95. Васильковський М.І. Обґрунтування параметрів сепарації зерна в похилому повітряному потоці / М.І. Васильковський, С.Я. Гончарова, С.М. Лещенко // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науковотехнічний збірник. – Кіровоград, 2007. – Вип. 37. – 132-137с.

96. Абдуєв М.М., Бакум М.В., Манчинський Ю.О., Сичов В.В., Леонов В.П. Теоретичні дослідження характеристик руху часток у нахиленому повітряному каналі при зміні характеристик епюри швидкості повітря по висоті каналу. *Механізація сільського господарства: Вісник ХДТУСГ*. Харків, 2003. Вип.21. С. 88-94.

97. Романов О.М. Романов Вібрації в техніці та технологіях / О. М. Романов // Енциклопедія Сучасної України [Електронний ресурс] / Редкол.: І.М. Дзюба, А.І. Жуковський, М.Г. Железняк [та ін.]; НАН України, НТШ. – К.: Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2005. – Режим доступу: <https://esu.com.ua/article-34352>.

98. Bredykhin V., Gurskyi P., Alfyorov O., Bredykhina K., Pak A. Improving the Mechanicalmathematical Model of Grain Mass Separation in A Fluidized Bed. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, 3, сторінки 79–86.

99. Ольшанский В.П. Гидродинамика сепарирования зерна. Харьков: “Міськдрук”, 2010. - 174 с.

100. Зозуля В.В., Мартиненко А.В., Лукін А.Н. Механіка суцільного середовища. Харків. Нац. університет вн. справ 2003. 600 с.

101. Бредихин В.В. Определение эффективного коэффициента динамической вязкости зерновой смеси на рабочей поверхности пневмосортировального. Lublin, «*Motrol*», 2013. – С. 192-199.

102. Ольшанський В.П., Бредихін В.В., Лук’яненко ВМ., Півен М.В., Сліпченко М.В., Харченко С.О. Теорія сепарування зерна: *монографія*. Харків ,2017: ПланетаПрінт. 803 с.

103. Zhao Z., Jin M. Z., Tian C. J., Yang S. X. Prediction of seed distribution in rectangular vibrating tray using grey model and artificial neural network. *Biosyst. Eng.*, 2018. 175:194–205. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2018.09.017.

104. Zhao Z., Wu Y.-F., Yin J.-J., Tang Z. Monitoring method of rice seeds mass in vibrating tray for vacuum-panel precision seeder. *Comput. Electron. Agric.*, 2015. 114:25–31.

105. Markauskas D., Kačianauskas R. Investigation of rice grain flow by multi-sphere particle model with rolling resistance. *Granul. Matter.*, 2011; 13:143–148.

106. Raji A.O., Favier J.F. Model for the deformation in agricultural and food particulate materials under bulk compressive loading using discrete element method. *Theory, model development and validation*. J. Food Eng., 2004. 64:359–371.

107. Zhan Z., Fang Q., Chun-Jie T., Simon X. Yang monitoring method of total seed mass in a vibrating tray using artificial neural network. 2018.

108. Yi-ping C., Qiang L., Xiao-zhen Y., Zhong-wen M., Jing L. Ultrasonic vibration seeds showed improved resistance to cadmium and lead in wheat seedling. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2013 Jul;20 (7):4807-16.

109. Дадак В.О. Аналіз основних фізико-механічних властивостей насіння багаторічних трав та їх засмічувачів. Теоретичні основи і практичні аспекти використання ресурсоощадних технологій для підвищення ефективності агропромислового виробництва і розвитку сільських територій: тези доп. Міжнар. наук. -практ. форуму, 18-21 вер. 2012р. Львів, нац. агр. ун-т, 2000. С. 521-525.

110. Дударев І.М., Голячук С.Є., Лук'янчук Т.М. Дослідження впливу аеродинамічних параметрів шару гірчиці на процес його вентилявання. *Сільськогосподарські машини: зб. наук. ст.* Вип. 17. Луцьк, 2008. Ред. вид. відділ ЛНТУ, 2008. С. 40-45.

111. D. Zare., Bakhshipour A. and Chen G. Physical properties of cumin and caraway seeds. *International Agrophysics*. 27(4). 2013. P. 491-494.

112. Ковалишин С.Й., Паранюк В.О., Дадак В.О., Соколюк В.В. Оцінка та виявлення нових ознак подільності дрібнонасінневих сумішей сільськогосподарських культур. *Motrol: Motorization and power industry in agriculture*. Lublin, 2012. Commission of motorization and power industry in agriculture Vol. 14D. P. 95–103.

113. Ніщенко І.О., Швець О.П. Дослідження траєкторії руху частинок насінневої суміші кулястої форми по рухомій в електричному полі похилій фрикційній площині. *Вісник Дніпропетровського державного аграрного*



університету: сучасні проблеми землеробської механіки. Дніпропетровськ, 2009. № 209. С. 256-259.

114. Богомоллов А.В. Движение частиц детерминированных форм поперечного сечения (эллипс, оживал) по движущемуся профилю наименьшего сопротивления. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 2003. - № 4. - С. 21-26.

115. El-Gamal R. A., Radwan M. A., ElAmir M. S., El-Masry G. M. Aerodynamic properties of some oilseeds crops under different moisture conditions. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, 2011. 2 (5), 495–507. doi: <https://doi.org/10.21608/jssae.2011.55480>.

116. Нанка О.В, Бакум М.В, Крекот М.М. Дослідження мінливості розмірних характеристик насіння зернових культур. *Інженерія природокористування*. 2019. № 2(12). С. 90-95.

117. Алієв Е.Б., Лупко К.О. Морфологічні ознаки і фізико-механічні властивості насіння дрібнонасінних культур. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2020. № 50 С. 27-35. doi:<https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.27-35>.

118. Завгородний А.И., Романюк Г.С., Шептур А.А., Обыхвост А.В. Обеспечение технологического режима движения сферической частицы по деке вибросепаратора. “*Механізація сільськогосподарського виробництва*”: *Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка*, Т.1, Вип.93.– Харків, 2010.– С.205-214.

119. Бакум М.В., Шептур О.А. Дослідження фізико-механічних властивостей насіння, що мають пружний елемент. *Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства*. 2001. № 21. С. 223- 227.

120. Карвацький А.Я. Механіка суцільних середовищ [Електронний ресурс]: навч. посіб. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016. – 290 с.: іл. – Бібліогр.: с. 284–285.

121. A New Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows-Model Development and Validation / T.-H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang, J. Zhu // *Computers Fluids*. — 1995. — Vol. 24, No. 3. — P. 227—238.

122. Лимарченко О.С. Розширені можливості аналітичної механіки суцільного середовища. *Збірник праць Ін-ту математики НАН України*. 2023 рік. т. 20, №1, с. 873–895.

123. Богомолів О.В., Кісь В.М., Лук'янов І.М., Акіншин В.В. До розробки алгоритму аналізу та сепарації зернових сумішей. *Вісник ХНТУСГ*. Харків, 2019. С. 60–66.

124. Горик О.В. Основи розрахунку інженерних конструкцій: Навч. посібник – Полтава: ПДТУ. 2000. – 286 с.

125. Дяченко С.С. Фізичні основи міцності та пластичності металів: Навч. посібник – Харків: Видавництво ХНАДУ, 2003. – 226 с.

126. Царенко О.М., Войтюк Д.Г., Швайко В.М. та ін. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: підручник, за ред. С.С. Яцуна. Київ: Мета, 2003. 448 с.

127. Завгородний А.И., Синяева О.В. Движения шара в воздушном потоке между вибрирующими плоскостями. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2012. № 3(67). С. 20–27.

128. Нечаєв В.П., Берідзе Т.М., Кононенко В.В. Теорія планування експерименту. Навч. посібник. К. 2005. 232 с.

129. David Glickenstein. Geometric triangulations and discrete Laplacians on manifolds: An update. *Computational Geometry* March 2024. <https://doi.org/10.1016/j.comgeo.2023.102063>.

130. Zemlyanskiy A. V., Martinov V.M. Aerodinamika izolirovanogo profilya i reshchetki profilei. metodicheskie ukazaniya k laboratornim rabotam po kursy «Gazodinamika lopatochnix mashchin». М., 1983: MFTY. 22 p.

131. Krasnov N. F. Aerodinamika. Chast ychebnoe posobie. М. 1980: Vishaya shkola. 416 p.

132. DSP Hybrid. CUDAfy user manual / Hybrid DSP // CUDAfy user manual. – USA. – 2015. – С. 45-48.

133. Соколовський Я.І. Програмний комплекс автоматизації скінченно-елементної дискретизації двовимірних областей /Я.І. Соколовський, О.П. Сикала // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. – Львів : Вид-во Центру математичного моделювання ін-ту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України. – 2014. – Вип. 19. – С. 176-188.

134. Романюк О., Сторчак О. Алгоритми триангуляції // Комп'ютери+програми. – 2001. – № 1.

135. Гаральд Іро. Класична Механіка, Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 1999, 464с.

136. Ozguven F., Vursavus K. Some physical, mechanical and aerodynamic properties of pine (*Pinus pinea*) nuts. *Journal of Food Engineering*, 68. 2005. 191–196 p.

137. Лега, Ю.Г. Прикладні методи комп'ютерного моделювання в середовищі Mathematica [Електронний ресурс]: [посібник] / Ю.Г. Лега, В. В. Мельник, О.М. Папуша; М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. – Черкаси: ЧДТУ, 2011. – 188 с. ISBN 978-966-402-087-6.

138. Жученко А.І. Математичне моделювання процесів і систем [Електронний ресурс]: Навч. посіб. / А.І. Жученко, Л.Р. Ладієва, М.С. Піргач, ЯЮ. Жураковський; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні (1 файл: 5,6 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 351 с.

139. Мінухін С.В. Методи і моделі проектування на основі сучасних CASE-засобів. Навчальний посібник / С.В. Мінухін, О.М. Беседовський, С.В. Знахур. – Харків: Вид. ХНЕУ, 2008. – 272 с.

140. Matouk A.M., Abd El-latif S.M., Tharwat A. Aerodynamics and mechanical properties of some oil producing crops. *J. Agric. Sci.* 33. 2008. 4195–4211 p.

141. Shahbazi F., Valizadeh S., Dowlatshah A. Aerodynamic properties of Makhobeli, triticale and wheat seeds. *Int. Agrophys.* 28. 2014. 389–394 p.

142. Matouk A.M., El-Kholy M.M., Hamam A.S., Ewis T.R. Aerodynamic characteristics for different varieties of some cereal crops. *J. Agric. Eng. Res* 22 (3). 2005. 1086–1102 p.

143. Нечаєв В.П., Берідзе Т.М., Кононенко В.В. Теорія планування експерименту. Навч. посібник. К.: Кондор, 2005. 232 с.

144. А.с. №1514424, СССР, МКИ В07. Вибрационная машина для очистки и сортирования зерна. А.В. Козаченко, А.В. Богомолов, П.М. Заика, А.Д. Михайлов. №4349058/29-03; Заявл. 28.12.87; Опубл. 15.10.89, Бюл. № 38. 3с.

145. Клепко В.Ю., Голець В.Л. Метод Крамера // Вища математика в прикладах і задачах. – 2-ге видання. – К.: Центр учбової літератури, 2009. – 594 с.

146. Cramer H. *Mathematical Methods of Statistics.* – Princeton University Press. – 1999. – 575 p.

147. Методи та засоби експериментальних досліджень: навч. посіб. Г.Б. Параска, Д.В. Прибега, П.С. Майдан. – Київ: Кондор-Видавництво, 2017. 138 с.

148. Бабицький Л.Ф. Основи наукових досліджень. Л.Ф.Бабицький, В.М. Булгаков, Д.Г. Войтюк, В.И. Рябець. Київ: НАУ, 1999. - 228 с.

## Додаток А методика визначення елементарних аеродинамічних сил і моментів для плоских аеродинамічних профілів-перетинів

Аеродинамічні сили і моменти, що діють на об'ємне тверде тіло при його обтіканні нестисливим потоком повітря, виникають внаслідок нерівномірного розподілу тиску повітря в приграничному шарі навколо тіла. Нерівномірний розподіл тиску, в свою чергу, спричиняється нерівномірним розподілом швидкості потоку вздовж поверхні тіла [92, 136, 141, 142].

У дисертаційному дослідженні розроблена методика розрахунку аеродинамічних характеристик насіння, форма яких може бути описана у вигляді деякої складної об'ємної фігури, що задається дискретними елементами [132, 137].

Якщо розглядати випадок обтікання об'ємного тіла, який показаний на рис. А.1, то результуюча аеродинамічна сила, прикладена в миттєвому центрі тиску, буде спрямована під деяким кутом до повітряного потоку. Величина даного кута буде визначатися співвідношенням величин підйомної сили і сили аеродинамічного опору. Аеродинамічний момент щодо початку обраної системи координат, як правило, діє на зменшення кута атаки тіла, повертаючи його у відповідному напрямку.

Розрахунок аеродинамічних сил і моментів, що діють на об'ємні тіла довільної форми, пов'язаний низкою труднощів. Зазвичай для точної оцінки аеродинамічних характеристик такого тіла необхідно мати картину розподілу тисків по його поверхні. Зі свого боку розподіл тисків отримують шляхом здійснення експериментальних продувок геометрично подібних тіл. Такий підхід, коли необхідно проводити попередні експерименти для продування насіння різної форми, не може розглядатися в якості робочого методу проведення практичних розрахунків при проектуванні віброфрікційних насінневих сепараторів.

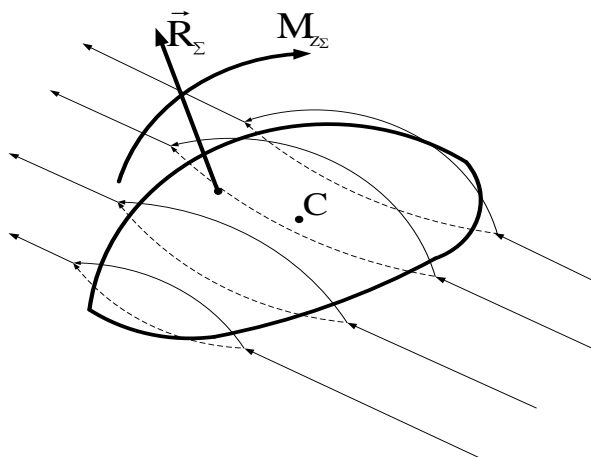


Рисунок А.1 – Дія аеродинамічних сил і моментів на тіло (насіння), що знаходиться в повітряному потоці

Однак в [7] вказується на можливість заміни складної картини об'ємного обтікання суперпозицією простих плоских обтікань заданих дискретних перетинів. При цьому для кожного плоского перетину тіла його аеродинамічні коефіцієнти визначаються на підставі результатів продувок близьких до отримуваних перетинів аеродинамічних профілів з встановленими геометричними характеристиками при заданих критеріях подоби.

Обчислення величин аеродинамічної сили і аеродинамічного моменту, які діють на об'ємне тіло, що розглядається, розбивається на дискретні профілі. Для кожного профілю розраховується елементарна аеродинамічна сила  $R$  і елементарний аеродинамічний момент  $m_z$  для випадку плоского перерізу. При цьому розрахункова схема, яка приймається для кожного аеродинамічного профілю, на які розбивається тіло, наведена на рис. А.2.

На рис. А.2 величина  $R$  є результуюча сил тиску і тертя. Її називають повною аеродинамічною силою, що діє на даний аеродинамічний профіль. Момент повної аеродинамічної сили профілю щодо його передньої кромки називається поздовжнім моментом або аеродинамічним моментом тангажу профілю  $m_z$ .

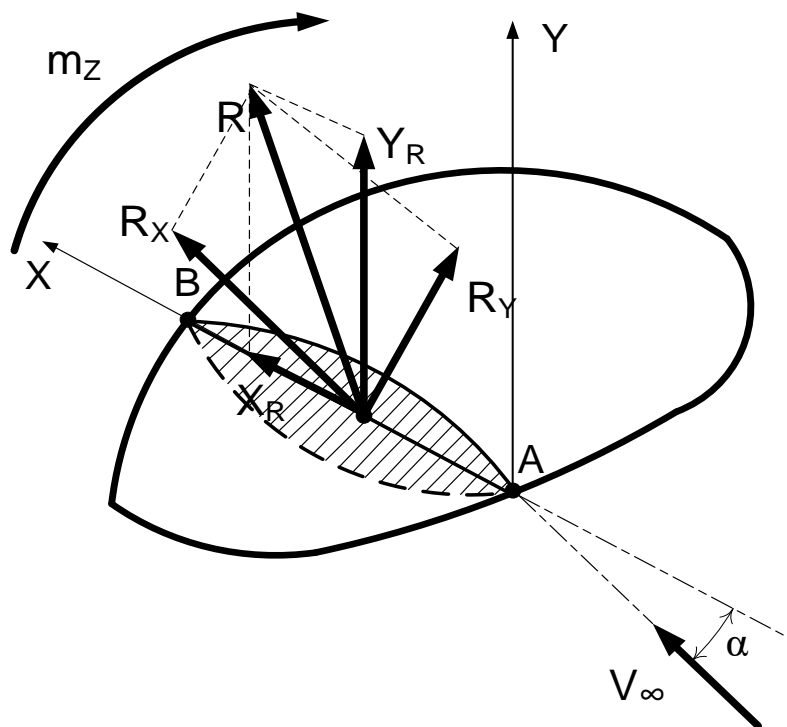


Рисунок 2.2 – Розрахункова схема для визначення аеродинамічних сил і моментів з використанням перетинів

При теоретичному і експериментальному дослідженнях силової взаємодії рухомого тіла з навколишнім середовищем зазвичай розглядається не результуюча сила  $R$ , а проєкції цієї сили на осі тієї чи іншої системи координат, обраній в залежності від умов задачі. У аеродинаміці частіше використовуються дві системи координат: швидкісна (вісь  $X$  збігається з вектором швидкості потоку, що набігає  $V_\infty$ ) і зв'язана (осі  $X$  і  $Y$  є осями симетрії і (або) інерції тіла, що розглядається). Початок координат зазвичай поєднують з передньою кромкою тіла.

У швидкісній системі координат проєкції сили  $R$  позначаються  $R_x$ ,  $R_y$ , а в зв'язаній –  $X_R$ ,  $Y_R$ .

Для плоского перерізу, який розглядається в нашому випадку, аеродинамічна сила розкладається на дві складові:

$$R = \sqrt{X_R^2 + Y_R^2} \quad \text{або} \quad R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} . \quad (\text{A.1})$$

У швидкісній системі координат проєкції сили  $R$  на напрямок

перпендикулярний до швидкості потоку в стані спокою називається аеродинамічною підйомною силою  $R_Y$ , а проєкція сили  $R$  на напрямок протилежний руху тіла – лобовим опором  $R_X$ .

