

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ДЕМ'ЯНЕНКО МАРИНА МИКОЛАЇВНА

УДК 66.074.1+66.084+66.021.1

ДИСЕРТАЦІЯ
ГІДРОДИНАМІКА ТА ГІДРОАЕРОПРУЖНІСТЬ
ДИНАМІЧНИХ СЕПАРАЦІЙНИХ ПРИСТРОЇВ

Спеціальність: 133 – Галузеве машинобудування
Галузь знань – 13 механічна інженерія

Продається на здобуття ступеня доктора філософії

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

_____ М.М. Дем'яненко

Наукові керівники:

Павленко Іван Володимирович, доктор технічних наук, професор

Ляпощенко Олександр Олександрович, доктор технічних наук, професор

Суми - 2021

АНОТАЦІЯ

Дем'яненко М.М. **Гідродинаміка та гідроаеропружність динамічних сепараційних пристроїв.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 – галузеве машинобудування – Сумський державний університет Міністерства освіти і науки України, Суми, 2021 р.

Процеси сепарації фаз є супутніми при протіканні більшості з основних процесів хімічних, нафтопереробних та металургійних виробництв для забезпечення якості первинної підготовки сировини, якості вихідного продукту та екологічної безпеки. У зв'язку з цим важливою науково-технічною задачею є підвищення ефективності та інтенсивності процесів сепарації гетерогенних багатокомпонентних сумішей. Розробка нових та вдосконалення існуючих способів сепарації є обов'язковою, оскільки більшість існуючих способів розділення, таких як відстоювання, фільтрування та центрифугування не дозволяють отримати очищений продукт який би відповідав сучасним вимогам, нормам та стандартам якості.

На основі огляду літературних джерел був проведений аналіз існуючих способів розділення газорідних сумішей та конструкцій, що їх реалізують. Було зроблено висновок, що на сьогоднішній день з точки зору питомих енерговитрат та ефективності сепарації найбільш оптимальними являються сепараційні пристрої основною діючою силою в яких є сила інерції. Широко розповсюдженими пристроями є жалюзійні сепараційні пристрої. Проаналізовано особливості протікання процесу розділення газокраплинних потоків в них, їх конструктивні особливості та методики розрахунку. Вказані їх основні переваги та недоліки а також шляхи щодо їх уникнення. На підставі проведеного аналізу запропонований новий спосіб розділення газорідних сумішей з використанням динамічних сепараційних пристроїв, що дозволяють регулювати гідравлічний опір. У зв'язку з тим, що під час роботи даних сепараційних пристроїв потік викликає деформацію пружних відбійних елементів, які в свою чергу викликають зміну параметрів потоку необхідно вирішувати задачу гідроаеропружності. У зв'язку з цим було проаналізовано

методи математичного моделювання процесу гідроаеропружної взаємодії потоку газу та/або рідини з пружними тілами. Після чого було зроблено висновок про доцільність проведення математичної ідентифікації параметрів математичних моделей гідроаеропружних явищ, що супроводжують процеси розділення гетерогенних систем методом вібраційно-інерційної сепарації.

У зв'язку з тим, що метод вібраційно-інерційної сепарації гетерогенних сумішей на даний час майже не досліджений та широко розповсюджених конструкцій пристроїв або обладнання не існує, були розроблені та захищені патентами України на корисну модель нові конструкції динамічних сепараційних пристроїв. Описано їх принцип роботи та суть фізичних процесів, що в них протікають. Одним з таких процесів являється гідроаеропружна взаємодія газорідного потоку та пружних елементів динамічних сепараційних пристроїв. Виходячи з особливостей роботи динамічних сепараційних пристроїв розроблена загальна методика проведення дисертаційних досліджень. Методика складається з послідовних етапів, що в свою чергу містять фізичні та числові експерименти задачами яких є визначення гідродинамічних показників та гідроаеропружних параметрів, таких як критичні швидкості, що призводять до втрати статичної та динамічної стійкості пружних елементів, визначення частот та амплітуд коливань а також дослідження впливу механічних коливань на газорідний потік. Для проведення фізичних досліджень розроблена експериментальна установка, що враховує теорії подібності та дозволяє відтворити умови наближені до реальних режимів роботи сепараційного обладнання та динамічних сепараційних пристроїв, а саме потік газорідної суміші швидкість якого може становити від 0,1 до 13,1 м/с ($Re\ 882 - 115,6 \cdot 10^3$), і провести випробування дослідно-експериментальних зразків пружних елементів даних пристроїв, з метою визначення особливостей їх роботи.

Для вирішення задач гідроаеропружності числовими методами застосовувався програмний комплекс ANSYS, що дозволяє вирішувати зв'язані задачі механіки рідини та деформівного тіла, в якому за допомогою модулю System Coupling можливо поєднати модулі Fluent та Transient Structural, що

застосовуються для дослідження гідродинаміки руху рідини та напружено-деформованого стану конструкцій відповідно.

Під час проведення теоретичних досліджень процесу роботи динамічних сепараційних пристроїв були розроблені математичні моделі взаємодії газорідного потоку та пружних елементів динамічних сепараційних пристроїв. Для дослідження деформацій елементів викликаних потоком було використано метод скінченних елементів та основні його залежності. З статичного розрахунку попередньо zdeформованого стану були отримані залежності для визначення максимальних деформацій пружних елементів динамічних сепараційних пристроїв.

На основі розрахунку попередньо zdeформованого стану пластин було проведено стаціонарний розрахунок гідроаеропружної взаємодії газорідного потоку та пружних відбійних елементів за допомогою методу скінченних елементів, а саме матричних рівнянь. В даних рівняннях матриця жорсткості динамічного відбійного елемента визначається за допомогою чисельних та фізичних експериментів, та вектор узагальнених вузлових сил, до якого входить стаціонарна складова узагальнених зовнішніх сил, що теж визначається за допомогою чисельних та фізичних експериментів. Визначена критична швидкість дивергенції та за допомогою методу комплексних амплітуд була визначена критична швидкість флатеру.

Також розроблена математична модель гідроаеропружної взаємодії потоку з пружними елементами синусоїдальної форми, в результаті розв'язання якої визначені такі характеристики як форма кривизни каналу в амплітудних значеннях та видовження каналу під дією гідродинамічного тиску.

Враховуючи, що під час протікання процесу сепарації газорідного потоку відбувається процес стікання плівки вловленої рідини, що суттєво впливає на його ефективність, за допомогою введення спрощень та допущень в систему рівнянь Нав'є-Стокса, що були замкнені рівняннями нерозривності були отримані залежності осередненої товщини тривимірної плівки рідини від розмірів осаджувальної поверхні, та осереднені значення швидкості. Також визначений кут відхилення вектору швидкості від вертикального напрямку.

В результаті проведених числових та фізичних експериментів були визначені основні характеристики та робочі режими динамічних сепараційних пристроїв. Так в ході фізичних моделювань гідроаеропружної взаємодії потоку з пружними елементами були визначені власні частоти і амплітуди коливань при різних швидкостях потоку ($2,6 - 11,6$ м/с, $Re: 22,9 \cdot 10^3 - 102,4 \cdot 10^3$) та різних товщинах елементів ($0,4 \cdot 10^{-3} - 0,6 \cdot 10^{-3}$ м). Визначені робочі режими пружних елементів, які виникають при різній швидкості потоку та відрізняються частотою та амплітудою коливань. Числові експерименти дозволили визначити максимальні деформації та сили прикладені до поверхні пружних елементів зі сторони потоку, при цьому за результатами моделювань виведені залежності, які дозволяють розраховувати розмах коливань від швидкості потоку, оцінку адекватності яких проведено за допомогою критерію Фішера. Дані, що були отримані в ході числового експерименту, дозволили провести ідентифікацію невідомих параметрів розробленої математичної моделі взаємодії потоку з пружними елементами синусоїдальної форми.

В результаті аналізу отриманих результатів теоретичних та експериментальних досліджень розроблена інженерна методика розрахунку динамічних сепараційних пристроїв, яка включає послідовні етапи технологічних та конструктивних розрахунків і дозволяє визначити основні гідродинамічні показники та гідроаеропружні характеристики процесу взаємодії газокраплинного потоку та пружних відбійних елементів. На основі конструктивних особливостей даних пристроїв надані рекомендації щодо раціонального компоновання у багатофазних розділювачах а також розроблена їх конструктивно-технологічна класифікація, внаслідок чого значно спрощується процес проектування, виготовлення та експлуатації.

В процесі виготовлення експериментальної установки та пружних відбійних елементів і проведення фізичних досліджень процесу гідроаеропружної взаємодії були розроблені практичні рекомендації щодо компоновання, кодування та складання, які дозволять відтворити параметри роботи динамічних сепараційних пристроїв та забезпечити ефективне протікання робочого процесу.

Ключові слова: гетерогенні суміші, сепарація, вібраційно-інерційні методи, пружні елементи, гідроаеропружність, частота коливань, амплітуда, плівка рідини, попередньо-деформований стан.

SUMMARY

Demianenko M.M. **Hydrodynamics and hydroaeroelasticity of the dynamic separation devices** – Qualifying scientific work on the manuscript rights.

The dissertation for obtaining the degree of Doctor of Philosophy by specialty 133 – Industrial Engineering. Sumy State University, Sumy, 2021.

In this regard, an important scientific and technical task is an intensification of the separation processes of heterogeneous multicomponent mixtures. The development of new, as well as improvement of existing separation methods is mandatory, since the most of the existing separation methods, such as settling, filtration and centrifugation, prevent obtaining a purified product that would comply to modern requirements, norms, and quality standards.

An analysis of the gas-liquid separation methods and corresponding equipment design that was based on a literature review was conducted. It was concluded that today, from the perspective of specific energy consumption and separation efficiency, the most optimal separation devices are the devices with inertial separation force as the main operating force. Louver separation devices are such as widely used. The features of the gas-liquid separation process, the separation devices' design features, and the calculation methods were analyzed. Their main advantages and disadvantages, as well as ways to avoid them, are indicated. The new gas-liquid separation method by using dynamic separation devices is proposed based on conducted analysis. These devices allow the adjustment of the hydraulic resistance. Since the operation of these dynamic separation devices, the flow causes deformation of the elastic baffle elements, which in turn causes flow parameters to change, it is necessary to solve the hydroaeroelasticity problem. In this regard, the mathematical modeling methods of the process of hydroaeroelasticity interaction of a gas or gas-liquid flow with elastic elements were analyzed. Eventually, it was concluded that it is expedient to carry out a parameters identification of the mathematical models of hydroaeroelastic phenomena accompanying the heterogeneous systems separation processes by the vibration-

inertial separation method. The vibration-inertial separation method of the heterogeneous mixtures is currently almost not explored and widespread devices designs or equipment designs do not exist. In this regard, new designs of dynamic separation devices were developed and protected by Ukraine patents on a useful model. Operation principle and the physical processes essence, which take place in those devices are described. One of these processes is the hydroaeroelasticity interaction between gas-liquid flow and elastic elements of dynamic separation devices. Based on the operation peculiarities of dynamic separation devices, a general methodology for conducting dissertation research has been developed. The technique consists of successive stages, in turn, they contain physical and numerical experiments. That methodology allows determining hydrodynamic parameters and hydroaeroelastic characteristics, such as critical speeds leading to the static and dynamic stability loss of elastic elements, the vibrations frequencies, and amplitudes, as well as studying the effect of the mechanical vibrations on the gas-liquid flow. The experimental installation for physical research that considers the theory of similarity was developed. That installation makes it possible to recreate conditions close to the real operating modes of separation equipment and dynamic separation devices, namely, the gas-liquid mixture flow with speed range from 2 to 12 m/s ($Re: 17,6 \cdot 10^3 - 105,9 \cdot 10^3$), as well as to conduct experimental samples of the tests of the elastic elements of those devices, to determine their features operation.

To solve the hydroaeroelasticity problems by numerical methods, the ANSYS software package was used, which makes it possible to solve related problems of fluid mechanics and a deformable body. In this software, using the System Coupling module, it is possible to combine the Fluent Flow and Transient Structural modules used to study the fluid flow hydrodynamic and the stress-strain state of structures, respectively. During theoretical studies of the operation process of dynamic separation devices, mathematical models of the gas-liquid flow and the interaction of the elastic elements of these devices were developed. The finite element method and its main dependencies were used to define the deformations of elastic elements caused by the flow. From the previously-deformed state static calculation, dependencies were obtained to determine the elastic elements' maximum deformations of the dynamic

separation devices. Based on the previously-deformed state calculation of the plates, a stationary calculation of the hydroaeroelasticity interaction between gas-liquid flow and elastic baffle elements was carried out using the finite element method, namely, matrix equations. In these equations, the stiffness matrix of the elastic baffle element is determined using numerical and physical experiments. The vector of generalized nodal forces, which includes the stationary component of generalized external forces, is also determined using numerical and physical experiments. The critical divergence speed was determined, and the critical flutter speed was determined using the complex amplitudes method. The mathematical model of the hydroaeroelastic interaction between flow with sinusoidal elastic elements has been developed. The results of solving this model allow determining such characteristics as the channel curvature shape in amplitude values and the channel elongation under the hydrodynamic pressure action.

During the process of gas-liquid stream separation, the liquid film draining process is occurring, which significantly affects the separation efficiency. By introducing simplifications and assumptions into the Navier-Stokes equations system, which are closed by the continuity equations, the dependences of the three-dimensional liquid film averaged thickness on the size of the settling surface and the velocity averaged values were obtained. The deviation angle of the velocity vector from the vertical direction is also determined. As a result of the performed numerical and physical experiments, the main characteristics and operating modes of dynamic separation devices were determined. Thus, during the physical modeling of the flow with elastic elements hydroaeroelastic interaction, natural frequencies and vibration amplitudes were determined at different flow velocities (2,6 – 11,6 m/s, $Re: 22,9 \cdot 10^3 - 102,4 \cdot 10^3$) and various element thicknesses ($0,4 \cdot 10^{-3} - 0,6 \cdot 10^{-3}$ m). The operating modes of elastic elements, which arise at different flow rates and differ in oscillations frequency and amplitude have been determined. Numerical experiments made it possible to determine the maximum deformations and forces applied to the surface of the elastic element from the flow side. Based on the simulation results, the derived dependencies that allow calculating the range of fluctuations on the flow rate, the adequacy of which was assessed using the Fisher criterion. The data obtained in the

course of the numerical experiment made it possible to identify the unknown parameters of the developed mathematical model of the interaction of the flow with a sinusoidal elastic element. As a result of the obtained results analysis of the theoretical and experimental studies, an engineering methodology for calculating dynamic separation devices was developed. The methodology includes sequential stages of technological and constructive calculations and makes it possible to determine the main hydrodynamic parameters and hydroaeroelastic characteristics of the gas-liquid flow and elastic baffle elements interaction process. Based on the devices' design features, given are recommendations for their rational layout in multiphase separators. Their design-technological classification has been developed, which allows simplifying the process of design, manufacture, and operation of dynamic separation devices. In the manufacturing process of the experimental installation and elastic elements, as well as conducting physical studies of the hydroaeroelastic interaction process, practical recommendations for layout, coding, and assembly were developed. These recommendations will allow reproduction of the operating parameters of dynamic separation devices and ensure the efficient passing of the working process.

Keywords: heterogeneous mixtures, separation, vibration-inertial methods, elastic elements, hydro aeroelasticity, vibration frequency, amplitude, liquid film, previously-deformed state.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні результати дисертації:

1. Pavlenko I., Liaposhchenko A., Ochowiak M., Demyanenko M. Solving the stationary hydroaeroelasticity problem for dynamic deflection elements of separation devices. *Vibrations in Physical Systems - Poznan University of Technology*, 2018. Volume 29. P. 1 – 7.
2. Pavlenko, I.; Liaposhchenko, O.; Ochowiak, M.; Olszewski, R.; Demianenko, M.; Starynskyi, O.; Ivanov, V.; Yanovych, V.; Włodarczak, S.; Doligalski, M. Three-Dimensional Mathematical Model of the Liquid Film Downflow on a Vertical Surface. *Energies*. 2020. 13, 1938.

3. Demianenko M., Volf M., Pavlenko I., Liaposhchenko O. Experimental studies on oscillation modes of vibration separation devices. *Journal of Engineering Sciences*. 2021. Vol. 8(1), pp. D1 – D9.
4. Demianenko, M., Volf, M., Pavlenko, V., Liaposhchenko, O., Pavlenko, I. The solution of the stationary aeroelasticity problem for a separation channel with deformable sinusoidal walls. *Journal of Engineering Sciences*. (2020). Vol. 7(1), pp. D5 – D10.
5. Pavlenko, I.V., Liaposhchenko, O.O., Demianenko, M.M., Starynskyi, O.Ye. Static calculation of the dynamic deflection elements for separation devices. *Journal of Engineering Sciences*, 2017. Vol. 4(2), pp. B19 - B24.
6. Liaposhchenko, O., Pavlenko, I., Monkova, K., Demianenko, M., Starynskyi, O. Numerical simulation of aeroelastic interaction between gas-liquid flow and deformable elements in modular separation devices. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II, Springer International Publishing*, 2020. P. 765-774.
7. Demianenko M., Liaposhchenko O., Pavlenko I., Luscinski S., Ivanov V. Methodology of experimental research of aeroelastic interaction between two-phase flow and deflecting elements for modular separation devices. *Advanced Manufacturing Processes. Springer, Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020. P. 1 – 11.

Наукові праці, які свідчать про апробацію матеріалів дисертації:

8. Дем'яненко М.Н., Ляпощенко А.А., Павленко И.В., Склабинский В.И. Решение уравнений Навье-Стокса и задачи гидроаэроупругости для процессов сепарации в криволинейных каналах. *Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна. Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління»*. – 2015. № 27. С. 53 – 64.
9. О.О. Ляпощенко, І.В. Павленко, Р.Ю. Усик, М.М. Дем'яненко, Моделювання процесів сепарації та розробка методики розрахунку трифазного сепаратора. *Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій: науковий журнал*. – Серія «Технічні науки». 2015. № 47. Т. 1. С. 62–66.

10. Ляпощенко О.О., Іванов В.О., Павленко І.В., Дем'яненко М.М., Старинський О.Є., Ковтун В.В. Оптимізаційне компонування фазних розділювачів з застосуванням модульних сепараційних пристроїв. *Наукові праці ОНАХТ: науковий журнал. – Серія «Технічні науки»*. 2018. Т.8 2. №1. С. 128 - 133.
11. Ляпощенко О.О., Дем'яненко М.М., Старинський О.Є., Янович В.П., Павленко І.В. Експериментальне дослідження взаємодії газорідного потоку з деформівними елементами модульного сепараційного пристрою за допомогою РІV. *Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали та програма VII Всеукраїнської науково-технічної конференції. – Суми: Сумський державний університет, 2020. С. 155 - 156.*
12. Гусак О., Іванов В., Павленко І., Ляпощенко О., Дем'яненко М., Старинський О., Математичні моделювання процесів, протікаючих в динамічних сепараційних елементах. *I Міжнародна науково-технічна конференція “Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2019”* 2019. С. 238 - 239.
13. Дем'яненко М.М., Старинський О.Є., Павленко І.В., Ляпощенко О. О. Використання засобів ідентифікації математичних моделей для створення інженерної методики розрахунку вібраційно-інерційних сепараційних пристроїв. *Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали VI Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції – Суми: Сумський державний університет, 2019. С. 141-142.*
14. Дем'яненко М.М., Старинський О.Є., Павленко І.В., Ляпощенко О. О. Розроблення методики проведення експериментальних досліджень впливу механічних коливань на газорідний потік. *Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали VI Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції – Суми: Сумський державний університет, 2019. С. 143-144.*
15. Дем'яненко М.М., Павленко І.В., Ляпощенко О.О. Розширення діапазону ефективної роботи динамічних сепараційних елементів за рахунок використання віброкоагуляції газорідного потоку. *Сучасні технології у*

промислового виробництва: матеріали V Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції – Суми: Сумський державний університет, 2018. С. 134.

16. Павленко І.В., Дем'яненко М.М., Старинський О.Є. Оптимізаційне профілювання каналів динамічних сепараційних пристроїв з використанням сучасних програмних комплексів. *Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали V Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції* – Суми: Сумський державний університет, 2018. С. 231.

17. Ляпощенко О.О., Павленко І.В., Дем'яненко М.М., Старинський О.Є., Ковтун В.В., Голохвост О.О. Застосування методів обчислювальної гідродинаміки до оптимізації конструкцій модульних сепараційних пристроїв багатофазних розділювачів. *III Міжнародна науково-практична конференція "Прикладні науково-технічні дослідження (applied scientific and technical research)", Академія технічних наук України, Університет Короля Данила, Івано-Франківський національний університет нафти і газу.* 2019. С. 132.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

18. О.О. Ляпощенко, В.М. Маренок, М.М. Дем'яненко, О.Є. Старинський, В.В. Ковтун, О.О. Голохвост Оптимізаційне моделювання модульних сепараційних пристроїв у багатофазних розділювачах. *Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали VI Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції.* – Суми: Сумський державний університет. 2019. С. 243.

19. Ляпощенко О.О., Павленко І.В., Іванов В.О., Дем'яненко М.М., Старинський О.Є. Розроблення конструкторсько-технологічної класифікації модульних сепараційних пристроїв. *XVIII Міжнародна науково-практична конференція «Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво».* 2018. С. 120-122.

20. Liaposhchenko, O.O., Starynskyi O.Ye., Demianenko M.M., Pavlenko I.V. Hydrodynamics simulation and forecasting the efficiency of separation equipment oil stabilization unit of Gnidyntsy gas processing plant. *II Міжнародна*

науково-технічна конференція “Машини обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку нафти і газу PGE – 2018”, 2018. С. 340 - 342.

21. Пат. 102445 Україна, МПК В01D 45/04 (2006.01). Спосіб вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідинного потоку / О.О. Ляпощенко, І.В. Павленко, О.В. Настенко, Р.Ю. Усик, М.М. Дем'яненко; заявник та патентовласник Сумський державний університет. № u201505124; заявл. 25.05.2015; опубл. 26.10.2015, бюл.№ 20.

22. Пат. 111039 Україна, МПК В01D 45/00 (2016.01). Спосіб вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідинного потоку / О.О. Ляпощенко, О.В. Настенко, І.В. Павленко, М.М. Дем'яненко та ін.; заявник та патентовласник Сумський державний університет. № u201605061; заявл. 06.05.2016; опубл. 25.10.2016, бюл. № 20.

23. Пат. 130464 U Україна, МПК В01D 45/04 (2006.01) Пристрій для сепарації дисперсної рідини з газового потоку / О.О. Ляпощенко, І.В. Павленко, М.М. Дем'яненко, О.Є. Старинський, В.В. Ковтун; заявник та патентовласник Сумський державний університет. № u201806182; заявл. 04.06.2018; опубл. 10.12.2018, бюл. № 23.

24. Пат. №145173 U Україна, МПК В01D 17/00 (2006.01) Пристрій для розділення двофазних газорідинних багатокомпонентних систем / О.О. Ляпощенко, В.Я. Стороженко, М.С. Скиданенко, І.В. Павленко, В.А. Шматенко, М.М. Дем'яненко, О.Є. Старинський, С. Хуссейн; заявник та патентовласник Сумський державний університет. № u202003718; заявл. 19.06.2020; опубл. 26.12.2020, бюл. №22, 2020.

ЗМІСТ

	с.
ВСТУП.....	16
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	22
1.1. Огляд існуючих способів та обладнання для розділення гетерогенних систем.....	22
1.2 Особливості конструкції та робочі характеристики інерційних сепараційних пристроїв.....	25
1.3 Переваги та недоліки інерційних жалюзійних сепараційних пристроїв.....	29
1.4 Акустична коагуляція дисперсних часток.....	31
1.5 Математичне моделювання гідроаеропружної взаємодії газорідинного потоку та пружних тіл.....	37
1.6 Висновки до Розділу 1.....	48
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА ЗАГАЛЬНОЇ МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ДИСЕРТАЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	50
2.1 Загальна методика досліджень процесів вібраційно- інерційної сепарації.....	50
2.2 Методи лінеаризації рівнянь руху.....	56
2.3 Методика фізичних моделювань. Опис експериментального стенду.....	59
2.4 Методика математичних моделювань (числових експериментів).....	64
2.5 Висновки до Розділу 2.....	71
РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ, ЩО ВИНΙΚАЮТЬ ПІД ЧАС ВІБРАЦІЙНО-ІНЕРЦІЙНОЇ СЕПАРАЦІЇ.....	72
3.1 Статичний розрахунок попереднього деформованого стану динамічних відбійних елементів сепараційних пристроїв.....	72

	15
3.2 Розв'язання стаціонарної задачі гідроаеропружності.....	78
3.3 Ідентифікація параметрів математичної моделі стаціонарної задачі гідроаеропружності.....	84
3.4 Ідентифікація параметрів математичної моделі нестаціонарної задачі гідроаеропружності.....	89
3.5 Розроблення математичної моделі процесу гідроаеропружної взаємодії.....	93
3.6 Розроблення математичної моделі процесу стікання плівки вловленої рідини по поверхні сепараційного елемента.....	98
3.7 Висновки до Розділу 3.....	121
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЧИСЛОВІ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ У ДИНАМІЧНИХ СЕПАРАЦІЙНИХ ПРИСТРОЯХ.....	122
4.1 Аналіз результатів експериментальних досліджень.....	122
4.2 Аналіз результатів числових моделювань.....	140
4.3 Ідентифікація невідомих параметрів математичної моделі за результатами числових експериментів.....	146
4.4 Висновки до Розділу 4.....	155
РОЗДІЛ 5 АПРОБАЦІЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ. ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВИКОРИСТАННЯ ТА РОЗРАХУНКІВ ДИНАМІЧНИХ СЕПАРАЦІЙНИХ ПРИСТРОЇВ.....	157
5.1 Впровадження результатів досліджень динамічних сепараційних пристроїв в науковій, промисловій та навчальній практиках	157
5.2 Практичні рекомендації до інженерних розрахунків та компонування динамічних сепараційних пристроїв.....	159
5.3 Висновки до Розділу 5.....	170
ВИСНОВКИ.....	171
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	173
ДОДАТКИ	

ВСТУП

Актуальність теми. На сьогоднішній день з точки зору питомих енерговитрат та ефективності сепарації найбільш оптимальними є сепараційні пристрої, основною діючою силою в яких є сила інерції. Однією з найрозповсюдженіших проблем сепараційних пристроїв, робота яких заснована на розділенні в полі сил інерції газокраплинних потоків, являється руйнування плівки з наступним зривом і вторинним бризкоунесенням краплин вже вловленої рідини з поверхонь осадження сепараційних елементів. Не зважаючи на велику кількість традиційних шляхів уникнення даного недоліку (збільшення вільного перетину; забезпечення регулярного відведення рідини та ін.), вони не змінюють значення критичної швидкості газового потоку при якому відбувається вторинне бризковинесення. Для вирішення даної задачі було запропоновано використовувати динамічні сепараційні пристрої, суттю яких є можливість динамічного регулювання гідравлічного опору та використання накладених вібрацій для підвищення ефективності розділення гетерогенних систем. При цьому задача математичного, фізичного та числового моделювання даних процесів ускладнюється гідроаеропружною взаємодією пружних відбійних елементів динамічних сепараційних пристроїв та газорідного потоку і відноситься до невирішених задач та визначає актуальність проведених досліджень. Дослідження процесів розділення гетерогенних систем за рахунок динамічних процесів вібраційно-інерційної сепарації відноситься до науково-прикладних проблем галузевого машинобудування. У зв'язку з цим можна стверджувати, що тема дисертації представляється актуальною, має важливе наукове і практичне значення, оскільки спрямована на вирішення актуального наукового завдання, що має істотне значення для галузевого машинобудування, сутність якого полягає в визначенні гідродинамічних показників та гідроаеропружних характеристик динамічних сепараційних пристроїв.