У зв'язаній системі координат сили  $Y_R$  і  $X_R$  називаються аеродинамічною нормальною і поздовжньою силами відповідно.

Складові сили в цих двох системах координат пов'язані між собою наступними залежностями:

$$\begin{cases} Y_R = R_Y \cos \alpha + R_X \sin \alpha , \\ X_R = R_X \cos \alpha - R_Y \sin \alpha , \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

або

$$\begin{cases} R_Y = Y_R \cos \alpha - X_R \sin \alpha , \\ R_X = X_R \cos \alpha + Y_R \sin \alpha , \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

де  $\alpha$  – кут атаки. Кут вектора швидкості повітряного потоку в стані спокою по відношенню до осі зв'язаної системи координат.

Для визначення сил  $R_X$  і  $R_Y$ , діючих на профіль, можна використовувати метод розрахунку аеродинамічних характеристик профілю в залежності від його відносних геометричних характеристик [7]. Величини проєкцій аеродинамічної сили на осі швидкісної системи координат розраховуються з використанням аеродинамічних коефіцієнтів. При цьому формули для нормальної і поздовжньої проєкцій аеродинамічної сили будуть мати такий вигляд:

$$R_Y = C_Y q \cdot [\tilde{S}^M] , \quad (\text{A.4})$$

$$R_X = C_X q \cdot [\tilde{S}^M] , \quad (\text{A.5})$$

де  $C_Y$ ,  $C_X$ , – коефіцієнти нормальної і поздовжньої проєкцій аеродинамічної сили для швидкісної системи координат;

$q = \frac{\rho V_\infty^2}{2}$  – швидкісний натиск, де  $\rho$  – щільність повітря,  $V_\infty$  – швидкість



потоків в стані спокою;  $[\tilde{S}^M]$  – математичне очікування площі міделевого перерізу насіння. Під міделевим перерізом насіння розуміється той його переріз, який розташований перпендикулярно вектору швидкості набігаючого потоку і має найбільшу площу для даного ракурсу насіння.

Момент аеродинамічної сили відносно передньої кромки профілю (відносно початку прийнятої системи координат) може бути представлений як:

$$m_z = -Y_R x_T = -(R_Y \cos \alpha + R_X \sin \alpha) \cdot x_T, \quad (\text{A.6})$$

де  $x_T$  – абсциса центру тиску аеродинамічного профілю в зв'язаній системі координат;  $Y_R$  – проєкція аеродинамічної сили на поперечну вісь зв'язаної системи координат.

Якщо позначити коефіцієнт повної аеродинамічної сили через  $C_R$ , а коефіцієнт повного моменту відносно передньої кромки профілю через  $C_m$ , то:

$$R = C_R q \cdot [\tilde{S}^M], \quad (\text{A.7})$$

$$m_z = C_m q \cdot [\tilde{S}^M] \cdot b, \quad (\text{A.8})$$

де  $b$  – умовне плече моменту (зазвичай хорда профілю);  $C_R$  – коефіцієнт повної аеродинамічної сили;  $C_m$  – коефіцієнт моменту повної аеродинамічної сили відносно передньої кромки профілю.

Для аеродинамічних коефіцієнтів, на підставі (A.1)-(A.4), справедливо:

$$C_R = \sqrt{C_X^2 + C_Y^2}, \quad (\text{A.9})$$

$$C_m = -(C_Y \cos \alpha + C_X \sin \alpha) \cdot \bar{x}_T, \quad (\text{A.10})$$

де  $\bar{x}_T = x_T/b$  – відносна абсциса центру тиску профілю.

Аеродинамічні коефіцієнти  $C_X$  і  $C_Y$  є незалежними один від одного величинами. На їх підставі, використовуючи формулу (A.9), визначається величина коефіцієнта повної аеродинамічної сили  $C_R$ .

Коефіцієнт повної аеродинамічної сили  $C_R$ , а також його компоненти  $C_X$  і  $C_Y$ , коефіцієнт моменту  $C_m$  залежать від форми профілю, кута атаки, критеріїв подібності: числа Рейнольдса  $Re$ , числа Маха  $M$ , ступеня турбулентності потоку та ін. Цими коефіцієнтами зручно користуватися, оскільки для динамічно подібних течій вони однакові і можна для практичних розрахунків використовувати результати експериментальних досліджень, проведених раніше. Такі результати наводяться у вигляді залежностей для аеродинамічних коефіцієнтів для різних аеродинамічних профілів з заданими відносними геометричними характеристиками при заданих критеріях подібності  $Re$  і  $M$ .

В якості геометричних характеристик аеродинамічного профілю розглядаються (рис. А.3) [130, 131]:

– довжина хорди профілю,  $b$  – довжина лінії, що з'єднує дві найбільш віддалені точки профілю;

– відносна товщина профілю,  $\bar{c} = c/b$  – відношення максимальної товщини профілю до довжини хорди  $b$ ;

– відносна кривизна профілю,  $\bar{f} = f/b$ , де  $f$  – кривизна профілю (найбільша ордината точки, що належить середній лінії профілю);

– відносні абсциси товщини і кривизни профілю  $\bar{x}_c = x_c/b$ ,  $\bar{x}_f = x_f/b$  відповідно. Тут  $x_c$  і  $x_f$  – абсциси найбільшої товщини профілю і його найбільшої кривизни;

– відносні радіуси кривизни в «голові» і «хвості» профілю,  $\bar{r} = r/b$ . Часто дані величини виражають у відсотках.

Результати експериментальних досліджень по коефіцієнтам аеродинамічної сили  $C_Y$  і  $C_X$  представляються у вигляді графіків залежності даних коефіцієнтів від кута атаки профілю при різних відносних геометричних характеристиках даного профілю.

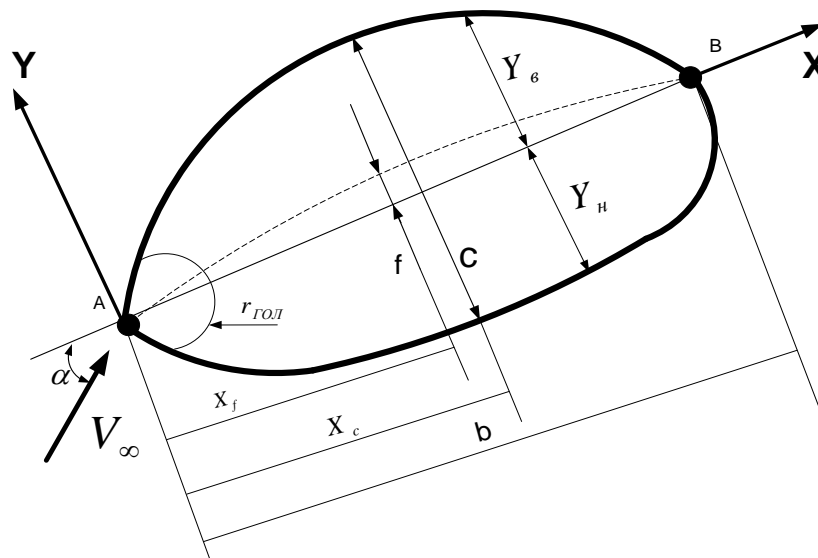


Рисунок А.3 – Геометричні характеристики аеродинамічного профілю

Графік залежності коефіцієнта підйомної сили  $C_Y$  в залежності від кута атаки профілю має вигляд, який представлений на рис. А.4 [91].

На прямолінійній ділянці кривої  $C_Y=f(\alpha)$  величина коефіцієнта підйомної сили визначається рівнянням:

$$C_Y = C_Y^\alpha (\alpha - \alpha_0), \quad (\text{А.11})$$

де  $C_Y^\alpha$  – кутовий коефіцієнт прямолінійної ділянки графіка  $C_Y = f(\alpha)$ .

Розмір прямолінійної ділянки графіка  $C_Y = f(\alpha)$  або величина максимального коефіцієнта підйомної сили профілю, при якому відбувається відрив потоку, змінюється в залежності від відносної кривизни і відносної абсциси кривизни розглянутого профілю при незмінному критичному куті атаки (рис. А.5).

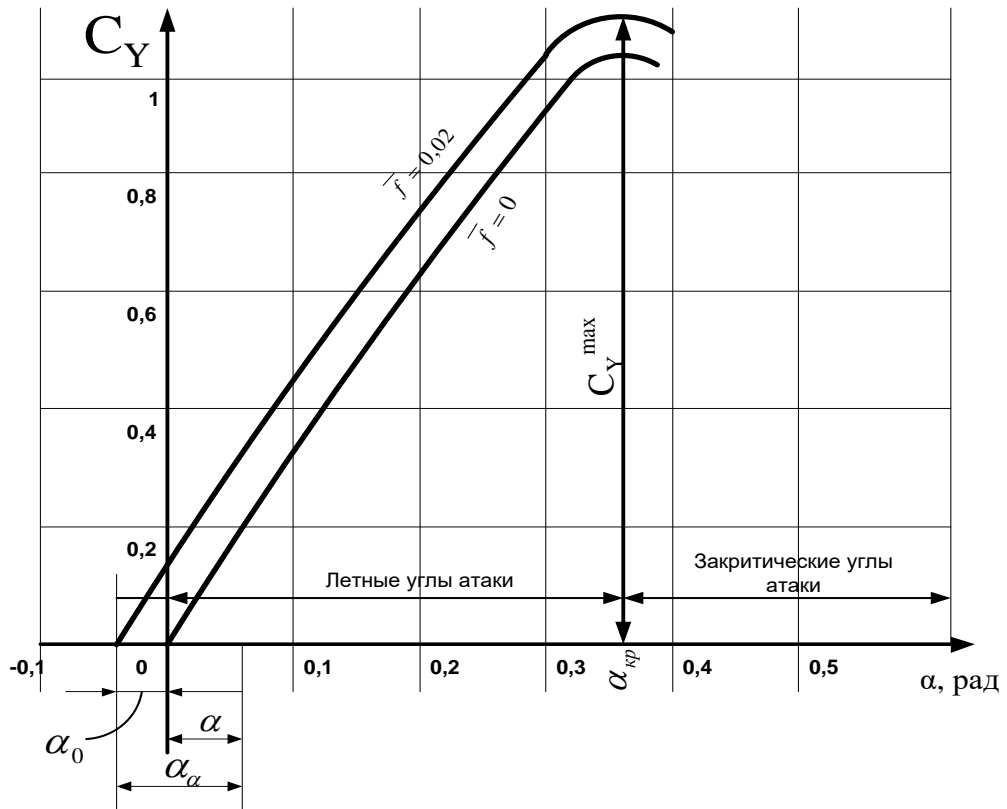


Рисунок А.4 – Залежність коефіцієнта підйомної сили від кута атаки профілю

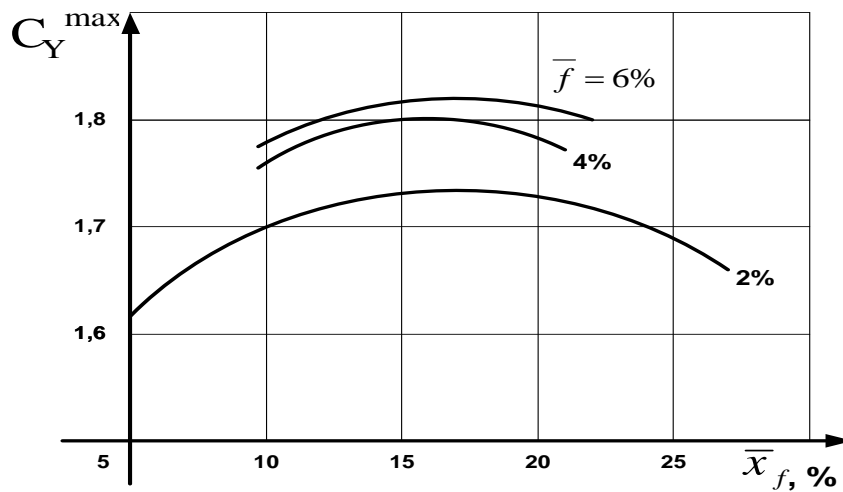


Рисунок А.5 – Змінення коефіцієнта  $C_Y^{\max}$  в залежності від кривизни профілю  $f$  і абсциси  $\bar{x}_f$

Залежність коефіцієнта лобового опору  $C_X$  від кута атаки  $\alpha$  зазвичай має

вигляд параболи (рис. А.6). Спочатку  $C_x$  змінюється незначно, а потім, починаючи з кутів атаки, дещо менших ніж  $\alpha_{кр}$ , швидко зростає. Це обумовлено посиленням відриву крайового шару.

Коефіцієнт аеродинамічного моменту обчислюється на підставі графіків А.4-А.6 і співвідношення (А.10). Величина  $\bar{x}_T$  визначається на підставі раніше отриманих результатів продувок аеродинамічних профілів при різних кутах атаки. Результати цих продувок представлені у вигляді графіка залежності  $\bar{x}_T$  від величини кута атаки профілю (рис. А.7). Пунктирною лінією позначені результати продувок для профілів, що мають такий розподіл тисків по їх хорді, які обумовлюють момент аеродинамічної сили, спрямованої на збільшення кута атаки. Суцільною лінією позначені для профілів, що мають момент аеродинамічної сили, спрямованої на зменшення кута атаки.

Як бачимо при збільшенні кутів атаки від 0 до  $+\infty$  для профілів з будь-яким напрямком моменту від аеродинамічної сили відбувається наближення значень  $\bar{x}_T$  до величини  $m$ , яка дорівнює 0,25. Тобто для більшості розрахункових випадків можна прийняти, що центр тиску розташовується на одній четвертій від носової частини профілю,  $\bar{x}_T = 0,25$ .

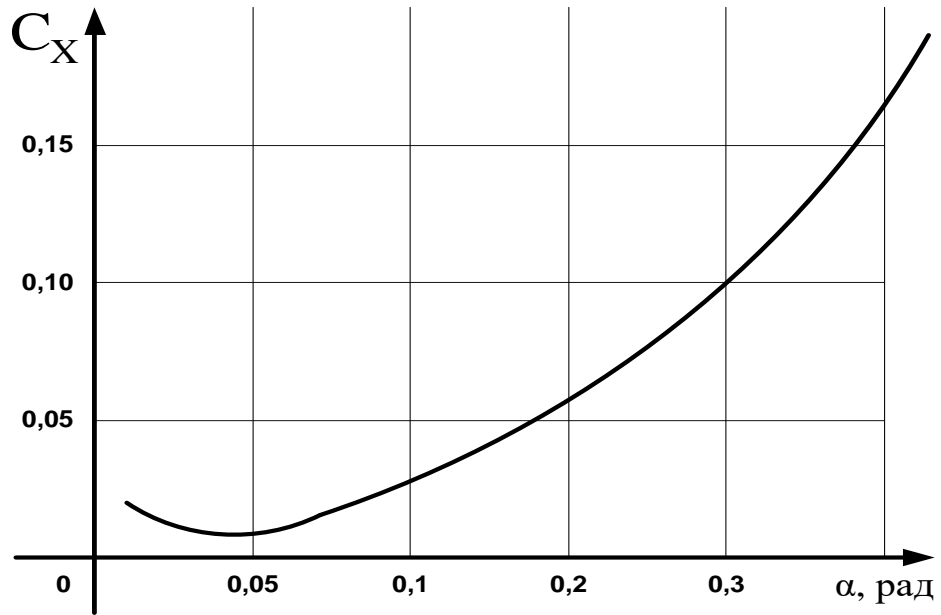


Рисунок А.6 – Залежність коефіцієнта опору від кута атаки

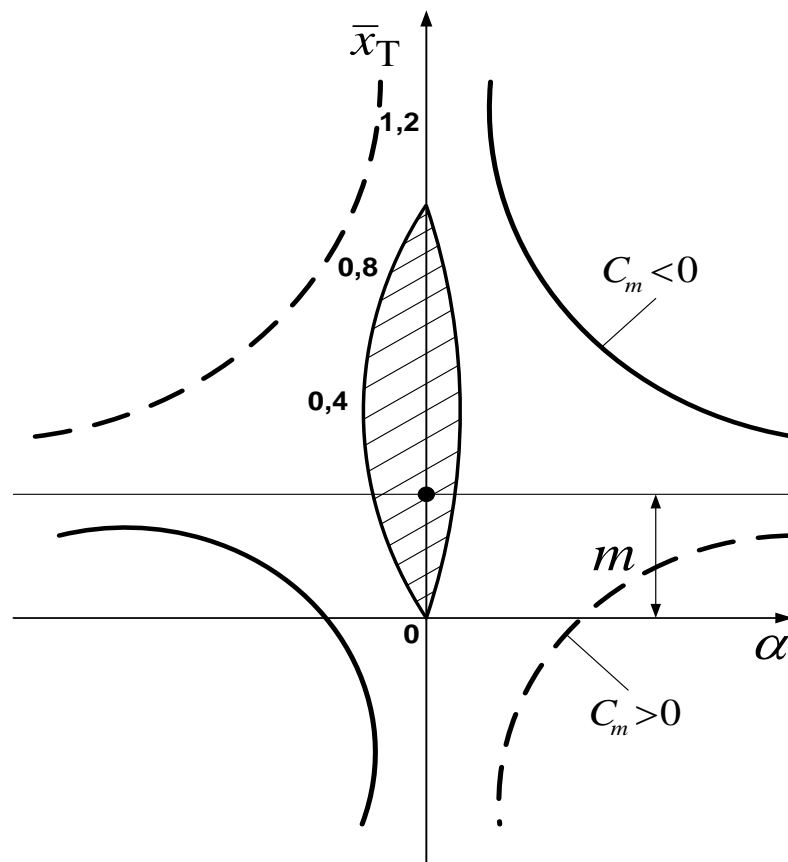


Рисунок А.7 – Змінення коефіцієнта центра тиску в залежності від аеродинамічного кута атаки

Додаток Б методика визначення геометричних характеристик перетинів  
насіння, що приводяться до характеристик еталонних аеродинамічних  
профілів

У даній роботі пропонується задавати об'ємне тіло як сукупність дискретних плоских елементів – трикутників (рис. Б.1) [129, 132, 133, 134].

При цьому профіль перетину тіла, що розглядається, буде визначатися як сукупність слідів перетину січною площиною або ламаною лінією (рис. Б.2).

Процедура розбиття об'ємних тіл довільної форми на дискретні плоскі трикутники називається тріангуляцією.

Методика розрахунку сліду при перетині січною площиною дискретних плоских трикутників наступна.

Об'ємна фігура довільної форми задається сукупністю вузлів розбиття. При цьому фігура представляється у вигляді сукупності дискретних плоских трикутників, кожен з яких може бути аналітично описаний рівнянням площини, що проходить через три задані точки, що не лежать на одній прямій (рис. Б.3).

Ламана лінія  $A, B, C$  є результатом перетину тіла січною площиною, де для всіх точок площини, трикутних граней, утворених точками об'ємної фігури:  $(x_{j,k}, y_{j,k}, h_{j,k})$ ,  $(x_{j+1,k}, y_{j+1,k}, h_{j+1,k})$ ,  $(x_{j+1,k+1}, y_{j+1,k+1}, h_{j+1,k+1})$ , для першої грані і  $(x_{j,k}, y_{j,k}, h_{j,k})$ ,  $(x_{j,k+1}, y_{j,k+1}, h_{j,k+1})$ ,  $(x_{j+1,k+1}, y_{j+1,k+1}, h_{j+1,k+1})$ , для другої грані, де  $j=1, 2, \dots, X_{\text{макс.}}/\Delta x$  і  $k=1, 2, \dots, Y_{\text{макс.}}/\Delta y$  – індекси вузлів розбивки тіла по осі  $X$  і  $Y$ ;  $\Delta x$  і  $\Delta y$  – крок розбивки по осі  $X$  і  $Y$  відповідно. Значення координат, що визначають розташування точок ламаної  $A, B, C$ , обчислюються за допомогою наступних співвідношень:

$$x_A = \frac{H - h_1}{h_2 - h_1} \cdot (x_2 - x_1) + x_1, \quad (\text{Б.1})$$

$$y_A = \frac{H - h_1}{h_2 - h_1} \cdot (y_2 - y_1) + y_1, \quad (\text{Б.2})$$

$$x_B = \frac{H - h_1}{h_3 - h_1} \cdot (x_3 - x_1) + x_1, \quad (\text{Б.3})$$

$$y_B = \frac{H - h_1}{h_3 - h_1} \cdot (y_3 - y_1) + y_1, \quad (\text{Б.4})$$

$$x_C = \frac{H - h_1}{h_4 - h_1} \cdot (x_4 - x_1) + x_1, \quad (\text{Б.5})$$

$$y_C = \frac{H - h_1}{h_4 - h_1} \cdot (y_4 - y_1) + y_1, \quad (\text{Б.6})$$

$$h_2 > H \cap h_3 > H \cap h_4 > H \cap h_1 < H, \quad (\text{Б.7})$$

або:

$$h_2 < H \cap h_3 < H \cap h_4 < H \cap h_1 > H, \quad (\text{Б.8})$$

де  $(x_A, y_A, h_A)$ ,  $(x_B, y_B, h_B)$ ,  $(x_C, y_C, h_C)$  – координати точок, що утворюють ламану  $A, B, C$ ;  $(x_1, y_1, h_1)$ ,  $(x_2, y_2, h_2)$ ,  $(x_3, y_3, h_3)$ ,  $(x_4, y_4, h_4)$  – координати вузлів, що утворюють трикутні грані, за допомогою яких апроксимується об'ємна фігура неправильної форми для квадрата розбивки, що розглядається  $j, j+1$  і  $k, k+1$ .

Нумерація вузлів встановлюється у відповідності до умови (Б.1), (Б.2). Індекс 1 присвоюється тому вузлу, який відсікається від інших площиною рівня  $h=N$ . Решта індексів (2, 3 і 4) присвоюються в довільному порядку трьом вузлам, що залишилися. На прикладі, який зображений на рисунку Б.3, індекс 1 присвоюється вузлу  $(j+1; k+1)$ , індекси 2, 3 і 4 – вузлам  $(j+1; k)$ ,  $(j; k)$  і  $(j; k+1)$  відповідно.



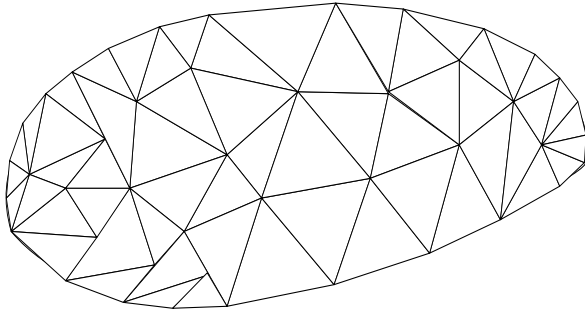


Рисунок Б.1 – Представлення об'ємного тіла за допомогою сукупності дискретних плоских трикутників

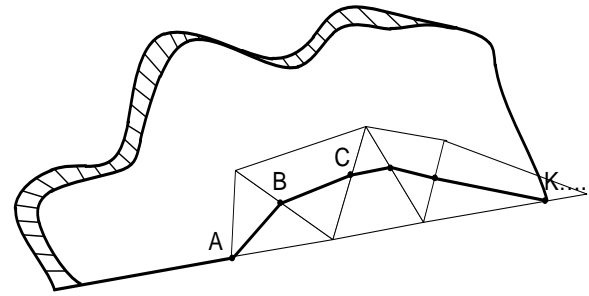


Рисунок Б.2 – Сукупність слідів перетину січною площиною площин введених дискретних елементів

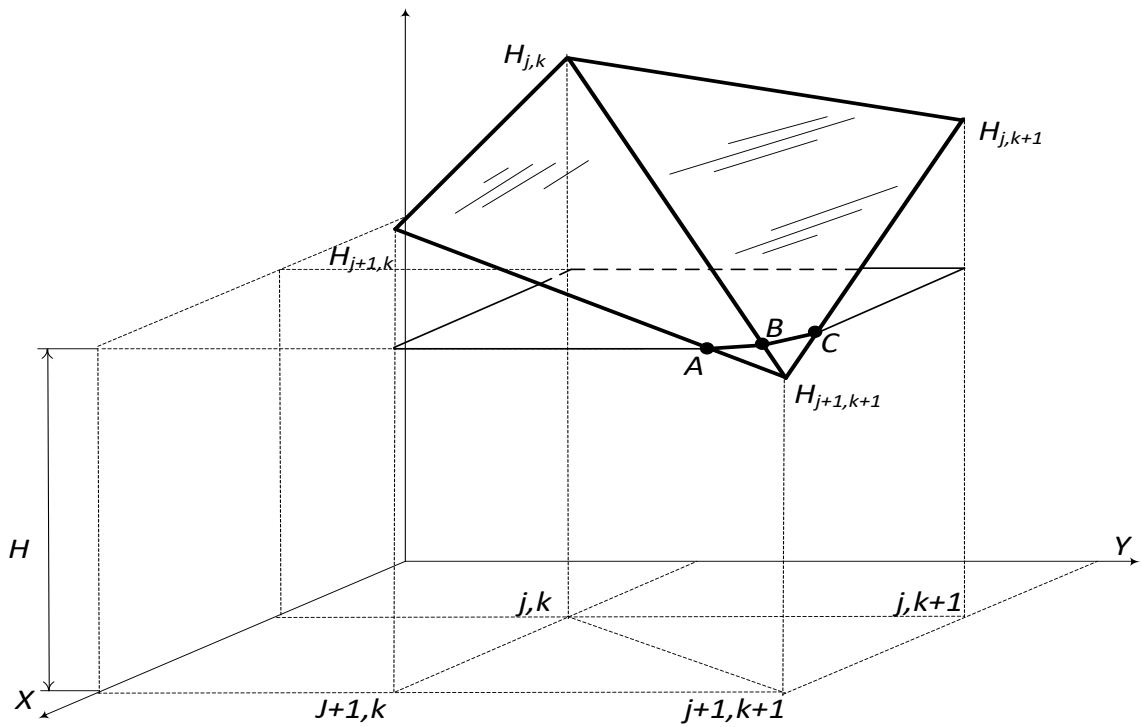


Рисунок Б.3 – Побудова ламаної лінії – сліду перетину тіла січною площиною

Результат складання отриманих слідів перетину дискретних плоских трикутників, що утворюють поверхню тіла, має вигляд ламаної лінії, яка утворює замкнутий контур (рис. Б.4).

Отримані результати дозволяють визначати геометричні характеристики перерізу як аеродинамічного профілю (рис. Б.5).

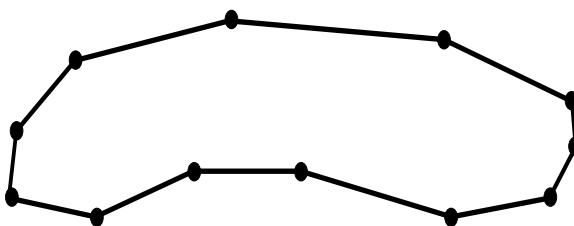


Рисунок Б.4 – Результат складання отриманих слідів перетину дискретних плоских трикутників

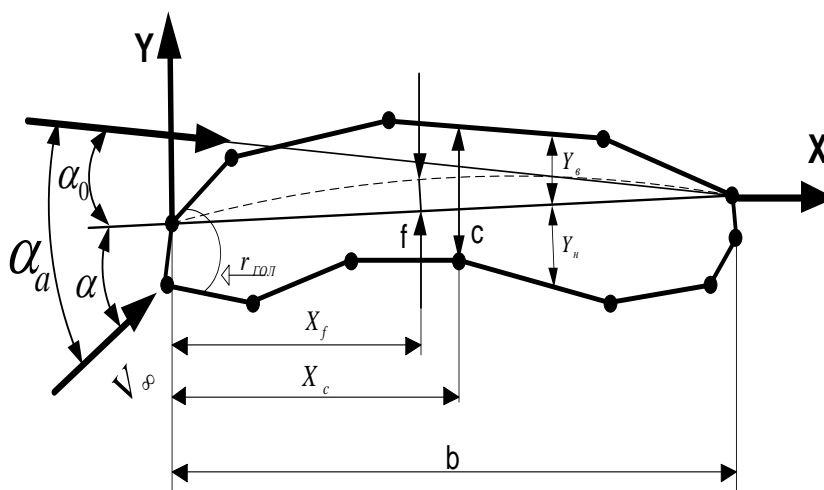


Рисунок Б.5 – Геометричні характеристики розрахованого профілю перетину тіла

Запропонований підхід, за допомогою якого задається поверхня об'ємних тіл, дозволяє уніфікувати методику розрахунку геометричних характеристик перетинів цих тіл. При цьому підході методика визначення геометрії перетинів не буде залежати від форми поверхні тіла, яке розтинають на елементи. Це дозволить підвищити ефективність досліджень з обліку аеродинамічних властивостей елементів насінневих матеріалів при проєктуванні перспективних зразків ВФНС.

Додаток В система алгебраїчних рівнянь в кінцево-різницевої формі та алгоритм розрахунку

Для визначення невідомих значень кінематичних параметрів руху насіння  $\theta, \psi, \varphi, r_{\text{СК.Х}}, r_{\text{СК.У}}$  використовуємо спосіб послідовного просування по осі часу з встановленим кроком  $\Delta t$ . На кожному кроці для поточного моменту часу  $t = t_0 + \Delta t \cdot s$ , де  $s$  – індекс кроку обчислень, визначаємо значення кутових прискорень  $\ddot{\theta}(t), \ddot{\psi}(t), \ddot{\varphi}(t)$  і проєкції прискорення проковзування  $\ddot{r}_{\text{СК.Х}}(t), \ddot{r}_{\text{СК.У}}(t)$ . Значення прискорень визначаємо в результаті рішення лінійної системи рівнянь, що мають вигляд:

$$\begin{cases} \ddot{\theta} \cdot A_{11} + \ddot{\varphi} \cdot A_{12} + \ddot{\psi} \cdot A_{13} + \ddot{x}_{\text{КВЗ}} \cdot A_{14} + \ddot{y}_{\text{КВЗ}} \cdot A_{15} = B_1, \\ \ddot{\theta} \cdot A_{21} + \ddot{\varphi} \cdot A_{22} + \ddot{\psi} \cdot A_{23} + \ddot{x}_{\text{КВЗ}} \cdot A_{24} + \ddot{y}_{\text{КВЗ}} \cdot A_{25} = B_2, \\ \ddot{\theta} \cdot A_{31} + \ddot{\varphi} \cdot A_{32} + \ddot{\psi} \cdot A_{33} + \ddot{x}_{\text{КВЗ}} \cdot A_{34} + \ddot{y}_{\text{КВЗ}} \cdot A_{35} = B_3, \\ \ddot{\theta} \cdot A_{41} + \ddot{\varphi} \cdot A_{42} + \ddot{\psi} \cdot A_{43} + \ddot{x}_{\text{КВЗ}} \cdot A_{44} + \ddot{y}_{\text{КВЗ}} \cdot A_{45} = B_4, \\ \ddot{\theta} \cdot A_{51} + \ddot{\varphi} \cdot A_{52} + \ddot{\psi} \cdot A_{53} + \ddot{x}_{\text{КВЗ}} \cdot A_{54} + \ddot{y}_{\text{КВЗ}} \cdot A_{55} = B_5, \end{cases} \quad (\Gamma.1)$$

де:

$$A_{11} = m \cdot \left\{ \sin \psi \cdot R_{Cz} + f \frac{\dot{x}_{\text{СК}}}{\sqrt{\dot{x}_{\text{СК}}^2 + \dot{y}_{\text{СК}}^2}} (\cos \psi \cdot R_{Cy} - \sin \psi \cdot R_{Cx}) \right\}, \quad (\Gamma.2)$$

$$\begin{aligned} A_{12} = m \cdot \{ & -\sin \theta \cos \psi \cdot R_{Cz} - \cos \theta \cdot R_{Cy} + \\ & + f \frac{\dot{x}_{\text{СК}}}{\sqrt{\dot{x}_{\text{СК}}^2 + \dot{y}_{\text{СК}}^2}} (\sin \theta \sin \psi \cdot R_{Cy} + \sin \theta \cos \psi \cdot R_{Cx}) \}, \end{aligned} \quad (\Gamma.3)$$

$$A_{13} = -m \cdot R_{Cy}, \quad (\Gamma.4)$$

$$A_{14} = m, \quad (\Gamma.5)$$

$$A_{15} = 0, \quad (\Gamma.6)$$

$$A_{21} = -m \cdot \left\{ \cos \psi \cdot R_{Cz} + f \frac{\dot{y}_{CK}}{\sqrt{\dot{x}_{CK}^2 + \dot{y}_{CK}^2}} \cdot (\cos \psi \cdot R_{Cy} - \sin \psi \cdot R_{Cx}) \right\}, \quad (\Gamma.7)$$

$$A_{22} = m \cdot \{ \cos \theta \cdot R_{Cx} - \sin \theta \sin \psi \cdot R_{Cz} + \\ + f \frac{\dot{y}_{CK}}{\sqrt{\dot{x}_{CK}^2 + \dot{y}_{CK}^2}} \cdot (\sin \theta \sin \psi \cdot R_{Cy} + \sin \theta \cos \psi \cdot R_{Cx}) \}, \quad (\Gamma.8)$$

$$A_{23} = m \cdot R_{Cx}, \quad (\Gamma.9)$$

$$A_{24} = 0, \quad (\Gamma.10)$$

$$A_{25} = m, \quad (\Gamma.11)$$

$$A_{31} = mR_C^2 \cdot \cos \psi - mR_{Cx} \cdot (R_{Cx} \cos \psi + R_{Cy} \sin \psi) + \\ + J'_x \cos \varphi \cdot l_1 - J'_y \sin \varphi \cdot l_2, \quad (\Gamma.12)$$

$$A_{32} = mR_C^2 \cdot \sin \theta \sin \psi + J'_z \cdot l_3 - \\ - mR_{Cx} (R_{Cx} \sin \theta \sin \psi - R_{Cy} \sin \theta \cos \psi + R_{Cz} \cos \theta), \quad (\Gamma.13)$$

$$A_{33} = -mR_{Cx} R_{Cz} + J'_x \cdot \sin \theta \sin \varphi \cdot l_1 + J'_y \sin \theta \cos \varphi \cdot l_2 + \\ + J'_z \cos \theta \cdot l_3, \quad (\Gamma.14)$$

$$A_{34} = 0, \quad (\Gamma.15)$$

$$A_{35} = -mR_{Cz}, \quad (\Gamma.16)$$

$$A_{41} = mR_C^2 \cdot \sin \psi - mR_{Cy} (R_{Cx} \cos \psi + R_{Cy} \sin \psi) + \\ + J'_x \cdot \cos \varphi \cdot m_1 - J'_y \cdot \sin \varphi \cdot m_2, \quad (\Gamma.17)$$

$$A_{42} = J'_z m_3 - mR_C^2 \sin \theta \cos \psi - \\ - mR_{Cy} (R_{Cx} \sin \theta \sin \psi - R_{Cy} \sin \theta \cos \psi + R_{Cz} \cos \theta), \quad (\Gamma.18)$$

$$A_{43} = J'_x \sin \theta \sin \varphi \cdot m_1 - mR_{Cy} R_{Cz} + \\ + J'_y \cdot \sin \theta \cos \varphi \cdot m_2 + J'_z \cdot \cos \theta \cdot m_3, \quad (\Gamma.19)$$

$$A_{44} = mR_{Cz}, \quad (\Gamma.20)$$

$$A_{45} = 0, \quad (\Gamma.21)$$

$$A_{51} = -mR_{Cz}(R_{Cx} \cos \psi + R_{Cy} \sin \psi) + J'_x \cdot \cos \varphi \cdot n_1 - J'_y \cdot \sin \varphi \cdot n_2, \quad (\Gamma.22)$$

$$A_{52} = mR_C^2 \cos \theta + J'_z \cdot n_3 - mR_{Cz}(R_{Cx} \sin \theta \sin \psi - R_{Cy} \sin \theta \cos \psi + R_{Cz} \cos \theta), \quad (\Gamma.23)$$

$$A_{53} = mR_C^2 - mR_{Cz}R_{Cz} + J'_x \cdot \sin \theta \sin \varphi \cdot n_1 + J'_y \cdot \sin \theta \cos \varphi \cdot n_2 + J'_z \cdot \cos \theta \cdot n_3, \quad (\Gamma.24)$$

$$A_{54} = -mR_{Cy}, \quad (\Gamma.25)$$

$$A_{55} = mR_{Cx}, \quad (\Gamma.26)$$

$$B_1 = m(\dot{\theta}\dot{\psi} \cos \psi - \dot{\varphi}\dot{\theta} \cos \theta \cos \psi + \dot{\varphi}\dot{\psi} \sin \theta \sin \psi)R_{Cz} +$$