Мета і завдання досліджень. Метою дисертаційної роботи є моделювання гідродинамічних процесів та гідроаеропружної взаємодії пружних відбійних елементів та потоку в динамічних сепараційних пристроях, розробка методів розрахунку гідродинамічних показників та гідроаеропружних характеристик

динамічних сепараційних пристроїв та видача практичних рекомендацій щодо їх проектування та експлуатації. Для досягнення поставленої мети в дисертації було поставлено наступні задачі:

- провести аналіз механізмів розділення гетерогенних систем з використанням традиційних способів сепарації та розробити пропозиції щодо їх вдосконалення за рахунок використання способів вібраційно-інерційної сепарації;

- розробити математичну модель гідроаеропружної взаємодії газорідного потоку з пружними елементами динамічних сепараційних пристроїв;

- розробити математичну модель, що дозволить визначати зміну геометричних параметрів синусоїдальних сепараційних каналів під дією швидкісного тиску;

- розробити математичну модель стікання плівки вловленої рідини по осаджувальним поверхням модульних динамічних сепараційних пристроїв;

- провести фізичні та числові моделювання процесів вібраційно-інерційної сепарації, визначити основні робочі характеристики динамічних сепараційних пристроїв;

- розрахувати ефективність вібраційно-інерційної сепарації для модульних динамічних сепараційних пристроїв та визначити їх оптимальну кількість;

- розробити рекомендації щодо способів компонування динамічних сепараційних пристроїв у фазних розділювачах та алгоритм інженерного розрахунку даних пристроїв.

- розробити та впровадити модульні динамічні сепараційні пристрої;

Об'єкт досліджень – гідродинамічні процеси у динамічних сепараційних пристроях та гідроаеропружна взаємодія потоку з пружними елементами.

Предмет дослідження – гідродинаміка потоків та пов'язані пружні деформації елементів модульних динамічних сепараційних пристроїв.

Методи дослідження. Для створення математичної моделі взаємодії газорідного потоку та пружних відбійних елементів динамічних сепараційних пристроїв використовувалися аналітичні залежності методу скінченних елементів; для тривимірної моделі стікання плівки вловленої рідини

проводилось аналітичне вирішення рівнянь Нав'є-Стокса, в які вводились спрощення, припущення та проводилась оцінка порядку малості величини що до нього входять. Числове моделювання проводилось за допомогою програмного комплексу ANSYS, а саме його модулів FLUENT та Transient Structural пов'язаних за допомогою технології System Coupling, що базуються на методі скінченних елементів та об'ємів, відповідно. Обробку даних експериментальних досліджень було проведено за допомогою методу найменших квадратів з використанням програми MathCAD.

Наукова новизна одержаних результатів.

Вперше:

- отримано розв'язок задачі гідроаеропружності для взаємодії газодисперсного потоку та пружних сепараційних елементів у формі похилого параболічного напівциліндра, з урахуванням їх попередньої деформації;

- отримано залежності, що визначають зміну геометричної форми синусоїдального каналу динамічного сепараційного пристрою в результаті гідродинамічної та гідроаеропружної взаємодії з потоком;

- отримано аналітичні залежності для оцінювання значень коефіцієнтів жорсткості за даними експериментальних і чисельних досліджень із використанням методів теорії оцінювання параметрів;

Дістало подальшого розвитку:

- математична модель, що описує тривимірне стікання плівки вловленої рідини по осаджувальним поверхням модульних динамічних сепараційних пристроїв шляхом уведення спрощень, припущень та оцінювання порядку малості величин;

- науковий підхід щодо раціонального вибору компоновань модульних сепараційних пристроїв на основі технологічних та експлуатаційних параметрів, що дозволяє вдосконалити процеси їх проєктування та складання із забезпеченням необхідних умов експлуатації.

Практичне значення одержаних результатів.

Отримані результати числових, фізичних та математичних моделювань процесу аерогідропружної взаємодії газорідинного потоку та пружних відбійних

елементів можуть бути використанні для інженерного розрахунку модульних динамічних сепараційних пристроїв.

Розроблено сучасний проблемо-орієнтований підхід щодо кодування модульних сепараційних пристроїв за конструкторсько-технологічними та експлуатаційними ознаками.

Обґрунтовано конструкції елементів модульного сепараційного пристрою, що забезпечує необхідну точність складання, ефективність експлуатації пристрою та реалізації робочого процесу.

На підставі отриманих результатів було запропоновано нові способи розділення газорідних сумішей, захищені патентами на корисну модель (№ U102445, U130464, U111039). Основні результати дисертаційної роботи впроваджено у виробничу діяльність ТОВ «ПРОМ-ЕНЕРГО ПРОДУКТ» (м. Харків) та ТОВ «Аграрник» (м. Суми), використані при виконанні держбюджетних НДР №0117U003931 «Розробка та впровадження енергоефективних модульних сепараційних пристроїв для нафтогазового та очисного обладнання», НДР №0120U102036 "Створення нових гранульованих матеріалів для ядерного палива та каталізаторів в активному гідродинамічному середовищі" та впроваджені у навчальний процес Сумського державного університету.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи, що складають її сутність були отримані особисто здобувачем. Серед них: статистичний збір матеріалу, його обробка, аналіз процесів та роботи приладів для розділення газорідних сумішей; проведення числового, фізичного та математичного моделювання процесів вібраційно-інерційної сепарації, що виникають при роботі модульних динамічних сепараційних пристроїв; створення експериментального стенду для дослідження роботи динамічних сепараційних пристроїв та визначення їх ефективності; розробка методики визначення жорсткості пружних елементів динамічних сепараційних пристроїв та кривої розподілу тиску на них за результатами проведення числових та фізичних моделювань.

Вибір теми дисертаційної роботи, постановка завдання та формулювання висновків проводились під керівництвом наукових керівників – д-р техн. наук, проф., І. В. Павленко та д-р техн. наук, проф., О. О. Ляпощенко.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи обговорювались та доповідались на наступних наукових конференціях:

XVIII Міжнародна науково-практична конференція «Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво», м. Краматорськ, 31.10-02.11.2018 р.;

III Міжнародна науково-практична конференція «Прикладні науково-технічні дослідження (Applied Scientific and Technical Research)», м. Івано-Франківськ, 3-5.04.2019 р.;

II Міжнародна науково-технічна конференція «Машини обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку нафти і газу PGE – 2018», м. Івано-Франківськ, 24-27.04.2018 р.;

«International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange (DSMIE-2019)», м. Луцьк, 11–14.06.2019 р.;

2nd Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes «Interpartner-2020», м. Одеса, 8-11.09.2020 р.;

I Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2019», м. Вінниця, 13-15.05.2019 р.;

V, VI та VII Всеукраїнські міжвузівські науково-технічні конференції «Сучасні технології у промисловому виробництві» (2018, 2019 та 2020 р. відповідно).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковані у 24 наукових працях, із них 2 статті – у наукових журналах що індексуються базами даних Scopus та/або Web of Science, 6 статей – у фахових виданнях України, 12 публікацій у матеріалах і працях конференцій та 4 патенти України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, переділку джерел посилань. Загальний обсяг роботи становить – 214 сторінок, з яких основного тексту – 177 сторінок. Дисертаційна

робота містить 11 таблиць, 55 рисунків, 128 найменувань списку використаних джерел на 13 сторінках та 5 додатків на 28 сторінках.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Огляд існуючих способів та обладнання для розділення гетерогенних систем

У нафтогазовій, хімічній, металургійній та суміжних галузях промисловості в протікають процеси в наслідок яких утворюються гетерогенні системи, такі як газорідинні суміші, емульсії, суспензії та ін. Так у хімічній промисловості при протіканні тепло- та масо-обмінних процесів, таких як абсорбція та ректифікація утворюються газорідинні потоки, які потребують подальшого розділення на рідку та газову фазу [1; 2; 3; 4]. При спалюванні корисних копалин у печах та шахтах, а також на металургійних підприємствах в ході ливарних процесів утворюються димові гази, які потрібно додатково очищати від шкідливих домішок таких як вуглекислий газ, двоокис сірки та ін. [5; 6; 7]. На нафтогазових підприємствах видобуті зі свердловини вуглеводневі являють собою багатофазні багатокомпонентні суміші, які перед подальшою переробкою необхідно розділяти на окремі фази [8; 9; 10; 11; 12; 13].

Отже, однією із обов'язкових технологічних стадій у будь-якій з вище перелічених галузей промисловості є розділення гетерогенних сумішей, для цього застосовуються багатофазні сепаратори (фазні розділювачі) принцип дії яких заснований на балансі масових сил та аеродинамічного опору [14]. Перед тим, як зробити вибір конкретної конструкції сепараційного пристрою необхідно оцінити наступні фактори [15]: розмір часток дисперсної фази, що має видалити з основного потоку сепараційний пристрій; гідравлічний опір сепараційного пристрою допустимий для необхідного рівня розділення суміші; чутливість сепараційного пристрою до забруднення твердими частинками, якщо такі присутні в потоці; граничне навантаження сепараційного пристрою; можливість встановлення пристрою в уже існуюче сепараційне обладнання, або його необхідно встановлювати в спеціальний, окремий апарат; доступність

конструктивних матеріалів необхідних для процесу розділення; ціна саме сепараційного пристрою та додаткового обладнання необхідного для його використання (апаратів, труб та трубопровідної арматури і інструментів).

Як вказувалось вище, принцип дії всіх сепараторів базується на рівновазі між масовими силами та опором, що реалізується одним з перелічених шляхів [16]:

- зменшення сили опору порівняно з силою гравітації за рахунок зменшення швидкості газу (гравітаційні сепаратори, відстійники);
- введення додаткових сил (скрубери Вентурі, циклони, електродегідратори і т. д.);
- збільшення масової сили за рахунок збільшення розміру краплин (пакети листових насадок і т. д.).

Принцип дії гравітаційного газосепаратору заснований на тому, що газовий потік потрапляє в осаджувальну камеру (ємність), поперечний переріз якої значно більший ніж вхідний канал. В даній камері зменшується швидкість потоку газу, а як наслідок і аеродинамічна сила, діюча на краплини, стаючи меншою ніж сила гравітації, що і викликає осадження дисперсної вологи. Гравітаційний спосіб очистки газу дозволяє відсепарувати краплини більші ніж 40 – 50 мкм, з ефективністю 40-50 % [17]. Необхідно відміти, що зазвичай даний спосіб використовується в поєднанні з інерційною сепарацією.

Типова конструкція гравітаційного газосепаратору вказана на рисунку 1.1 (а – з вертикальною формою корпусу, б – з горизонтальною формою корпусу). Як видно з рисунку 1.1 гравітаційні газосепаратори зазвичай складаються з 4 зон, а саме [17; 18; 19; 20; 21; 22]:

- вхідна зона, яка включає вхідний пристрій, що може використовуватись не тільки для направлення потоку, а й для попереднього грубого очищення початкової газорідинної суміші;
- зона гравітаційної сепарації, саме тут під дією сили тяжіння осаджуються краплини під дією сил гравітації;
- зона відстоювання, в якій знаходиться відсепарована рідина, що відводиться за допомогою дренажних каналів;

• тумановловлювач, що встановлюється в апараті для більш тонкого очищення, принцип дії яких заснований на дії сил інерції.

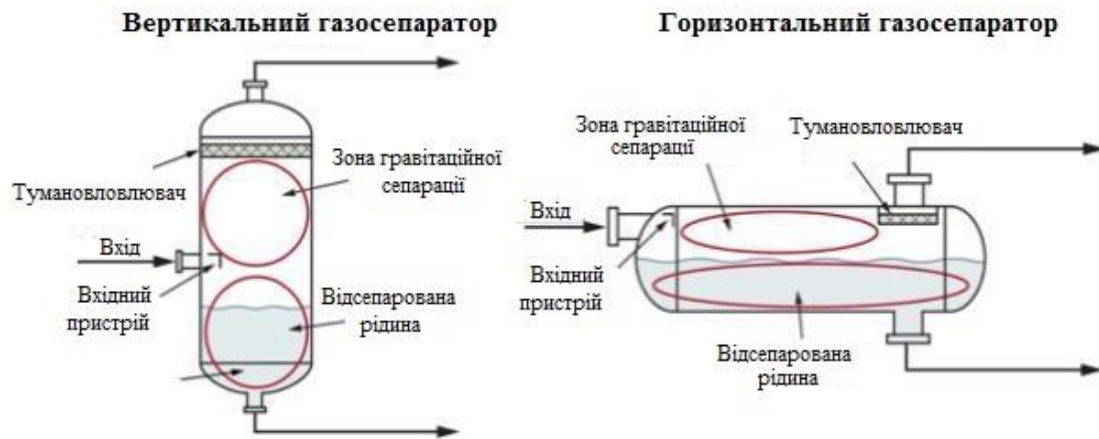


Рисунок 1.1 – Гравітаційний газосепаратор: а – вертикальна форма корпусу; б – горизонтальна форма корпусу

На сьогоднішній день з точки зору питомих енерговитрат та ефективності сепарації найбільш оптимальними являються сепараційні пристрої основною діючою силою в яких є сила інерції [18]. Інерційні сепараційні пристрої, засновані на тому що газорідинний потік потрапляє в сепараційний канал, що має скривлену форму. При цьому краплини рідини під дією сил інерції відхиляються від скривленої траєкторії руху та осаджуються на не рухомих статичних стінках, формуючи плівку за рахунок дії сил поверхневого натягу. Осаджена рідина стікає під дією сил гравітації, виходячи з сепараційного пристрою через дренажні канали. Інерційний спосіб очистки дозволяє вловлювати краплини розміром від 15-20 мкм з ефективністю 60-90% [17].

Типова конструкція інерційного газосепаратору відрізняється від вказаних на рисунку 1.1 наявністю інерційних сепараційних елементів замість зони відстоювання. Тумановловлювач теж являє собою зазвичай інерційний газосепаратор [17 - 22].

Інерційний сепараційний пристрій може являти собою лише одну пластину або диск установлений в апараті. Як показано на рисунку 1.2 при наближенні

газорідинного потоку до поверхні осадження можливо три випадки, а саме захват краплини за рахунок інерційного удару, прямої взаємодії та дифузії:

- інерційний удар – краплини розміром 1 – 10 мкм, мають достатню масу, щоб відхилитись від скривленої лінії струму основного (газового потоку) та зіткнутись з перешкодою. Удар являється важливим механізмом при розділенні у сітчастих набивках та за допомогою листових пластин.

- пряма взаємодія – у газовому потоці є краплини, що мають менші діаметри ніж указані вище 0.3 – 1 мкм, які не мають достатньої інерційності, щоб відхилитись від лінії току газу та потрапити на перешкоду, замість цього вони переносяться навколо неї. При цьому, якщо краплина опиниться на відстані меншій ніж половина діаметру від перешкоди вона доторкнеться до неї та там залишиться. У випадку якщо перешкода має пористу структуру то захвачуватись буде більша кількість краплин. Пряма взаємодія використовується інаприклад у фільтрах.

- дифузія – краплини менше ніж 0,3 мкм в діаметрі зазвичай демонструють Броунівський рух викликаний зіткненнями з молекулами газу. Даний рух приводить до потрапляння краплин на поверхню сепаруючого пристрою навіть при швидкості руху газу рівній нулю. Рушійною силою такої сепарації є процес дифузії (різниця концентрацій). Сприятливими умовами для дифузії являються низька швидкість газу та значна різниця концентрацій.

1.2 Особливості конструкції та робочі характеристики інерційних сепараційних пристроїв

Найбільш розповсюдженим типом сепараційних пристроїв заснованих на інерційному ударі являються пакети жалюзійних насадок [18]. Основні форми профілів жалюзійних насадок вказані на рисунку 1.2. Дані профілі використовуються в сепараційних пристроях таких світових виробників як Sulzer AG та Koch-Glitsch [23; 24].

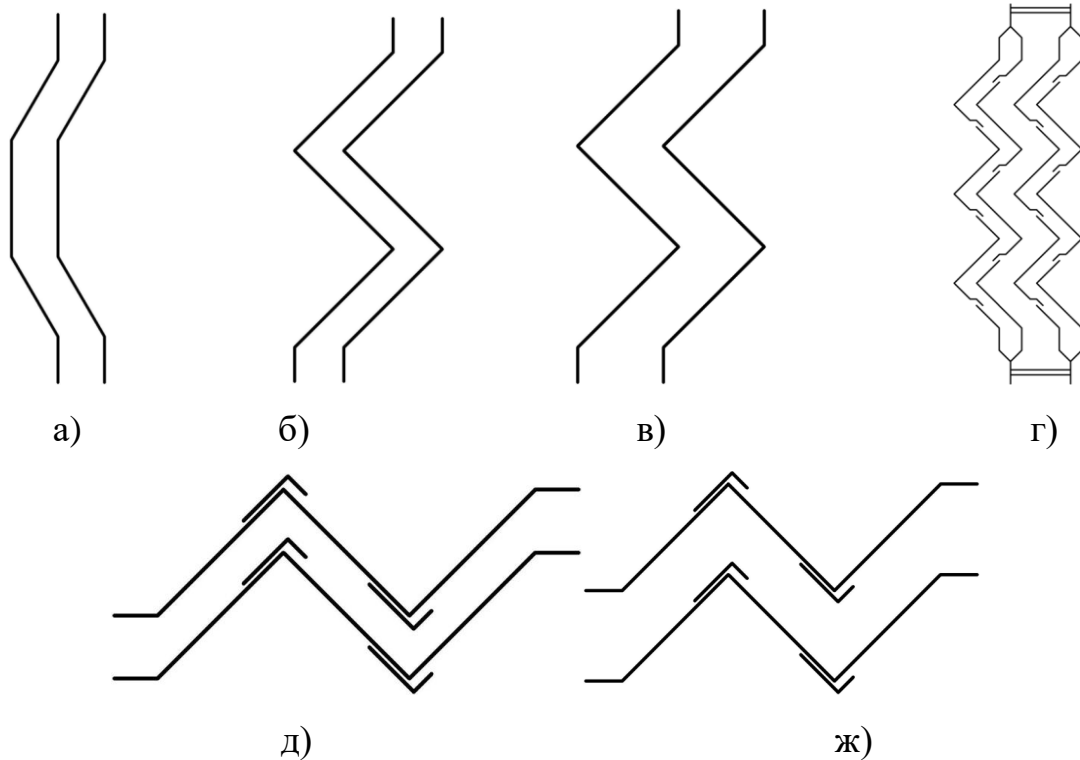


Рисунок 1.2 – Основні форми профілів жалюзійних сепараційних насадок:
 а) С- профіль, б) Z – профіль, в) С або Z – профіль зі збільшеною відстанню між пластинами, г) комплексний профіль з інтегрованими дренажними каналами, д) Z – профіль з дренажними карманами, ж) – профіль з дренажними карманами зі збільшеною відстанню між пластинами

Як видно з рисунку 1.2. жалюзійні сепараційні пристрої являють собою пакет гофрованих пластин різного профілю розташованих паралельно один до одного. Така конструкції призводить до того, що потік газу між цими пластинами являється ламінарним, поверхня пластин слугує поверхнею осадження. Відстань між пластинами знаходиться зазвичай в діапазоні від 5 до 75 мм, з довжиною в напрямку потоку 150 – 300 мм [25].

На рисунку 1.3 показано жалюзійні сепараційні пристрої, що встановлюється в горизонтальних (а) та вертикальних (б) сепараторах [26]. Коли газорідинний потік проходить через пластини краплі потраплять на їх поверхню та під діє сил гравітації стікають.

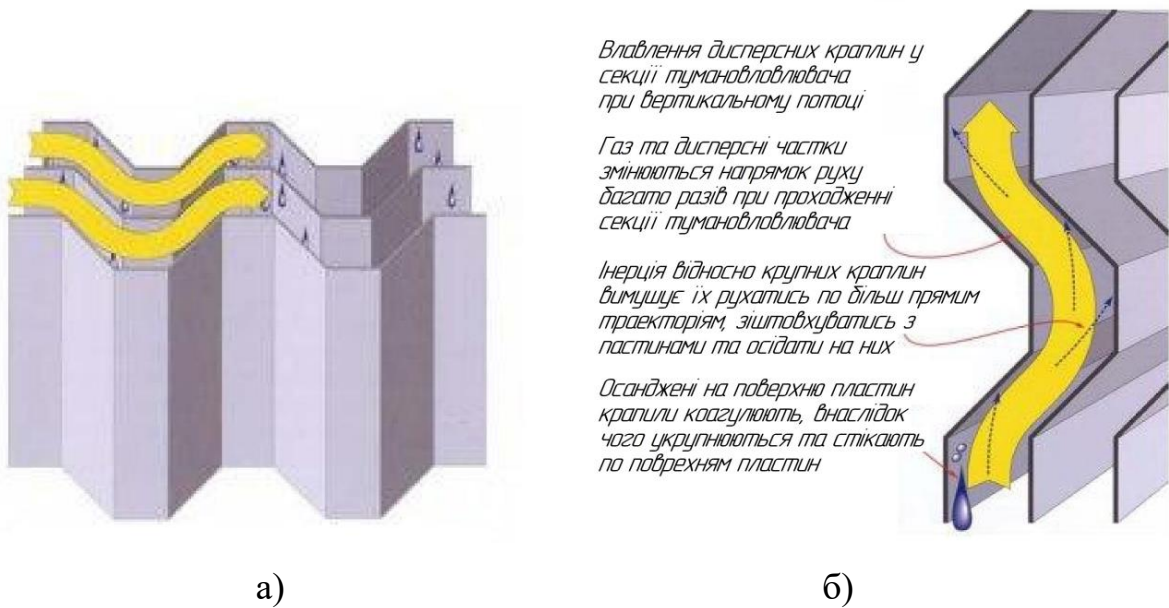


Рисунок 1.3 – Жалюзійні сепараційні пристрої, що встановлюється в горизонтальних (а) та вертикальних (б) сепараторах

При проектуванні жалюзійних сепараційних пристроїв для визначення площі поперечного перетину та визначення ефективності розділення першочергово визначається розрахункову швидкість газового потоку за формулою Саундерса-Брауна [27]:

$$V_{кр} = K_{SB} \sqrt{\frac{\rho_P - \rho_G}{\rho_G}}, \quad (1.1)$$

де ρ_P – густина рідини;

ρ_G – густина газу;

K_{SB} – коефіцієнт Саундерса-Брауна, що визначається експериментально для кожного типу пластин та навантаження по рідині. Залежить від таких експлуатаційних параметрів, як гідравлічний опір, в'язкість рідини та повневій натяг рідини. Для типових конструкцій та параметрів, його значення може коливатись в діапазоні 0,09 – 0,3 м/с.

Під розрахунковою швидкістю $V_{кр}$ в даному випадку розуміється її значення, що дає найкращу продуктивність з точки зору захвату краплин та запобігання повторного бризковинесення. Якщо реальна швидкість менше

розрахункової то краплини не мають достатнього імпульсу для потрапляння на стінки сепараційного каналу, а при перевищенні швидкості газорідинний потік має достатню кінетичну енергію для зриву плівки вже вловленої рідини [28]. Для типових конструкцій коливання швидкостей допускається в діапазоні $\pm 25\%$ від розрахункової [29]. Підсумовуючи вищесказане коефіцієнт Саундерса-Брауна можна розглядати як здатність сепараційного пристрою відводити відсепаровану рідину та запобігати повторному винесенню бризок. Необхідно відмітити, що при будь якій зміні конструкції сепаруючих елементів коефіцієнт Саундерса-Брауна повинен бути перерахований. Наступним етапом являється визначення площі поперечного перетину сепараційного елемента поділивши витрату на оптимальну швидкість.

Ще одним важливим параметром будь якого сепараційного пристрою являється гідравлічний опір. Даний параметр для жалюзійних сепараційних елементів визначається за відомою формулою для визначення гідравлічного опору при раптових звуженнях та розширеннях каналу по якому проходить потік [16; 29]:

$$\Delta p = \zeta \frac{V_{кр}^2 \cdot \rho_{г}}{2 \cdot F_a^2} \cdot \frac{L}{m} \quad (1.2)$$

де ζ – коефіцієнт опору жалюзійного сепараційного пристрою, що визначається за допомогою проведення експерименту;

L – довжина жалюзійної насадки, м;

F_a – коефіцієнт живого перетину перерізу насадки, визначається, як відношення кроку між пластинами та сумою кроку та її товщини;

m – гідравлічний радіус насадки жалюзійного сепараційного елемента.

Як видно з вищесказаного конструктивний розрахунок жалюзійних сепараційних елементів зазвичай проводиться за допомогою експериментального коефіцієнту Саундерса-Брауна, а така важлива робоча характеристика як гідравлічний опір розраховується з використанням дослідно отриманого коефіцієнту гідравлічного опору такий підхід являється

рентабельним тільки у випадку серійного виготовлення сепараційних пристроїв. Необхідно відмітити, що у зв'язку з високим розвитком комп'ютерної техніки набуває розповсюдження проведення чисельного експерименту замість фізичного з використанням програмних комплексів, що реалізують методи скінченних об'ємів та елементів.

1.3 Переваги та недоліки інерційних жалюзійних сепараційних пристроїв

В процесі проведення літературного огляду виділені наступні основні переваги жалюзійних інерційних сепараційних пристроїв [16; 17; 18; 19; 20; 21; 22; 23; 24; 25; 26; 27; 28; 29]:

- порівняно з інерційними сепараційними елементами інших типів низький гідравлічний опір;
- стійкі до забруднень потоками з вмістом твердих частинок;
- порівняно з відцентровими сепараційними елементами легкі у виготовленні;
- порівняно з іншими типами інерційних сепараційних елементів висока продуктивність.

При цьому поряд з вище переліченими перевагами можна виділити ряд недоліків. Однією з найрозповсюдженіших проблем сепараційних пристроїв, робота яких заснована на силі інерції, являється зрив вже вловленої плівки рідини з осаджувальних поверхонь за рахунок її контакту з турбулентним газовим потоком. Саме швидкість та тиск при яких він відбувається являються критичними, як вище вказувалась дана швидкість для інерційних сепараційних елементів визначається за формулою Саундерса-Брауна, яка носить емпіричний характер. При зростанні швидкості вхідного газорідного потоку збільшення ефективності сепарації відбувається до певного критичного значення швидкості, після чого зривається плівка вловленої рідини через виникнення на її поверхні хвиль та зміни ламінарного режиму течії на турбулентний [30; 31; 32]. Для вирішення даної проблеми є ряд традиційних шляхів [33]:

- збільшення вільного перетину, а отже і зниження швидкості газу;
- створення насадкових елементів з регулярним відведенням рідини;
- зниження масового відношення рідини та газу за допомогою пристроїв попереднього відбору.

При цьому застосовуючи дані методи необхідно пам'ятати, що критична швидкість газового потоку при якій відбувається бризковинесення суттєво не змінюється, а отже не відбувається суттєве розширення діапазону ефективної роботи сепараційних пристроїв. Так наприклад, збільшення вільного перетину, а як наслідок і зниження швидкості вхідного газорідинного потоку призводить до зменшення продуктивності.

Звичайно, що встановлення додаткових пристроїв відбору рідини підвищує вихідну вартість сепараційного обладнання. При створенні каналів з регулярним відведенням рідини необхідно враховувати, що на сьогоднішній день для розрахунку параметрів потоку стікаючої по осаджувальним поверхням плівки існує багато методик, більшість з яких носить емпіричний характер, аналітичні методики через введені спрощення та припущення також працюють для обмеженої кількості конструкцій. Як вказувалось вище широкого розповсюдження набули чисельні методики для обчислення параметрів двофазних потоків, в тому числі і стікаючих плівок [34; 35; 36; 37].

Для розширення діапазону ефективної роботи інерційних сепараційних пристроїв був запропонований спосіб динамічної сепарації [38]. Особливістю даного способу є направлення газорідинного потоку на пружні елементи, консольно закріплені у сепараційному каналі, що призводить до викривлення ліній току внаслідок чого під дією сил інерції відбувається сепарація дисперсної фази. При цьому під дією швидкісного напору (динамічного тиску) пружні елементи змінюють свою конфігурацію, що в свою чергу викликає зміну параметрів потоку, а отже мають місце гідроаеропружні явища. Такий підхід дозволяє автоматично регулювати значення динамічного тиску та площі поперечного перетину, а саме:

- у випадку зростання швидкості газорідинного потоку, зростає динамічний тиск, а як наслідок пружні елементи динамічного сепараційного пристрою

змінюють своє положення, а отже і збільшується площа поперечного перетину каналу утвореного пластинами, гідравлічний опір зменшується;

- у випадку зниження швидкості газорідного потоку, динамічний тиск зменшується, пружні елементи динамічного сепараційного пристрою змінюють своє положення, а отже і зменшується площа поперечного перетину каналу утвореного пластини, гідравлічний опір збільшується.