$$+ m \cdot f \frac{\dot{x}_{CK}}{\sqrt{\dot{x}_{CK}^2 + \dot{y}_{CK}^2}} \{(-\dot{\theta}\dot{\psi} \sin \psi + \dot{\varphi}\dot{\theta} \cos \theta \sin \psi + \dot{\varphi}\dot{\psi} \sin \theta \cos \psi)R_{Cy} -$$

$$- (\dot{\theta}\dot{\psi} \cos \psi - \dot{\varphi}\dot{\theta} \cos \theta \cos \psi + \dot{\varphi}\dot{\psi} \sin \theta \sin \psi)R_{Cx} +$$

$$+ (\omega_x R_{Cx} + \omega_y R_{Cy} + \omega_z R_{Cz})\omega_z - \omega^2 R_{Cz} + \ddot{r}_{B\bar{6}.z}\} -$$

$$- m \cdot \{(-\dot{\varphi}\dot{\theta} \sin \theta)R_{Cy} + (\omega_x R_{Cx} + \omega_y R_{Cy} + \omega_z R_{Cz})\omega_x -$$

$$- \omega^2 R_{Cx} + \ddot{r}_{B\bar{6}.x}\} - G_x - G_z \cdot f \frac{\dot{x}_{CK}}{\sqrt{\dot{x}_{CK}^2 + \dot{y}_{CK}^2}} - R_x^{aep.}, \quad (\Gamma.27)$$

$$\begin{aligned}
B_2 = & -m\dot{\phi}\dot{\theta}\sin\theta \cdot R_{C_x} - m(-\dot{\theta}\dot{\psi}\sin\psi + \dot{\phi}\dot{\theta}\cos\theta\sin\psi + \\
& + \dot{\phi}\dot{\psi}\sin\theta\cos\psi)R_{C_z} + m(\omega_x R_{C_x} + \omega_y R_{C_y} + \omega_z R_{C_z})\omega_y - \\
& - m\omega^2 R_{C_y} + m\ddot{r}_{B\delta.y} + m \cdot f \frac{\dot{y}_{CK}}{\sqrt{\dot{x}_{CK}^2 + \dot{y}_{CK}^2}} \times \\
& \times \{(-\dot{\theta}\dot{\psi}\sin\psi + \dot{\phi}\dot{\theta}\cos\theta\sin\psi + \dot{\phi}\dot{\psi}\sin\theta\cos\psi) \cdot R_{C_y} - \\
& - (\dot{\theta}\dot{\psi}\cos\psi - \dot{\phi}\dot{\theta}\cos\theta\cos\psi + \dot{\phi}\dot{\psi}\sin\theta\sin\psi) \cdot R_{C_x} + \\
& + (\omega_x R_{C_x} + \omega_y R_{C_y} + \omega_z R_{C_z})\omega_z - \omega^2 R_{C_z} + \ddot{r}_{B\delta.z}\} - \\
& - G_y - G_z \cdot f \frac{\dot{y}_{CK}}{\sqrt{\dot{x}_{CK}^2 + \dot{y}_{CK}^2}} - R_y^{aep}.
\end{aligned} \quad , \quad (\Gamma.28)$$

$$\begin{aligned}
B_3 = & mR_C^2(-\dot{\theta}\dot{\psi}\sin\psi + \dot{\phi}\dot{\theta}\cos\theta\sin\psi + \dot{\phi}\dot{\psi}\sin\theta\cos\psi) - \\
& - mR_{C_x} \cdot \{R_{C_x}(-\dot{\theta}\dot{\psi}\sin\psi + \dot{\phi}\dot{\theta}\cos\theta\sin\psi + \dot{\phi}\dot{\psi}\sin\theta\cos\psi) + \\
& + R_{C_y}(\dot{\theta}\dot{\psi}\cos\psi - \dot{\phi}\dot{\theta}\cos\theta\cos\psi + \dot{\phi}\dot{\psi}\sin\theta\sin\psi) - R_{C_z}\dot{\phi}\dot{\theta}\sin\theta\} + \\
& + m(\omega_x R_{C_x} + \omega_y R_{C_y} + \omega_z R_{C_z})(R_{C_y}\omega_z - R_{C_z}\omega_y) + \\
& + \{J'_x \cdot (\dot{\psi}\dot{\theta}\cos\theta\sin\phi + \dot{\psi}\dot{\phi}\sin\theta\cos\phi - \dot{\theta}\dot{\phi}\sin\phi) + (J'_z - J'_y)\omega'_y \cdot \omega'_z\} \cdot l_1 + \\
& + \{J'_y \cdot (\dot{\psi}\dot{\theta}\cos\theta\cos\phi - \dot{\psi}\dot{\phi}\sin\theta\sin\phi - \dot{\theta}\dot{\phi}\cos\phi) + (J'_x - J'_z)\omega'_x \cdot \omega'_z\} \cdot l_2 + \\
& + \{-J'_z \cdot \dot{\psi}\dot{\theta}\sin\theta + (J'_y - J'_x)\omega'_x \omega'_y\} \cdot l_3 + \\
& + mR_{C_y}\ddot{r}_{B\delta.z} - mR_{C_z}\ddot{r}_{B\delta.y} - R_{C_y}G_z + R_{C_z}G_y - M_{K\psi.x} - M_x^{aep}.
\end{aligned} \quad , \quad (\Gamma.29)$$

$$\begin{aligned}
B_4 = & mR_C^2(\dot{\theta}\dot{\psi}\cos\psi - \dot{\phi}\dot{\theta}\cos\theta\cos\psi + \dot{\phi}\dot{\psi}\sin\theta\sin\psi) - \\
& - mR_{C_y} \{R_{C_x}(-\dot{\theta}\dot{\psi}\sin\psi + \dot{\phi}\dot{\theta}\cos\theta\sin\psi + \dot{\phi}\dot{\psi}\sin\theta\cos\psi) + \\
& + R_{C_y}(\dot{\theta}\dot{\psi}\cos\psi - \dot{\phi}\dot{\theta}\cos\theta\cos\psi + \dot{\phi}\dot{\psi}\sin\theta\sin\psi) - R_{C_z}\dot{\phi}\dot{\theta}\sin\theta\} + \\
& + m(\omega_x R_{C_x} + \omega_y R_{C_y} + \omega_z R_{C_z})(R_{C_z}\omega_x - R_{C_x}\omega_z) + \\
& + \{J'_x \cdot (\dot{\psi}\dot{\theta}\cos\theta\sin\phi + \dot{\psi}\dot{\phi}\sin\theta\cos\phi - \dot{\theta}\dot{\phi}\sin\phi) + (J'_z - J'_y)\omega'_y \cdot \omega'_z\} \cdot m_1 + \\
& + \{J'_y \cdot (\dot{\psi}\dot{\theta}\cos\theta\cos\phi - \dot{\psi}\dot{\phi}\sin\theta\sin\phi - \dot{\theta}\dot{\phi}\cos\phi) + (J'_x - J'_z)\omega'_x \cdot \omega'_z\} \cdot m_2 + \\
& + \{-J'_z \cdot \dot{\psi}\dot{\theta}\sin\theta + (J'_y - J'_x)\omega'_x \omega'_y\} \cdot m_3 + mR_{C_z}\ddot{r}_{B\delta.x} - \\
& - mR_{C_x}\ddot{r}_{B\delta.z} - R_{C_z}G_x + R_{C_x}G_z - M_{K\psi.y} - M_y^{aep}.
\end{aligned} \quad , \quad (\Gamma.30)$$

$$\begin{aligned}
B_5 = & mR_{Cz}^2 \cdot \dot{\varphi} \dot{\theta} \sin \theta - \\
& - mR_{Cz} \{ R_{Cx} (-\dot{\theta} \dot{\psi} \sin \psi + \dot{\varphi} \dot{\theta} \cos \theta \sin \psi + \dot{\varphi} \dot{\psi} \sin \theta \cos \psi) + \\
& + R_{Cy} (\dot{\theta} \dot{\psi} \cos \psi - \dot{\varphi} \dot{\theta} \cos \theta \cos \psi + \dot{\varphi} \dot{\psi} \sin \theta \sin \psi) - R_{Cz} \dot{\varphi} \dot{\theta} \sin \theta \} + \\
& + m(\omega_x R_{Cx} + \omega_y R_{Cy} + \omega_z R_{Cz})(R_{Cx} \omega_y - R_{Cy} \omega_x) + \\
& + \{ J'_x \cdot (\dot{\psi} \dot{\theta} \cos \theta \sin \varphi + \dot{\psi} \dot{\varphi} \sin \theta \cos \varphi - \dot{\theta} \dot{\varphi} \sin \varphi) + (J'_z - J'_y) \omega'_y \cdot \omega'_z \} n_1 + \\
& + \{ J'_y \cdot (\dot{\psi} \dot{\theta} \cos \theta \cos \varphi - \dot{\psi} \dot{\varphi} \sin \theta \sin \varphi - \dot{\theta} \dot{\varphi} \cos \varphi) + (J'_x - J'_z) \omega'_x \cdot \omega'_z \} n_2 + \\
& + \{ -J'_z \cdot \dot{\psi} \dot{\theta} \sin \theta + (J'_y - J'_x) \omega'_x \omega'_y \} n_3 + \\
& + mR_{Cx} \ddot{r}_{вб.у} - mR_{Cy} \ddot{r}_{вб.х} - R_{Cx} G_y + R_{Cy} G_x - M_z^{аер}.
\end{aligned} \tag{Г.31}$$

Коефіцієнти  $A_{ij}$  і  $B_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, 5$ ,  $j = 1, 2, \dots, 5$ , які входять в нелінійну систему рівнянь для кожного розглянутого кроку обчислень, є постійними величинами, які визначаються або з початкових умов руху насіння, або з результатів обчислень попереднього кроку інтегрування. Тобто при вирішенні системи рівнянь для моментів часу  $t = t_0 + \Delta t \cdot s$  значення коефіцієнтів беруться  $A_{ij} = A_{ij}(t - \Delta t) = (A_{ij})_{s-1}$ ,  $B_i = B_i(t - \Delta t) = (B_i)_{s-1}$ .

Для отриманих значень інших похідних (прискорень) кутових і лінійних координат за допомогою співвідношень Ейлера обчислюються спочатку швидкості, а потім самі кінематичні параметри.

Місцезнаходження центру маси насіння щодо робочої поверхні визначається шляхом покрокового інтегрування пройденого на момент часу  $t = t_0 + \Delta t \cdot s$  шляху:

$$x_s = \sum_{k=1}^s (x_{ck})_k + \sum_{k=1}^s [(x_K)_k - (x_K)_{k-1}] + (R_{Cx})_s, \tag{Г.32}$$

$$y_s = \sum_{k=1}^s (y_{ck})_k + \sum_{k=1}^s [(y_K)_k - (y_K)_{k-1}] + (R_{Cy})_s, \tag{Г.33}$$

де  $(x_{ck})_k$ ,  $(y_{ck})_k$  – проєкції вектора шляху ковзання, пройденого насінням на  $k$ -му кроці обчислень  $k = 1, 2, \dots, s$ ;  $(x_K)_{k-1}$ ,  $(x_K)_k$ ,  $(y_K)_{k-1}$ ,

$(y_K)_k$  – координати точки контакту насіння з робочою поверхнею в системі координат робочої поверхні при виконанні  $k-1$ -го і  $k$ -го кроків обчислень відповідно;  $R_{C_{x_s}}$ ,  $R_{C_{y_s}}$  – проєкції радіус-вектора, що з'єднує точку контакту з центром маси насіння в системі координат робочої поверхні для  $s$ -го кроку обчислень. Величини проєкцій радіус-вектора обчислюються за допомогою виразів (2.184), (2.185), п.п. 2.3.1.

Значення координат точки контакту насіння з робочою поверхнею на розглянутому  $k$ -му кроці обчислень розраховуємо за допомогою виразів (2.187)-(2.189), п.п. 2.3.1 шляхом вибору такої точки дискретної розбивки його поверхні, яка при обчислених для  $k$ -го кроку значеннях косинусів повороту осей власної системи координат щодо осей системи координат робочої поверхні має мінімальне перевищення над робочою поверхнею. Тобто:

$$(l; m)_K = \arg \left( \min_{l, m} z_{lm} \right), \quad (\Gamma.34)$$

де  $(l; m)_K$  – номери індексів, що визначають  $l$ -ий меридіан і  $m$ -у паралель, які визначають дискретну точку розбивки поверхні еліпсоїда на дискретні ділянки, є точкою контакту насіння з робочою поверхнею при заданих кутах повороту осей власної системи координат щодо системи координат робочої поверхні;  $z_{lm}$  – величина перевищення дискретної точки еліпсоїда, що розглядається, над робочою поверхнею.



## Додаток Г геометричні та фізико-механичні властивості насіння

Таблиця Г.1 – Основні параметри геометрії та фізико-механичні характеристики насіння

Вид насіння	Фракція насіння	Назва характеристики	Значення характеристики
1. Кріп запашний	Всі фракції	Геометрична форма поверхні (для обчислення аеродинамічних сил та моментів)	Табл. Г.2, рис. Г.1-Г.3
		Маса, [г]	0,0016
	1.1 Група №1	Коефіцієнт тертя ковзання	0,4
		Моменти інерції насіння навколо його головних осей:	
		$J'_x$ , [Г·мм]	...
		$J'_y$ , [Г·мм]	...
		$J'_z$ , [Г·мм]	...
		Півосі еліпсоїда (для рівнянь віброфрикційного руху):	
		a, [мм]	3,5
		b, [мм]	0,92
		c, [мм]	0,72
		1.2 Група №2	Маса, [г]
	Коефіцієнт тертя ковзання		0,4
	Моменти інерції насіння навколо його головних осей:		
	$J'_x$ , [Г·мм]		0,00158
	$J'_y$ , [Г·мм]		0,00035
	$J'_z$ , [Г·мм]		0,00028
	Півосі еліпсоїда (для рівнянь віброфрикційного руху):		
	a, [мм]		4,2
	b, [мм]		0,94
	c, [мм]		0,75
	1.3 Група №3	Маса, [г]	0,00145
		Коефіцієнт тертя ковзання	0,4
Моменти інерції насіння навколо його головних осей:			

		$J'_x$ , [Г·мм]	0,00167
		$J'_y$ , [Г·мм]	0,00033
		$J'_z$ , [Г·мм]	0,00028
		Півосі еліпсоїда (для рівнянь віброфрикційного руху):	
		a, [мм]	4,6
		b, [мм]	0,96
		c, [мм]	0,78
	1.4 Група №4 (сміття)	Маса, [г]	0,0014
		Коефіцієнт тертя ковзання	0,4
		Моменти інерції насіння навколо його головних осей:	
		$J'_x$ , [Г·мм]	0,0028
		$J'_y$ , [Г·мм]	0,00035
		$J'_z$ , [Г·мм]	0,00035
		Півосі еліпсоїда (для рівнянь віброфрикційного руху):	
		a, [мм]	3-5,5
b, [мм]	1		
c, [мм]	1		
2. Салат листковий	Всі фракції	Геометрична форма поверхні	Табл. Г.3, рис. Г.4 – Г.6
	2.1 Група №1	Маса, [г]	0,0012
		Коефіцієнт тертя ковзання	0,45
		Моменти інерції насіння навколо його головних осей:	
		$J'_x$ , [Г·мм]	0,0009
		$J'_y$ , [Г·мм]	0,00018
		$J'_z$ , [Г·мм]	0,00015
		Півосі еліпсоїда (для рівнянь віброфрикційного руху):	
		a, [мм]	3
	b, [мм]	0,6	
	c, [мм]	0,5	
	2.2 Група №2	Маса, [г]	0,0011
		Коефіцієнт тертя ковзання	0,45
		Моменти інерції насіння навколо його головних осей:	

		осей:	
		$J'_x$ , [Г·ММ]	0,00088
		$J'_y$ , [Г·ММ]	0,00018
		$J'_z$ , [Г·ММ]	0,00015
		Півосі еліпсоїда (для рівнянь віброфрикційного руху):	
		a, [ММ]	3 3,4
		b, [ММ]	0,6 0,64
		c, [ММ]	0,5 0,54
		2.3 Група №3	Маса, [Г]
	Коефіцієнт тертя ковзання		0,45
	Моменти інерції насіння навколо його головних осей:		
	$J'_x$ , [Г·ММ]		0,0009
	$J'_y$ , [Г·ММ]		0,00017
	$J'_z$ , [Г·ММ]		0,00014
	Півосі еліпсоїда (для рівнянь віброфрикційного руху):		
	a, [ММ]		3,6
	b, [ММ]		0,66
	c, [ММ]	0,56	
	2.4 Група №4 (сміття)	Маса, [Г]	0,0009
		Коефіцієнт тертя ковзання	0,45
		Моменти інерції насіння навколо його головних осей:	
$J'_x$ , [Г·ММ]		0,00086	
$J'_y$ , [Г·ММ]		0,00011	
$J'_z$ , [Г·ММ]		0,00011	
Півосі еліпсоїда (для рівнянь віброфрикційного руху):			
a, [ММ]		3,8	
b, [ММ]		0,5	
c, [ММ]	0,5		
3. Пастернак	Всі фракції	Геометрична форма поверхні	Табл. Г.4, рис. Г.7 – Г.9
	3.1 Група №1	Маса, [Г]	0,0035
		Коефіцієнт тертя ковзання	0,5
		Моменти інерції насіння	

		навколо його головних осей:	
		$J'_x$ , [Г·мм]	0,00438
		$J'_y$ , [Г·мм]	0,00306
		$J'_z$ , [Г·мм]	0,00044
		Півосі еліпсоїда (для рівнянь віброфрикційного руху):	
		a, [мм]	5
		b, [мм]	3,5
		c, [мм]	0,5
		3.2 Група №2	Маса, [г]
	Коефіцієнт тертя ковзання		0,5
	Моменти інерції насіння навколо його головних осей:		
	$J'_x$ , [Г·мм]		0,00466
	$J'_y$ , [Г·мм]		0,00336
	$J'_z$ , [Г·мм]		0,00047
	Півосі еліпсоїда (для рівнянь віброфрикційного руху):		
	a, [мм]		5,4
	b, [мм]		3,9
	c, [мм]	0,55	
	3.3 Група №3	Маса, [г]	0,0034
		Коефіцієнт тертя ковзання	0,5
		Моменти інерції насіння навколо його головних осей:	
		$J'_x$ , [Г·мм]	0,00476
		$J'_y$ , [Г·мм]	0,00349
		$J'_z$ , [Г·мм]	0,00051
		Півосі еліпсоїда (для рівнянь віброфрикційного руху):	
		a, [мм]	5,6
		b, [мм]	4,1
c, [мм]	0,6		
3.4 Група №4 (сміття)	Маса, [г]	0,0025	
	Коефіцієнт тертя ковзання	0,5	
	Моменти інерції насіння навколо його головних осей:		

		осей:		
		$J'_x$ , [Г·ММ]	0,00238	
		$J'_y$ , [Г·ММ]	0,00063	
		$J'_z$ , [Г·ММ]	0,00063	
		Півосі еліпсоїда (для рівнянь віброфрикційного руху):		
		a, [ММ]	3,8	
		b, [ММ]	1	
		c, [ММ]	1	

Таблиця Г.2 – Геометрична форма поверхні насіння кропу

Номер вузла	Координати вузла у системі координат насіння		
	x, [ММ/20]	y, [ММ/20]	z, [ММ/20]
1	0	0	-22
2	13	0	-18,7
3	-13	0	-18,7
4	17,5	0	-13
5	-17,5	0	-13
6	20	0	-7,5
7	-20	0	-7,5
8	20,2	0	0
9	-20,2	0	0
10	19,5	0	6,7
11	-19,5	0	6,7
12	17,5	0	13
13	-17,5	0	13
14	14,3	0	20
15	-14,3	0	20
16	9	0	28
17	-9	0	28
18	0	0	35,5
19	0	6	-18,7
20	0	10,7	-13
21	0	13	-7,5
22	0	13,5	0
23	0	12	6,7
24	0	8,5	13
25	0	4,5	20
26	0	1,5	28
27	-8,5	2	-18,7
28	-6	4	-18,7
29	6	4	-18,7
30	8,5	2	-18,7
31	-11,5	3	-13
32	-9	5	-13

33	-6,5	7,7	-13
34	6,5	7,7	-13
35	9	5	-13
36	11,5	3	-13
37	-16	3	-7,5
38	-12,7	5,5	-7,5
39	-11	7,7	-7,5
40	-7,5	10,2	-7,5
41	7,5	10,2	-7,5
42	11	7,7	-7,5
43	12,7	5,5	-7,5
44	16	3	-7,5
45	-18	2	0
46	-15,7	5,2	0
47	-12,7	7,7	0
48	-9,7	10	0
49	9,7	10	0
50	12,7	7,7	0
51	15,7	5,2	0
52	18	2	0
53	-16,5	2	6,7
54	-13,8	4,5	6,7
55	-10	7,7	6,7
56	-7,5	9,8	6,7
57	7,5	9,8	6,7
58	10	7,7	6,7
59	13,8	4,5	6,7
60	16,5	2	6,7
61	-10	3	13
62	-6	6	13
63	6	6	13
64	10	3	13
65	-6,7	2	20
66	6,7	2	20
67	0	-1	-18,7
68	0	-2	-13
69	0	-3	-7,5
70	0	-3,8	0
71	0	-3,5	6,7
72	0	-2,2	13
73	0	-1,8	20
74	0	-0,5	28
75	10	-1	-13
76	-10	-1	-13
77	9	-1,5	-7,5
78	-9	-1,5	-7,5
79	10	-1,5	0
80	-10	-1,5	0
81	9	-1,5	6,7

82	-9	-1,5	6,7
83	9,5	-1	13
84	-9,5	-1	13

Таблиця Г.3 – Геометрична форма поверхні насіння салату листового

Номер вузла	Координати вузла у системі координат насіння		
	x, [мм/20]	y, [мм/20]	z, [мм/20]
1	0	0	-30
2	8	0	-23
3	-8	0	-23
4	13	0	-16
5	-13	0	-16
6	16	0	-9
7	-16	0	-9
8	16,2	0	0
9	-16,2	0	0
10	16	0	10
11	-16	0	10
12	12,5	0	25
13	-12,5	0	25
14	8	0	40
15	-8	0	40
16	5	0	55
17	-5	0	55
18	0	0	70
19	0	4	-23
20	0	6	-16
21	0	9	-9
22	0	9	0
23	0	8	10
24	0	6	25
25	0	4,5	40
26	0	1,5	55
27	-6	0,5	-23
28	-4	3	-23
29	4	3	-23
30	6	0,5	-23
31	-8	1	-16
32	-6	2	-16
33	-4	3	-16
34	4	3	-16
35	6	2	-16
36	8	1	-16
37	-13	1	-9
38	-11	2	-9
39	-8	4	-9
40	-5	8	-9
41	5	8	-9

42	8	4	-9
43	11	2	-9
44	13	1	-9
45	-15	1	0
46	-12,5	2	0
47	-11	4	0
48	-6	8	0
49	6	8	0
50	11	4	0
51	12,5	2	0
52	15	1	0
53	-13	1	10
54	-11,5	2	10
55	-7	3	10
56	-5	6	10
57	5	6	10
58	7	3	10
59	11,5	2	10
60	13	1	10
61	-7	2	25
62	-4	4	25
63	4	4	25
64	7	2	25
65	-5	1,5	40
66	5	1,5	40
67	0	-1	-23
68	0	-2	-16
69	0	-2,5	-9
70	0	-3	0
71	0	-3	10
72	0	-2,2	25
73	0	-1,8	40
74	0	-0,5	55
75	7	-1	-16
76	-7	-1	-16
77	6	-1	-9
78	-6	-1	-9
79	6,2	-1	0
80	-6,2	-1	0
81	5,3	-1	10
82	-5,3	-1	10
83	6	-0,5	25
84	-6	-0,5	25

Таблиця Г.4 – Геометрична форма поверхні насіння пастернака

Номер вузла	Координати вузла у системі координат насіння		
	x, [мм/20]	y, [мм/20]	z, [мм/20]
1	0	0	-30



2	13	0	-23
3	-13	0	-23
4	17,5	0	-16
5	-17,5	0	-16
6	20	0	-9
7	-20	0	-9
8	20,2	0	0
9	-20,2	0	0
10	19,5	0	6
11	-19,5	0	6
12	17,5	0	12
13	-17,5	0	12
14	14,3	0	18
15	-14,3	0	18
16	9	0	24
17	-9	0	24
18	0	0	30
19	0	0	-23
20	0	0	-16
21	0	2	-9
22	0	2	0
23	0	2	6
24	0	2	12
25	0	0	18
26	0	0	24
27	-8,5	0	-23
28	-6	0	-23
29	6	0	-23
30	8,5	0	-23
31	-11,5	0	-16
32	-9	0	-16
33	-6,5	0	-16
34	6,5	0	-16
35	9	0	-16
36	11,5	0	-16
37	-16	0	-9
38	-12,7	0	-9
39	-11	0	-9
40	-7,5	2	-9
41	7,5	2	-9
42	11	0	-9
43	12,7	0	-9
44	16	0	-9
45	-18	0	0
46	-15,7	0	0
47	-12,7	0	0
48	-9,7	2	0
49	9,7	2	0
50	12,7	0	0

51	15,7	0	0
52	18	0	0
53	-16,5	0	6
54	-13,8	0	6
55	-10	0	6
56	-7,5	2	6
57	7,5	2	6
58	10	0	6
59	13,8	0	6
60	16,5	0	6
61	-10	0	12
62	-6	2	12
63	6	2	12
64	10	0	12
65	-6,7	0	18
66	6,7	0	18
67	0	0	-23
68	0	0	-16
69	0	-1	-9
70	0	-1	0
71	0	-1	6
72	0	-1	12
73	0	0	18
74	0	0	24
75	10	0	-16
76	-10	0	-16
77	9	-1	-9
78	-9	-1	-9
79	10	-1	0
80	-10	-1	0
81	9	-1	6
82	-9	-1	6
83	9,5	0	12
84	-9,5	0	12

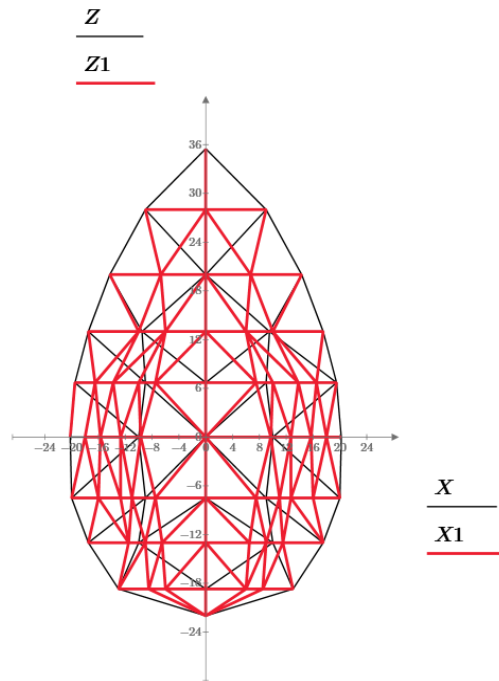


Рисунок Г.1 – Розбивка поверхні насіння кропу запашного на дискретні елементи. Вигляд зверху.

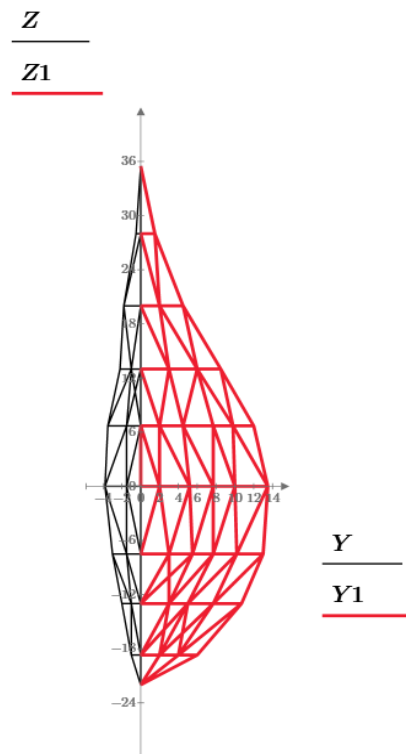


Рисунок Г.2 – Розбивка поверхні насіння кропу запашного на дискретні елементи. Вигляд збоку.

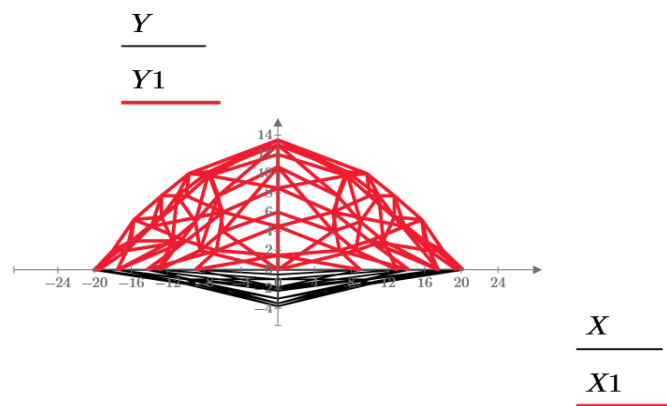


Рисунок Г.3 – Розбивка поверхні насіння крупу запашного на дискретні елементи. Вигляд ззаду.

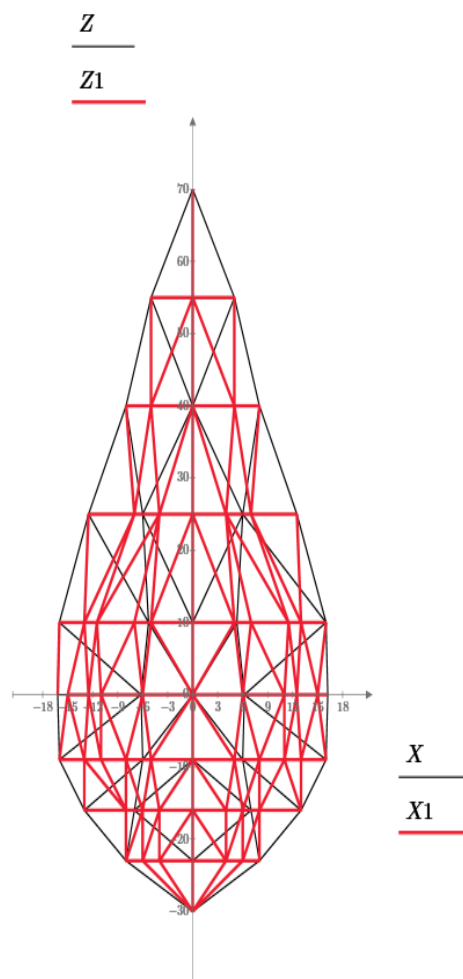


Рисунок Г.4 – Розбивка поверхні насіння салату листкового на дискретні елементи. Вигляд зверху.

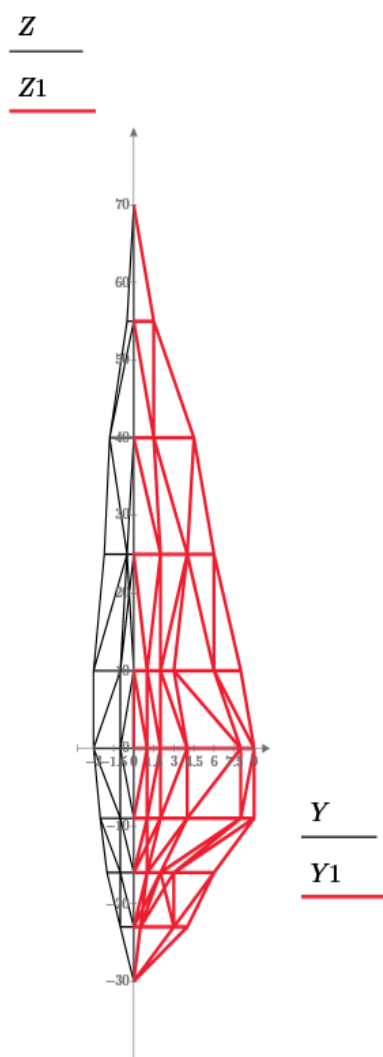


Рисунок Г.5 – Розбивка поверхні насіння салату листового на дискретні елементи. Вигляд збоку.

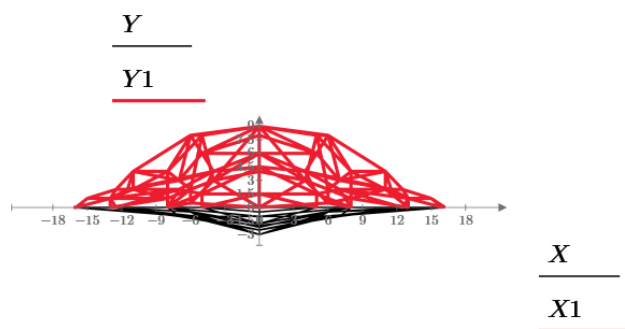


Рисунок Г.6 – Розбивка поверхні насіння салату листового на дискретні елементи. Вигляд ззаду.

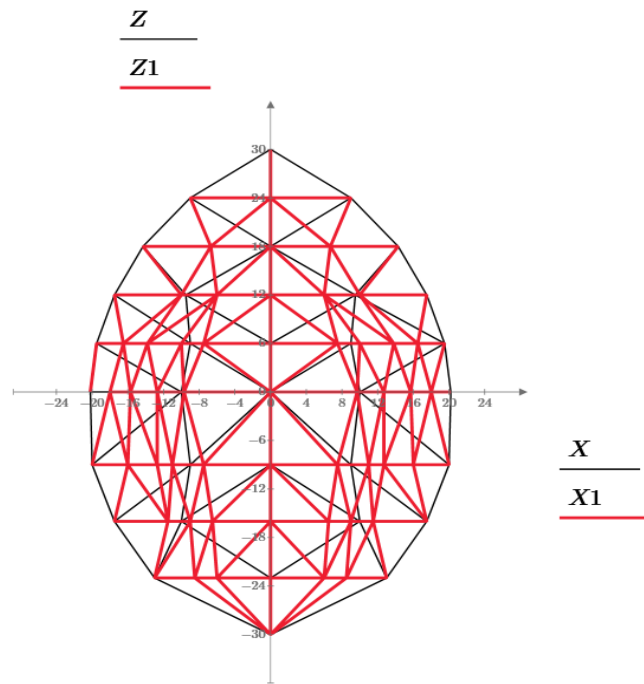


Рисунок Г.7 – Розбивка поверхні насіння пастернаку на дискретні елементи.  
Вигляд зверху.

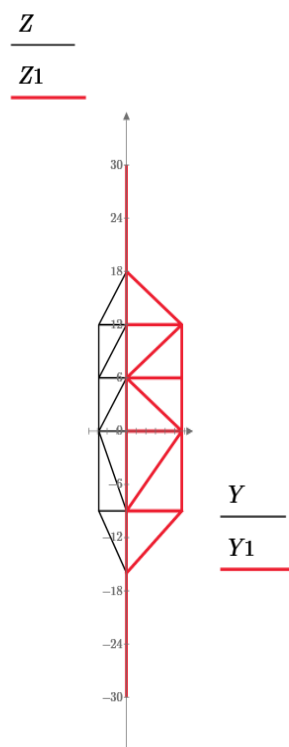


Рисунок Г.8 – Розбивка поверхні насіння пастернаку на дискретні елементи.  
Вигляд збоку.

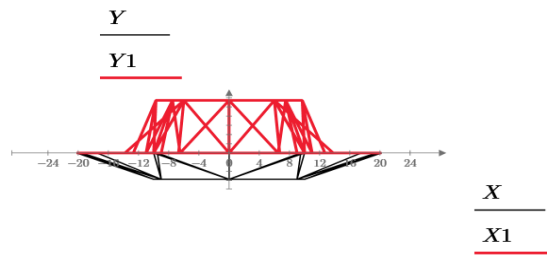


Рисунок Г.9 – Розбивка поверхні насіння пастернаку на дискретні елементи.  
Вигляд ззаду.