Серед гідроаеропружних явищ, що виникають при роботі динамічних сепараційних пристроїв найбільший інтерес представляють наступні два, що супроводжуються коливаннями пружних відбійних елементів, а саме флатер та бафтинг.

На сьогоднішній день існує велика кількість досліджень впливу коливань на газорідний потік, але засадничими були роботи Фукса Н. А., Меднікова Е. П. та ін. В роботах [39; 40] вони вказали, що під час дії на газорідний потік акустичних коливань певної частоти (зворотно-поступального руху пружного середовища) відбувається укрупнення краплин (їх коагуляція), а отже і інтенсифікація процесу розділення газорідної суміші. При достатній частоті та інтенсивності акустичних коливань краплинна рідина коагулює з достатньо високою швидкістю (за декілька хвилин, або секунд) [41]. Необхідно відмітити, що може спостерігатись і зворотній ефект, а саме диспергація краплинної рідини, що знаходиться в потоці [42].

Підсумовуючи вищесказане було висунута гіпотеза, що механічні коливання пружних відбійних елементів динамічних сепараційних пристроїв можуть викликати коагуляцію краплин, а отже і інтенсифікувати процес розділення, тим самим додатково розширюючи діапазон ефективної роботи сепараційних пристроїв та багатофазних розділювачів в цілому.

1.4 Акустична коагуляція дисперсних часток

Розглянемо більш детально ефекти, що обумовлюють акустичну коагуляцію [39-47]:

- ортокінетичний механізм взаємодії краплин відноситься до коагуляції за рахунок прямого зіткнення між краплинами, що рухаються з різними швидкостями під дією акустичних коливань. Різні швидкості їх руху обумовлені їх різним розміром, а отже і різною інерційністю. Дана модель вперше була розроблена Медніковим Е.П. [39]. Необхідно відмітити, що даний механізм взаємодії не пояснює зіткнення краплин, що мають практично однаковий розмір, оскільки їх інерційні властивості є практично рівними.

- гідродинамічний механізм взаємодії краплин пояснює монодисперсну коагуляцію у результаті коливання біля положення рівноваги двох частинок однакового розміру в звуковому полі. Даний ефект був вперше виявлений Гофманом Т.Л. та Коопманом Д.Г. [47].

Як вказувалось вище, в роботі Меднікова Е.П. основним механізмом була ортокінетична взаємодія краплин в якій основна увага приділялась розрахунку ядра акустичної коагуляції, що являє собою об'ємну швидкість ($\text{м}^3/\text{с}$) за якої велика краплина може збирати інші. Гофман Т.Л. обчислив розширене ядро акустичної коагуляції на основі явища акустичного сліду, використовуючи припущення, що ефективність зіткнень рівна одиниці. Даний параметр являє собою долю площі поперечного перетину необхідної меншим краплинам для злиття з більшою. В роботі [48] відмічалось, що гіпотеза про ефективність злиття краплин рівній одиниці не точна, оскільки при русі дрібних краплин поблизу краплини великого розміру призводить до того, що їх лінії току набувають скривленої форми. При цьому у всіх вищеперерахованих роботах не враховувалось сила тяжіння, що для частинок великого розміру при невеликих швидкостях руху дуже важлива, частинка мала форму кулі та не деформувалась.

Суттєвий внесок в теорію акустичної коагуляції був зроблений Донгом Ш. [49]. Він ввів термін «ефективної довжини коагуляції», що являє собою максимальну відстань між частинками для можливого зіткнення в напрямку звукової хвилі. Окремо розглядалось зіткнення краплин, що мають різні розміри (ортокінетичний механізм) та приблизно однакові (гідродинамічний механізм).

Для краплин різних розмірів при визначенні ефективної довжини коагуляції приймалась до уваги сила опору та ефективність зіткнення краплин, що являє

собою відношення краплин що зіткнулися до краплин які могли б зіткнутись, якщо б лінії току не були б викривлені. При цьому приймалось, що вертикальна складова швидкості краплин (швидкість осадження) порівняно мала зі швидкістю їх вібрації. На рисунку 1.4 а вказана схема зіткнення малих краплин (d_2) з більш крупною (d_1).

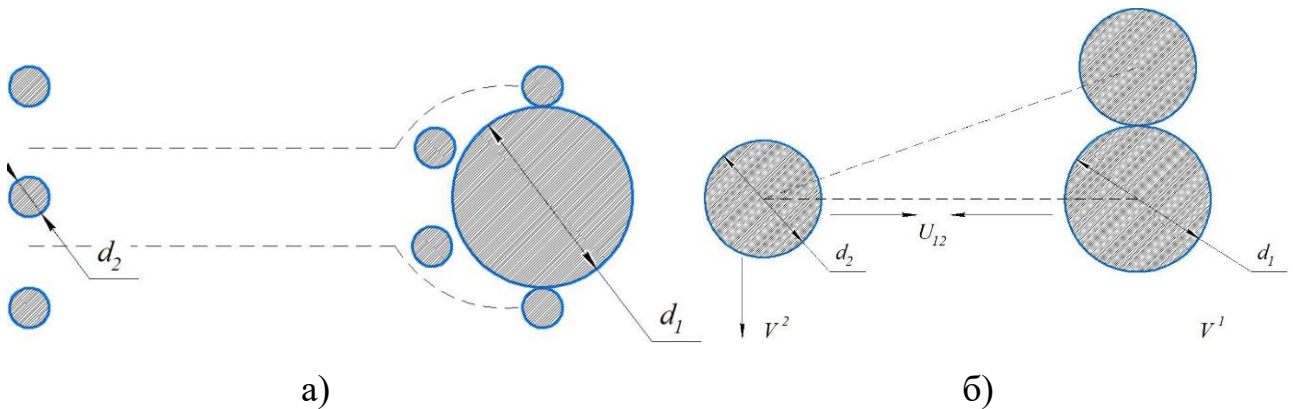


Рисунок 1.4 – Схема зіткнення краплин: а) різного розміру; б) приблизно однакового розміру

Важливим параметром для визначення ефективної довжини коагуляції, являється амплітуда відносної коливальної швидкості між двома частинками. Вираз для визначення якої був отриманий Брандтом О., Фройндом Х. та Хайдеманом Е. [50]:

$$U_{12} = \mu_{12} U_2, \quad (1.3)$$

де μ_{12} – відношене захоплення між двома частинками;

U_2 – амплітуда швидкості газу.

Відношене захоплення між двома частинками визначається за формулою вказаною нижче:

$$\mu_{12} = \frac{\omega(\tau_1 - \tau_2)}{\sqrt{(1 + (\omega\tau_1)^2)(1 + (\omega\tau_2)^2)}}, \quad (1.4)$$

де ω – кутова частота, що визначається як $\omega = 2\pi f$ (f – частота звуку);

τ - час релаксації для частинки великого розміру (індекс 1) та маленького (індекс 2):

$$\tau = \frac{1}{18} \frac{\rho_p}{\eta} d^2, \quad (1.5)$$

де ρ_p – густина краплини;

η – динамічна в'язкість газу.

При врахуванні відхилення ліній току більш дрібних та їх осадження на більші, у вираженні через число Стокса (St) ефективність зіткнення краплин визначається нижче наведеним співвідношенням

Ефективність зіткнення краплин, що при врахуванні відхилення ліній току більш дрібних та їх осадження на більші, у вираженні через число Стокса (St) визначається нижче наведеним співвідношенням:

$$\varepsilon = \left(\frac{St}{St+A} \right)^B, \quad (1.6)$$

де A та B сталі, їх значення в роботі [51] наступні: $A = 0,65$, $B=3,7$.

$$St = \frac{\rho \mu_{12} U_c d_2^2}{18 \eta d_1}. \quad (1.7)$$

Отже, для ортокінетичної коагуляції ефективна довжина визначається за формулою [48]:

$$L_{eff}^{ort} = \varepsilon L. \quad (1.8)$$

Коагуляція краплин приблизно однакових розмірів відбувається за рахунок існування взаємодії не тільки між частинкою та газом, а й безпосередньо між частинками. В [48] розглядались коагуляція під дією двох сил:

- сила Б'єркнеса;

• сили Кьонінга в стоксовому потоці – теорія заснована на гідродинамічному принципі Бернуллі для довільного розвішування частинок. Коли частинки орієнтовані у напрямку звукового поля вони відштовхуються одна від одної, а коли орієнтовані перпендикулярно звуковому полю вони притягуються. Сила Кьонінга обернено пропорційна четвертій степені сили розділення частинок.

• гідродинамічні сили Озеєна – теорія заснована на тому, що поле швидкостей навколо частинки, що рухається характеризується сильною асиметрією: швидкість газу зменшується, як $1/r^2$ перед сферою та як $1/r$ за нею, де r – відстань між частинками. Отже, якщо сфери розташовані на достатній відстані одна від одної то кожна викликає зміну поля швидкостей навколо іншої, а отже зменшення опору менш значне для «ведучої» частинки ніж для «хвостової». Саме цим і пояснюється явище акустичного сліду.

Ефективна довжина коагуляції в [48], з урахуванням ефекту акустичного сліду, визначається як відстань між частинка, що приводить до їх об'єднання за певний час при русі у вертикальному напрямку:

$$L_{eff}^{awe} = \sqrt{\frac{3}{2} \frac{U_z}{\pi} (d_1 l_1 + d_2 l_2) \frac{9\eta}{C_c \rho_p g (d_1 - d_2)}}, \quad (1.9)$$

де C_c – коефіцієнт ковзання Канінгема для частинок діаметром 0,1 – 10 мкм, що залежить від їх діаметру та середньої довжини вільного пробігу газу (λ_2), визначається за формулою:

$$C_c = 1 + \frac{2,52\lambda_2}{d}, \quad (1.10)$$

l – коефіцієнт тертя, що визначається окремо для кожної краплини в залежності від постійної (h) та коефіцієнту ковзання частинок в стоксовому режимі (n). Залежності для визначення вище перелічених параметрів вказані нижче:

$$l = \frac{n}{\sqrt{1+2hm^2+h^2n^4}}; h = \frac{9U_z \rho_c}{\pi\omega d \rho_p}; n = \frac{\omega\tau}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}}. \quad (1.11)$$

Використовуючи дані співвідношення в роботі [48] проводився аналіз важливості швидкості осадження до ефекту акустичного сліду. Для густини рідини 2700 кг/м^3 та їх діаметру $0,1 - 10 \text{ мкм}$ було визначено, що швидкість осадження та швидкість злиття частинок мають приблизно однаковий порядок.

Також в роботі проводився аналіз впливу частоти звуку, рівня звукового тиску та розміру частинок на значення ефективної довжини коагуляції. Було визначено, що при невеликих значеннях частоти коливань ортокінетичне зіткнення домінує, в той час як ефект акустичного сліду більш яскраво виражений на високих частотах. Оптимальна частота для зіткнень краплин різного розміру визначається зі співвідношення розмірів частинок та акустичного тиску. Для коагуляції більш дрібних частинок необхідна більш висока частота звуку. Ортокінетичний механізм коагуляції добре працює лише при помірних співвідношеннях між розмірами частинок, та неефективний для субмікронних розмірів.

Як вказувалось в попередньому розділі, при роботі динамічних сепараційних пристроїв, за певних швидкостей входу газорідинного потоку, можуть виникати механічні коливання пружних відбійних елементів. Коливання пружного тіла в газорідинному середовищі викликають по чергове стиснення та розрідження газу, що знаходиться у безпосередній близькості з вібруючим пружним тілом, а як наслідок і зворотно-поступальний рух сусідніх дисперсних частинок. Цей рух викликає в шарі газу знакозмінні зміни тиску, що приводить до коливального зміщення частинок у наступному шарі газу, таким чином коливання передаються далі. Вплив даних коливань буде аналогічним до впливу акустичних, оскільки обидва викликають коливання газового потоку, що в свою чергу впливає на дисперсну рідину. Враховуючи, що механічні коливання будуть мати не високі частоти (набагато нижчі за ультразвук) то домінуючим механізмом буде ортокінетичний. Необхідно відмітити, що динамічний сепараційний пристрій, на його режимах роботи при яких відсутні коливання пружних відбійних елементів, планується застосовувати для видалення краплин з діаметрами $1 - 10 \text{ мкм}$, а отже не ефективність ортокінетичного механізму для

субмікронних розмірів частинок та непомірних співвідношень між їх розмірами не важлива. Необхідно відміти, що вищевказані співвідношення [48] гарно корелюють з експериментом, а отже можуть бути використані при проектуванні динамічних сепараційних пристроїв.

1.5 Математичне моделювання гідроаеропружної взаємодії газорідного потоку та пружних тіл

Як вказувалось вище, при роботі динамічних сепараційних пристроїв пружні елементи взаємодіють з потоком змінюючи його характеристики, в результаті чого виникають деформації елементів. Така взаємодія може бути статичною (враховуються сили пружності та аеродинамічні сили) та динамічною (крім аеродинамічної сили та сили пружності враховується сила інерції). Оскільки постановка та характер досліджуваних проблем, які відносяться до механіки деформівного тіла, з однієї сторони, та рідини і газу з іншої мають різко виражені особливості, розв'язання задачі гідроаеропружності, що включає «зв'язані» рівняння різних типів, складає певні труднощі [52].

Взагалі деформація пружних тіл, що обтікаються потоком рідини або газу, на протязі довгого часу викликає інтерес та є об'єктом досліджень. Особливо гостро дані проблеми постають перед авіаційною промисловістю, а саме дослідження таких явищ, як флатер, бафтинг, дивергенція та реверс елеронів [53; 54; 55; 56; 57; 58].

Розглянемо більш детально статичну не стійкість на прикладі літка:

- дивергенція являє собою закручування хвоста або крила літака під дією аеродинамічної (підйомної) сили, що направлена нормальньо до повітряного потоку (рисунок 1.5 а). Крило літака або хвіст знаходиться в повітряному потоці під певним кутом атаки (α) за рахунок чого створюється підйомна сила (Y_a), під дією якої крило або хвіст, що не являються абсолютно жорсткими тілами закручуються (M_a). У випадку коли центр тиску знаходиться перед центром жорсткості, то при закручуванні збільшується кут атаки, що в свою чергу призводить до збільшення підйомної сили, а отже і закручувального моменту.

Даний процес буде відбуватись до тих пір поки закручувальний момент не врівноважиться пружним. Але можливий випадок при якому приріст кута атаки, а як наслідок підйомної сили не врівноважується пружним моментом, швидкість при якій це відбувається називається критичною швидкістю дивергенції.

Необхідно відмітити, що на сьогоднішній день явище дивергенції практично не являється небезпечним для літаків, оскільки критична швидкість дивергенції набагато нижче критичної швидкості флатера.

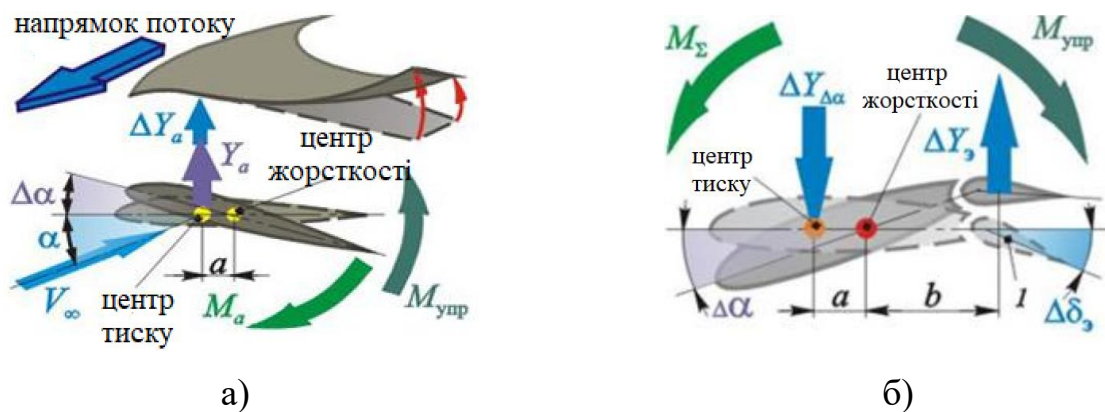


Рисунок 1.5 – Дивергенція крила літака (а), реверс елеронів (б)

- реверс елеронів являє собою закручування несучої рульової поверхні, при цьому відбувається втрата її ефективності (реакція літака на її відхилення). При відхиленні елерона на деякий кут виникає додаткова підйомна сила, що буде закручувати його в протилежну сторону відносно центра жорсткості, що приведе до зменшення кута атаки, а як наслідок і зменшення підйомної сили, що теж буде закручувати рульову поверхню (рисунок 1.5 б). Результуюча зміна підйомної сили буде закручувати елерон до тих пір поки закручування не буде врівноважене пружним моментом. При збільшенні швидкості польоту сумарна зміна підйомної сили буде практично рівним нулю.

Розглянемо два найважливіші явища динамічної нестійкості, на прикладі крил літака та хвостового оперення:

- флатер являє собою не затухаючі самозбудні коливання, що виникають за певної швидкості набігаючого потоку (критична швидкість флатеру), для виникнення та розвитку яких не має потреби в періодичній збурюючій силі.

Флатер (рисунок 1.6) може виникнути під дією будь якої сили (відхилення елерону, порив вітру), що викликає відхилення крила за рахунок згину з початкового (нейтрального) положення 1 (з площини Oxz), наприклад, вгору. Під дією пружних сил крило, намагаючись повернутися в початкове положення, рухається вниз (2) не плоскопаралельно, а з закручуванням, оскільки, центр тиску (в якому прикладена підйомна сила) та центр мас (в якому прикладені масові та інерційні сили) не співпадають з центром жорсткості (відносно якого відносно якого відбувається закручування). Пройшовши по інерції нейтральне положення крило опускається вниз (3, 4) після чого процес відбувається знову зі зміною знаків всіх моментів та сил. Фази даного руху та відповідні згинально-крутильні деформації (Δy – згинальні та $\Delta \varphi$ - крутильні) за один цикл коливань відносно початкового положення (площини Oxz) проілюстровані на рисунку 1.6.

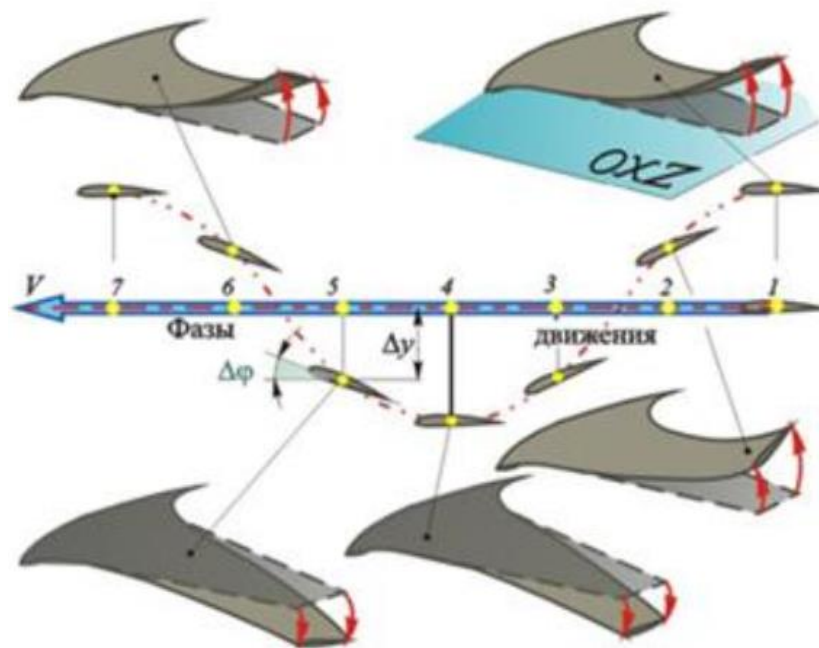


Рисунок 1.6 – Фази згинально-крутильних деформацій при виникненні флатеру крила літака

В залежності від можливих переміщень конструкції (ступенів свободи) пружних частин літака розрізняють різні види флатеру: згинно-крутильний (фази якого вказано на рисунку 1.6), згинно-елеронний, крутильно-елеронний флатер

крила, згинно-рульовий флатер горизонтального оперення (характеризується згином фюзеляжу та симетричним відхиленням рулів висоти).

•бафтинг являє собою вібрацію пружного тіла під дією періодичної аеродинамічної сили. У літака найчастіше схильне до бафтингу хвостове оперення. Дане явище виникає за рахунок того що не збурений потік обтікаючи крила літака, різні елементи фюзеляжу, випущене шасі і т. д., завихрюється зривами і періодично потрапляє на хвостове оперення. Результат такої взаємодії між потоком та пружним тілом проявляється у вигляді «розгойдування», а саме збільшення амплітуди коливань оперення. Необхідно відмітити, що при дії циклічних поривів турбулентної атмосфери виникають та підтримуються коливання за рахунок зовнішньої періодичної збурюючої сили, а отже являються вимушеними.

Проводячи аналогію між взаємодією потоку з крилом літака та з пружними елементами динамічного сепараційного пристрою можна зробити висновок, що потік буде викликати дивергенцію та флатер. При цьому розглядаючи бафтинг необхідно враховувати розташування динамічних сепараційних елементів в корпусі сепаратору. Пружні елементи планується встановлювати послідовно у паралельно розміщених сепараційних каналах як вказано на рисунку 1.7.

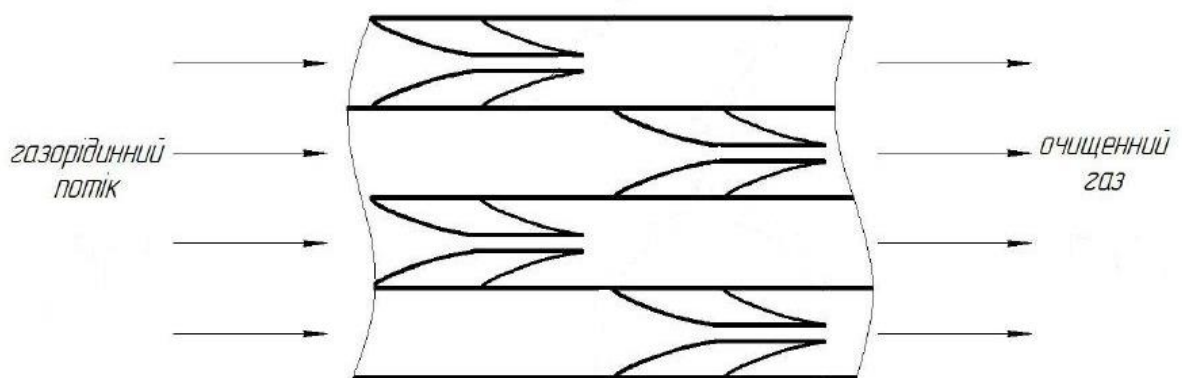


Рисунок 1.7 – Плановане розташування динамічних сепараційних пристроїв [59] в корпусі сепараційного апарату

Враховуючи дане розташування в залежності від того в якому ряду встановлюється сепараційний елемент критична швидкість бафтингу може

змінюватись, оскільки потік зриваючись з сепараційних елементів першого ряду потрапляючи на пружні елементи другого ряду призводить до зменшення критичної швидкості бафтингу порівняно з попереднім рядом.

Зважаючи на велику кількість галузей в яких необхідно розраховувати вплив гідроаеропружних явищ на елементи конструкції, їх математичне моделювання являється актуальною проблемою. Оскільки, при їх математичному моделюванні постає необхідність вирішувати систему рівнянь які дозволяють описати деформацію пружного тіла, його вплив на потік і навпаки. Зокрема, труднощі пов'язані з тим, що гідродинамічні сили, що діють на поверхню пружного тіла мають сильну залежність від прискорення поверхні, що деформується [60]. А значить, гідродинамічні навантаження не можуть розглядатись як зовнішні, попередньо розраховані навантаження, замість цього вони повинні визначатись разом з деформаціями тіла. Якщо пружні деформації відносно малі, та тіло не перетинає вільну від рідини поверхню, то ми можемо успішно використовувати декілька методів: метод нормальних форм (згідно з яким необхідно вираховувати матриці так званої маси) або гранично-інтегральні рівняння з нелокальним інерційним членом [61]. При цьому дослідження гідроаеропружних явищ ускладняється наявністю вільної від рідини поверхні та відносно великими деформаціями, саме такі виникають при роботі динамічних сепараційних елементів. Необхідно відмітити, що не зважаючи на високий розвиток комп'ютерної техніки та програмного забезпечення, що дозволяє вирішувати зв'язані задачі гідроаеропружності, для конструкцій схильних до виникнення гідроаеропружних явищ необхідно розробляти інженерні методики розрахунку.

Основоположні дослідження направлені на вирішення вищевказаних проблем були проведені Пензіном, Озкером та Дейлі, Бісплінгхофф направлені на дослідження коливань тіл циліндричної форми, що являється важливим для проектування теплообмінних апаратів та глибоководних нафтових трубопроводів [62; 63]. В роботі [62] розглядаються криволінійні глибоководні нафтові труби за допомогою представлення їх як балочних елементів та з використанням методу скінченних елементів в полярних координатах. В роботі

було визначено функції для визначення амплітуди коливань, та критичні швидкості потоку при яких вони виникають для різних геометрій та властивостей рідини. Робота [63] являється розвитком вищевказаних досліджень щодо кожухотрубних теплообмінників, в ній описується взаємодія потоку та труб, а саме розглядаються методика знаходження власних частот та форм коливань, реальної функції прогину, якщо коливання прямої труби викликані внутрішнім потоком, як стаціонарним так і змінним в часі; якщо коливання криволінійної труби викликано потоком, що плавно змінюється; коливання пучка труб викликане потоком, який направлений поперечно до осі труб; коливання виливані турбулентним потоком.

Роботи Гонгуера, Кривцова та Хескеседа були основоположними при дослідженні гідроаеропружної взаємодії між потоком та лопатями турбіни. На сьогоднішній день, більшість робіт направлені на дослідження гідроаеропружних явищ, що виникають під час роботи вітряків встановлених в морі [64; 65; 66; 67; 68; 69]. В [64] описується створення програмного забезпечення для їх розрахунку за результатами отриманими при роботі морського вітряку на протязі двох років. Для створення програми використовувались нейронні мережі. В роботах [65; 66; 67; 68; 69] описується створення програми в середовищі MatLab для розрахунку вітряків використовуючи метод скінченних елементів та данні метеоцентрів про швидкість вітру. В роботі [69] проводиться порівняння результатів отриманих за допомогою використання спрощених моделей розрахунку лопатей вітряків, при цьому було відзначено, що хоча вони добре збігаються з результатами експериментів про те не дають розуміння про структуру потоку навколо них та розподілення внутрішніх навантажень. Для отримання таких даних доцільним являється використання методів скінченних об'ємів в поєднанні з методом скінченних елементів, що являється необхідними для оптимізації форми лопатей.

Ще одним сучасним напрямком досліджень гідроаеропружних явищ являється дослідження впливу хвильового навантаження на корпус надвеликих контейнеровозів, жорсткість на кручення корпусу яких знижена через наявність великого трюму. На їх ранній стадії проектування використовується балочна

модель, а для більш точного розгляду використовується метод скінченних елементів [70; 71; 72; 73]. Підсумовуючи вище вказане для математичного моделювання гідроаеропружної взаємодії потоку та пружного тіла будь-якої конфігурації, на сьогоднішній день, найчастіше використовується метод скінченних елементів з введенням аеродинамічних сил. При цьому для описання статичної нестійкості рівняння руху в загальній постановці мають вигляд:

$$M\ddot{x} + K = 0, \quad (1.12)$$

де M та K – матриці маси та жорсткості відповідно, розмірністю $N \times N$;

x – вектор деформації конструкції, розмірністю $N \times 1$.

Для описання не стаціонарних явищ в рівняння руху додається не стаціонарна складова що відповідає за демпфування \dot{x} . Для визначення невідомих параметрів моделі використовується ідентифікація її параметрів [74].