## Додаток Д план проведення чисельного експерименту

Номер експерименту	Значення нормованих параметрів			
	Висота вертикальної стінки, $\bar{d}$	Зазор між екраном та робочими поверхнями, $\bar{z}$	Вертикальний зазор між робочими поверхнями, $\bar{H}$	Амплітуда коливань, $\bar{A}$
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0,5
3	0	0	0	1
4	0	0	0,5	0
5	0	0	0,5	0,5
6	0	0	0,5	1
7	0	0	1	0
8	0	0	1	0,5
9	0	0	1	1
10	0	0,5	0	0
11	0	0,5	0	0,5
12	0	0,5	0	1
13	0	0,5	0,5	0
14	0	0,5	0,5	0,5
15	0	0,5	0,5	1
16	0	0,5	1	0
17	0	0,5	1	0,5
18	0	0,5	1	1
19	0	1	0	0
20	0	1	0	0,5
21	0	1	0	1
22	0	1	0,5	0
23	0	1	0,5	0,5
24	0	1	0,5	1
25	0	1	1	0
26	0	1	1	0,5
27	0	1	1	1
28	0,5	0	0	0
29	0,5	0	0	0,5
30	0,5	0	0	1
31	0,5	0	0,5	0
32	0,5	0	0,5	0,5
33	0,5	0	0,5	1
34	0,5	0	1	0
35	0,5	0	1	0,5
36	0,5	0	1	1
37	0,5	0,5	0	0
38	0,5	0,5	0	0,5
39	0,5	0,5	0	1
40	0,5	0,5	0,5	0



Номер експерименту	Значення нормованих параметрів			
	Висота вертикальної стінки, $\bar{d}$	Зазор між екраном та робочими поверхнями, $\bar{z}$	Вертикальний зазор між робочими поверхнями, $\bar{H}$	Амплітуда коливань, $\bar{A}$
41	0,5	0,5	0,5	0,5
42	0,5	0,5	0,5	1
43	0,5	0,5	1	0
44	0,5	0,5	1	0,5
45	0,5	0,5	1	1
46	0,5	1	0	0
47	0,5	1	0	0,5
48	0,5	1	0	1
49	0,5	1	0,5	0
50	0,5	1	0,5	0,5
51	0,5	1	0,5	1
52	0,5	1	1	0
53	0,5	1	1	0,5
54	0,5	1	1	1
55	1	0	0	0
56	1	0	0	0,5
57	1	0	0	1
58	1	0	0,5	0
59	1	0	0,5	0,5
60	1	0	0,5	1
61	1	0	1	0
62	1	0	1	0,5
63	1	0	1	1
64	1	0,5	0	0
65	1	0,5	0	0,5
66	1	0,5	0	1
67	1	0,5	0,5	0
68	1	0,5	0,5	0,5
69	1	0,5	0,5	1
70	1	0,5	1	0
71	1	0,5	1	0,5
72	1	0,5	1	1
73	1	1	0	0
74	1	1	0	0,5
75	1	1	0	1
76	1	1	0,5	0
77	1	1	0,5	0,5
78	1	1	0,5	1
79	1	1	1	0
80	1	1	1	0,5
81	1	1	1	1

Додаток Е результати чисельного експерименту з оцінки показника ступеня впливу знакозмінного повітряного потоку на якість вібросепарації залежно від конструкційно-режимних параметрів ВФНС з аеродинамічним екраном

Таблиця Е.1 – Результати чисельного експерименту для насіння кропу запашного

Номер експерименту	Фракція 1				Фракція 2				Фракція 3				$\frac{K}{k}$
	Без урахування аеродинаміки		З урахуванням аеродинаміки		Без урахування аеродинаміки		З урахуванням аеродинаміки		Без урахування аеродинаміки		З урахуванням аеродинаміки		
	$\varphi_1^b$ , [град.]	$\delta_1^b$ , [град.]	$\varphi_1^a$ , [град.]	$\delta_1^a$ , [град.]	$\varphi_2^b$ , [град.]	$\delta_2^b$ , [град.]	$\varphi_2^a$ , [град.]	$\delta_2^a$ , [град.]	$\varphi_3^b$ , [град.]	$\delta_3^b$ , [град.]	$\varphi_3^a$ , [град.]	$\delta_3^a$ , [град.]	
1	4	10	4,4	11	6	12	6,8	13,1	10	35	11	38,3	$\frac{1,095}{0,262}$
2	5	12	6	14	7	14	8,2	16,4	11	40	13	46,8	$\frac{1,17}{0,488}$
3	6	13	7,4	16	8	16	10	19,6	12	45	14,7	55,2	$\frac{1,227}{0,66}$
4	4	10	4,6	11,6	6	12	7	14	10	35	11,6	40,6	$\frac{1,16}{0,458}$
5	5	12	6,3	15	7	14	8,8	17,5	11	40	13,8	50	$\frac{1,25}{0,729}$
6	6	13	8	17,2	8	16	10,6	21,2	12	45	16	59,5	$\frac{1,322}{0,946}$
7	4	10	4,7	11,7	6	12	7	14	10	35	11,7	41	$\frac{1,17}{0,488}$
8	5	12	6	14,7	7	14	8,6	17,2	11	40	13,5	49	$\frac{1,225}{0,654}$
9	6	13	8	17,4	8	16	10,7	21,4	12	45	16	60,3	$\frac{1,34}{1}$

10	4	10	4,4	11	6	12	6,8	13,1	10	35	11	38,3	<u>1,095</u> 0,262
11	5	12	6	14	7	14	8,2	16,4	11	40	13	46,8	<u>1,17</u> 0,488
12	6	13	7,4	16	8	16	9,8	19,6	12	45	14,7	55,2	<u>1,227</u> 0,66
13	4	10	4,6	11,6	6	12	7	14	10	35	11,6	40,6	<u>1,16</u> 0,458
14	5	12	6,3	15	7	14	8,8	17,5	11	40	13,8	50	<u>1,25</u> 0,729
15	6	13	7,9	17,2	8	16	10,6	21,2	12	45	16	59,5	<u>1,322</u> 0,946
16	4	10	4,7	11,7	6	12	7	14	10	35	11,7	41	<u>1,17</u> 0,488
17	5	12	6,1	14,7	7	14	8,6	17,5	11	40	13,5	49	<u>1,225</u> 0,654
18	6	13	8	17,4	8	16	10,7	21,4	12	45	16,1	60,3	<u>1,34</u> 1
19	4	10	4,4	11	6	12	6,6	13,1	10	35	11	38,3	<u>1,095</u> 0,262
20	5	12	5,9	14	7	14	8,2	16,4	11	40	13	46,8	<u>1,17</u> 0,488
21	6	13	7,4	16	8	16	9,9	19,6	12	45	14,7	55,2	<u>1,227</u> 0,66
22	4	10	4,6	11,6	6	12	7	13,9	10	35	11,6	40,6	<u>1,16</u> 0,458
23	5	12	6,3	15	7	14	8,8	17,5	11	40	13,8	50	<u>1,25</u> 0,729
24	6	13	8	17,2	8	16	10,6	21,2	12	45	15,9	59,5	<u>1,322</u> 0,946
25	4	10	4,7	11,7	6	12	7	14	10	35	11,7	41	<u>1,17</u> 0,488
26	5	12	6,1	14,7	7	14	8,6	17,2	11	40	13,5	49	<u>1,225</u>

													0,654
27	6	13	8	17,4	8	16	10,7	21,4	12	45	16,1	60,3	$\frac{1,34}{1}$
28	4	10	4,2	10,5	6	12	6,3	12,6	10	35	10,5	36,7	$\frac{1,049}{0,123}$
29	5	12	5,4	13	7	14	7,6	15,1	11	40	11,9	43,1	$\frac{1,078}{0,211}$
30	6	13	6,7	14,4	8	16	8,9	17,8	12	45	13,3	50	$\frac{1,11}{0,307}$
31	4	10	4,3	10,8	6	12	6,5	12,9	10	35	10,9	37,6	$\frac{1,075}{0,202}$
32	5	12	5,6	13,5	7	14	7,9	15,7	11	40	12,4	44,9	$\frac{1,123}{0,346}$
33	6	13	7,1	15,3	8	16	9,4	18,8	12	45	14,2	53	$\frac{1,178}{0,512}$
34	4	10	4,3	10,9	6	12	6,5	13	10	35	10,9	38	$\frac{1,086}{0,235}$
35	5	12	5,9	14	7	14	8,2	16,5	11	40	13	47	$\frac{1,175}{0,503}$
36	6	13	7,4	16	8	16	9,8	19,6	12	45	14,7	55,2	$\frac{1,227}{0,66}$
37	4	10	4,3	10,7	6	12	6,4	12,8	10	35	10,7	37,5	$\frac{1,07}{0,187}$
38	5	12	5,5	13,2	7	14	7,7	15,4	11	40	12,1	44	$\frac{1,1}{0,277}$
39	6	13	6,8	14,8	8	16	9,1	18,2	12	45	13,7	51,2	$\frac{1,138}{0,392}$
40	4	10	4,4	11,1	6	12	6,6	13,3	10	35	11,1	38,8	$\frac{1,108}{0,301}$
41	5	12	5,7	13,7	7	14	8	16	11	40	12,5	45,6	$\frac{1,14}{0,398}$
42	6	13	7,2	15,6	8	16	9,6	19,2	12	45	14,4	54	$\frac{1,2}{0,578}$

43	4	10	4,4	11,1	6	12	6,7	13,3	10	35	11,1	38,9	$\frac{1,11}{0,307}$
44	5	12	6	14,4	7	14	8,4	16,8	11	40	13,2	48	$\frac{1,2}{0,578}$
45	6	13	7,5	16,3	8	16	10	20	12	45	15	56,3	$\frac{1,25}{0,729}$
46	4	10	4,4	11,1	6	12	6,7	13,3	10	35	11,1	38,9	$\frac{1,11}{0,307}$
47	5	12	5,7	13,7	7	14	8	16	11	40	12,6	45,8	$\frac{1,144}{0,41}$
48	6	13	7,1	15,3	8	16	9,4	18,8	12	45	14,1	52,9	$\frac{1,175}{0,503}$
49	4	10	4,6	11,6	6	12	7	13,9	10	35	11,6	40,6	$\frac{1,16}{0,458}$
50	5	12	5,9	14,1	7	14	8,3	16,5	11	40	13	47,1	$\frac{1,178}{0,512}$
51	6	13	7,4	16,1	8	16	10	19,8	12	45	14,9	55,8	$\frac{1,24}{0,699}$
52	4	10	4,7	11,8	6	12	7,1	14,1	10	35	11,8	41,1	$\frac{1,175}{0,503}$
53	5	12	6,2	14,9	7	14	8,7	17,4	11	40	13,6	49,6	$\frac{1,24}{0,699}$
54	6	13	7,7	16,8	8	16	10,3	20,6	12	45	15,5	58,1	$\frac{1,29}{0,849}$
55	4	10	4	10,1	6	12	6,1	12,1	10	35	10,1	35,3	$\frac{1,008}{0}$
56	5	12	5,1	12,1	7	14	7,1	14,1	11	40	11,1	40,4	$\frac{1,01}{0,006}$
57	6	13	6,1	13,2	8	16	8,1	16,3	12	45	12,2	45,8	$\frac{1,018}{0,03}$
58	4	10	4	10,1	6	12	6,1	12,1	10	35	10,1	35,4	$\frac{1,01}{0,006}$
59	5	12	5,1	12,1	7	14	7,1	14,2	11	40	11,1	40,5	$\frac{1,012}{0,006}$

													0,012
60	6	13	6,2	13,3	8	16	8,2	16,4	12	45	12,3	46,1	$\frac{1,025}{0,051}$
61	4	10	4	10,1	6	12	6,1	12,1	10	35	10,1	35,4	$\frac{1,01}{0,006}$
62	5	12	5,1	12,2	7	14	7,1	14,3	11	40	11,2	40,8	$\frac{1,02}{0,036}$
63	6	13	6,2	13,4	8	16	8,2	16,5	12	45	12,4	46,4	$\frac{1,03}{0,066}$
64	4	10	4,2	10,4	6	12	6,2	12,5	10	35	10,4	36,4	$\frac{1,04}{0,096}$
65	5	12	5,3	12,6	7	14	7,4	14,7	11	40	11,6	42	$\frac{1,05}{0,127}$
66	6	13	6,8	14,8	8	16	9,1	18,2	12	45	13,7	51,2	$\frac{1,138}{0,392}$
67	4	10	4,2	10,6	6	12	6,7	12,7	10	35	10,6	37,1	$\frac{1,06}{0,157}$
68	5	12	5,3	12,8	7	14	7,5	15	11	40	11,8	42,7	$\frac{1,068}{0,181}$
69	6	13	7,1	15,4	8	16	9,5	19	12	45	14,2	53,3	$\frac{1,185}{0,533}$
70	4	10	4,3	10,8	6	12	6,5	12,9	10	35	10,8	37,6	$\frac{1,075}{0,202}$
71	5	12	5,4	13	7	14	7,6	15,1	11	40	11,9	43,2	$\frac{1,08}{0,217}$
72	6	13	6,5	14,2	8	16	8,7	17,4	12	45	13,1	49,1	$\frac{1,09}{0,247}$
73	4	10	4,3	10,8	6	12	6,5	13	10	35	10,8	37,9	$\frac{1,083}{0,226}$
74	5	12	5,6	13,4	7	14	7,8	15,6	11	40	12,3	44,6	$\frac{1,115}{0,322}$
75	6	13	6,8	14,8	8	16	9,1	18,2	12	45	13,6	51,1	$\frac{1,135}{0,383}$

76	4	10	4,6	11,4	6	12	6,8	13,7	10	35	11,4	39,9	$\frac{1,139}{0,395}$
77	5	12	5,8	13,9	7	14	8,1	16,2	11	40	12,8	46,4	$\frac{1,16}{0,458}$
78	6	13	7,1	15,4	8	16	9,5	19	12	45	14,2	53,3	$\frac{1,185}{0,533}$
79	4	10	4,6	11,5	6	12	6,9	13,8	10	35	11,5	40,3	$\frac{1,15}{0,428}$
80	5	12	5,9	14,1	7	14	8,2	16,5	11	40	12,9	47	$\frac{1,175}{0,503}$
81	6	13	7,4	16,1	8	16	9,9	19,8	12	45	14,8	55,6	$\frac{1,236}{0,687}$

Таблиця Е.2 – Результати чисельного експерименту для насіння салату листкового

Номер експерименту	Фракція 1				Фракція 2				Фракція 3				$\frac{K}{k}$
	Без урахування аеродинаміки		З урахуванням аеродинаміки		Без урахування аеродинаміки		З урахуванням аеродинаміки		Без урахування аеродинаміки		З урахуванням аеродинаміки		
	$\varphi_1^b$ , [град.]	$\delta_1^b$ , [град.]	$\varphi_1^a$ , [град.]	$\delta_1^a$ , [град.]	$\varphi_2^b$ , [град.]	$\delta_2^b$ , [град.]	$\varphi_2^a$ , [град.]	$\delta_2^a$ , [град.]	$\varphi_3^b$ , [град.]	$\delta_3^b$ , [град.]	$\varphi_3^a$ , [град.]	$\delta_3^a$ , [град.]	
1	3	9	3,2	9,5	5	10	5,3	10,6	6	35	6,4	37,1	$\frac{1,06}{0,207}$
2	4	11	4,5	12,3	6	12	6,7	13,4	7	40	7,8	44,8	$\frac{1,12}{0,428}$
3	5	12	5,9	14,1	7	15	8,2	17,6	8	45	9,4	52,7	$\frac{1,172}{0,62}$
4	3	9	3,3	10	5	10	5,5	11,1	6	35	6,7	38,8	$\frac{1,108}{0,384}$
5	4	11	4,8	13,1	6	12	7,1	14,2	7	40	8,3	47,5	$\frac{1,187}{0,384}$

													0,675
6	5	12	6,3	15,1	7	15	8,8	18,8	8	45	10	56,5	$\frac{1,255}{0,926}$
7	3	9	3,4	10,1	5	10	5,6	11,2	6	35	6,7	39,2	$\frac{1,12}{0,428}$
8	4	11	4,8	13,2	6	12	7,2	14,5	7	40	8,4	48,2	$\frac{1,204}{0,738}$
9	5	12	6,4	15,3	7	15	8,9	19,1	8	45	10,2	57,4	$\frac{1,275}{1}$
10	3	9	3,2	9,5	5	10	5,3	10,6	6	35	6,4	37,1	$\frac{1,06}{0,207}$
11	4	11	4,5	12,3	6	12	6,7	13,4	7	40	7,8	44,8	$\frac{1,12}{0,428}$
12	5	12	5,9	14,1	7	15	8,2	17,6	8	45	9,4	52,7	$\frac{1,172}{0,62}$
13	3	9	3,3	10	5	10	5,5	11,1	6	35	6,7	38,8	$\frac{1,108}{0,384}$
14	4	11	4,8	13,1	6	12	7,1	14,2	7	40	8,3	47,5	$\frac{1,187}{0,675}$
15	5	12	6,3	15,1	7	15	8,8	18,8	8	45	10	56,5	$\frac{1,255}{0,926}$
16	3	9	3,4	10,1	5	10	5,6	11,2	6	35	6,7	39,2	$\frac{1,12}{0,428}$
17	4	11	4,8	13,2	6	12	7,2	14,5	7	40	8,4	48,2	$\frac{1,204}{0,738}$
18	5	12	6,4	15,3	7	15	8,9	19,1	8	45	10,2	57,4	$\frac{1,275}{1}$
19	3	9	3,2	9,5	5	10	5,3	10,6	6	35	6,4	37,1	$\frac{1,06}{0,207}$
20	4	11	4,5	12,3	6	12	6,7	13,4	7	40	7,8	44,8	$\frac{1,12}{0,428}$
21	5	12	5,9	14,1	7	15	8,2	17,6	8	45	9,4	52,7	$\frac{1,172}{0,62}$



22	3	9	3,3	10	5	10	5,5	11,1	6	35	6,7	38,8	<u>1,108</u> 0,384
23	4	11	4,8	13,1	6	12	7,1	14,2	7	40	8,3	47,5	<u>1,187</u> 0,675
24	5	12	6,3	15,1	7	15	8,8	18,8	8	45	10	56,5	<u>1,255</u> 0,926
25	3	9	3,4	10,1	5	10	5,6	11,2	6	35	6,7	39,2	<u>1,12</u> 0,428
26	4	11	4,8	13,2	6	12	7,2	14,5	7	40	8,4	48,2	<u>1,204</u> 0,738
27	5	12	6,4	15,3	7	15	8,9	19,1	8	45	10,2	57,4	<u>1,275</u> 1
28	3	9	3,1	9,2	5	10	5,1	10,3	6	35	6,2	36	<u>1,027</u> 0,085
29	4	11	4,2	11,6	6	12	6,3	2,1	7	40	7,4	42,2	<u>1,054</u> 0,185
30	5	12	5,4	13	7	15	7,6	16,3	8	45	8,7	48,9	<u>1,087</u> 0,306
31	3	9	3,2	9,5	5	10	5,3	10,5	6	35	6,3	36,8	<u>1,051</u> 0,173
32	4	11	4,3	11,9	6	12	6,5	13	7	40	7,6	43,3	<u>1,082</u> 0,288
33	5	12	5,7	13,7	7	15	8	17,1	8	45	9,1	51,4	<u>1,142</u> 0,509
34	3	9	3,2	9,5	5	10	5,3	10,6	6	35	6,4	37,1	<u>1,06</u> 0,207
35	4	11	4,5	12,5	6	12	6,8	13,7	7	40	8	45,5	<u>1,138</u> 0,494
36	5	12	5,9	14,1	7	15	8,2	17,6	8	45	9,4	52,9	<u>1,175</u> 0,631
37	3	9	3,1	9,4	5	10	5,2	10,4	6	35	6,3	36,5	<u>1,044</u> 0,148

38	4	11	4,3	11,8	6	12	6,4	12,9	7	40	7,5	42,9	<u>1,072</u> 0,251
39	5	12	5,5	13,2	7	15	7,7	16,5	8	45	8,8	49,5	<u>1,1</u> 0,354
40	3	9	3,2	9,6	5	10	5,4	10,7	6	35	6,4	37,5	<u>1,072</u> 0,251
41	4	11	4,4	12	6	12	6,5	13,1	7	40	7,6	43,6	<u>1,09</u> 0,317
42	5	12	5,8	13,8	7	15	8,1	17,3	8	45	9,2	51,9	<u>1,153</u> 0,55
43	3	9	3,2	9,7	5	10	5,4	10,8	6	35	6,5	37,8	<u>1,077</u> 0,269
44	4	11	4,6	12,7	6	12	7	13,9	7	40	8,1	46,3	<u>1,158</u> 0,568
45	5	12	6	14,4	7	15	8,4	18	8	45	9,6	54	<u>1,2</u> 0,723
46	3	9	3,3	9,8	5	10	5,4	10,9	6	35	6,5	38	<u>1,085</u> 0,299
47	4	11	4,5	12,3	6	12	6,7	13,5	7	40	7,8	44,8	<u>1,121</u> 0,432
48	5	12	5,7	13,8	7	15	8	17,2	8	45	9,2	51,6	<u>1,147</u> 0,528
49	3	9	3,3	9,9	5	10	5,5	11	6	35	6,6	38,5	<u>1,1</u> 0,354
50	4	11	4,5	12,4	6	12	6,7	13,5	7	40	7,9	45	<u>1,124</u> 0,443
51	5	12	5,9	14,1	7	15	8,2	17,7	8	45	9,4	53	<u>1,177</u> 0,638
52	3	9	3,4	10,1	5	10	5,6	11,2	6	35	6,7	39,3	<u>1,122</u> 0,435
53	4	11	4,7	13,1	6	12	7,1	14,2	7	40	8,3	47,4	<u>1,186</u> 0,672

54	5	12	6,2	14,9	7	15	8,7	18,6	8	45	9,9	55,7	<u>1,238</u> 0,863
55	3	9	3	9	5	10	5	10	6	35	6	35,1	<u>1,004</u> 0
56	4	11	4	11,1	6	12	6	12,1	7	40	7	40,2	<u>1,006</u> 0,007
57	5	12	5	12,1	7	15	7,1	15,2	8	45	8,1	45,5	<u>1,01</u> 0,022
58	3	9	3	9,1	5	10	5	10,1	6	35	6	35,2	<u>1,006</u> 0,007
59	4	11	4	11,1	6	12	6,1	12,1	7	40	7,1	40,4	<u>1,009</u> 0,018
60	5	12	5,1	12,2	7	15	7,1	15,3	8	45	8,1	45,8	<u>1,017</u> 0,048
61	3	9	3	9,1	5	10	5	10,1	6	35	6	35,2	<u>1,006</u> 0,007
62	4	11	4	11,1	6	12	6,1	12,1	7	40	7,1	40,4	<u>1,01</u> 0,022
63	5	12	5,1	12,2	7	15	7,1	15,3	8	45	8,2	45,9	<u>1,02</u> 0,059
64	3	9	3,1	9,2	5	10	5,1	10,3	6	35	6,2	36	<u>1,027</u> 0,085
65	4	11	4,1	11,4	6	12	6,2	12,4	7	40	7,2	41,4	<u>1,035</u> 0,114
66	5	12	5,5	13,2	7	15	7,7	16,5	8	45	8,8	49,5	<u>1,1</u> 0,354
67	3	9	3,1	9,4	5	10	5,2	10,4	6	35	6,2	36,4	<u>1,04</u> 0,133
68	4	11	4,2	11,5	6	12	6,3	12,6	7	40	7,3	41,9	<u>1,048</u> 0,162
69	5	12	5,7	13,6	7	15	7,9	17	8	45	9,1	51	<u>1,134</u> 0,48

70	3	9	3,2	9,5	5	10	5,3	10,5	6	35	6,3	36,8	$\frac{1,05}{0,17}$
71	4	11	4,2	11,6	6	12	6,3	12,7	7	40	7,4	43,3	$\frac{1,057}{0,196}$
72	5	12	5,4	12,9	7	15	7,5	16,1	8	45	8,6	48,4	$\frac{1,075}{0,262}$
73	3	9	3,2	9,5	5	10	5,3	10,6	6	35	6,4	37	$\frac{1,058}{0,199}$
74	4	11	4,3	11,9	6	12	6,5	13	7	40	7,6	43,3	$\frac{1,083}{0,292}$
75	5	12	5,5	13,2	7	15	7,7	16,5	8	45	8,8	49,5	$\frac{1,1}{0,354}$
76	3	9	3,3	9,9	5	10	5,5	11	6	35	6,6	38,5	$\frac{1,1}{0,354}$
77	4	11	4,5	12,3	6	12	6,7	13,4	7	40	7,8	44,8	$\frac{1,12}{0,428}$
78	5	12	5,7	13,6	7	15	7,9	17	8	45	9,1	50,9	$\frac{1,132}{0,472}$
79	3	9	3,3	9,9	5	10	5,5	11,1	6	35	6,6	38,7	$\frac{1,107}{0,38}$
80	4	11	4,5	12,4	6	12	6,7	13,5	7	40	7,9	45	$\frac{1,124}{0,443}$
81	5	12	5,8	14	7	15	8,2	17,5	8	45	9,3	52,5	$\frac{1,167}{0,601}$

Таблиця Е.3 – Результати чисельного експерименту для насіння пастернаку

Номер експерименту	Фракція 1				Фракція 2				Фракція 3				$\frac{K}{k}$
	Без урахування аеродинаміки		З урахуванням аеродинаміки		Без урахування аеродинаміки		З урахуванням аеродинаміки		Без урахування аеродинаміки		З урахуванням аеродинаміки		
	$\varphi_1^b$ , [град.]	$\delta_1^b$ , [град.]	$\varphi_1^a$ , [град.]	$\delta_1^a$ , [град.]	$\varphi_2^b$ , [град.]	$\delta_2^b$ , [град.]	$\varphi_2^a$ , [град.]	$\delta_2^a$ , [град.]	$\varphi_3^b$ , [град.]	$\delta_3^b$ , [град.]	$\varphi_3^a$ , [град.]	$\delta_3^a$ , [град.]	
1	3	8	3,1	8,2	5	10	5,2	10,3	5	35	5,2	36,1	$\frac{1,03}{0,126}$
2	4	10	4,3	10,6	6	12	6,4	12,7	6	40	6,4	42,5	$\frac{1,062}{0,269}$
3	5	12	5,6	13,5	7	14	7,9	15,7	7	45	7,9	50,5	$\frac{1,123}{0,543}$
4	3	8	3,2	8,4	5	10	5,3	10,6	5	35	5,3	37	$\frac{1,055}{0,238}$
5	4	10	4,5	11,3	6	12	6,8	13,5	6	40	6,8	45	$\frac{1,125}{0,552}$
6	5	12	6	14,3	7	14	8,4	16,7	7	45	8,4	53,7	$\frac{1,193}{0,857}$
7	3	8	3,2	8,6	5	10	5,4	10,8	5	35	5,4	37,6	$\frac{1,075}{0,327}$
8	4	10	4,6	11,4	6	12	6,9	13,7	6	40	6,9	45,7	$\frac{1,143}{0,632}$
9	5	12	6,1	14,7	7	14	8,6	17,1	7	45	8,6	55,1	$\frac{1,225}{1}$
10	3	8	3,1	8,2	5	10	5,2	10,3	5	35	5,2	36,1	$\frac{1,03}{0,126}$
11	4	10	4,3	10,6	6	12	6,4	12,7	6	40	6,4	42,5	$\frac{1,062}{0,269}$

12	5	12	5,6	13,5	7	14	7,9	15,7	7	45	7,9	50,5	$\frac{1,123}{0,543}$
13	3	8	3,2	8,4	5	10	5,3	10,6	5	35	5,3	37	$\frac{1,055}{0,238}$
14	4	10	4,5	11,3	6	12	6,8	13,5	6	40	6,8	45	$\frac{1,125}{0,552}$
15	5	12	6	14,3	7	14	8,4	16,7	7	45	8,4	53,7	$\frac{1,193}{0,857}$
16	3	8	3,2	8,6	5	10	5,4	10,8	5	35	5,4	37,6	$\frac{1,075}{0,327}$
17	4	10	4,6	11,4	6	12	6,9	13,7	6	40	6,9	45,7	$\frac{1,143}{0,632}$
18	5	12	6,1	14,7	7	14	8,6	17,2	7	45	8,6	55,1	$\frac{1,225}{1}$
19	3	8	3,1	8,2	5	10	5,2	10,3	5	35	5,2	36,1	$\frac{1,03}{0,126}$
20	4	10	4,3	10,6	6	12	6,4	12,7	6	40	6,4	42,5	$\frac{1,062}{0,269}$
21	5	12	5,6	13,5	7	14	7,9	15,7	7	45	7,9	50,5	$\frac{1,123}{0,543}$
22	3	8	3,2	8,4	5	10	10,6	5,3	5	35	5,3	37	$\frac{1,055}{0,238}$
23	4	10	4,5	11,3	6	12	6,8	13,5	6	40	6,8	45	$\frac{1,125}{0,552}$
24	5	12	6	14,3	7	14	8,4	16,7	7	45	8,4	53,7	$\frac{1,193}{0,857}$
25	3	8	3,2	8,6	5	10	5,4	10,8	5	35	5,4	37,6	$\frac{1,075}{0,327}$
26	4	10	4,6	11,4	6	12	6,9	13,7	6	40	6,9	45,7	$\frac{1,143}{0,632}$
27	5	12	6,1	14,7	7	14	8,6	17,2	7	45	8,6	55,1	$\frac{1,225}{1}$

28	3	8	3	8,1	5	10	5,1	10,1	5	35	5,1	35,4	$\frac{1,01}{0,036}$
29	4	10	4,1	10,2	6	12	6,1	12,3	6	40	6,1	40,9	$\frac{1,022}{0,09}$
30	5	12	5,3	12,6	7	14	7,4	14,7	7	45	7,4	47,3	$\frac{1,05}{0,215}$
31	3	8	3,1	8,3	5	10	5,2	10,4	5	35	5,2	36,3	$\frac{1,038}{0,161}$
32	4	10	4,2	10,6	6	12	6,3	12,7	6	40	6,3	42,2	$\frac{1,055}{0,238}$
33	5	12	5,6	13,5	7	14	7,9	15,8	7	45	7,9	50,7	$\frac{1,126}{0,556}$
34	3	8	3,1	8,3	5	10	5,2	10,4	5	35	5,2	36,4	$\frac{1,04}{0,17}$
35	4	10	4,4	11	6	12	6,6	13,2	6	40	6,6	44,1	$\frac{1,103}{0,453}$
36	5	12	5,7	13,8	7	14	8	16	7	45	8	51,6	$\frac{1,146}{0,646}$
37	3	8	3,1	8,2	5	10	5,1	10,3	5	35	5,1	35,9	$\frac{1,025}{0,103}$
38	4	10	4,2	10,4	6	12	6,2	12,5	6	40	6,2	41,6	$\frac{1,04}{0,17}$
39	5	12	5,4	12,9	7	14	7,5	15	7	45	7,5	48,3	$\frac{1,073}{0,318}$
40	3	8	3,1	8,4	5	10	5,2	10,5	5	35	5,2	36,7	$\frac{1,048}{0,206}$
41	4	10	4,3	10,7	6	12	6,4	12,8	6	40	6,4	42,7	$\frac{1,068}{0,296}$
42	5	12	5,7	13,6	7	14	7,9	15,9	7	45	7,9	51	$\frac{1,133}{0,587}$
43	3	8	3,2	8,5	5	10	5,3	10,6	5	35	5,3	37	$\frac{1,058}{0,251}$

44	4	10	4,5	11,2	6	12	6,7	13,5	6	40	6,7	45	$\frac{1,124}{0,547}$
45	5	12	5,9	14	7	14	8,2	16,4	7	45	8,2	52,7	$\frac{1,17}{0,753}$
46	3	8	3,2	8,5	5	10	5,3	10,6	5	35	5,3	37,1	$\frac{1,06}{0,26}$
47	4	10	4,3	10,8	6	12	6,5	12,9	6	40	6,5	43,1	$\frac{1,078}{0,341}$
48	5	12	5,6	13,4	7	14	7,8	15,6	7	45	7,8	50,3	$\frac{1,117}{0,516}$
49	3	8	3,2	8,6	5	10	5,4	10,7	5	35	5,4	37,5	$\frac{1,07}{0,305}$
50	4	10	4,4	10,9	6	12	6,5	13,1	6	40	6,5	43,6	$\frac{1,09}{0,395}$
51	5	12	5,8	13,8	7	14	8,1	16,1	7	45	8,1	51,8	$\frac{1,152}{0,673}$
52	3	8	3,3	8,7	5	10	5,5	10,9	5	35	5,5	38,2	$\frac{1,092}{0,404}$
53	4	10	4,6	11,6	6	12	6,9	13,9	6	40	6,9	46,3	$\frac{1,157}{0,695}$
54	5	12	6	14,5	7	14	8,5	16,9	7	45	8,5	54,4	$\frac{1,208}{0,924}$
55	3	8	3	8	5	10	5	10	5	35	5	35,1	$\frac{1,002}{0}$
56	4	10	4	10	6	12	6	12	6	40	6	40,1	$\frac{1,003}{0,004}$
57	5	12	5	12,1	7	14	7	14,1	7	45	7	45,2	$\frac{1,004}{0,009}$
58	3	8	3	8	5	10	5	10	5	35	5	35,1	$\frac{1,003}{0,004}$
59	4	10	4	10	6	12	6	12	6	40	6	40,1	$\frac{1,003}{0,004}$



60	5	12	5	12,1	7	14	7	14,1	7	45	7	45,4	$\frac{1,008}{0,027}$
61	3	8	3	8	5	10	5	10	5	35	5	35,1	$\frac{1,003}{0,004}$
62	4	10	4	10,1	6	12	6	12,1	6	40	6	40,2	$\frac{1,006}{0,018}$
63	5	12	5,1	12,2	7	14	7,1	14,2	7	45	7,1	45,7	$\frac{1,016}{0,063}$
64	3	8	3,1	8,2	5	10	5,1	10,2	5	35	5,1	35,7	$\frac{1,02}{0,081}$
65	4	10	4,1	10,2	6	12	6,1	12,3	6	40	6,1	40,9	$\frac{1,022}{0,09}$
66	5	12	5,3	12,7	7	14	7,4	14,8	7	45	7,4	47,6	$\frac{1,058}{0,251}$
67	3	8	3,1	8,2	5	10	5,1	10,3	5	35	5,1	35,9	$\frac{1,025}{0,103}$
68	4	10	4,1	10,4	6	12	6,2	12,4	6	40	6,2	41,4	$\frac{1,035}{0,148}$
69	5	12	5,5	13,1	7	14	7,6	15,3	7	45	7,6	49,1	$\frac{1,09}{0,395}$
70	3	8	3,1	8,3	5	10	5,2	10,4	5	35	5,2	36,3	$\frac{1,038}{0,161}$
71	4	10	4,2	10,4	6	12	6,3	12,5	6	40	6,3	41,7	$\frac{1,042}{0,179}$
72	5	12	5,3	12,6	7	14	7,4	14,7	7	45	7,4	47,3	$\frac{1,05}{0,215}$
73	3	8	3,1	8,3	5	10	5,2	10,4	5	35	5,2	36,3	$\frac{1,038}{0,161}$
74	4	10	4,2	10,5	6	12	6,3	12,8	6	40	6,3	41,9	$\frac{1,048}{0,206}$
75	5	12	5,3	12,7	7	14	7,4	14,8	7	45	7,4	47,7	$\frac{1,06}{0,26}$

76	3	8	3,2	8,4	5	10	5,3	10,5	5	35	5,3	36,9	$\frac{1,053}{0,229}$
77	4	10	4,3	10,8	6	12	6,5	12,9	6	40	6,5	43	$\frac{1,075}{0,327}$
78	5	12	5,5	13,1	7	14	7,7	15,3	7	45	7,7	49,2	$\frac{1,093}{0,408}$
79	3	8	3,2	8,6	5	10	5,4	10,8	5	35	5,4	37,6	$\frac{1,075}{0,327}$
80	4	10	4,3	10,8	6	12	6,5	13	6	40	6,5	43,3	$\frac{1,082}{0,359}$
81	5	12	5,6	13,5	7	14	7,9	15,8	7	45	7,9	50,8	$\frac{1,128}{0,565}$

Додаток Ж кроки перетворень повнофакторних регресійних моделей, отриманих в результаті чисельного експерименту

Таблиця Ж.1 – Перетворення повнофакторної регресійної моделі для насінневого матеріалу пастернаку

Крок перетворень	Коефіцієнти регресії та їх t-критерії															
	$\bar{x}_0 = 1$		$\bar{x}_1$		$\bar{x}_2$		$\bar{x}_3$		$\bar{x}_4$		$\bar{x}_1\bar{x}_2$		$\bar{x}_1\bar{x}_3$		$\bar{x}_1\bar{x}_4$	
	$a_0$	$t_0$	$a_1$	$t_1$	$a_2$	$t_2$	$a_3$	$t_3$	$a_4$	$t_4$	$a_5$	$t_5$	$a_6$	$t_6$	$a_7$	$t_7$
0	0,264	7,87	0,201	6,44	-0,377	-12,13	0,212	6,81	0,314	10,09	-	-	-	-	-	-
1	0,311	10,0	-0,155	-2,31	-0,332	-4,96	0,38	5,67	0,371	5,53	0,407	10,37	0,081	2,07	0,03	0,76
2	0,304	10,89	-0,139	-2,23	-0,37	-10,13	0,383	5,87	0,408	13,09	0,405	10,62	0,081	2,12	0	0

Таблиця Ж.1 – Перетворення повнофакторної регресійної моделі для насінневого матеріалу пастернаку (продовження)