Як вказувалось вище для кращого розуміння структури потоку навколо пружного тіла, що взаємодіє з потоком рідини та отримання розподілу навантажень в ньому доцільним являється використання програмних комплексів, що дозволяють вирішувати пов'язані задачі гідроаеропружності за допомогою методів скінченних елементів та об'ємів. Одним з таких програмних комплексів являється ANSYS Workbench [75; 76; 77]. Для розрахунку гідродинаміки в якому можуть використовуватись модулі Fluent та CFX, що базуються на методі скінченних об'ємів та елементів відповідно; щодо напруженого стану конструкції – модуль Static або Transient Structural; їх пов'язує – System Coupling. Даний метод має назву FSI (Fluid Structural Interaction). В залежності від характеру взаємодії потоку та пружного тіла розрізняють [78]:

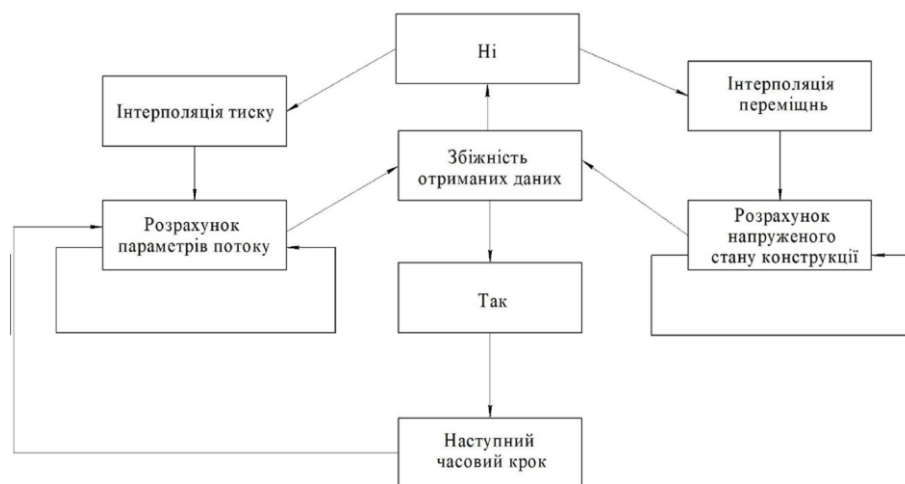
- One-Way FSI (односторонній зв'язок) – описує передачу навантаження від рідини до конструкції (пружного тіла) без врахування її деформації на потік. На рисунку 1.8 а пояснюється One-Way FSI. Першим етапом є розрахунок руху рідини до збіжності основних рівнянь. Потім отримані значення сили інтерполюються відносно скінчено елементної розрахункової сітки конструкції

та проводиться її розрахунок. Дана процедура повторюється до отримання розв'язку за весь заданий проміжок часу.

•Two-Way FSI (двобічний зв'язок) – використовується у випадку коли не можна знехтувати впливом деформації пружного тіла на потік. На рисунку 1.8 б пояснюється Two-Way FSI, у випадку якщо не враховується попередньо zdeформований стан конструкції. Першим етапом являється розрахунок параметрів потоку за один часовий крок до отримання збіжності основних рівнянь. Після чого отримані значення тиску інтерполюються відносно скінчено елементної розрахункової сітки конструкції та передаються для розрахунку її напружено-деформівного стану. Після отримання розв'язку основних рівнянь за один часовий крок результат передається для розрахунку параметрів потоку для нових граничних умов після чого отриманий результат передається в System Coupling де проводиться оцінка отриманого результату саме зв'язаної задачі. Якщо отримані сили та переміщення залишаються не змінними до певної заданої межі то проводиться розрахунок наступного часового кроку.



а)



б)

Рисунок 1.8 – Алгоритми One-Way FSI (а) та Two-Way FSI (б)

Розрахунок будь-якої задачі за допомогою методу FSI має ряд особливостей, а саме побудова скінчено елементної розрахункової сітки вузли якої будуть співпадати з скінчено об'ємною, при цьому остання повинна бути задовільної якості для забезпечення перебудови границь [78; 79; 80; 81; 82; 83].

Розглянемо два модулі доступні в ANSYS Workbench для розрахунку параметрів потоку, а саме Fluent та CFX [84]. Головною різницею між ними являється те, що перший базується на методі скінченних об'ємів (параметри потоку розраховуються в центрах розрахункових комірок), а другий на методі скінченних елементів (параметри потоку розраховуються у вузлах комірок). Для моделювання багатофазних потоків Fluent доступні декілька підходів [85; 86; 87]:

- Ейлера-Лагранжа – частинки розглядаються як окремі та можуть бути твердими, рідкими та бульбашками. Рівняння збереження вирішуються для безперервної фази, а кожна частинка відслідковується за рахунок вирішення рівнянь руху для кожної:

$$\frac{\partial \alpha_p \rho_p}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p u_p) = S_{max}, \quad (1.13)$$

$$\frac{\partial \alpha_p \rho_p}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p u_p u_p) = \alpha_p \nabla p - \alpha_p \nabla \cdot \tau_p - S_\eta + \alpha_p \rho_p g = 0, \quad (1.14)$$

$$\frac{\partial u_\eta}{\partial t} = \sum F. \quad (1.15)$$

де α – об'ємна доля;

S_{max} – джерело маси, що присутнє у випадку фазових переходів;

S_η – інерційний член, що присутній у випадку впливу на параметри потоку з боку частинок на неперервну фазу;

F – сила.

Індекси η та p вказують на частинки та неперервну фазу відповідно.

- Ейлер-Ейлер – в даному випадку обидві фази розглядаються як неперервні. Даний метод застосовується в двох випадках, а саме: якщо обидві фази являються неперервними; якщо немає необхідності у визначенні траєкторії кожної частинки окремо. В другому випадку рівняння для дисперсної фази

осереднюються в кожній розрахунковій комірці для отримання середнього значення поля. Фази розглядаються окремо, а зв'язок між ними досягається за рахунок коефіцієнту міжфазного обміну. Основні рівняння що вирішуються наведені нижче:

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k U_k) = 0, \quad (1.16)$$

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k U_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k U_k u_k) = -\alpha_k \nabla P - \alpha_k \nabla \cdot \tau_k + S_k + \alpha_k \rho_k g_k = 0, \quad (1.17)$$

$$\frac{\partial \alpha_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k U_k) = 0. \quad (1.18)$$

де U – уявне поле швидкостей;

P – уявний тиск, яким «обмінюються» фази.

•VOF (Volume of Fluid) – метод об'єму рідини. VOF являється окремим випадком моделі Ейлера-Ейлера, але на відміну від неї фази не можуть бути взаємно проникними. Даний метод використовує функцію індикації фази, іноді вона називається функцією кольору, що б відстежувати границю між двома та більше фазами. Функція може мати два значення 1 (коли контрольний об'єм повністю заповнений фазою) та 0 (коли комірка не заповнена фазою). Враховуючи, що рівняння переносу вирішуються без урахування швидкості ковзання, всі змінні поля являються загальними для фаз. Рівняння, що вирішуються згідно даного методу подано нижче:

$$\frac{\partial \alpha_m \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m u) = 0, \quad (1.19)$$

$$\frac{\partial \rho_m u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m u u) = -\nabla P - \nabla \cdot \tau + S + \rho_m g = 0, \quad (1.20)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha u) = 0. \quad (1.21)$$

де $\rho_m = \sum \alpha_k \rho_k$. Індекс m – відноситься до суміші.

На противагу Fluent в CFX доступний тільки підхід VOF в різних модифікаціях [85-87]. Отже, враховуючи необхідність моделювання

газорідинного потоку для проведення дисертаційних досліджень доцільним являється обрати модуль Fluent.

Як вказувалось вище при використанні методу Two-Way FSI постає необхідність у використанні динамічної сітки. У модулі Fluent існують наступні методи її перебудови:

- Smoothing (згладжування сітки) - доступний для трикутних, тетраедральних, гексагональних та поліедричних сіток (застосовується для 2D та 3D задач), при застосуванні даного методу число вузлів та їх зв'язки не змінюються. Доступно три моделі для внутрішніх областей:

- Spring Smoothing - застосовується у випадку малих деформацій та/або якщо границі переміщуються переважно по нормалі;

- Diffusion Smoothing - застосовується для більш значних деформацій сітки та при цьому зберігається якість сітки на більш високому рівні;

- Linearly elastic solid smoothing - модель деформує сітку таким чином якщо б вона мала властивості пружного тіла, при цьому деформації повинні знаходитись в межах закону Гука.

- Layering (створення або видалення комірок сітки) – доступний для квадратних 2D елементів та призматичних, гексаедричних елементів 3D. Використовується у випадку коли елементи конструкції рухаються тільки поступально або тільки обертаються навколо осі.

- Remeshing (перебудова сітки) - використовується у випадку задач з великими деформаціями. Сітка перебудовується коли критерій скошеності досягає певного значення, мінімального та максимального значення розміру елемента, число вузлів та їх зв'язки змінюються. Доступні наступні моделі для перебудови сітки:

- Local cell - перебудова деяких внутрішніх елементів;

- Zone Remeshing - відбувається повна перебудова всієї зони, у випадку якщо Local cell не зміг добре перебудувати сітку;

- Local Face - перебудова трикутних елементів на поверхні, що деформується, не може бути використано для FSI поверхонь;

- Region Face - перебудова сітки на поверхні, що прилягає до границі, що рухається;
- Cutcell Zone - перебудова внутрішніх та поверхневих елементів для всієї зони.

Розглянемо модулі, що описують напружено-деформівний стан пружного тіла, а саме Static та Transient Structural. Обидва модулі базуються на методі скінченних елементів та розв'язують рівняння 1.12 без нелінійної складової та з нею, відповідно.

Підсумовуючи вищевказане для чисельного моделювання взаємодії газорідинного потоку та пружних відбійних елементів динамічних сепараційних пристроїв доцільним являється використання модулів Fluent та Transient Structural у поєднанні за допомогою System Coupling, використовуючи метод Two-Way FSI, оскільки згідно за описаним вище принципом роботи пристроїв, очікується великі деформації пружного тіла, а отже і сильний вплив на потік.

1.6 Висновки до Розділу 1

На сьогоднішній день з точки зору питомих енерговитрат та ефективності розділення оптимальними методами розділення газокраплинних потоків являються методи, що засновані на дії сил інерції. При цьому їх стандартні конструкції мають ряд загальних недоліків, для їх усунення був запропонований метод динамічної сепарації. Пристрої, що його реалізують являю собою системи автоматичного регулювання, в яких об'єктом регулювання є гідравлічний опір, а регулюючою дією - пружні сили. Робота динамічних сепараційних пристроїв супроводжується гідроаеропружними явищами, серед них найбільший інтерес представляють наступні два, що супроводжуються коливаннями пружних відбійних елементів, а саме флатер та бафтинг. Тому, метою дисертаційної роботи є визначення гідродинамічних показників та гідроаеропружних характеристик динамічних сепараційних пристроїв.

Для досягнення поставленої мети в дисертації було поставлено наступні задачі:

- провести аналіз механізмів розділення гетерогенних систем з використанням традиційних способів сепарації та розробити пропозиції щодо їх вдосконалення за рахунок використання способів вібраційно-інерційної сепарації;

- розробити математичну модель гідроаропружної взаємодії газорідного потоку з пружними елементами динамічних сепараційних пристроїв;

- розробити математичну модель, що дозволить визначати зміну геометричних параметрів синусоїдальних сепараційних каналів під дією швидкісного тиску;

- розробити математичну модель стікання плівки вловленої рідини по осаджувальним поверхням модульних динамічних сепараційних пристроїв;

- провести фізичні та числові моделювання процесів вібраційно-інерційної сепарації, визначити основні робочі характеристики динамічних сепараційних пристроїв;

- розрахувати ефективність вібраційно-інерційної сепарації для модульних динамічних сепараційних пристроїв та визначити їх оптимальну кількість;

- розробити рекомендації щодо способів компоновання динамічних сепараційних пристроїв у фазних розділювачах та алгоритм інженерного розрахунку даних пристроїв.

- розробити та впровадити модульні динамічні сепараційні пристрої;

Основні задачі досліджень розділу опубліковані в працях [38; 52; 75; 76; 77; 83].

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА ЗАГАЛЬНОЇ МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ДИСЕРТАЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Загальна методика досліджень процесів вібраційно-інерційної сепарації

Для розробки загальної методики проведення дисертаційних досліджень розглянемо більш детально роботу динамічних сепараційних пристроїв. Динамічні сепараційні пристрої, не залежно від їх конструкції, обов'язково включають пружні елементи різного типу та форми. Дані елементи під дією гідродинамічного потоку можуть змінювати свою форму (деформуються), а отже і збільшується або зменшується площа вільного перетину, а як наслідок і параметри потоку, тому мають місце гідроаеропружні явища, як зазначалось у попередньому розділі.

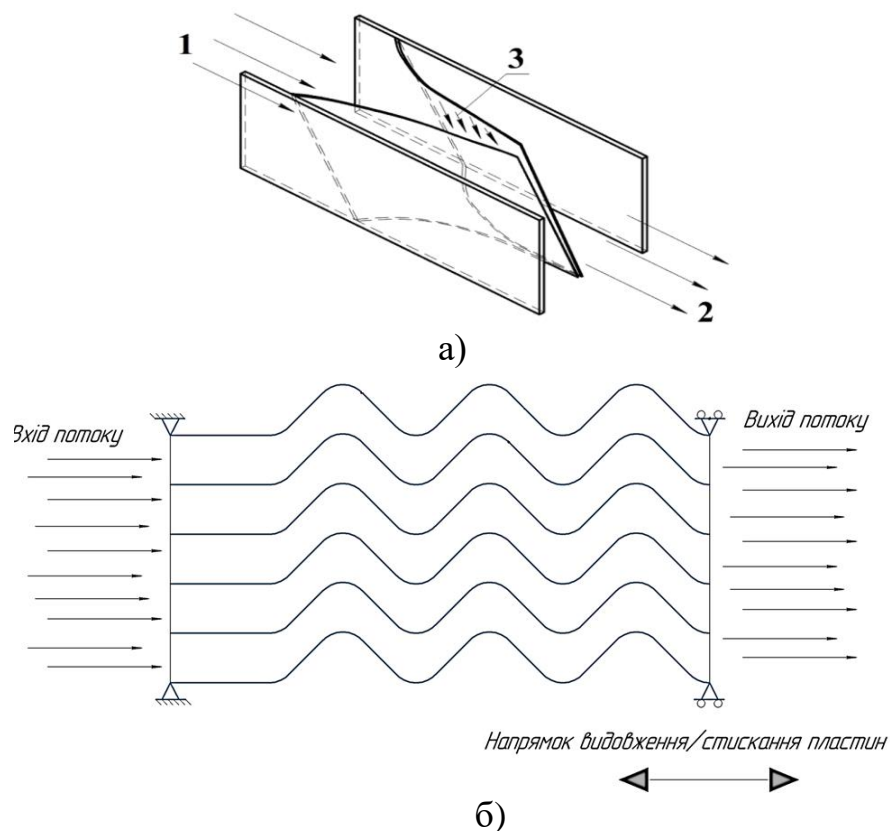


Рисунок 2.1 – Конструкції динамічних сепараційних пристроїв (1 – газодисперсний потік; 2 – плівка вловленої рідини; 3 – очищений газовий потік)

На рисунку 2.1 зображені сепараційні пристрої різних конструкцій з різними типами пружних елементів. На рисунку 2.1 а пружні елементи, закріплені під гострим кутом до напрямку потоку, мають форму плоско-паралельних пластин, які під дією динамічного тиску вигинаються у форму похилого параболічного напівциліндру. Пружні елементи синусоїдальної форми, які можуть видовжуватись/стискатись під дією швидкісного потоку, зображені на рисунку 2.1 б. Конструкція сепараційних пристроїв представлені на рисунках 2.1 а та 2.1 б захищені патентами України на корисну моделі (додаток Д) [59; 88].

Рисунок 2.2 а, б відображає найголовніші відмінності роботи динамічних сепараційних пристроїв, до втрати їхніми пружними елементами статичної та динамічної стійкості, від жалюзійних сепараційних елементів. Важливим параметром сепараційних пристроїв є гідравлічний опір, значення якого залежить від коефіцієнту гідравлічного опору, що визначається експериментально [16; 29].

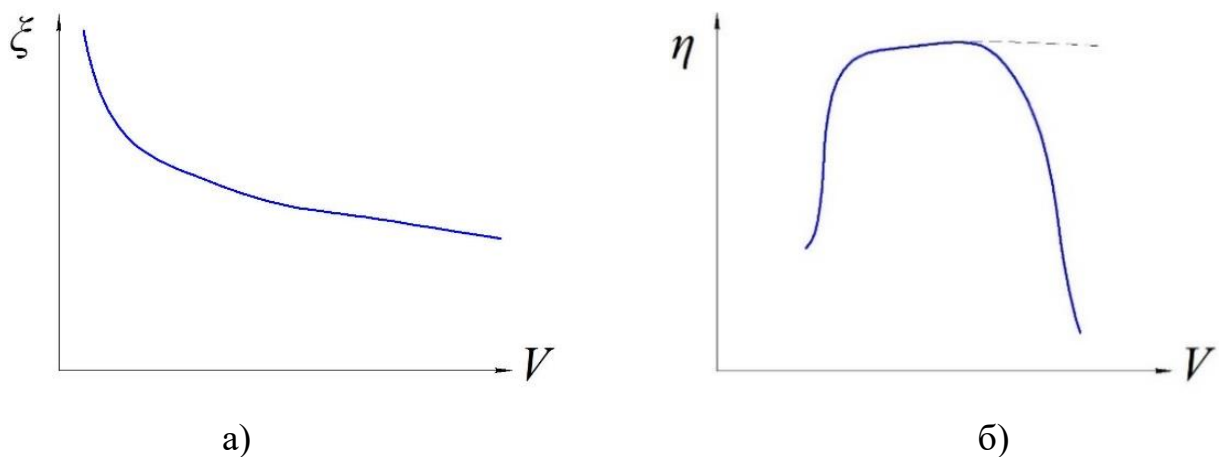


Рисунок 2.2 – Основні відмінності між параметрами роботи динамічних сепараційних пристроїв та жалюзійних: а) – основна тенденція зміни коефіцієнту гідравлічного опору в залежності від швидкості потоку $\zeta(V)$ для динамічних сепараційних пристроїв; б) – залежність коефіцієнту ефективності від швидкості $\eta(V)$ для динамічних сепараційних пристроїв (штрихова лінія) та жалюзійних (суцільна)

Значення даного параметру для жалюзійних сепараційних пристроїв в залежності від конструкції може знаходитись в діапазоні від 4 до 400 [89; 90; 91;

92; 93]. В свою чергу динамічні сепараційні пристрої на відміну від жалюзійних мають змінний, в залежності від швидкості газорідного потоку (V), коефіцієнт гідравлічного опору (ζ). Основна тенденція залежності $\zeta(V)$ вказана на рисунку 2.2 а, при збільшенні швидкості газорідного потоку площа поперечного перетину збільшується, а отже і коефіцієнт гідравлічного опору зменшується.

Звичайно, основним параметром при оцінці ефективності роботи будь-якого сепараційного пристрою є ступінь розділення (коефіцієнт ефективності сепарації) η , найбільш застосованим співвідношенням являється, визначення даного параметру як відношення кількості відділеної дисперсної фази до її вмісту у газорідній суміші на вході до сепаратора [94; 95]:

$$\eta_1 = \frac{G_1 - G_2}{G_1} = \frac{G_3}{G_1} \quad (2.1)$$

де G_1 , G_2 , G_3 – масова витрата дисперсних часток (краплин), на вході в пристрій, залишилися в потоці на виході, а також видалених, відповідно, кг/с.

Даний параметр в традиційних конструкціях жалюзійних сепараційних пристроях змінюється в залежності від швидкості входу газорідного потоку, основна тенденція такої зміни вказана на рисунку 2.2 б суцільною лінією [96]. Чим вище швидкість потоку, тим більша сила інерції діюча на краплинну рідину, що викликає її відділення, а отже ефективність зростає. З іншого боку, руйнування краплин призводить до зупинки росту ефективності розділення (горизонтальна ділянка на рисунку 2.2 б) при певному значенні витрат. Ефект руйнування краплин настільки важливий, що у поєднанні з руйнуванням плівки вже вловленої рідини, а як наслідок і вторинного бризковинесення, призводить не тільки до зупинки росту ефективності, а й до різкого його падіння [16; 18; 97]. У роботах [90; 98; 99; 100; 101] розглядається дроблення краплини певного розміру, що рухається в потоці газу та плівки вже вловленої рідини. На рідину діють зовнішні аеродинамічні сили (p_a), що повинні бути врівноважені її внутрішнім тиском ($p_{вн}$) та силою поверхневого натягу ($p_{пн}$):

$$p_a = p_{en} + p_{nn} = const.$$

Краплина або плівка залишається стабільною, поки зміна аеродинамічної сили компенсується зміною сили поверхневого натягу, так щоб внутрішній тиск залишався не змінним. Якщо аеродинамічна сила значно більша за силу поверхневого натягу то внутрішній тиск краплини або плівки практично рівний з аеродинамічним, тому і зміну внутрішнього тиску компенсувати нічим, краплина або плівка деформується та дробиться до тих пір, поки збільшення p_{nn} не компенсується p_{en} .

Отже, на відміну від жалюзійного сепараційного пристрою уникнення падінню ефективності розділення у динамічному сепараційному пристрої може бути здійснено за рахунок запобігання критичному збільшенню діючої аеродинамічної сили при збільшенні швидкості руху газорідного потоку, за рахунок збільшення поперечного перетину каналу, а як наслідок і розширенню діапазону ефективної роботи (основна тенденція для динамічного сепараційного пристрою вказана на рисунку 2.2 б штриховою лінією).

Підсумовуючи вищесказане, концепцією динамічного сепараційного пристрою являється можливість його роботи, як системи автоматичного регулювання, за рахунок чого можна підтримувати ступінь очистки газу в широкому діапазоні можливої зміни витрати газорідної суміші. В даному випадку об'єктом регулювання є гідравлічний опір, а регулюючою дією - пружні сили [52; 102].

Ґрунтуючись на теоретичних уявленнях про процеси та явища що протікають в динамічних сепараційних пристроях, з метою розробки інженерної методики розрахунку сепараційних пристроїв, кожного з вказаних на рисунку 2.1, необхідно вирішувати окремо задачу гідроаеропружності, враховуючи їх особливості та вводячи відповідні спрощення та допущення. При цьому зважаючи, що в залежності від вмісту рідкої фази може змінюватись характер взаємодії газорідного потоку та пружних елементів та не зважаючи на особливості кожного пристрою вирішення даної задачі можна розділити на наступні чотири етапи [103; 104]:

•перший етап – являє собою проведення натурного та чисельного експериментів, за допомогою якого визначається та порівнюється швидкість газового потоку, що викликає втрату статичної та динамічної стійкості пружних елементів. При втраті статичної стійкості проводиться верифікація чисельного експерименту за допомогою значень відхилень пружних елементів та швидкостей газового потоку, що їх викликали. Враховуючи, що з чисельного експерименту можна отримати більше уявлення про структуру потоку та напружено-деформований стан елементів, визначається розподіл тиску на них $p(l)$ в залежності від швидкості та деформацій. Дані можуть бути використані для визначення жорсткості елементів та демпфування з боку газового потоку за рахунок чого уточнена математична модель. При втраті динамічної стійкості проводиться верифікація отриманих результатів за допомогою проведення чисельного експерименту з використанням частоти коливань пружних елементів та їх амплітуди. З верифікованого числового експерименту можна визначити розподіл тиску по пружним елементам в залежності від часу $p(l, t)$ та швидкості потоку, а як наслідок і значення демпфування в залежності від часу;

•другий етап – являє собою проведення експериментальних досліджень взаємодії пружних елементів та газорідного потоку з різною концентрацією рідкої фази. Як і на попередньому етапі досліджується втрата статичної та динамічної стійкості в залежності від швидкості потоку у певному діапазоні вмісту дисперсної рідини в газовому потоці χ . Верифікація чисельного експерименту за результатами фізичного, на другому етапі проводиться аналогічно до першого та визначаються з нього розподіл тиску на пружні елементи $p(l)$ в залежності від швидкості газорідного потоку та концентрації в ньому рідкої фази у випадку втрати статичної стійкості та в залежності і від часу у випадку втрати динамічної стійкості $p(l, t)$. При цьому отримані дані використовуються для визначення жорсткості пружних елементів та визначення коефіцієнтів демпфування з боку газорідного потоку. Порівнюючи отримані дані з результатами попереднього етапу можна зробити висновок про вплив різної концентрації на стійкість пружних елементів, визначити ефективність

розділення та розглянути можливість використання механічних коливань для коагуляції краплин;

- третій етап – являє собою саме дослідження впливу механічних коливань пружних елементів на газорідний потік. Очікуваним ефектом являється коагуляція краплин, а отже і збільшення ефективності їх розділення, аналогічно до ефекту акустичної коагуляції. Але згідно з особливостями вказаного ефекту можна спостерігати як злиття краплин так і їх руйнування в залежності від комбінації наступних параметрів: швидкості газорідного потоку, частоти коливань пружних елементів та дисперсності краплин. Тому для вивчення впливу механічних коливань на потік використаємо математичну модель в яку засобами ідентифікації були внесені всі необхідні коефіцієнти та параметри, для знаходження розмірів сепараційного пристрою, що забезпечить підвищення ефективності розділення вхідної газорідної суміші за рахунок коагуляції краплин. За даними розмірами необхідно виготовити інший сепараційний елемент, що дозволить дослідити саме вплив механічних коливань;

- четвертий етап - являє собою проведення натурного та числового експерименту для дослідження впливу встановлених послідовно динамічних сепараційних пристроїв один на одного. Особливий інтерес буде представляти зміна критичних швидкостей газорідного потоку (бафтингу та флатеру), що будуть викликати явища динамічної не стійкості, в залежності від відстані між пристроями. При цьому ця зміна критичної швидкості може бути різною в залежності від по черговості їх розташування вздовж потоку.

Підсумовуючи вищесказане на рисунку 2.3 вказані спільні, для кожної з вказаних на рисунку 2.1 конструкцій модульних динамічних сепараційних пристроїв, етапи проведення досліджень взаємодії газорідного потоку та пружних елементів.

Слід зауважити, що є певні особливості проведення досліджень кожної з конструкцій пристроїв вказаних на рисунку 2.1. Найголовніші відмінності полягають в різній методиці виготовлення, так наприклад в сепараційному пристрої де пружні елементи являють собою похилі параболічні напівциліндри пружні елементи (пластини) знаходяться в попередньо здеформованому стані,

його необхідно враховувати, оскільки це буде впливати на значення їх жорсткості. В пристрої зображеному на рисунку 2.1 б до входу газорідного потоку в сепараційний канал пружні елементи не мають внутрішніх напружень, оскільки їх форма отримується з використанням вакуумного пресу. Однією з найголовніших складнощів при розробленні сепараційних пристроїв з пружними елементами синусоїдальної форми є вибір матеріалу, механічні властивості якого будуть такими, що забезпечуватимуть необхідні деформації при цьому тримати форму синусоїди.

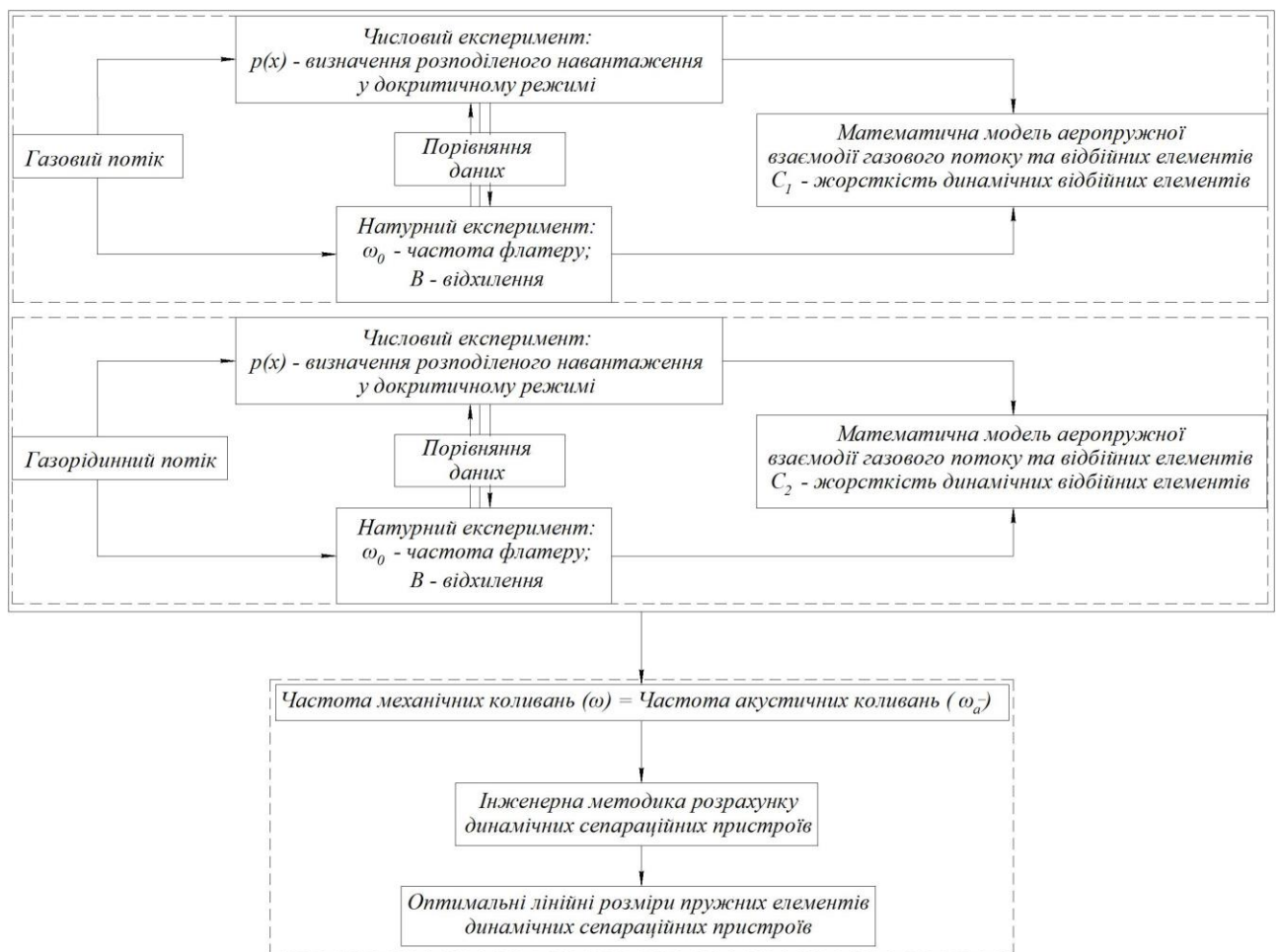


Рисунок 2.3 - Етапи проведення досліджень взаємодії газорідного потоку та пружних елементів

2.2 Методи лінеаризації рівнянь руху

На сьогоднішній день для розрахунку гідроаеропружного демпфування застосовують два методи, а саме інструменти аеропружної стійкості та аналізу

часової області [105]. При застосуванні першого методу необхідна лінеаризація рівняння (1.12) за наявності в ньому складової \dot{x} , оскільки такі властивості системи, як форма коливань та частоти являються лінійними, а отже даний метод являється більш швидким, але менш точним ніж більшість методів аналізу часової області (аналіз спектру).

Розглянемо лінеаризацію рівнянь руху на прикладі вітряної турбіни. При цьому існує одна проблема, а саме обертання її ротору, як наслідок кут повороту може змінюватись від 0° до 360° , а отже не може вважатись малим та лінеаризованим. Для вирішення цієї проблеми є декілька методів, найпростішим з них є перетворення Фур'є [106], при його застосуванні групу деформацій на лопатях можна записати в іншому наборі координат. Допускають, що деформацію кожної лопаті можна представити використовуючи три нові координати, а саме: одна співпадає з нахилом площини ротору; друга — рискаям площини ротору, а третя — рух вперед/назад площини ротору. Розглядаючи N — кількість лопаток рівномірно розташованих по колу ротора, в такому випадку кут на повороту деякої b лопаті визначається виразом:

$$\psi_b = \psi + (b - 1) \frac{2\pi}{N}, \quad (2.3)$$

де ψ — кут повороту лопатки від якої проводиться відлік ($\psi = 0$ — якщо лопать від якої проводиться відлік розташована вертикально).

Отже, трансформовані координати q_i на вищевказані нові матимуть вигляд:

$$q_0 = \frac{1}{N} \sum_{b=1}^N q_b, \quad q_{nc} = \frac{2}{N} \sum_{b=1}^N q_b \cos n \psi_b, \quad q_{ns} = \frac{2}{N} \sum_{b=1}^N q_b \sin n \psi_b. \quad (2.4)$$

Отже, використання перетворення Фур'є дозволяє виключити з рівнянь руху періодичну складову, а отже їх можна лінеаризувати. Необхідно відмітити, що при наявності деякої періодичності після використання вищевказаного перетворення використовується осереднення. Отримана інваріантна за часом модель дозволяє знайти власні частоти, значення демпфування та форми власних

коливань. Для забезпечення точності отриманих даних необхідно спочатку знайти усталені деформації лопатей викликані аеродинамічними силами, що діють на систему. Вони будуть залежати від швидкості обертання ротору, швидкості вітру та кута атаки, таким чином для різних комбінацій даних параметрів повинні бути розраховані усталені деформації.

У випадках, якщо розглядуваний випадок не можна представити як ізотропний використання перетворення Фур'є та подальшого осереднення не дозволяє лінеаризувати модель доцільним являється перехід до більш складних методів Хілла та Флоке (частинним випадком якого і є перетворення Фур'є) [107]. Згідно аналізу Флоке лінеаризація рівнянь руху виконується за рахунок розділення на періодичну та експоненціальну частину. Якщо рівняння руху мають вигляд [108; 109]:

$$\{\dot{y}\} = [A(t)] \{y\} \quad (2.5)$$

де $\{\dot{y}\}$ - стовпець із ступенями вільності q_i та відповідними похідними по часу $\{\dot{q}_i\}$, то можна використовуючи матрицю переходу $[\Phi(t, 0)]$ отримаємо [110]:

$$\{y(t)\} = [\Phi(t, 0)] \{y(0)\}. \quad (2.6)$$

Вказана вище матриця переходу має вигляд:

$$[\Phi(t, 0)] = [P(t)]e^{[A_L]t} \quad (2.7)$$

де $[P(t)]$ - матриця періодів $T = \frac{2\pi}{\Omega}$ та матриця констант A_L :

$$[A_L] = \frac{1}{T} \ln([\Phi(T, 0)]) \quad (2.8)$$

Стабільність переміщень визначається власними значеннями матриці $[A_L]$, що являють собою характерним показником матриці амплітуд в залежності від часу $[A(t)]$.

Діагональні матриці $[A]$ та $[\Sigma]$ з характерним показником λ_i та множником σ_i , діагоналізуюча матриця $[V]$ визначають власні значення матриці $[A_L]$ та $[\Phi(t, 0)]$:

$$[A_L] = [V][A][V]^{-1}, [\Phi(t, 0)] = [V][\Sigma][V]^{-1}. \quad (2.9)$$

Необхідно відмітити, що аналіз Флоке при кількості рівнянь в системі більшій за 50 являє собою проблему, оскільки обчислення матриці переходу $[\Phi(t, 0)]$ займає надто велику кількість часу. В зв'язку з цим були запропоновані розширення теорії, наприклад в [111].

Після використання перетворень та визначення власних значень стають відомими власні частоти та демпфування, за рахунок використання методів ідентифікації параметрів лінійних моделей [112]. Як вказувалось вище дані моделі набагато простіші ніж аналіз в часовій області, тому мають меншу точність.

Так наприклад визначене демпфування за допомогою лінеаризації являється константою, а при використанні інструментів аналізу в часові області може дати уявлення про зміну демпфування в часі. Для цього може бути використані сучасні програмні комплекси.

2.3 Методика фізичних моделювань. Опис експериментального стенду

Враховуючи етапи проведення досліджень описані вище та зведені до рисунку 2.4 розроблений експериментальний стенд повинен забезпечувати вирішення наступних задач [113]:

- забезпечувати легку зміну модульних сепараційних пристроїв;
- вимірювати відхилення пружних елементів в до критичному режимі та частоту і амплітуду коливань при втраті їх динамічної стійкості;

- вимірювати ефективність розділення газорідинних суміші та гідравлічного опору динамічного сепараційного пристрою;

- визначати вплив механічних коливань на газорідинний потік.

На базі Сумського державного університету, в лабораторії грануляційного та масообмінного обладнання було розроблено експериментальний стенд, який дозволить вирішити вищезазначені задачі. На рисунку 2.4 зображена його принципова схема. Обладнання, матеріали та прилади:

- обладнання - експериментальний стенд для дослідження процесів вібраційно-інерційної сепарації, модель динамічного сепараційного пристрою, газодувка для подачі газового потоку, парогенератор для введення дисперсної рідини в потік (Longray 2680A-II), ємність для осадження краплин (необхідна при перевірці впливу на потік механічних коливань пружних відбійних елементів модульних динамічних сепараційних пристроїв), регулятор частоти обертів Aqua Drive FC 200;

- матеріали - повітря, антифриз для систем охолодження двигунів автомобілю (не випаровується під час введення в канал експериментального стенду на відміну від води);

- прилади – анемометр для вимірювання швидкості потоку та температури (Hot Wire Anemometer HT-9829), високошвидкісна камера (Canon EOS 700D body. Тип матриці CMOS 18,5 МП), стробоскоп.

Розглянемо детально принцип роботи експериментального стенду схема якого наведена на рисунку 2.4, а фото на рисунку 2.5. Диспергована рідина за допомогою генератора туману Longray 2680A-II (1) подається до відцентрової газодувки (2) де змішується з газовим потоком та під дією тиску створеного газодувкою направляється до каналу експериментального стенду де встановлена модель модульного динамічного сепараційного пристрою. В даному каналі за допомогою високошвидкісної камери фіксується деформація пружного елемента по відношенню до шкали нанесеної на стінки каналу (камера закріплюється на штативі та її положення вимірюється рівнеміром). В даному каналі за допомогою високошвидкісної камери фіксується деформація пружного елемента по відношенню до шкали нанесеної на стінки каналу (камера закріплюється на

штативі та її положення вимірюється рівнеміром). У тестовій секції (3) газорідний потік минає модульний динамічний сепараційний пристрій (4), де відбувається уловлювання дисперсних частинок. Вловлена рідина відводиться з сепаратору у вигляді плівки, а очищений газ виходить в атмосферу. Витрата повітря відцентрової газодувки регулюється за допомогою регулятора частоти Aqua Drive FC 200. Генератор холодного туману Longray 2680A-II дозволяє регулювати дисперсність рідини у межах від 5 мкм до 50 мкм, а отже ефективність розділення можна визначити для різних за розміром часток.

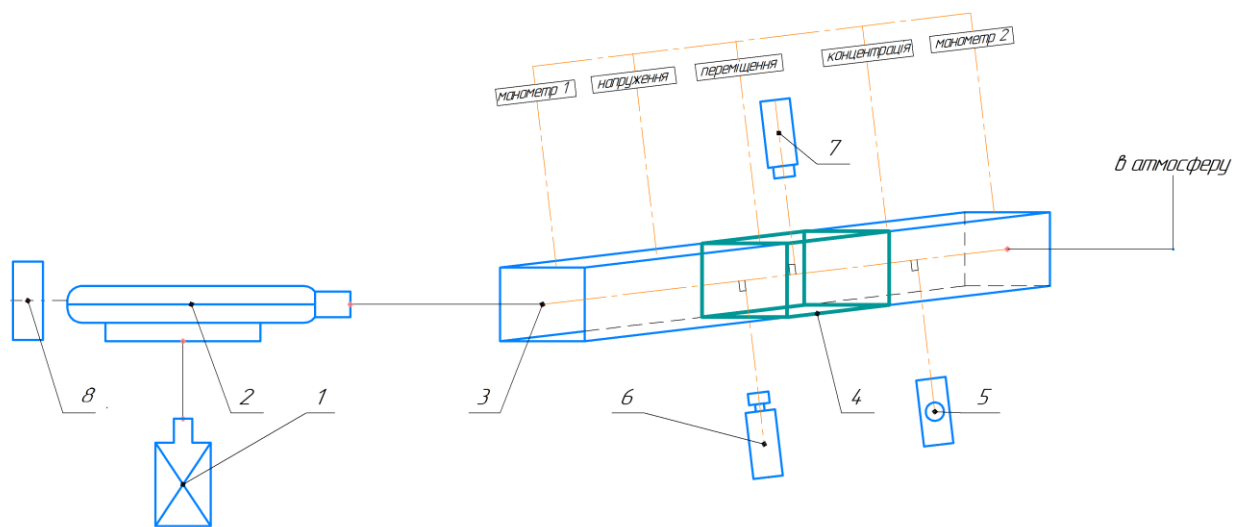


Рисунок 2.4 - Принципова схема експериментального стенду для дослідження динамічних модульних сепараційних пристроїв (1 – генератор туману Longray 2680A-II; 2 – відцентрова газодувка; 3 – тестова секція; 4 – модель динамічного модульного сепараційного пристрою; 5 – анемометр; 6 – високошвидкісна камера; 7 – стробоскоп; 8 – регулятор частоти обертів Aqua Drive FC 200)

Як видно з рисунку 2.5 а тестова секція складається з двох частин, що мають квадратний поперечний перетин 125 мм x 125 мм та довжину 400 мм. Такі геометричні розміри були обрані з умови забезпечення рівномірності потоку на вході в модульний динамічний сепараційний пристрій. Для цього ж слугує перехідна насадка з круглого поперечного перетину на квадратний, що має форму дифузора з кутом розкриття 15° [114]. Пружні елементи модульного сепараційного пристрою закріплюється між двома частинами тестової секції,

таке закріплення було обране для мінімізації впливу жорсткості корпусу на коливання пружних елементів при втраті ними динамічної стійкості. Розглядаються елементи вказані на рисунку 2.1 а без нахилу, а отже їх форма являє собою параболічний напівциліндр. Довжина пластин, що його утворюють 210 мм.



а)

б)

Рисунок 2.5 – Фото тестової секції (а) та регулятора частоти Aqua Drive FC 200

Було розроблено порядок проведення фізичного експерименту на першому етапі досліджень:

1. Вмикається регулятор частоти та виставляється на ньому частота обертів ротору електродвигуна, під'єданого до відцентрової газодувки. За допомогою анемометру вимірюється швидкість потоку на вході в модульний сепараційний пристрій. В результаті складається графік залежності швидкості входу газорідного потоку в сепараційний елемент від частоти обертів електродвигуна.

2. Газовий потік потрапляє до тестової секції де встановлений модульний сепараційний пристрій. У випадку якщо газовий потік не викликає втрати

динамічної стійкості, а лише їх відхилення вони замірюються за допомогою шкали на корпусі та заносяться до таблиці. Якщо ж спостерігаються коливання пружних елементів то за допомогою високошвидкісної камери з швидкістю зйомки 240 кадрів в секунду проводиться запис на протязі однієї хвилини. Після чого отримане відео розкладається на кадри. Порівняння кожних двох сусідніх кадрів дозволяє отримати швидкість руху пружних елементів та визначити частоті коливань.

3. Серія дослідів проводиться для товщин пружних елементів 0.4 мм, 0.5 мм, 0.6 мм для різних значень швидкості газового потоку, об'ємної долі рідини та різної дисперсності. Перед проведенням вимірів або початку запису відео необхідно зачекати до встановлення режиму. Наприклад, при втраті пружним елементом стійкості за певного значення швидкості вхідного потоку та подальшій зміні її необхідно зачекати до встановлення режиму, оскільки для затухання коливань необхідний певний час. Цей час теж заноситься до окремої таблиці.

В тому числі на першому етапі досліджень після проведення вище перелічених вимірювань в експериментальний стенд встановлюються нові пластини та встановлюється на регуляторі частоти саме та, що викликає коливання пружних елементів та витримується до її руйнування. Отриманий час дозволить дослідити втомну міцність пружних елементів, а саме кількість згинів до їх руйнування.

Розглянемо різницю між проведенням експериментальних досліджень на першому та другому етапах. Після першого кроку, а саме вмикання газодувки вмикається генератор туману та встановлюється на ньому дисперсність краплин, отриманий туман подається до відцентрової газодувки. За програмою описаною вище вимірюється відхилення пружних елементів до втрати стійкості, визначається швидкість їх руху, частота коливань, критична швидкість потоку та час до руйнування пружного елементу. Отримані результати заносяться до відповідних таблиць та порівнюються з відповідними результатами одержаними на першому етапі. В тому числі вимірюється ефективність розділення до втрати елементами динамічної стійкості.

На третьому етапі проведення досліджень вимірюється ефективність розділення вже після втрати динамічної стійкості пружних елементів. При цьому проводиться серія дослідів для різної комбінації дисперсності рідини та частоти коливань пружних елементів. Отримані результати заносяться до таблиці.

Для четвертого етапу в корпус стенду встановлюються два модулі динамічних сепараційних елементів. На цьому етапі досліджень генератор туману не вмикається, а лише проводиться регулювання частоти обертання ротору газодувки. Спостереження проводяться за обома модулями, та визначається для кожного критична швидкість входу, що викликає коливання.

При цьому експериментальні дослідження проводились у відповідності до програми та методики досліджень розробленої у відповідності до ГОСТ 19.301-79 “Програма і методика випробувань. Вимоги до змісту і оформлення” [115]. Отримані результати проведення експериментальних досліджень дозволять провести верифікацію числового експерименту та визначити основні параметри роботи досліджуваних модульних сепараційних пристроїв.

2.4 Методика математичних моделювань (числових експериментів)

Розглянемо загальні кроки та особливості числового моделювання кожної конструкції модульних динамічних сепараційних пристроїв вказаних на рисунку 2.1. Враховуючи, що параметри потоку впливають на форму каналу, що в свою чергу викликає зміну його форми у кожній конструкції необхідно проводити вирішення задачі гідроаеропружності [116; 117]. Для числового моделювання взаємодії газорідного потоку та пружних елементів динамічних сепараційних пристроїв було обрано програмний комплекс ANSYS Workbench, а саме його модулі Fluent Flow, що базується на методі скінченних об’ємів, та Transient Structural, що базується на методі скінченних елементів, які були об’єднані за допомогою System Coupling [83]. Враховуючи сильний зв’язок між деформаціями пружних елементів та характеристиками потоку необхідно вирішувати задачу з двостороннім зв’язком.

Першим етапом будь якого чисельного розрахунку являється побудова тривимірної моделі. Для задач в яких необхідно вирішувати проблеми динаміки руху рідини та деформації пружної конструкції необхідно побудувати тривимірну модель об'єму рідини та пружного тіла. При побудові всіх моделей з метою покращення збіжності задачі та відсутності зворотних потоків у модулі Fluent Flow для всіх конструкцій були продовжені вхідні та вихідні зони. Слід зауважити, що при моделюванні динамічного сепараційного пристрою зображеного на рисунку 2.1 а для запобігання виникнення так званих «вироджених» елементів (елементи, що мають нульовий об'єм) параболічні пластини не повинні дотикатись або зіштовхуватись. У зв'язку з цим необхідним є побудова додаткового тіла посередині каналу, що буде виключене для розрахунку течії, але буде присутнє для розрахунку у модулі Transient Structural. Отримані розрахункові моделі для конструкцій, що вказані на рисунках 2.1 а, б зображені з розмірами (розміри в міліметрах) на рисунках 2.6 а, б відповідно.

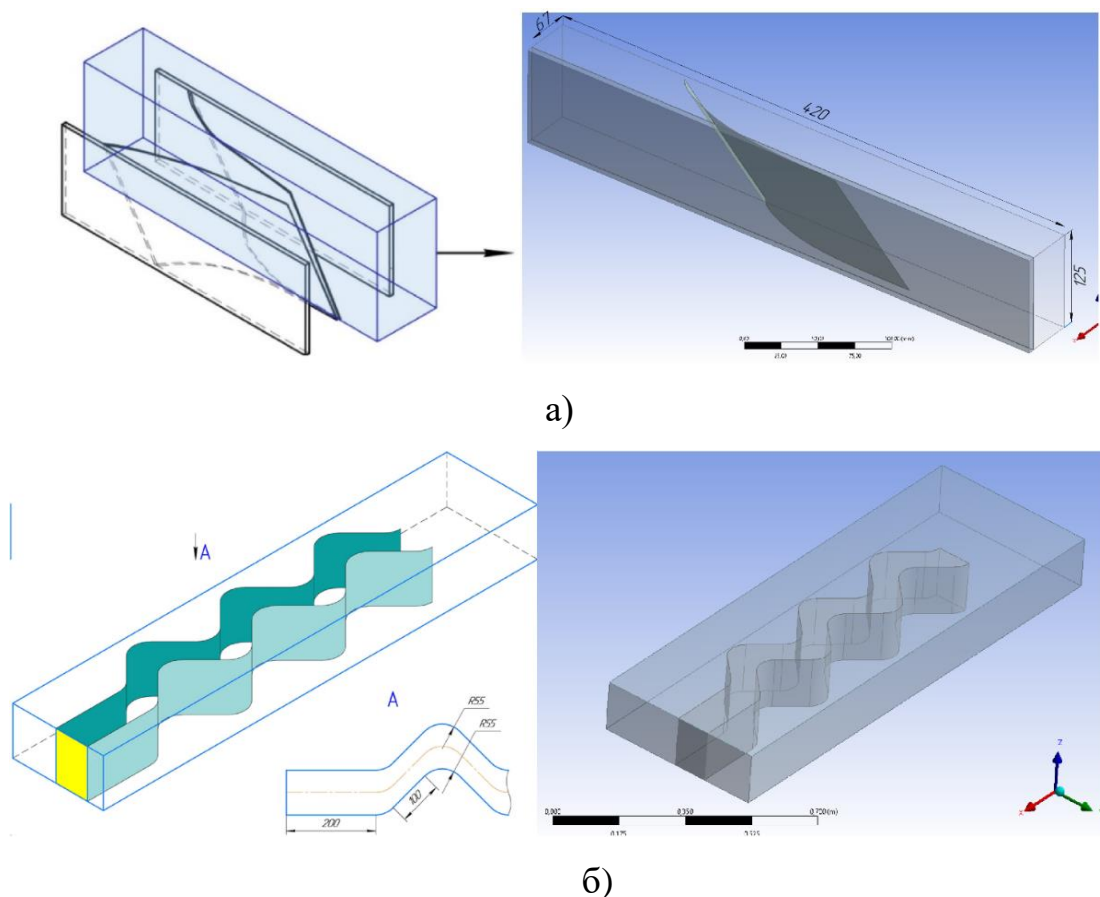


Рисунок 2.6 – Тривимірні розрахункові моделі динамічних сепараційних пристроїв

Другим етапом при проведення числових розрахунків являється побудова скінчено об'ємних та елементних сіток для тривимірних моделей поданих на рисунку 2.6. Необхідно відмітити, що для кожного модулю не виключеним з розрахунку залишається лише той елемент тривірної моделі, який необхідний для відповідного аналізу. Генерація тривимірної сітки для розрахунку у модулі Fluent Flow проводилась з використанням методу Sweep, що дозволяє побудувати для тіл видавлювання переважно гексагональні елементи. Таким чином для тривимірних моделей наведених на рисунку 2.6 скінчено об'ємні розрахункові сітки мали показники якості представлені у таблиці 2.1. Згенеровані розрахункові сітки зображені на рисунку 2.7.

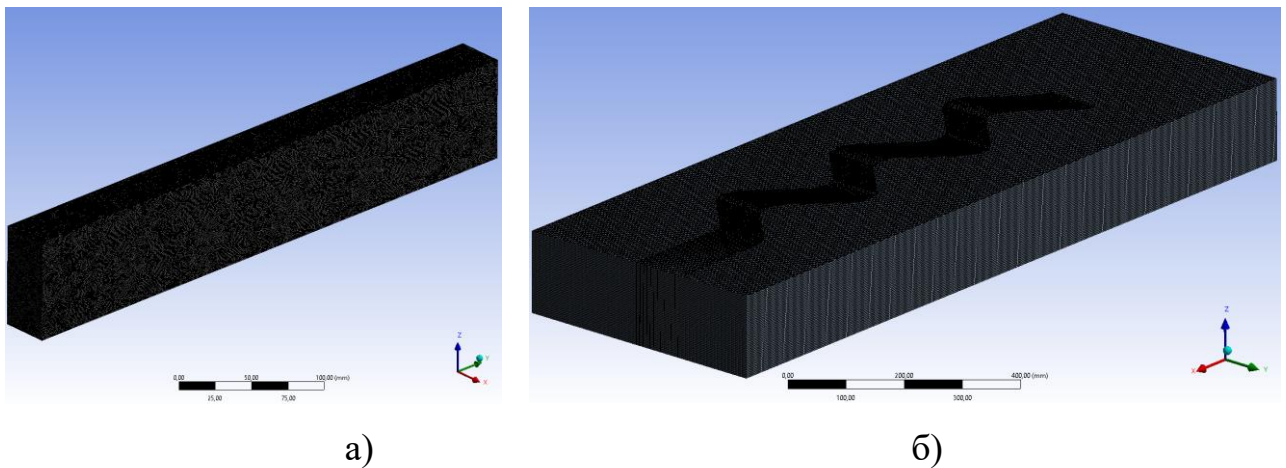


Рисунок 2.7 – Скінчено-об'ємні розрахункові сітки

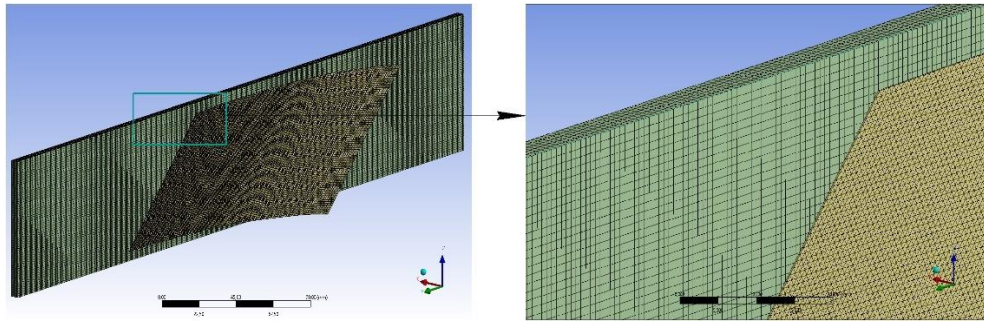
(а – сепараційний пристрій з похилими параболічними пластинами;
б - сепараційний пристрій з синусоїдальними пластинами)

Генерація тривимірної сітки сепараційного елемента на рисунку 1.4 а для розрахунку у модулі Transient Structural проводилась з врахуванням деформацій пластин, які будуть виникати під дією потоку. Тривимірні сітки побудовані у модулі Transient Structural зображені на рисунку 2.6. Одним з найважливіших етапів проведення числових розрахунків являється визначення в моделі поверхонь для налаштування граничних та початкових умов, динамічної сітки, необхідних при проведенні розрахунку течії та напружено-деформованого стану елементів конструкції [83; 118].

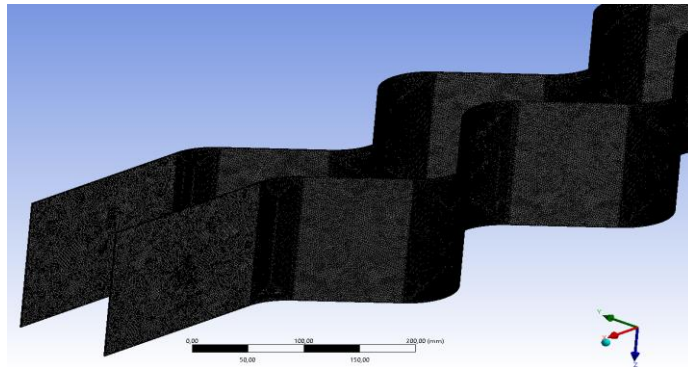
Таблиця 2.1 – Показники якості скінчено-об’ємних сіток тривимірних моделей динамічних сепараційних пристроїв.