Крок перетворень	Коефіцієнти регресії та їх t-критерії														Критерій Фішера	Коефіцієнт детермінації
	$\bar{x}_2\bar{x}_3$		$\bar{x}_2\bar{x}_4$		$\bar{x}_3\bar{x}_4$		$\bar{x}_1^2$		$\bar{x}_2^2$		$\bar{x}_3^2$		$\bar{x}_4^2$			
	$a_8$	$t_8$	$a_9$	$t_9$	$a_{10}$	$t_{10}$	$a_{11}$	$t_{11}$	$a_{12}$	$t_{12}$	$a_{13}$	$t_{13}$	$a_{14}$	$t_{14}$		
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	84,2	0,816
1	-0,136	-3,46	-0,37	-9,4	0,121	3,08	0,106	1,91	-0,04	-0,72	-0,204	-3,67	0,022	0,39	113	0,96
2	-0,14	-3,66	-0,368	-9,64	0,119	3,12	0,106	1,96	0	0	-0,203	-3,77	0	0	153	0,96

Таблиця Ж.2 – Перетворення повнофакторної регресійної моделі для насінневого матеріалу салату листкового

Крок перетворень	Коефіцієнти регресії та їх t-критерії															
	$\bar{x}_0 = 1$		$\bar{x}_1$		$\bar{x}_2$		$\bar{x}_3$		$\bar{x}_4$		$\bar{x}_1\bar{x}_2$		$\bar{x}_1\bar{x}_3$		$\bar{x}_1\bar{x}_4$	
	$a_0$	$t_0$	$a_1$	$t_1$	$a_2$	$t_2$	$a_3$	$t_3$	$a_4$	$t_4$	$a_5$	$t_5$	$a_6$	$t_6$	$a_7$	$t_7$
0	0,223	6,66	0,18	5,83	-0,369	-11,91	0,227	7,34	0,338	10,91	-	-	-	-	-	-
1	0,235	8,28	-0,146	-2,37	-0,244	-3,98	0,348	5,67	0,436	7,09	0,37	10,29	0,052	1,45	0,037	1,03
2	0,23	8,97	-0,124	-2,17	-0,28	-8,44	0,348	5,8	0,442	15,44	0,371	10,56	0,051	1,45	0	0

Таблиця Ж.2 – Перетворення повнофакторної регресійної моделі для насінневого матеріалу салату листкового (продовження)

Крок перетворень	Коефіцієнти регресії та їх t-критерії														Критерій Фішера	Коефіцієнт детермінації
	$\bar{x}_2\bar{x}_3$		$\bar{x}_2\bar{x}_4$		$\bar{x}_3\bar{x}_4$		$\bar{x}_1^2$		$\bar{x}_2^2$		$\bar{x}_3^2$		$\bar{x}_4^2$			
	$a_8$	$t_8$	$a_9$	$t_9$	$a_{10}$	$t_{10}$	$a_{11}$	$t_{11}$	$a_{12}$	$t_{12}$	$a_{13}$	$t_{13}$	$a_{14}$	$t_{14}$		
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	87,2	0,821
1	-0,2	-5,56	-0,42	-11,62	0,147	4,09	0,109	2,14	-0,04	-0,79	-0,128	-2,51	-0,011	-0,23	137	0,967
2	-0,202	-5,75	-0,41	-11,77	0,146	4,15	0,105	2,12	0	0	-0,126	-2,54	0	0	181	0,967

Таблиця Ж.3 – Перетворення повнофакторної регресійної моделі для насінневого матеріалу кропу запашного

Крок перетворень	Коефіцієнти регресії та їх t-критерії															
	$\bar{x}_0 = 1$		$\bar{x}_1$		$\bar{x}_2$		$\bar{x}_3$		$\bar{x}_4$		$\bar{x}_1\bar{x}_2$		$\bar{x}_1\bar{x}_3$		$\bar{x}_1\bar{x}_4$	
	$a_0$	$t_0$	$a_1$	$t_1$	$a_2$	$t_2$	$a_3$	$t_3$	$a_4$	$t_4$	$a_5$	$t_5$	$a_6$	$t_6$	$a_7$	$t_7$
0	0,112	3,03	0,162	4,73	-0,308	-9,0	0,27	7,9	0,371	10,86	-	-	-	-	-	-
1	0,104	3,38	-0,067	-1,01	0,033	0,5	0,344	5,19	0,314	4,73	0,298	7,67	0,055	1,41	0,053	1,38
2	0,117	3,79	-0,02	-0,51	-0,148	-3,86	0,343	5,02	0,271	3,96	0,286	7,13	0,039	0,97	0,042	1,04

Таблиця Ж.3 – Перетворення повнофакторної регресійної моделі для насінневого матеріалу кропу запашного (продовження)

Крок перетворень	Коефіцієнти регресії та їх t-критерії														Критерій Фішера	Коефіцієнт детермінації
	$\bar{x}_2\bar{x}_3$		$\bar{x}_2\bar{x}_4$		$\bar{x}_3\bar{x}_4$		$\bar{x}_1^2$		$\bar{x}_2^2$		$\bar{x}_3^2$		$\bar{x}_4^2$			
	$a_8$	$t_8$	$a_9$	$t_9$	$a_{10}$	$t_{10}$	$a_{11}$	$t_{11}$	$a_{12}$	$t_{12}$	$a_{13}$	$t_{13}$	$a_{14}$	$t_{14}$		
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	71	0,789
1	-0,235	-6,06	-0,45	-11,58	0,2	5,16	0,035	0,63	-0,175	-3,19	-0,104	-1,89	0,137	2,5	114	0,96
2	-0,219	-5,47	-0,423	-10,57	0,217	5,42	0	0	0	0	-0,109	-1,92	0,172	3,04	122	0,956

Додаток 3 план і результати проведення натурального експерименту

Таблиця 3.1 - План проведення натурального експерименту

Номер експерименту	Значення нормованих параметрів		
	Висота вертикальної стінки, $\bar{d}$	Зазор між екраном та робочими поверхнями, $\bar{z}$	Амплітуда коливань, $\bar{A}$
1	0	0	0
2	0	0	0,5
3	0	0	1
4	0	0,5	0
5	0	0,5	0,5
6	0	0,5	1
7	0	1	0
8	0	1	0,5
9	0	1	1
10	0,5	0	0
11	0,5	0	0,5
12	0,5	0	1
13	0,5	0,5	0
14	0,5	0,5	0,5
15	0,5	0,5	1
16	0,5	1	0
17	0,5	1	0,5
18	0,5	1	1
19	1	0	0
20	1	0	0,5
21	1	0	1
22	1	0,5	0
23	1	0,5	0,5
24	1	0,5	1
25	1	1	0
26	1	1	0,5
27	1	1	1

У стовбці відклику ( $K/k$ ) наведено значення ненормованого та нормованого коефіцієнту вимірювання впливу аеродинаміки на кінематичні параметри віброфрикційного руху насіння. Нормовані значення коефіцієнту обчислювалися за допомогою (3.12) п.п. 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати натурального експерименту для насіння пастернаку

Номер експерименту	Фракція 1				Фракція 2				$\frac{K}{k}$
	Нормативні значення		Експериментальні значення		Нормативні значення		Експериментальні значення		
	$\varphi_1^*$ , [град.]	$\delta_1^*$ , [град.]	$\varphi_1$ , [град.]	$\delta_1$ , [град.]	$\varphi_2^*$ , [град.]	$\delta_2^*$ , [град.]	$\varphi_2$ , [град.]	$\delta_2$ , [град.]	
1	3	8	3,1	8,1	5	35	5,3	36	$\frac{1,05}{0,25}$
2	4	10	4,5	10,9	6	40	6,5	44	$\frac{1,11}{0,57}$
3	5	12	5,8	13,7	7	45	8,0	53,3	$\frac{1,19}{1}$
4	3	8	3,1	8,1	5	35	5,3	36	$\frac{1,05}{0,25}$
5	4	10	4,5	10,9	6	40	6,5	44	$\frac{1,11}{0,57}$
6	5	12	5,8	13,7	7	45	8,0	53,3	$\frac{1,19}{1}$
7	3	8	3,1	8,1	5	35	5,3	36	$\frac{1,05}{0,25}$
8	4	10	4,5	10,9	6	40	6,5	44	$\frac{1,11}{0,57}$
9	5	12	5,8	13,7	7	45	8,0	53,3	$\frac{1,19}{1}$
10	3	8	3,1	8,2	5	35	5,2	35	$\frac{1,03}{0,14}$
11	4	10	4,0	10,0	6	40	6,0	41,6	$\frac{1,04}{0,2}$
12	5	12	5,1	12,8	7	45	7,2	49,0	$\frac{1,114}{0,59}$
13	3	8	3,1	7,8	5	35	5,2	35,8	$\frac{1,04}{0,2}$
14	4	10	4,1	9,5	6	40	6,4	41,0	$\frac{1,06}{0,31}$
15	5	12	5,5	13,0	7	45	7,5	49	$\frac{1,128}{0,67}$
16	3	8	3,2	8,6	5	35	5,4	37,5	$\frac{1,05}{0,25}$
17	4	10	4,4	10,9	6	40	6,5	43,6	$\frac{1,08}{0,41}$
18	5	12	5,8	13,8	7	45	8,1	51,8	$\frac{1,145}{0,76}$
19	3	8	3	8	5	35	5	35,1	$\frac{1,003}{0}$
20	4	10	4	10	6	40	6	40,1	$\frac{1,003}{0}$

21	5	12	5	12,1	7	45	7	45,4	$\frac{1,008}{0,03}$
22	3	8	3,1	8,2	5	35	5,1	35,9	$\frac{1,02}{0,09}$
23	4	10	4,1	10,4	6	40	6,2	41,4	$\frac{1,03}{0,14}$
24	5	12	5,3	12,6	7	45	7,1	48,3	$\frac{1,05}{0,25}$
25	3	8	3,2	8,4	5	35	5,1	36,0	$\frac{1,04}{0,2}$
26	4	10	4,3	10,8	6	40	6,2	42	$\frac{1,07}{0,36}$
27	5	12	5,3	12,7	7	45	7,3	48,6	$\frac{1,083}{0,43}$



Додаток І кроки перетворень повнофакторної регресійної моделі, отриманої в результаті натурального експерименту

Таблиця І.1 – Перетворення повнофакторної регресійної моделі для насінневого матеріалу пастернаку

Крок перетворень	Коефіцієнти регресії та їх t-критерії											
	$\bar{x}_0 = 1$		$\bar{x}_1$		$\bar{x}_2$		$\bar{x}_3$		$\bar{x}_1\bar{x}_2$		$\bar{x}_1\bar{x}_3$	
	$a_0$	$t_0$	$a_1$	$t_1$	$a_2$	$t_2$	$a_3$	$t_3$	$a_5$	$t_5$	$a_6$	$t_6$
0	0,2956	4,63	-0,4283	-6,42	0,1578	2,36	0,4599	6,89	-	-	-	-
1	0,2685	8,91	-0,2612	-3,28	-0,0522	-0,66	0,4698	5,9	0,3106	6,37	-0,6087	-12,48
2	0,2693	9,66	-0,2897	-7,58	-0,0369	-0,96	0,4633	6,06	0,3044	6,5	-0,6068	-12,96
3	0,2675	9,35	-0,2578	-3,35	-0,0393	-1,02	0,4677	6,08	0,3072	6,52	-0,6078	-12,9
4	0,2702	9,2	-0,2892	-7,32	-0,0512	-0,65	0,4644	5,88	0,3043	6,29	-0,6062	-12,52


Таблиця І.2 – Перетворення повнофакторної регресійної моделі для насінневого матеріалу пастернаку (продовження)

Крок перетворень	Коефіцієнти регресії та їх t-критерії								Критерій Фішера	Коефіцієнт детермінації
	$\bar{x}_2\bar{x}_3$		$\bar{x}_1^2$		$\bar{x}_2^2$		$\bar{x}_3^2$			
	$a_8$	$t_8$	$a_{11}$	$t_{11}$	$a_{12}$	$t_{12}$	$a_{13}$	$t_{13}$		
0	-	-	-	-	-	-	-	-	31,4	0,804
1	0,0822	1,68	-0,0307	-0,44	0,0124	0,18	0,2492	3,61	143	0,987
2	0,0794	1,7	0	0	0	0	0,2565	3,87	199	0,987
3	0,0818	1,74	-0,0335	-0,5	0	0	0,2514	3,77	172	0,987
4	0,0778	1,61	0	0	0,015	0,22	0,2562	3,74	163	0,986

## Додаток К акти впровадження

ПОГОДЖЕНО

Проректор з наукової роботи  
Державного біотехнологічного  
університету

 Валерій МИХАЙЛОВ  
«02» грудня 2022 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної роботи  
Державного біотехнологічного  
університету

 Максим СЕРІК  
«02» грудня 2022 р.

### АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ результатів науково-дослідних, дослідно-конструкторських і технологічних робіт в освітній процес закладів вищої освіти

Замовник. Державний біотехнологічний університет

Комісія у складі: проректора з науково-педагогічної роботи канд. техн. наук, доцента Серіка Максима Леонідовича та керівника навчального відділу Кашперська Анастасія Іванівна.

Дійсним актом підтверджується, що результати науково-дослідної роботи Вплив параметрів повітряного потоку на ефективність функціонування вібраційної насінноочисної машини

виконаної на кафедрі мехатроніки, безпеки життєдіяльності та управління якістю

виконуваної впродовж 2021-2022 навчального року

впроваджені на кафедрі мехатроніки, безпеки життєдіяльності та управління якістю

1. Вид впроваджених результатів. Методи класичної механіки, аналізу та синтезу математичного моделювання, математичної статистики, розв'язку систем нелінійних диференціальних рівнянь. Математична модель оцінки якості сепарування дрібнонасінневих сумішей залежно від параметрів конструкції та режиму роботи вібраційної машини з аеродинамічним екраном

2. Форма впровадження. Математичне моделювання, теоретичні дослідження та обробка результатів. Дослідження виконані з використанням програмного забезпечення MatLab, Matscad та Microsoft Office. Наукове обґрунтування критеріїв якості сепарування дрібнонасінневих сумішей за допомогою вібраційних машин з блоками робочих поверхонь

3. Новизна результатів науково-дослідних робіт. Побудована чотирьохфакторна регресійна модель другого порядку щодо оцінки показника рівня шкідливого впливу аеродинамічного фактору на якість вібраційного розділення насінневих сумішей.


4. Перелік курсів і дисциплін, у рамках яких викладені результати НДР:

– для студентів спеціальності 208 Агроінженерія – в лекційній курс «Загальне управління якістю. Метрологічне забезпечення якістю продукції», загальним обсягом 180 год., у розділі «Основні інструменти контролю якості»;

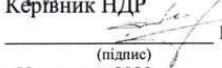
– для студентів спеціальності 208 Агроінженерія – в лекційній курс «Методологія та методи стандартизації», загальним обсягом 180 год., у розділі «Стандартизація в Україні».

5. Соціальний і науково-економічний ефект. Економічна ефективність вібраційної машини з аеродинамічним екраном при обробці легковажких насінневих культур з вираженими аеродинамічними властивостями складає 272%, що на 139% перевершує аналогічну машину без екранів

Зав. кафедрою

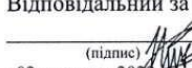
 Роман АНТОЩЕНКОВ

Керівник НДР

 Володимир ЛУК'ЯНЕНКО  
(підпис) (ініціали, прізвище)

«02» грудня 2022 р.

Відповідальний за впровадження

 Антон НИКИФОРОВ  
(підпис) (ініціали, прізвище)

«02» грудня 2022 р.

## МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

## ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ



Проректор з наукової роботи ДБТУ

Олексій БОГОМОЛОВ

2022 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

ПрАТ «Карлівський машинобудівний завод»

Олег КУЗЬМЕНКО

14 січня 2022 р.

## А К Т

## ВПРОВАДЖЕННЯ НАУКОВО-ДОСЛІДНОЇ РОБОТИ У ВИРОБНИЦТВО

Замовник: Державний біотехнологічний університет

В.о. ректора ДБТУ Тихонченко Р.С.

Цим актом підтверджується, що результати роботи, яку виконано на тему «Вплив параметрів повітряного потоку на ефективність функціонування віброфрикційних насінневих сепараторів»на кафедрі мехатроніки, безпеки життєдіяльності та управління якістювартістю: за рахунок утримання,яка виконувалася з 08.09.2021 р. по 08.02.2022 р.впроваджена на ПрАТ «КМЗ»1. Вид впроваджених результатів: експлуатація віброфрикційного насінневого сепаратору.

(експлуатація виробу, роботи, технології; виробництво виробу, роботи, технології, функціонування систем)

2. Характеристика масштабу впровадження: одиначне.

(унікальне, одиначне, партія, масове, серійне)

3. Форма впровадження: методика (метод) усунення негативного впливу динаміки повітря при розділенні насіння пастернаку на віброфрикційному насінневому сепараторі з аеродинамічним екраном.4. Новизна результатів науково-дослідних робіт: модифікація.

(піонерські, принципово нові, якісно нові, модифікація, модернізація старих розробок)

5. Дослідно-промислова перевірка: ПрАТ «КМЗ», з 15.12.21. до 15.01.22.

(найменування підприємства, період)

6. Впроваджені:

- в промислове виробництво: часток обробки насінневого матеріалу.

- в проектні роботи: \_\_\_\_\_

7. Річний економічний ефект (розрахунок додається):

- очікуваний 233 тис. грн.- фактичний 230 тис. грн.8. Соціальний і науково-технічний ефект: підвищення врожайності овочевих та лікарських культур

## ВІД ВИКОНАВЦЯ

Керівник роботи:

к.т.н. Галич І.В.

Відповідальний виконавець:

ст. викл. Никифоров А.О.

## ВІД ПІДПРИЄМСТВА

ПрАТ «КМЗ», к.т.н., керівник групи конструкторів

Борщ Ю.П.



## ДОВІДКА

### щодо соціального ефекту від впровадження результатів

дисертаційного дослідження Никифорова А.О. за темою «Вплив параметрів повітряного потоку на ефективність функціонування віброфрикційних насінневих сепараторів»

Соціальний ефект від виконання дисертаційного дослідження за темою «Вплив параметрів повітряного потоку на ефективність функціонування віброфрикційних насінневих сепараторів» полягає в підвищенні ефективності віброфрикційного розділення (очищення) насінневого матеріалу з виразними аеродинамічними властивостями та підвищенні, внаслідок цього, врожайності таких культур (деякі овочі та лікарські рослини).

В.о. генерального директора Кузьменко О.О.