Умовна назва елемента / номер рисунку	Кількість елементів сітки, млн	Показники якості сітки		
		Skewness	Orthogonal Quality	Aspect Ratio
Сепараційний елемент з пластинами параболічної форми / рисунок 2.1 а	2,485	0,81	0,15	1566
Сепараційний елемент з пластинами синусоїдальної форми / рисунок 2.1 б	2,034	0,82	0,17	1349

Граничні умови які були використані для розрахункових моделей, представлені на рисунку 2.7. Гранична умова (wall) була розділена на групи в залежності від властивостей динамічної сітки, які необхідні для забезпечення її деформації без виникнення «вироджених» елементів (wall_top, wall_bottom, wall_deforming, wall, wall_left, wall_right). Що стосується модулю Transient Structural, для нього було обрано поверхні Fixed Support (закріплення, що не має жорсткого ступеню вільності), System Coupling – поверхні, на які прикладаються навантаження з боку потоку та з яких передаються переміщення в модуль Fluent Flow. Необхідно зазначити, що для розрахункової моделі представленої на рисунку 2.6 а між додатковим введеним тілом та поверхнею пружного елемента на який набігає потік було задано нелінійний тип контакту Frictionless. Згідно з цією моделлю коефіцієнт тертя між поверхнями контактуючих елементів рівний нулю, між ними можливе виникнення зазорів та їх повна відсутність, також можливе проковзування поверхонь. Оскільки конструкція сепараційного пристрою симетрична, то саме в такій постановці було побудовано тривимірну розрахункову модель, на рисунку 2.9 а показано розташування граничної умови symmetry.



а)



б)

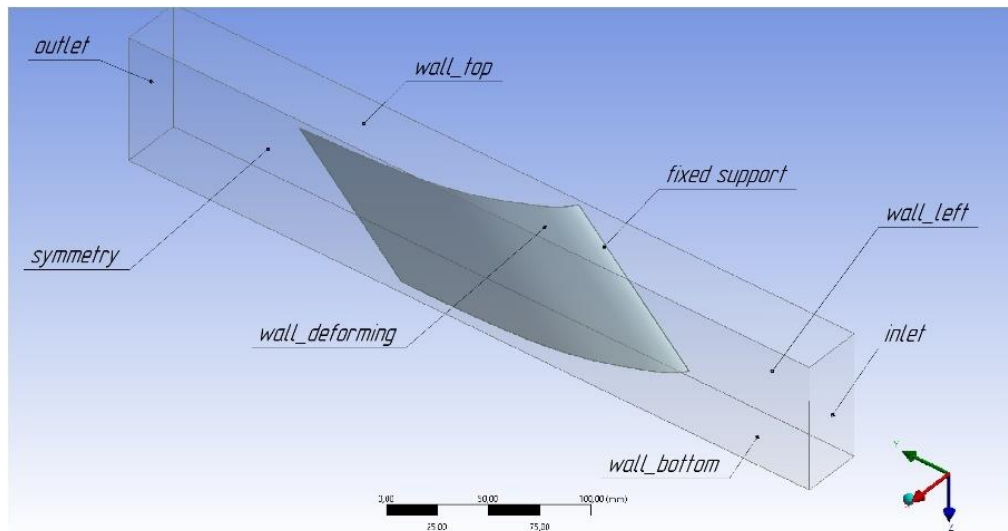
Рисунок 2.8 - Тривимірні розрахункові сітки побудовані у модулі Transient Structural (а – сепараційний пристрій з похилими параболічними пластинами; б - сепараційний пристрій з синусоїдальними пластинами)

Для забезпечення деформації розрахункової області були обрані наступні методи динамічної сітки: Smoothing - Spring (число вузлів та їх зв'язки не змінюються, сітка деформується до заданих значень скошеності елементів та їх розмірів) та Remeshing – Local Cell, Zone Remeshing (сітка перебудовується якщо значення скошеності та розміри елементів перевищують задані, а отже число вузлів та зв'язки між ними не змінюються). При цьому була обрана опція Implicit Update, що перебудовує сітку повністю у випадку якщо Remeshing не вдалося перебудувати її частково. Налаштовані зони для вказаних на рисунку 2.9 поверхонь:

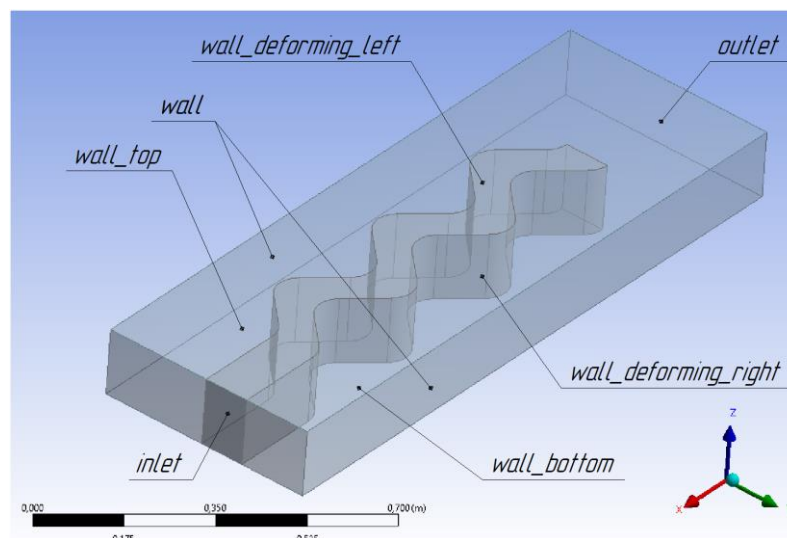
1. System Coupling (з даних поверхонь передається сила, що діє на пружні елементи та вони деформуються разом з ними) – wall_deforming, wall_deforming_left, wall_deforming_right. Необхідно відмітити, що для забезпечення деформації пограничного шару була обрана опція – Deform Adjacent Boundary Layer with Zone;

2. Stationary (дані поверхні не деформуються, сітка не перебудовується за допомогою методу Remeshing) – inlet, outlet, wall_top, wall_bottom;

3. Deforming (дані поверхні змінюються в результаті деформації пружних елементів, методи Smoothing та Remeshing) – wall right, wall left.



a)



б)

Рисунок 2.9 – Граничні умови розрахункових моделей сепараційних пристроїв
(а – сепараційний пристрій з похилими параболічними пластинами;
б - сепараційний пристрій з синусоїдальними пластинами)

Наступним кроком після побудови розрахункових сіток та налаштування граничних умов є налаштування модулів Fluent Flow та Transient Structural, а

саме вибір моделі турбулентності, вхідних швидкостей та термодинамічних параметрів (тиск і температура), вибір матеріалів пружних елементів. Налаштування для модулю Fluent Flow представлені у таблиці 2.2. Налаштування властивостей матеріалу, що створювався власноруч у базі даних програмного комплексу ANSYS для проведення моделювань, пружних елементів сепараційного пристрою представленого на рисунку 2.1 а у модулі Transient Structural наступні: густина $\rho = 910 \text{ кг/м}^3$; модуль Юнга $E = 3,6 \text{ МПа}$; коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,42$. При цьому для синусоїдальних пружних елементів (рисунок 2.1 б), внаслідок особливостей їх виготовлення, модуль Юнга становить $E = 1,1 \text{ МПа}$.

Таблиця 2.2 – Налаштування модулю Fluent Flow.

№	Параметри	Умовна назва елемента / номер рисунку	
		Сепараційний елемент з пластинами параболічної форми / рисунок 1.4 а	Сепараційний елемент з пластинами синусоїдальної форми / рисунок 1.4 б
1	Модель турбулентності	k - ϵ (Realizable)	
2	Діапазон вихідної швидкості, м/с	2 - 4	5 – 30
3	Крок швидкості, для кожного наступного розрахунку, м/с	0,2	5
4	Інтенсивність турбулентності, %	5	
5	Гідравлічний діаметр, мм	82	120
6	Надлишковий тиск на виході, МПа	0	

Далі були налаштовані методи вирішення, а саме: Scheme – Coupled; Spatial Discretization – Pressure=Simple; Momentum= Second Order Upwind; Turbulent

Kinetic Energy=Second Order Upwind; Turbulent Dissipation Rate=Second Order Upwind.

Останнім етапом є налаштування модулю System Coupling, що керує часовим кроком в кожному з обраних модулів. Крок по часу був обраний 0,001 с для забезпечення коректного описання руху пружних елементів та перебудови динамічної сітки. Кількість ітерацій за один крок 20. Далі проводиться ініціалізація вхідних даних розрахункової моделі та запускається розрахунок.

2.5 Висновки до Розділу 2

Отже, для досягнення мети та вирішення задач досліджень обрано аналітичні методи, а також сучасні методи числових та фізичних моделювань. Проведено стратегічне планування, що полягає у визначенні необхідного обсягу, кількості та послідовності проведення фізичних та числових експериментів.

Аналітичні дослідження взаємодії потоку та пружних елементів динамічних сепараційних пристроїв будуть ґрунтуватись на методі скінченних об'ємів, а також на розв'язаннях рівнянь Нав'є-Стокса та нерозривності потоку.

При проведенні числових моделювань процесу гідроаеропружної взаємодії доцільно використовувати метод скінченних об'ємів та метод скінченних елементів, поєднання яких дозволить врахувати взаємний вплив потоку та пружних елементів.

Фізичні моделювання інерційно-вібраційної сепарації у модульних динамічних сепараційних пристроїв необхідно проводити з врахуванням теорій подібності, що дозволить відтворити умови, в ході експериментів, наближені до умов експлуатації сепараційного обладнання.

Основні наукові результати розділу опубліковані в працях [83; 103; 104; 113; 116; 117; 118].

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ, ЩО
ВИНИКАЮТЬ ПІД ЧАС ВІБРАЦІЙНО-ІНЕРЦІЙНОЇ СЕПАРАЦІЇ3.1 Статичний розрахунок попереднього деформованого стану
динамічних відбійних елементів сепараційних пристроїв

Попередній zdeформований стан динамічного відбійного елемента сепараційного пристрою моделюється із застосуванням аналітичних залежностей методу скінченних елементів. Зокрема, динамічний відбійний елемент представлений двовузловим скінченним елементом $e(i, j)$ з шістьма ступенями вільності [119]. Розрахункова схема попереднього деформованого стану динамічного відбійного елемента сепараційного пристрою представлена на рисунку 3.1.

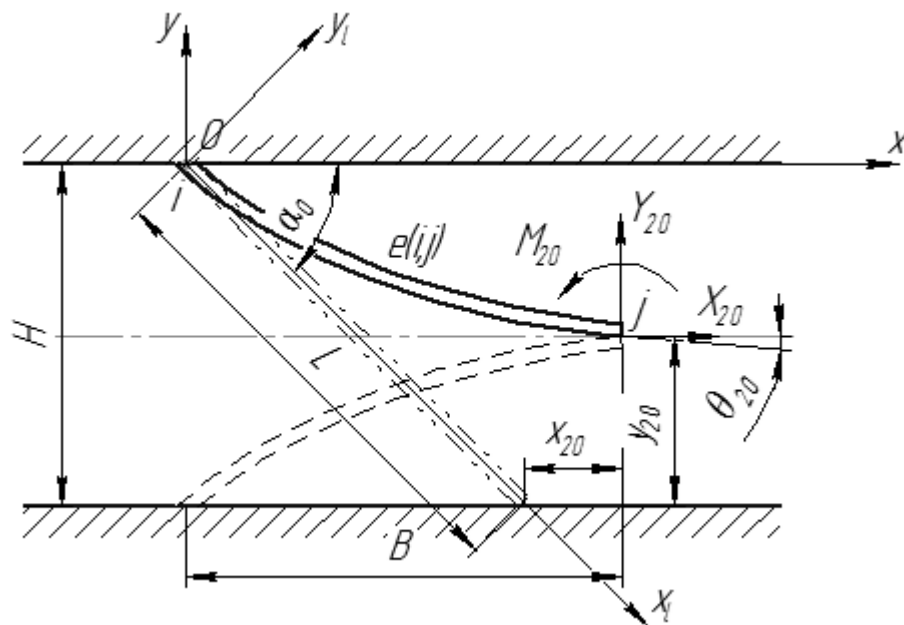


Рисунок 3.1 – Розрахункова схема попереднього деформованого стану
динамічного відбійного елемента сепараційного пристрою

Локальна система координат $x_l - y_l$ пов'язана із недеформованою серединною поверхнею динамічного відбійного елемента, глобальна система координат $x - y$ – із нерухомим корпусом.

Модель передбачає застосування функції прогину серединної поверхні у вигляді кубічного полінома, представленого у матричній формі:

$$y_l(x_l) = \{\Phi\}\{U\}_{0l}, \quad (3.1)$$

де $\{U\}_{0l} = \{y_{10l}, \theta_{10l}, y_{20l}, \theta_{20l}\}^T$ – вектор-стовпець вузлових переміщень;

$\{\Phi\}$ – вектор-рядок ортогональних функцій форми (інтерполяційна матриця):

$$\begin{aligned} \Phi_{1yl} &= 1 - 3\frac{x_l^2}{L^2} + 2\frac{x_l^3}{L^3}; \\ \Phi_{1\theta l} &= L\left(\frac{x_l}{L} - 2\frac{x_l^2}{L^2} + \frac{x_l^3}{L^3}\right); \\ \Phi_{2yl} &= 3\frac{x_l^2}{L^2} - 2\frac{x_l^3}{L^3}; \\ \Phi_{2\theta l} &= L\left(-\frac{x_l^2}{L^2} + \frac{x_l^3}{L^3}\right); \end{aligned} \quad (3.2)$$

де L – довжина пластини;

y_{10l}, y_{20l} – поперечні переміщення вузлів i, j ;

$\theta_{10l}, \theta_{20l}$ – кути повороту перерізів.

Індекс «0» вказує на розгляд умови статичної рівноваги; індекс « l » відповідає локальній системі координат; індекси «1», «2» вказують на приналежність фізичної величини вузлам i, j відповідно.

Зв'язок між переміщеннями відбійного елемента і силами, що спричинили його деформацію, визначається матричним рівнянням пружної рівноваги:

$$[C]_l\{U\}_{0l} = \{F\}_{0l}, \quad (3.3)$$

де $\{F\}_{0l} = \{Y_{10l}, M_{10l}, Y_{20l}, M_{20l}\}^T$ – вектор узагальнених сил, елементами якого є поперечні сили Y_{10l}, Y_{20l} , прикладені у вузлах i, j , та відповідні моменти M_{10l}, M_{20l} ; $[C]_l$ – локальна матриця жорсткості, елементи якої визначаються як другі похідні

за відповідними узагальненими переміщеннями від квадратичної форми потенціальної енергії деформації пластини:

$$C_{l_i,j} = \frac{\partial^2}{\partial U_{l_i} \partial U_{l_j}} \int_0^L \frac{1}{2} EI \left[\frac{d^2}{dx_l^2} (\{\Phi\}\{U\}_{l_i}) \right]^T \frac{d^2}{dx_l^2} (\{\Phi\}\{U\}_{l_i}) dx, \quad (3.4)$$

де E – модуль пружності 2-го роду матеріалу пластини;

$I = b^3 \cdot h / 12$ – момент інерції перерізу для пластини прямокутного перерізу висотою b і товщиною h .

Останній вираз не враховує енергію поздовжньої деформації динамічного відбійного елемента з огляду на його достатню гнучкість, і локальна матриця жорсткості набуває наступного вигляду:

$$[C]_l = \frac{EI}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6l & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

У глобальній системі координат x - y матричне рівняння пружної рівноваги має вигляд, аналогічний формулі (3.3):

$$[C]\{U\}_0 = \{F\}_0, \quad (3.6)$$

де $\{U\}_0 = \{x_{10}, y_{10}, \theta_{10}, x_{20}, y_{20}, \theta_{20}\}^T$ – вектор-стовпець вузлових переміщень
 $\{F\}_0 = \{X_{10}, Y_{10}, M_{10}, X_{20}, Y_{20}, M_{20}\}^T$ – вектор узагальнених вузлових сил із компонентами по осі x (X_{10}, X_{20}), y (Y_{10}, Y_{20}) і моментів (M_{10}, M_{20});

$[C]$ – глобальна матриця жорсткості.

Перехід від локальної до глобальної матриці жорсткості здійснюється за наступною формулою:

$$[C] = [T]^T [C]^E [T], \quad (3.7)$$

де $[T]$ – матриця трансформації:

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos \alpha_0 & -\sin \alpha_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin \alpha_0 & \cos \alpha_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_0 & -\sin \alpha_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin \alpha_0 & \cos \alpha_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (3.8)$$

$[C]^E_l$ – локальна матриця жорсткості (3.5), розширена до розміру 6×6 шляхом уведення значень, що відповідають за поздовжню деформацію:

$$[C]^E_l = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix}; \quad (3.9)$$

$A = b \cdot h$ – площа перерізу пластини.

Випадок гнучкого відбійного елемента дозволяє не враховувати у формулі (3.9) поздовжню жорсткість EA/L .

Урахування кінематичних граничних умов для вузла i ($x_{10} = y_{20} = 0$; $\theta_{10} = 0$) дозволяє розкласти рівняння (3.6) пружної рівноваги динамічного відбійного елемента на два матричних рівняння – окремо для вузлів i та j :

$$\begin{aligned} [C]_i \{U\}_{0j} &= \{F\}_{0i}; \\ [C]_j \{U\}_{0j} &= \{F\}_{0j}, \end{aligned} \quad (3.10)$$

де введені наступні позначення:

$$\begin{aligned}
 [C]_i &= \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} -12 \sin^2 \alpha_0 & -6 \sin 2\alpha_0 & 6L \sin \alpha_0 \\ -6 \sin 2\alpha_0 & -12 \cos^2 \alpha_0 & 6L \cos \alpha_0 \\ -6L \sin \alpha_0 & -6L \cos \alpha_0 & 2L^2 \end{bmatrix}; \\
 [C]_j &= \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 \sin^2 \alpha_0 & 6 \sin 2\alpha_0 & -6L \sin \alpha_0 \\ 6 \sin 2\alpha_0 & 12 \cos^2 \alpha_0 & -6L \cos \alpha_0 \\ -6L \sin \alpha_0 & -6L \cos \alpha_0 & 4L^2 \end{bmatrix}; \\
 \{F\}_{0i} &= \begin{Bmatrix} X_{10} \\ Y_{10} \\ M_{10} \end{Bmatrix}; \quad \{F\}_{0j} = \begin{Bmatrix} X_{20} \\ Y_{20} \\ M_{20} \end{Bmatrix}; \quad \{U\}_{0j} = \begin{Bmatrix} x_{20} \\ y_{20} \\ \theta_{20} \end{Bmatrix}.
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

Перше рівняння формули (3.10) дозволяє визначити внутрішні сили і момент, що виникають у закріпленні відбійного елемента в корпусі сепараційного пристрою:

$$\begin{Bmatrix} X_{10} \\ Y_{10} \\ M_{10} \end{Bmatrix} = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} -12 \sin^2 \alpha_0 & -6 \sin 2\alpha_0 & 6L \sin \alpha_0 \\ -6 \sin 2\alpha_0 & -12 \cos^2 \alpha_0 & 6L \cos \alpha_0 \\ -6L \sin \alpha_0 & -6L \cos \alpha_0 & 2L^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{10} \\ y_{10} \\ \theta_{10} \end{Bmatrix}, \tag{3.12}$$

або у розгорнутому вигляді:

$$\begin{aligned}
 X_{10} &= -\frac{6EI}{L^3} (2x_{20} \sin^2 \alpha_0 + y_{20} \sin 2\alpha_0 - \theta_{20} L \sin \alpha_0); \\
 Y_{10} &= -\frac{6EI}{L^3} (x_{20} \sin 2\alpha_0 + 2y_{20} \cos^2 \alpha_0 - \theta_{20} L \cos \alpha_0); \\
 M_{10} &= -\frac{2EI}{L^2} (3x_{20} \sin \alpha_0 + 3y_{20} \cos \alpha_0 - 2\theta_{20} L).
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

Друге рівняння формули (3.10) визначає внутрішні сили, що діють на вільний край відбійного елемента у результаті його попередньої деформації (при монтажу).

У подальшому матриця $[C]_j$ обирається за основну матрицю жорсткості системи, а друге рівняння (3.10) – за рівняння, що визначає деформований стан динамічного відбійного елемента.

$$\begin{Bmatrix} X_{20} \\ Y_{20} \\ M_{20} \end{Bmatrix} = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 \sin^2 \alpha_0 & 6 \sin 2\alpha_0 & -6L \sin \alpha_0 \\ 6 \sin 2\alpha_0 & 12 \cos^2 \alpha_0 & -6L \cos \alpha_0 \\ -6L \sin \alpha_0 & -6L \cos \alpha_0 & 4L^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{20} \\ y_{20} \\ \theta_{20} \end{Bmatrix}, \quad (3.14)$$

або у розгорнутому вигляді:

$$\begin{aligned} X_{20} &= \frac{6EI}{L^3} (2x_{20} \sin^2 \alpha_0 + y_{20} \sin 2\alpha_0 - \theta_{20} L \sin \alpha_0); \\ Y_{20} &= \frac{6EI}{L^3} (x_{20} \sin 2\alpha_0 + 2y_{20} \cos^2 \alpha_0 - \theta_{20} L \cos \alpha_0); \\ M_{20} &= -\frac{2EI}{L^2} (3x_{20} \sin \alpha_0 + 3y_{20} \cos \alpha_0 - 4\theta_{20} L). \end{aligned} \quad (3.15)$$

У другому рівнянні (3.10) і у подальшому індекс “ j ” не зазначається, а індекс «20» замінюється на «0».

Остаточним рівнянням пружної рівноваги, що визначає попередній деформований стан динамічного відбійного елемента, є рівняння (3.6) для наступних виразів глобальної матриці жорсткості $[C]$ та векторів вузлових переміщень $\{U\}_0$ і узагальнених сил $\{F\}_0$ відповідно до формули (3.14):

$$\begin{aligned} [C] &= \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 \sin^2 \alpha_0 & 6 \sin 2\alpha_0 & -6L \sin \alpha_0 \\ 6 \sin 2\alpha_0 & 12 \cos^2 \alpha_0 & -6L \cos \alpha_0 \\ -6L \sin \alpha_0 & -6L \cos \alpha_0 & 4L^2 \end{bmatrix}; \\ \{U\}_0 &= \begin{Bmatrix} x_{20} \\ y_{20} \\ \theta_{20} \end{Bmatrix}; \quad \{F\}_0 = \begin{Bmatrix} X_{20} \\ Y_{20} \\ M_{20} \end{Bmatrix}. \end{aligned} \quad (3.16)$$

Компоненти вектору переміщень $\{U\}_0$ визначаються геометрично за наступними залежностями:

$$\begin{aligned}
 x_{20} &= B - L \cos \alpha_0; \\
 y_{20} &= L \sin \alpha_0 - \frac{H}{2}; \\
 \theta_{20} &= \operatorname{arctg} \left(\frac{H}{B} - \operatorname{tg} \alpha_0 \right),
 \end{aligned}
 \tag{3.17}$$

де кут θ_{20} визначається наближено для параболічної форми вигину пластини; ширина B для zdeформованої пластини знаходиться у діапазоні (B_{\min}, B_{\max}) граничні значення якого визначаються за такими залежностями:

$$\begin{aligned}
 B_{\min} &= L - \frac{H}{2}; \\
 B_{\max} &= \sqrt{L^2 - \frac{H^2}{4}}.
 \end{aligned}
 \tag{3.18}$$

Найменше значення B_{\min} відповідає умові максимально можливої деформації елемента, найбільше значення B_{\max} – повороту прямолінійної форми елемента.

3.2 Розв'язання стаціонарної задачі гідроаеропружності

Деформація пружних елементів в результаті під дією потоку газу в глобальній системі координат $x - y$ можна описати матричним рівнянням:

$$[C]\{U\}_s = \{F\}_s,
 \tag{3.19}$$

де $[C]$ – матриця жорсткості динамічного відбійного елемента, що визначається за формулою (3.16);

$\{U\}_s$ – вектор стаціонарних складових переміщення.

Вектор узагальнених стаціонарних вузлових сил $\{F\}_s$ можна представити у вигляді суми вектора узагальнених сил $\{F\}_0$, визначених у результаті попереднього статичного розрахунку за формулою (3.14), і вектора $\{\delta F\}_s$ стаціонарних складових узагальнених зовнішніх сил [120]:

$$\{F\}_s = \{F\}_0 + \{\delta F\}_s. \quad (3.20)$$

Останній визначається через розподілене навантаження $p_s(x)$, отримане шляхом інтегрування по висоті пластини тиску, отриманого у результаті експериментальних досліджень або у результаті числового моделювання взаємодії газорідного потоку з динамічним відбійним елементом сепараційного пристрою у до критичному режимі, коли швидкість потоку не спричиняє явища флатера.

Для урахування навантаження, розподіленого по довжині zdeформованого відбійного елемента за довільним (або заданим) законом $p_s(x)$, здійснюється перехід до еквівалентної системи сил у вузлі j . Для цього необхідно, щоб робота дійсної системи навантаження на відповідних переміщеннях дорівнювала роботі еквівалентної системи сил і моментів на переміщеннях вузла j .

Вектор узагальнених вузлових сил скінченного елемента у локальній системі координат визначається за наступною формулою:

$$\{\delta F\}_{sl} = \int_0^L \Phi^T p_s(x_l) dx_l. \quad (3.21)$$

У стаціонарній постановці задачі з достатнім для практичних цілей представленням функції розподілу навантаження у вигляді квадратичного полінома

$$p_s(x_l) = p_1 - \Delta p \cdot \frac{x_l}{l} - \frac{a}{2} \cdot \frac{x_l}{L} \left(1 - \frac{x_l}{L}\right), \quad (3.22)$$

де $\Delta p = p_1 - p_2$ – перепад тиску по довжині елемента;

$a = d^2 p(x_l)/dx_l^2$ – кривизна епюри розподіленого навантаження (для лінійного закону розподілу навантаження коефіцієнт $a = 0$), вектор узагальнених вузлових сил визначатиметься за формулою:

$$\{\delta F\}_{sl} = L \cdot \int_0^1 \begin{Bmatrix} 1 - 3\xi^2 + 2\xi^3 \\ L(\xi - 2\xi^2 + \xi^3) \\ 3\xi^2 - 2\xi^3 \\ L(-\xi^2 + \xi^3) \end{Bmatrix} \left[p_1 - \Delta p \xi + \frac{1}{2} a \xi (1 - \xi) \right] d\xi, \quad (3.23)$$

де $\xi = x / L$ – відносна координата.

Після інтегрування компоненти вектора узагальнених вузлових сил $\{\delta F\}_{sl} = \{\delta Y_{1l}, \delta M_{1l}, \delta Y_{2l}, \delta M_{2l}\}^T$ визначаються такими залежностями:

$$\begin{aligned} \delta Y_{1l} &= \frac{1}{2} L \left(p_1 - 0.3 \Delta p + \frac{a}{12} \right); \\ \delta M_{1l} &= \frac{1}{12} L^2 \left(p_1 - 0.4 \Delta p + \frac{a}{10} \right); \\ \delta Y_{2l} &= \frac{1}{2} L \left(p_1 - 0.7 \Delta p + \frac{a}{12} \right); \\ \delta M_{2l} &= -\frac{1}{12} L^2 \left(p_1 - 0.6 \Delta p + \frac{a}{10} \right). \end{aligned} \quad (3.24)$$

У глобальній системі координат компоненти вектора узагальнених вузлових сил $\{\delta F\}_s = \{\delta X_1, \delta Y_1, \delta M_1, \delta X_2, \delta Y_2, \delta M_2\}^T$, що визначається за формулою

$$\{\delta F\}_s = [T] \{\delta F\}_{sl}, \quad (3.25)$$

набувають наступного вигляду:

$$\begin{aligned} \delta X_1 &= -\frac{1}{2} L \left(p_1 - 0.3 \Delta p + \frac{a}{12} \right) \sin \alpha_0; \\ \delta Y_1 &= \frac{1}{2} L \left(p_1 - 0.3 \Delta p + \frac{a}{12} \right) \cos \alpha_0; \\ \delta M_1 &= \frac{1}{12} L^2 \left(p_1 - 0.4 \Delta p + \frac{a}{10} \right); \\ \delta X_2 &= -\frac{1}{2} L \left(p_1 - 0.7 \Delta p + \frac{a}{12} \right) \sin \alpha_0; \\ \delta Y_2 &= \frac{1}{2} L \left(p_1 - 0.7 \Delta p + \frac{a}{12} \right) \cos \alpha_0; \\ \delta M_2 &= -\frac{1}{12} L^2 \left(p_1 - 0.6 \Delta p + \frac{a}{10} \right). \end{aligned} \quad (3.26)$$

З урахуванням кінематичних граничних умов для вузла i ($x_{10} = y_{20} = 0$; $\theta_{10} = 0$) вектор-стовпець стаціонарних значень узагальнених сил

$$\{\delta F\}_s = \begin{Bmatrix} -\frac{1}{2}L\left(p_1 - 0.7\Delta p + \frac{a}{12}\right)\sin\alpha_0 \\ \frac{1}{2}L\left(p_1 - 0.7\Delta p + \frac{a}{12}\right)\cos\alpha_0 \\ -\frac{1}{12}L^2\left(p_1 - 0.6\Delta p + \frac{a}{10}\right) \end{Bmatrix}. \quad (3.27)$$

Вектор вузлових переміщень $\{U\}_s$ можна представити у вигляді суми вектора переміщень $\{U\}_0$ як результату попереднього статичного навантаження пластини і вектора $\{\delta U\}_s$ вимушених складових переміщення [120]:

$$\{U\}_s = \{U\}_0 + \{\delta U\}_s. \quad (3.28)$$

Отримані вирази дозволяють переписати рівняння стаціонарної деформації динамічного відбійного елемента у наступному вигляді:

$$[C]\{U\}_0 + [C]\{\delta U\}_s = \{F\}_0 + \{\delta F\}_s, \quad (3.29)$$

яке зводиться до такого матричного рівняння:

$$[C]\{\delta U\}_s = \{\delta F\}_s, \quad (3.30)$$

що містить виключно вимушені компоненти зовнішніх сил $\{\delta F\}_s$ і відповідних переміщень $\{\delta U\}_s$.

Дослідження процесу розділення багатокомпонентних сумішей нерозривно пов'язане із розв'язанням задачі гідроаеропружної взаємодії газорідного потоку із динамічними відбійними елементами сепараційного обладнання. З цією метою математичну модель коливань, що описується матричним рівнянням (3.27), необхідно доповнити виразом, що описує залежність вектора $\{F\}_s$

узагальнених динамічних складових сил від вектора переміщень $\{U\}_s$ і швидкості потоку u .

У подальшому система буде спрощена до системи з двома ступенями вільності – поперечного переміщення δu і кута повороту перерізу $\delta\theta$. При такому підході матриця жорсткості набуває наступного вигляду:

$$[C] = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 \cos^2 \alpha_0 & -6L \cos \alpha_0 \\ -6L \cos \alpha_0 & 4L^2 \end{bmatrix}. \quad (3.31)$$

Зменшення кількості ступенів вільності механічної системи «газорідинний потік – динамічний відбійний елемент» обумовлено розглядом переважаючих поперечних деформацій пластини, дозволяє спростити математичну модель.

З позицій теорії гідроаеропружності [120] вектор узагальнених стаціонарних сил можна представити наступною залежністю:

$$\{\delta F\}_s = [\Delta C] \{\delta U\}_s, \quad (3.32)$$

де $[\Delta C]$ – матриця приєднаної жорсткості, елементи якої є функцією швидкості потоку u .

За основу для визначення компонентів цієї матриці береться теорія обтікання тіла потоком рідини. Ця задача розв'язується методами конформних перетворень, гідродинамічних особливостей, операційного числення із застосуванням перетворень Лапласа і Фур'є, представлених у роботі [120].

Питомі значення узагальнених сил для системи «газорідинний потік – динамічний відбійний елемент», визначаються такою залежністю [120]:

$$\begin{aligned} \delta Y &= 2\pi \rho u^2 c(k) \delta \theta; \\ \delta M &= -\pi \rho u^2 c(k) \delta \theta, \end{aligned} \quad (3.33)$$

де ρ – густина рідини; $c(k)$ – функція Теодорсена, що може бути визначена через функції Бесселя або Ханкеля [120].

У загальному випадку компоненти вектора узагальнених сил можна записати у такому вигляді:

$$\begin{aligned}\delta Y &= c_1 u^2 \delta \theta; \\ \delta M &= c_2 u^2 \delta \theta,\end{aligned}\tag{3.34}$$

де c_1, c_2 – коефіцієнти приєднаної жорсткості, які можуть бути розраховані методами теорії оцінювання на підставі результатів фізичного експерименту, числового моделювання або їх комбінації.

Рівняння стаціонарної гідроаеропружності динамічних сепараційних елементів (3.27) з урахуванням формул (3.29) і (3.32) набуває наступного вигляду:

$$[C]_{\Sigma} \{\delta U\}_s = \{0\},\tag{3.35}$$

де $\{0\}$ – нульовий вектор-стовпець; $[C]_{\Sigma}$ – матриця сумарної жорсткості системи:

$$[C]_{\Sigma} = [C] - [\Delta C] = \begin{bmatrix} \frac{12EI}{L^3} \cos^2 \alpha_0 & -\left(\frac{6EI}{L^2} \cos \alpha_0 + c_1 u^2\right) \\ -\frac{6EI}{L^2} \cos \alpha_0 & \frac{4EI}{L} - c_2 u^2 \end{bmatrix};\tag{3.36}$$

Отримане матричне рівняння може бути переписане у розгорнутому вигляді як система алгебраїчних рівнянь сумісних поперечних і кутових деформацій динамічного відбійного елемента сепараційного пристрою:

$$\begin{cases} \frac{12EI}{L^3} \cos^2 \alpha_0 \delta y - \left(\frac{6EI}{L^2} \cos \alpha_0 + c_1 u^2\right) \delta \theta = 0; \\ -\frac{6EI}{L^2} \cos \alpha_0 \delta y + \left(\frac{4EI}{L} - c_2 u^2\right) \delta \theta = 0. \end{cases}\tag{3.37}$$

Ця система рівнянь дозволяє визначити критичну швидкість газорідного потоку, за якої виникає явище дивергенції динамічних відбійних елементів сепараційних пристроїв. З умови існування нетривіальних розв'язків системи рівнянь (3.36) маємо:

$$\det[C]_{\Sigma} = \begin{vmatrix} \frac{12EI}{L^3} \cos^2 \alpha_0 & -\left(\frac{6EI}{L^2} \cos \alpha_0 + c_1 u^2\right) \\ -\frac{6EI}{L^2} \cos \alpha_0 & \frac{4EI}{L} - c_2 u^2 \end{vmatrix} = 0, \quad (3.38)$$

звідки визначається критична швидкість дивергенції:

$$u_{div} = \sqrt{\frac{EI/L}{c_2 + 0,5 c_1 L \sec \alpha_0}}. \quad (3.39)$$

3.3 Ідентифікація параметрів математичної моделі нестационарної задачі гідроаеропружності

Урахування нестационарних компонентів тиску p і, відповідно, підйомної сили δY та момента δM дозволяє уточнити коефіцієнти c_1 , c_2 приєднаної жорсткості, а також оцінити коефіцієнти демпфірування b_1 , b_2 із умови еквівалентності системи узагальнених динамічних складових сил, розподіленому по поверхні здеформованої пластини:

$$\sum_{i=1}^N \delta A_{Yi} + \sum_{i=1}^N \delta A_{Mi} = \sum_{i=1}^N \delta A_{pi}, \quad (3.51)$$

де δA_{Yi} , δA_{Mi} , δA_{pi} – елементарні роботи динамічних складових підйомної сили δY на переміщенні δy , момента δM на кутовому переміщенні $\delta \theta$, а також тиску, розподіленого по поверхні пластини, на відповідному нормальному переміщенні δw_n у момент часу $t = i \cdot \Delta t$:

$$\begin{aligned}
\delta A_{Y_i} &= Y_i \delta y_i; \\
\delta A_M &= M_i \delta \theta_i; \\
\delta A_p &= \iint_{(S)} p_i \delta w_{ni} dS,
\end{aligned}
\tag{3.52}$$

де i – індекс ($i = 1, 2, \dots, N$); N – кількість часових проміжків Δt , які визначаються через період T або частоту ω коливань пластини:

$$\Delta t = \frac{T}{N} = \frac{2\pi}{\omega N}.
\tag{3.53}$$

З урахуванням виразів (3.20) і (3.34) перші дві формули (2.52) набувають наступного вигляду:

$$\begin{aligned}
\delta A_{Y_i} &= (Y_0 + c_1 u^2 \delta \theta_i - b_1 u \delta \dot{y}_i) \delta y_i; \\
\delta A_{M_i} &= (M_0 + c_2 u^2 \delta \theta_i - b_2 u \delta \dot{y}_i) \delta \theta_i.
\end{aligned}
\tag{3.54}$$

Робота гідродинамічного тиску визначається у результаті числового експерименту.

У відповідності до методу найменших квадратів сумарна квадратична похибка для рівності (3.51):

$$\begin{aligned}
R = \sum_{j=1}^n \left\{ \sum_{i=1}^N \left[Y_0 + c_1 (u^{<j>})^2 \delta \theta_i^{<j>} - b_1 u^{<j>} \delta \dot{y}_i^{<j>} \right] \delta y_i^{<j>} + \right. \\
\left. + \sum_{i=1}^N \left[M_0 + c_2 (u^{<j>})^2 \delta \theta_i^{<j>} - b_2 u^{<j>} \delta \dot{y}_i^{<j>} \right] \delta \theta_i^{<j>} - \sum_{i=1}^N \delta A_{p_i}^{<j>} \right\}^2 \rightarrow \min.
\end{aligned}
\tag{3.55}$$

Невідомі параметри c_1 , c_2 , b_1 , b_2 оцінюються шляхом мінімізації функціонала R як розв'язки наступної системи чотирьох лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{\partial R}{\partial c_1} = 0; \\ \frac{\partial R}{\partial b_1} = 0; \\ \frac{\partial R}{\partial c_2} = 0; \\ \frac{\partial R}{\partial b_2} = 0, \end{cases} \quad (3.56)$$

яка після тотожних перетворень набуває матричного вигляду:

$$[K]\{c\} = \{r\}, \quad (3.57)$$

де $\{c\} = \{c_1, b_1, c_2, b_2\}^T$ – вектор-стовпець оцінюваних коефіцієнтів;

$[K]$ – матриця, елементи якої визначаються наступними виразами:

$$\begin{aligned} K_{11} &= \sum_{j=1}^n (u^{<j>})^4 \left(\sum_{i=1}^N \delta y_i^{<j>} \delta \theta_i^{<j>} \right)^2; \quad K_{12} = -K_{21}; \\ K_{13} &= \sum_{j=1}^n (u^{<j>})^4 \left[\sum_{i=1}^N (\delta \theta_i^{<j>})^2 \right] \left(\sum_{i=1}^N \delta y_i^{<j>} \delta \theta_i^{<j>} \right); \\ K_{14} &= -K_{41}; \quad K_{21} = \sum_{j=1}^n (u^{<j>})^3 \left(\sum_{i=1}^N \delta \dot{y}_i^{<j>} \delta y_i^{<j>} \right) \left(\sum_{i=1}^N \delta y_i^{<j>} \delta \theta_i^{<j>} \right); \\ K_{22} &= -\sum_{j=1}^n (u^{<j>})^2 \left(\sum_{i=1}^N \delta \dot{y}_i^{<j>} \delta y_i^{<j>} \right)^2; \quad K_{23} = \sum_{j=1}^n (u^{<j>})^3 \left(\sum_{i=1}^N \delta \dot{y}_i^{<j>} \delta y_i^{<j>} \right) \left[\sum_{i=1}^N (\delta \theta_i^{<j>})^2 \right]; \\ K_{24} &= -\sum_{j=1}^n (u^{<j>})^2 \left(\sum_{i=1}^N \delta \dot{y}_i^{<j>} \delta y_i^{<j>} \right) \left(\sum_{i=1}^N \delta \dot{y}_i^{<j>} \delta \theta_i^{<j>} \right); \quad K_{31} = K_{13}; \quad K_{32} = -K_{23}; \\ K_{33} &= \sum_{j=1}^n (u^{<j>})^4 \left[\sum_{i=1}^N (\delta \theta_i^{<j>})^2 \right]^2; \quad K_{34} = -K_{43}; \\ K_{41} &= \sum_{j=1}^n (u^{<j>})^3 \left(\sum_{i=1}^N \delta \dot{y}_i^{<j>} \delta \theta_i^{<j>} \right) \left(\sum_{i=1}^N \delta y_i^{<j>} \delta \theta_i^{<j>} \right); \quad K_{42} = K_{24}; \\ K_{43} &= \sum_{j=1}^n (u^{<j>})^3 \left(\sum_{i=1}^N \delta \dot{y}_i^{<j>} \delta \theta_i^{<j>} \right) \left[\sum_{i=1}^N (\delta \theta_i^{<j>})^2 \right]; \quad K_{44} = -\sum_{j=1}^n (u^{<j>})^2 \left(\sum_{i=1}^N \delta \dot{y}_i^{<j>} \delta \theta_i^{<j>} \right)^2. \end{aligned} \quad (3.58)$$

$\{r\}$ – вектор-стовпець правих частин системи (3.39):

$$\begin{aligned}
r_1 &= \sum_{j=1}^n (u^{<j>})^2 \left(\sum_{i=1}^N \delta A_{pi}^{<j>} - Y_0 \sum_{i=1}^N \delta y_i^{<j>} - M_0 \sum_{i=1}^N \delta \theta_i^{<j>} \right) \left(\sum_{i=1}^N \delta y_i^{<j>} \delta \theta_i^{<j>} \right); \\
r_2 &= \sum_{j=1}^n u^{<j>} \left(\sum_{i=1}^N \delta A_{pi}^{<j>} - Y_0 \sum_{i=1}^N \delta y_i^{<j>} - M_0 \sum_{i=1}^N \delta \theta_i^{<j>} \right) \left(\sum_{i=1}^N \delta \dot{y}_i^{<j>} \delta y_i^{<j>} \right); \\
r_3 &= \sum_{j=1}^n (u^{<j>})^2 \left(\sum_{i=1}^N \delta A_{pi}^{<j>} - Y_0 \sum_{i=1}^N \delta y_i^{<j>} - M_0 \sum_{i=1}^N \delta \theta_i^{<j>} \right) \left(\sum_{i=1}^N \delta \theta_i^{<j>} \right)^2; \\
r_4 &= \sum_{j=1}^n u^{<j>} \left(\sum_{i=1}^N \delta A_{pi}^{<j>} - Y_0 \sum_{i=1}^N \delta y_i^{<j>} - M_0 \sum_{i=1}^N \delta \theta_i^{<j>} \right) \left(\sum_{i=1}^N \delta \dot{y}_i^{<j>} \delta \theta_i^{<j>} \right).
\end{aligned} \tag{3.59}$$

Ураховуючи, що за повний період

$$\sum_{i=1}^N \delta y_i^{<j>} = 0; \quad \sum_{i=1}^N \delta \theta_i^{<j>} = 0, \tag{3.60}$$

формула (3.59) спрощується і не залежить від значень Y_0 та M_0 :

$$\begin{aligned}
r_1 &= \sum_{j=1}^n (u^{<j>})^2 \left(\sum_{i=1}^N \delta A_{pi}^{<j>} \right) \left(\sum_{i=1}^N \delta y_i^{<j>} \delta \theta_i^{<j>} \right); \\
r_2 &= \sum_{j=1}^n u^{<j>} \left(\sum_{i=1}^N \delta A_{pi}^{<j>} \right) \left(\sum_{i=1}^N \delta \dot{y}_i^{<j>} \delta y_i^{<j>} \right); \\
r_3 &= \sum_{j=1}^n (u^{<j>})^2 \left(\sum_{i=1}^N \delta A_{pi}^{<j>} \right) \left(\sum_{i=1}^N \delta \theta_i^{<j>} \right)^2; \\
r_4 &= \sum_{j=1}^n u^{<j>} \left(\sum_{i=1}^N \delta A_{pi}^{<j>} \right) \left(\sum_{i=1}^N \delta \dot{y}_i^{<j>} \delta \theta_i^{<j>} \right).
\end{aligned} \tag{3.61}$$

Розв'язок рівняння (3.57) дозволяє визначити вектор $\{c\}$ коефіцієнтів жорсткості і демпфірування:

$$\{c\} = [K]^{-1} \{r\}. \tag{3.62}$$

Із достатньою для практичних цілей коефіцієнти жорсткості та демпфірування можуть бути визначеними при розгляді основних гармонік вимушених поперечних і кутових коливань динамічних відбійних елементів із частотою ω

$$\begin{aligned}\delta y^{<j>}(t) &= A_1^{<j>} \sin \omega t; \\ \delta \theta^{<j>}(t) &= A_2^{<j>} \sin \omega t,\end{aligned}\quad (3.63)$$

де $A_1^{<j>}$, $A_2^{<j>}$ – експериментально визначені для різних значень швидкості $u^{<j>}$ газорідинного потоку амплітуди поперечних і кутових коливань відповідно.

Подальші дослідження проводяться з огляду на наступні перетворення:

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^N \delta y_i^{<j>} \delta \theta_i^{<j>} &\rightarrow \int_0^T \delta y^{<j>}(t) \delta \theta^{<j>}(t) dt = \frac{\pi}{\omega} A_1^{<j>} A_2^{<j>}; \\ \sum_{i=1}^N (\delta \theta_i^{<j>})^2 &\rightarrow \int_0^T [\delta \theta^{<j>}(t)]^2 dt = \frac{\pi}{\omega} (A_2^{<j>})^2; \\ \sum_{i=1}^N \delta \dot{y}_i^{<j>} \delta y_i^{<j>} &\rightarrow \int_0^T \delta \dot{y}^{<j>}(t) \delta y^{<j>}(t) dt = \pi (A_1^{<j>})^2; \\ \sum_{i=1}^N \delta \dot{y}_i^{<j>} \delta \theta_i^{<j>} &\rightarrow \int_0^T \delta \dot{y}^{<j>}(t) \delta \theta^{<j>}(t) dt = \pi A_1^{<j>} A_2^{<j>}.\end{aligned}\quad (3.64)$$

Підстановка останніх виразів у формули (3.58) і (3.61) дозволяють переписати рівняння (3.57) у такому вигляді:

$$\frac{\pi}{\omega} [\bar{K}] \{c\} = \{\bar{r}\}, \quad (3.65)$$

де елементи матриці $[\bar{K}]$ і вектора-стовпця $\{c\}$ визначаються за формулами:

$$\begin{aligned}\bar{K}_{11} &= \sum_{j=1}^n (u^{<j>})^4 (A_1^{<j>})^2 (A_2^{<j>})^2; \quad \bar{K}_{12} = -\bar{K}_{21}; \quad \bar{K}_{13} = \sum_{j=1}^n (u^{<j>})^4 A_1^{<j>} (A_2^{<j>})^3; \\ \bar{K}_{14} &= -\bar{K}_{23}; \quad \bar{K}_{21} = \omega \sum_{j=1}^n (u^{<j>})^3 (A_1^{<j>})^3 A_2^{<j>}; \quad \bar{K}_{22} = -\omega^2 \sum_{j=1}^n (u^{<j>})^2 (A_1^{<j>})^4; \\ \bar{K}_{23} &= \omega \sum_{j=1}^n (u^{<j>})^3 (A_1^{<j>})^2 (A_2^{<j>})^2; \quad \bar{K}_{24} = -\omega^2 \sum_{j=1}^n (u^{<j>})^2 (A_1^{<j>})^3 A_2^{<j>}; \\ \bar{K}_{31} &= \bar{K}_{13}; \quad \bar{K}_{32} = -\bar{K}_{23}; \quad \bar{K}_{33} = \sum_{j=1}^n (u^{<j>})^4 (A_2^{<j>})^4; \quad \bar{K}_{34} = -\bar{K}_{43}; \\ \bar{K}_{41} &= \bar{K}_{23}; \quad \bar{K}_{42} = \bar{K}_{24}; \\ \bar{K}_{43} &= \omega \sum_{j=1}^n (u^{<j>})^3 A_1^{<j>} (A_2^{<j>})^3; \quad \bar{K}_{44} = -\omega^2 \sum_{j=1}^n (u^{<j>})^2 (A_1^{<j>})^2 (A_2^{<j>})^2;\end{aligned}\quad (3.66)$$

$$\begin{aligned}
\bar{r}_1 &= \sum_{j=1}^n (u^{<j>})^2 A_p^{<j>} A_1^{<j>} A_2^{<j>}; \\
\bar{r}_2 &= \omega \sum_{j=1}^n u^{<j>} A_p^{<j>} (A_1^{<j>})^2; \\
\bar{r}_3 &= \sum_{j=1}^n (u^{<j>})^2 A_p^{<j>} (A_2^{<j>})^2; \\
\bar{r}_4 &= \omega \sum_{j=1}^n u^{<j>} A_p^{<j>} A_1^{<j>} A_2^{<j>},
\end{aligned} \tag{3.67}$$

де введений інтеграл $A_p^{<j>}$ від гідродинамічного тиску за період T :

$$\sum_{i=1}^N \delta A_{pi}^{<j>} \rightarrow A_p^{<j>} = \int_0^T \delta A_p^{<j>}(t) dt. \tag{3.68}$$

За такого підходу сумарна кількість параметрів матриці $[\bar{K}]$ і вектор-стовпця $\{\bar{r}\}$ зменшується з 20 до 12.

Рівняння (3.67) має наступний розв'язок:

$$\{c\} = \frac{\omega}{\pi} [\bar{K}]^{-1} \{\bar{r}\}. \tag{3.69}$$

3.4 Ідентифікація параметрів математичної моделі стаціонарної задачі гідроаеропружності

Визначення невідомих параметрів математичної моделі гідроаеропружної взаємодії газорідного потоку з динамічними відбійними елементами сепараційних пристроїв може бути здійснене методами теорії оцінювання (зокрема, регресійного аналізу) із застосуванням результатів числового моделювання процесу сепарації газорідної суміші.

З огляду на складність розв'язання задачі ідентифікації параметрів математичної моделі, що описує нестационарну задачу гідроаеропружності системи «газорідний потік – динамічний сепараційний елемент», доцільним є попередній розгляд аналогічної задачі в стаціонарній постановці.

Зокрема, для уточнення коефіцієнтів c_1 , c_2 приєднаної жорсткості застосовується умова еквівалентності системи узагальнених динамічних складових сил δY , δM тиску p , розподіленому по поверхні здеформованої пластини (рис. 3.2):

$$\delta A_{Y_s} + \delta A_{M_s} = \delta A_{p_s}, \quad (3.40)$$

де δA_{Y_s} , δA_{M_s} , δA_{p_s} – елементарні роботи вимушених складових стаціонарної підйомної сили δY_s на переміщенні δy , стаціонарної компоненти моменту δM_s на кутовому переміщенні $\delta \theta$, а також тиску, розподіленого по поверхні пластини, на відповідному нормальному переміщенні δw_n :

$$\begin{aligned} \delta A_{Y_s} &= Y_s \delta y; \\ \delta A_{M_s} &= M_s \delta \theta; \\ \delta A_{p_s} &= \iint_{(S)} p_s \delta w_n dS, \end{aligned} \quad (3.41)$$

де інтегрування ведеться по поверхні S динамічного відбійного елемента.

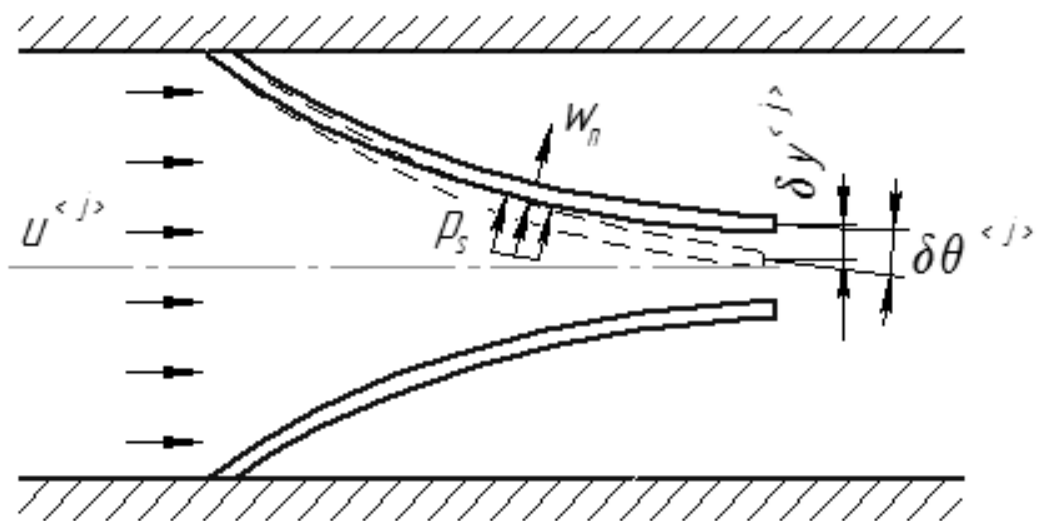


Рисунок 3.2 – Розрахункова схема для визначення елементарних робіт тиску, моменту і підйомної сили

З урахуванням виразів (3.20) і (3.34) перші дві формули (3.41) набувають наступного вигляду:

$$\begin{aligned}\delta A_Y &= (Y_0 + c_1 u^2 \delta \theta) \delta y; \\ \delta A_M &= (M_0 + c_2 u^2 \delta \theta) \delta \theta.\end{aligned}\quad (3.42)$$

Робота тиску визначається у результаті числового експерименту.

З огляду на стаціонарну постановку, умова (3.40) має виконуватись для будь-якого значення швидкості потоку $u^{<j>}$ із робочого або досліджуваного діапазону $u_1 \leq u \leq u_n$, де n – кількість досліджуваних режимів; j – номер режиму ($j = 1, 2, \dots, n$).

У відповідності до методу найменших квадратів сумарна квадратична похибка для рівності (3.40) з урахуванням виразів (3.42)

$$R = \sum_{j=1}^n \left\{ \left[Y_0 + c_1 (u^{<j>})^2 \delta \theta^{<j>} \right] \delta y^{<j>} + \left[M_0 + c_2 (u^{<j>})^2 \delta \theta^{<j>} \right] \delta \theta^{<j>} - \delta A_{ps}^{<j>} \right\}^2 \rightarrow \min. \quad (3.43)$$

Невідомі коефіцієнти жорсткості c_1, c_2 визначаються шляхом мінімізації функціонала R у результаті розв'язання системи двох лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{\partial R}{\partial c_1} = 0; \\ \frac{\partial R}{\partial c_2} = 0, \end{cases} \quad (3.44)$$

яка з урахуванням виразу (3.43) після тотожних перетворень набуває наступного вигляду:

$$\left\{ \begin{aligned} & \sum_{j=1}^n (c_1 \delta y^{<j>} + c_2 \delta \theta^{<j>}) (u^{<j>})^4 \delta y^{<j>} (\delta \theta^{<j>})^2 = \\ & = \sum_{j=1}^n (\delta A_{ps}^{<j>} - Y_0 \delta y^{<j>} - M_0 \delta \theta^{<j>}) (u^{<j>})^2 \delta y^{<j>} \delta \theta^{<j>} ; \\ & \sum_{j=1}^n (c_1 \delta y^{<j>} + c_2 \delta \theta^{<j>}) (u^{<j>})^4 (\delta \theta^{<j>})^3 = \\ & = \sum_{j=1}^n (\delta A_{ps}^{<j>} - Y_0 \delta y^{<j>} - M_0 \delta \theta^{<j>}) (u^{<j>})^2 (\delta \theta^{<j>})^2 . \end{aligned} \right. \quad (3.45)$$

Остання система може бути переписана в матричній формі:

$$[K]_s \{c\}_s = \{r\}_s, \quad (3.46)$$

де $\{c\}_s = \{c_1, c_2\}^T$ – вектор-стовпець невідомих коефіцієнтів;

$[K]_s$ – матриця, елементи якої визначаються наступними виразами:

$$\begin{aligned} K_{11} &= \sum_{j=1}^n (u^{<j>})^4 (\delta y^{<j>})^2 (\delta \theta^{<j>})^2; & K_{12} &= \sum_{j=1}^n (u^{<j>})^4 \delta y^{<j>} (\delta \theta^{<j>})^3; \\ K_{21} &= K_{12}; & K_{22} &= \sum_{j=1}^n (u^{<j>})^4 (\delta \theta^{<j>})^4; \end{aligned} \quad (3.47)$$

$\{r\}_s$ – вектор-стовпець правих частин системи (3.45):

$$\begin{aligned} r_1 &= \sum_{j=1}^n (\delta A_{ps}^{<j>} - Y_0 \delta y^{<j>} - M_0 \delta \theta^{<j>}) (u^{<j>})^2 \delta y^{<j>} \delta \theta^{<j>} ; \\ r_2 &= \sum_{j=1}^n (\delta A_{ps}^{<j>} - Y_0 \delta y^{<j>} - M_0 \delta \theta^{<j>}) (u^{<j>})^2 (\delta \theta^{<j>})^2 . \end{aligned} \quad (3.48)$$

Розв'язок рівняння (3.46)

$$\{c\}_s = [K]_s^{-1} \{r\}_s \quad (3.49)$$

дозволяє визначити коефіцієнти жорсткості:

$$c_1 = \frac{K_{22}r_1 - K_{12}r_2}{K_{11}K_{22} - K_{12}^2};$$

$$c_2 = \frac{K_{11}r_2 - K_{12}r_1}{K_{11}K_{22} - K_{12}^2}.$$
(3.50)

3.5 Розроблення математичної моделі процесу гідроаеропружної взаємодії

Розробка математичної моделі деформації стінки ґрунтується як на фізичних, так і геометричних підходах. Для випадку лінійного матеріалу перший заснований на законі Гука для ізотропного матеріалу в одновимірній формі

$$\Delta l = \delta \cdot F,$$
(3.70)

де Δl - зміщення зовнішнього краю стінки, м;

δ - жорсткість, м/Н.

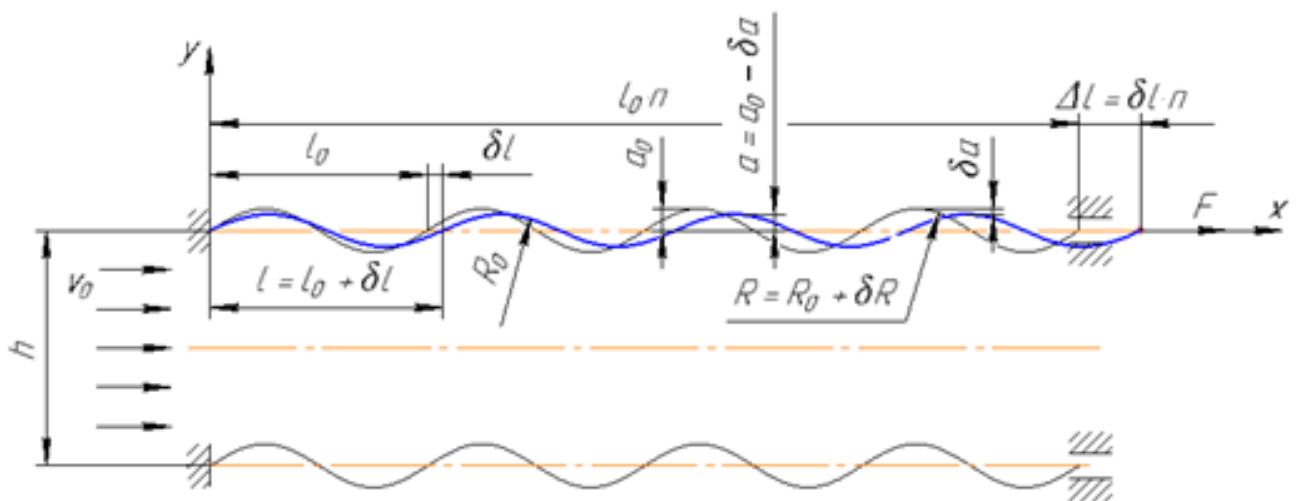


Рисунок 3.3 - Схема проекту каналу з деформівними синусоїдальними стінками: h - середня ширина, м; v_0 - швидкість на вході, м/с; l_0, l – довжина однієї хвилі, м; n - кількість хвиль; a_0, a - амплітуди, м; R_0, R – радіус кривизни, м; F -еквівалентна сила, Н

Еквівалентну силу $F(N)$ можна визначити чисельно з наступного рівняння енергії:

$$A(F) = A(p), \quad (3.71)$$

де $A(F)$ та $A(p)$ - дії сили F та гідродинамічного тиску p відповідно.

Геометрична модель заснована на аналізі змін в параметрах наступної синусоїдальної кривої (рисунок 3.3):

$$y = a \cdot \sin \lambda x, \quad (3.72)$$

де x - поздовжня координата, м;

a – амплітуда, м;

$\lambda = \frac{2\pi}{l}$ - хвильовий параметр (m^{-1}), який обернено пропорційний довжині l ,

м.

Загальна довжина однієї хвилі визначається наступним чином:

$$L = \int_0^l \sqrt{1 + \left[\frac{dy(x)}{dx} \right]^2} dx. \quad (3.73)$$

Використання неповного еліптичного інтеграла Лежандра другого роду [118]:

$$E(k) = \int_0^{2\pi} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta} d\theta \quad (3.74)$$

дозволяє переписати вираз (3.73). У цьому випадку після ідентичних перетворень слід написати:

$$L = \frac{a}{k} E(k), \quad (3.75)$$

де $k = [0,1)$ - наступний безрозмірний параметр:

$$k = \frac{a\lambda}{\sqrt{1+(a\lambda)^2}}. \quad (3.76)$$

Слід зазначити, що у випадку відносно малих амплітуд або великих довжин хвиль безрозмірний параметр може бути спрощений до $k \approx a \cdot \lambda$. Отже, загальна довжина однієї хвилі визначається наступним чином:

$$L = \frac{E(a\lambda)}{\lambda}. \quad (3.77)$$

Використання методу малих збурень дозволяє написати наступне:

$$L = L_0 + \delta L, \quad (3.78)$$

де $L_0 = E(a_0 \lambda_0)/\lambda_0$ - початкова довжина (м), яка залежить від початкових значень амплітуди a_0 (м) і хвильового параметра λ_0 (м⁻¹).

У зв'язку з тим, що довжина є незмінною під час деформації від зігнутої пластини, початкова довжина L_0 є постійною ($L_0 = L = \text{const}$), нескінченно мала зміна довжини дорівнює нулю. Отже, можна записати таке рівняння:

$$\delta L = - \left[\left(\frac{\partial L}{\partial a} \right)_0 \cdot \delta a + \left(\frac{\partial L}{\partial \lambda} \right)_0 \cdot \delta \lambda \right] = 0, \quad (3.79)$$

де δa - зміна амплітуди, м;

$\delta \lambda$ - зміна параметра хвилі, м⁻¹.

$$\delta a = a_0 - a; \quad \delta \lambda = \lambda_0 - \lambda. \quad (3.80)$$

Рівняння (2.79) дозволяє визначити зміну амплітуди:

$$\delta a = \Phi_0 \cdot \delta \lambda, \quad (3.81)$$

де - $\Phi_0 = \Phi_0(a_0, \lambda_0)$ функція передачі:

$$\Phi_0(a_0, \lambda_0) = -\frac{\left(\frac{\partial L}{\partial \lambda}\right)_0}{\left(\frac{\partial L}{\partial a}\right)_0}. \quad (3.82)$$

Оскільки інтеграл Лежандра $E(k)$ не інтегрується за площею, наступне аналітичне вираз запропонований для його апроксимації (рисунок 2.4):

$$\tilde{E}(k) = \sqrt{4\pi^2 - \alpha^2 k^2}, \quad (3.83)$$

де α - безрозмірний параметр.

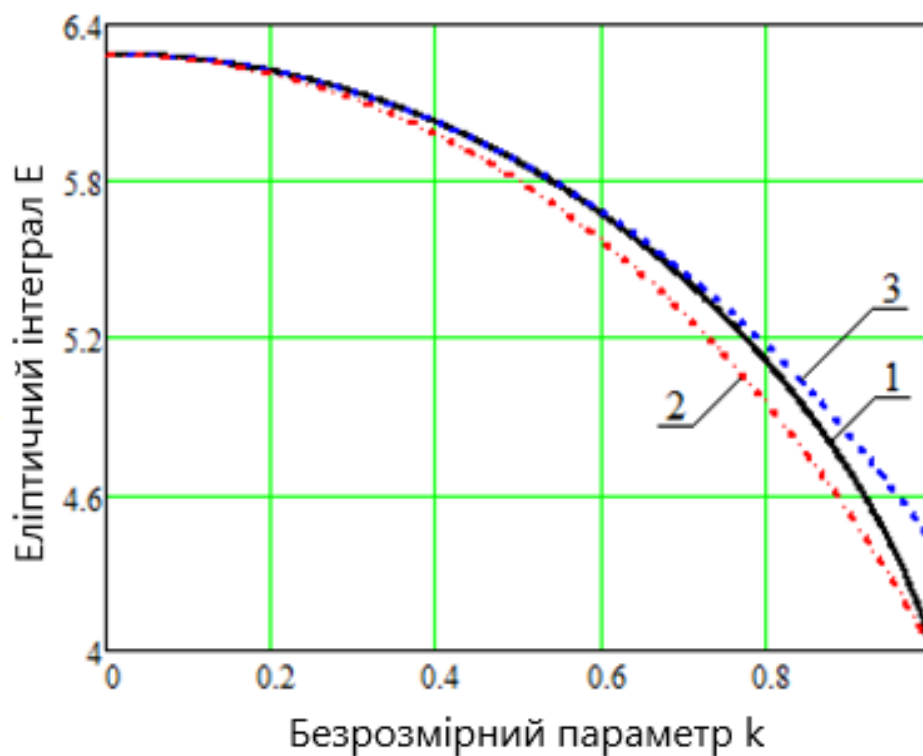


Рисунок 3.4 - Графічне зображення еліптичного інтеграла (поз. 1) та його наближення (поз. 2, 3)

Слід зазначити, що вираз (3.83) має відповідати наступним умовам: $\tilde{E}(0) = 2\pi$; $\tilde{E}(1) = 4$. Перша умова виконується автоматично, але остання

дозволяє отримати значення $\alpha = (4\pi^2 - 16)^{1/2} \approx 4.85$. Відповідна апроксимаційна крива позначена на рисунку 3.4 як поз. 2.

Якщо точність наближення є більшою на початку частини кривої, друга умова не виконується точно, згаданий вище параметр α слід оцінювати, використовуючи підхід квазілінійної регресії [118]:

$$R = \sum_{i=1}^N [4\pi^2 - \alpha^2 k^2 - E^2(k_i)]^2 \rightarrow \min, \quad (3.84)$$

де R - сума квадратних помилок;

i - індекс експериментальної точки;

N - загальна кількість числових експериментів.

Мінімізація функції R по відношенню до параметру α^2

$$\frac{\partial R}{\partial (\alpha^2)} = -2 \sum_{i=1}^N [4\pi^2 - \alpha^2 k^2 - E^2(k_i)] k_i = 0 \quad (3.85)$$

дозволяє визначити наступну регресійну залежність:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [4\pi^2 - E^2(k_i)] k_i^2}{\sum_{i=1}^N k_i^4}}. \quad (3.86)$$

У цьому випадку після автоматичного підрахунку значень $E(k_i)$ для діапазону $k_i = [0,1)$ з використанням $N = 1 \cdot 10^4$ чисельних експериментів (з постійним кроком $1/N$), наступне значення отримано оцінений параметр: $\alpha = 4,47$. Відповідна наближена крива позначена на рисунку 3.4 як поз. 3.

У випадку використання виразу (3.83), передавальна функція може бути наближено визначена наступним чином:

$$\Phi_0 \approx \frac{4\pi^2}{\alpha^2 a_0 \lambda_0^3}. \quad (3.87)$$

Радіус кривизни синусоїдальної кривої в її амплітудних значеннях (рисунок 3.4) в якості параметра, який визначає втрати вздовж сепараційного каналу визначається наступним чином:

$$R = \frac{\left\{1 + \left[\frac{dy(x)}{dx}\right]^2\right\}^{3/2}}{\left|\frac{d^2y(x)}{dx^2}\right|} = \frac{1}{a\lambda^2} = R_0 + \delta R, \quad (3.88)$$

де $R_0 = \frac{1}{a_0\lambda_0^2}$ – початковий радіус кривизни до деформацій;

δR - зміна радіуса кривизни, яка визначається наступним чином:

$$\delta R = \left(\frac{\partial R}{\partial a}\right)_0 \cdot \delta a + \left(\frac{\partial R}{\partial \lambda}\right)_0 \cdot \delta \lambda. \quad (3.89)$$

Послідовне врахування виразів (3.89) та (3.87) дозволяє отримати наступний варіант останнього рівняння:

$$\delta R = \Psi_0 \delta \lambda, \quad (3.90)$$

де $\Psi_0 = \Psi_0(a_0, \lambda_0)$ - наступна передавальна функція:

$$\Psi_0(a_0, \lambda_0) = \frac{2}{a_0\lambda_0^3} \left[1 + \frac{2\pi^2}{(\alpha a_0\lambda_0)^2}\right]. \quad (3.91)$$

Таким чином, математична модель базується на пошуку передавальних функцій (3.82) та (3.91).

3.6 Розроблення математичної моделі процесу стікання плівки вловленої рідини по поверхні сепараційного елемента

Стікання плівки рідини по поверхні пружних пластин динамічних сепараційних пристроїв є супутнім процесом при вібраційно-інерційній

сепарації. Слід зазначити, що плівкова течія зазвичай дозволяє підвищити інтенсивність та ефективність сепараційних процесів. Тому для досягнення високого ступеня ефективності розділення гетерогенних систем слід приділити увагу вивченню плівкових течій, їх гідродинамічних та тепломасообмінних показників, залежності даних показників від режимів течії і топології поверхні, а також сил які формують та руйнують плівку.

Для визначення гідродинамічних показників плівки рідини, товщини та характеру її зміни в залежності від гідродинамічних параметрів потоку, яким вона утворюється, використання традиційних методів не є доцільним і обмежує можливість отримання достовірних даних. Тому, актуальною задачею є розробка універсальної математичної моделі стікання плівки рідини, що дозволить визначати її товщину та характер її зміни в залежності від гідродинамічних характеристик потоку та характеристик поверхні по якій стікає плівка [121].

Розглянемо плівку рідини, яка стікає по вертикальній поверхні пружного елемента динамічного сепараційного пристрою під дією сили тяжіння, враховуючи її взаємодію з поверхнею стінки та газорідинним потоком. Рух плівки будемо описувати за допомогою системи рівнянь Нав'є-Стокса, для замикання якої скористаємося рівнянням нерозривності. В загальному випадку вказана система рівнянь в декартовій системі координат має вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u + \frac{1}{3} \mu \frac{\partial}{\partial x} \operatorname{div} V; \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 v + \frac{1}{3} \mu \frac{\partial}{\partial y} \operatorname{div} V; \\ \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \nabla^2 w + \frac{1}{3} \mu \frac{\partial}{\partial z} \operatorname{div} V; \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0, \end{array} \right. \quad (3.92)$$

де V – швидкість руху рідини, м/с; u , v , w – складові швидкості рідини V в проєкціях на осі координат x , y та z відповідно, м/с; ρ – густина рідини, кг/м³; μ – динамічна в'язкість рідини, Па·с; p – динамічний тиск рідини, Па; g – прискорення вільного падіння, м/с².

Для вирішення даної системи рівнянь введемо ряд спрощень та допущень:

- процес стікання плівки є ізотермічним та рідина є нестискаємою ($\rho = \text{const}$, а отже $\text{div}V=0$);

- розглядається течія плівки рідини вздовж стінки сепараційного каналу з урахуванням міжфазного тертя, а отже вона буде стікати не вертикально вниз, а під деяким кутом до напрямку сили тяжіння. Тому буде розглядатись двомірний рух плівки вздовж двох осей x та z , які направлені відповідно вертикально вниз та вздовж стінки, розрахункова схема вказана на рисунку 3.5;

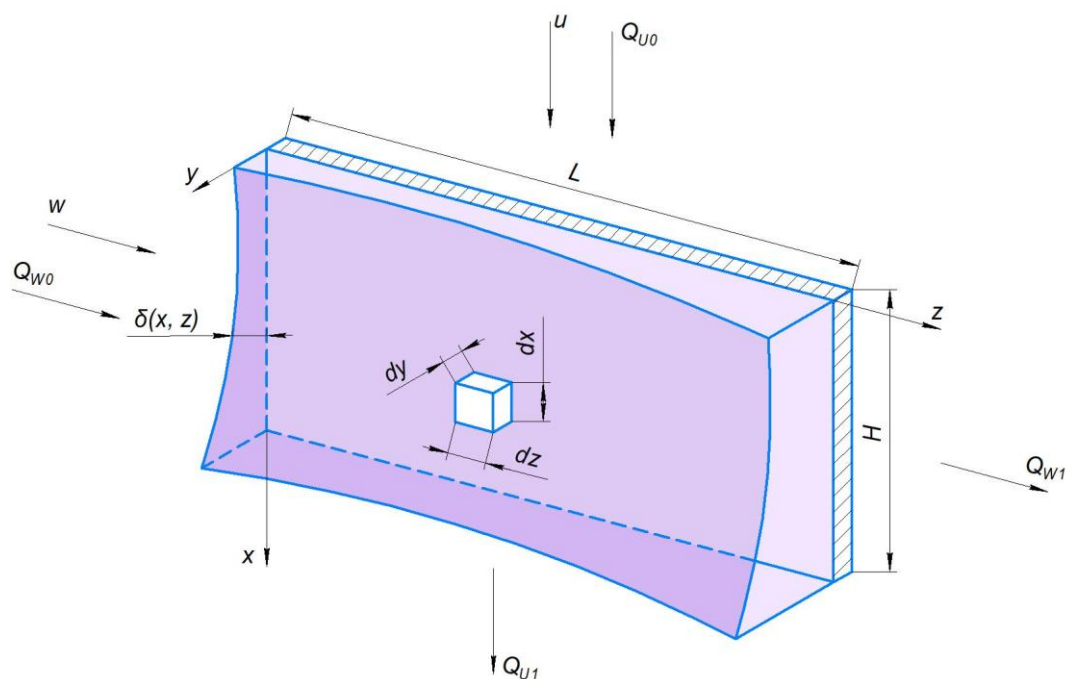


Рисунок 3.5 – Розрахункова схема тривимірної моделі стікання плівки по поверхні сепараційного елемента [121]

- рух рідини є усталеним $\left(\frac{\partial u}{\partial t} = 0; \frac{\partial v}{\partial t} = 0; \frac{\partial w}{\partial t} = 0; \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \right)$, та плівка рухається без хвилеутворення;

- товщина плівки рідини δ , як вказано на рисунку 3.5 змінюється по висоті каналу та по його довжині L , але її товщина являється достатньо малою порівняно з її протяжністю ($\delta \ll L$). При цьому припускаємо, що зміни товщини плівки рідни являються малими, тому і складова її швидкості по нормалі до поверхні в порівнянні з складовими в основному напрямку потоку є малими.

Саме тому розглядаємо рух плівки лише відносно двох осей координат, яка направлена вертикально вниз x та по довжині стінки каналу z ;

- тиск практично не змінюється по висоті стінки сепараційного каналу, по якій стікає рідина, а отже $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$;

- напруження внутрішнього тертя τ є постійним по всій довжині плівки.

Після врахування усіх введених спрощень та допущень початкова система рівнянь 1 набирає вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right); \\ \rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right); \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \end{array} \right. \quad (3.93)$$

Оцінимо порядок величин, що входять в отриману після введення спрощень систему рівнянь 2. Розглянемо перше рівняння системи:

- порівняємо складові які знаходяться в правій частині рівняння, а саме $v \frac{\partial u}{\partial y}$

та $w \frac{\partial u}{\partial z}$, при цьому розділимо складові швидкості та частинні похідні, тоді

будемо порівнювати $\frac{\partial u / \partial y}{\partial u / \partial z}$ та $\frac{w}{v}$. Значення елемента швидкості (∂u) та довжин

рідкої плівки (∂y , ∂z) відносяться так само, як і значення швидкості (u) та товщина, довжина плівки вловленої рідини (δ , L). Розглянемо порядки кожної з величин: товщина плівки вловленої рідини має порядок (δ) $10^{-4} \div 10^{-6}$ м, довжина каналу (L) - 10^{-1} м, максимальний порядок складової швидкості, яка направлена вздовж стінки на, якій осаджується рідина в ядрі потоку визначається

співвідношенням $W_{\max} \cdot \frac{\delta}{B/2} \cong 10 \frac{10^{-4} \div 10^{-6}}{10^{-1}}$ м/с, а складової швидкості направленої

по нормалі до стінки по якій рухається плівка 10^{-3} м/с. Враховуючи вищесказане

можна зробити висновок, що порядок $\frac{\partial u / \partial y}{\partial u / \partial z} \cong \frac{U / \delta}{U / L} \cong \frac{L}{\delta} \cong \frac{10^{-1}}{10^{-4} \div 10^{-6}} \cong 10^3 \div 10^5$, а

$\frac{W_{\max}}{V} \cong \frac{10}{10^{-3}} = 10^2$. Тому можемо знехтувати величиною з меншим порядком

малості, а саме $w \frac{\partial u}{\partial z}$;

- порівняємо складові в лівій частині рівняння заміняючи змінні на їх значення на поверхні плівки рідини $u \rightarrow U$, $v \rightarrow V$, $w \rightarrow W$, $x \rightarrow H$ (висота стінки по якій стікає рідина), $y \rightarrow \delta$, $z \rightarrow L$. Отримаємо для порівняння наступні величини $\frac{U}{H^2}$, $\frac{U}{\delta^2}$, $\frac{U}{L^2}$ найвищий порядок з яких має $\frac{U}{\delta^2}$. Саме тому в правій частині рівняння залишаємо тільки $\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$.

Розглянемо друге рівняння системи (2) за аналогією до оцінювання порядку складових першого рівня системи (2) вводимо значення змінних на поверхні плівки рідини, отримаємо для порівняння наступні складові $U \frac{W}{H}$, $V \frac{W}{\delta}$, $W \frac{W}{L}$,

$\rho \frac{U^2}{H}$, $\nu \frac{W}{H^2}$, $\nu \frac{W}{\delta^2}$, $\nu \frac{W}{L^2}$. Дані складові відповідно матимуть порядок $10 \frac{10}{10^{-1}} \cong 10^3$,

$10^{-3} \frac{10}{10^{-4} \div 10^{-6}} \cong 1 \div 10^2$, $10 \frac{10}{10^{-1}} \cong 10^3$, $10^3 \frac{10^2}{10^{-1}} = 10^6$, $10^{-6} \frac{10}{10^{-1}} \cong 10^{-4}$,

$10^{-6} \frac{10}{(10^{-4} \div 10^{-6})^2} \cong 10^3 \div 10^6$, $10^{-6} \frac{10}{10^{-1}} \cong 10^{-4}$. З цього видно, що необхідно приймати

до уваги тільки складові рівняння $\frac{\partial p}{\partial z}$ та $\mu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$ тому, що вони мають однаковий порядок 10^6 .

Отже, після врахування результатів аналізу порядку малості складових системи рівнянь (2), вона матиме вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \rho g + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}; \\ 0 = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}; \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \end{array} \right. \quad (3.94)$$

Розглянемо перше рівняння системи з якого знайдемо вираз для складової швидкості u . Припустимо, що профіль швидкості виражається у вигляді поліному третього степеню, враховуючи, що складова швидкості яка направлена вниз залежить від трьох координат та на стінці вона дорівнює нулю $u|_{y=0} = 0$:

$$u(x, y, z) = a(x, z)y + b(x, z)y^2 + c(x, z)y^3. \quad (3.95)$$

Для визначення невідомих коефіцієнтів, що входять до виразу (3.95) скористаємось наступними граничними умовами:

1) на поверхні плівки рідини вертикальна складова швидкості не змінюється в залежності від її ширини $\frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=\delta(x,z)} = 0$. З цієї умови отримуємо:

$$a + 2b\delta + 3c\delta^2 = 0; \quad (3.96)$$

2) на поверхні стінки відбувається прилипання рідини, тому складові швидкості u та v , що входять до першого рівняння системи 3 будуть рівними нулю. Тоді після його ділення на густину ρ , воно буде мати вигляд:

$$g \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \Big|_{y=0} = -g, \quad (3.97)$$

де g – кінематична в'язкість рідини плівки, m^2/s .

Враховуючи умову прилипання рідини до стінки та розділивши обидві частини виразу на кінетичну в'язкість, профіль складової швидкості направленої в бік сили тяжіння матиме вигляд:

$$2b = -\frac{g}{g}. \quad (3.98)$$

Підставляючи вираз (3.98) для коефіцієнту b в отриманий з першої граничної умови (3.96) одержимо коефіцієнт a , який буде залежати тільки від c .

$$a = \frac{g\delta}{g} - 3c\delta^2. \quad (3.99)$$

Запишемо складову швидкості (3.93) враховуючи отримані значення коефіцієнтів:

$$u = \left(\frac{g\delta}{g} - 3c\delta^2 \right) y - \frac{gy^2}{2g} + cy^3. \quad (3.100)$$

Перегрупуємо складові рівняння (3.100) наступним чином:

$$u = \frac{g}{g} y \left(\delta - \frac{y}{2} \right) + cy(y^2 - 3\delta^2). \quad (3.101)$$

Розглянемо друге рівняння системи (3.94) для знаходження складової швидкості направленої вздовж стінки по якій стікає плівка. Враховуючи, що рух плівки при відсутності хвилеутворення характеризується ламінарним режимом та у випадку її стікання під дією сил тяжіння вони перевищують сили інерції в рідині, можна записати наступне співвідношення:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = - \left(1 - \frac{\rho_{\text{сум}}}{\rho} \right) g, \quad (3.102)$$

де $\rho_{\text{сум}}$ - густина газорідинної суміші, кг/м³.

Введемо замість виразу $\left(1 - \frac{\rho_{сжм}}{\rho}\right)$ константу k та підставимо (3.102) в друге рівняння системи (3.96), отримаємо:

$$g \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = -kg. \quad (3.103)$$

Після інтегрування рівняння (3.103) та ділення обох його частин на кінематичну в'язкість одержимо:

$$\frac{\partial w}{\partial y} = -\frac{kg}{g} y + c_1. \quad (3.104)$$

Як видно з отриманого виразу в ньому після інтегрування присутня невідома константа, яку знайдемо з граничної умови міжфазного тертя на поверхні плівки $\mu \frac{\partial w}{\partial y} \Big|_{y=\delta} = \tau$. При цьому враховуємо, що напруження внутрішнього тертя є- постійними по довжині плівки згідно з вищевказаними допущеннями.

$$\mu \left(\frac{kg}{g} y + c_1 \right) = \tau. \quad (3.105)$$

Звідси,

$$c_1 = \frac{\tau}{\mu} + \frac{kg\delta}{g}. \quad (3.106)$$

З урахуванням (3.106) рівняння (3.104) буде мати вигляд:

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\tau}{\mu} + \frac{kg}{g} (\delta - y). \quad (3.107)$$

Після інтегрування (3.107) отримаємо, вираз для поздовжньої складової швидкості руху плівки вздовж стінки з невідомою константою c_2 :

$$w = \frac{\tau}{\mu} y - \frac{kg}{2g} (\delta - y)^2 + c_2. \quad (3.108)$$

Дану константу знайдемо з умови прилипання на стінці $w|_{y=0} = 0$:

$$-\frac{kg\delta^2}{2g} + c_2 = 0. \quad (3.109)$$

$$c_2 = \frac{kg\delta^2}{2g}. \quad (3.110)$$

Отже, вираз для поздовжньої швидкості (3.108) з урахуванням (3.110) :

$$w = \left[\frac{\tau}{\mu} + \frac{kg}{g} \left(\delta - \frac{y}{2} \right) \right] y. \quad (3.111)$$

Для знаходження рівняння товщини плівки стікаючої рідини підставимо отримані вирази для поздовжньої (3.111) та поперечної (3.100) складової швидкості в рівняння нерозривності системи (3.96).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{g}{g} y \left(\delta - \frac{y}{2} \right) + cy(y^2 - 3\delta^2) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\tau y}{\mu} + \frac{kgy}{g} \left(\delta - \frac{y}{2} \right) \right] = 0. \quad (3.112)$$

Після перетворень рівняння (3.112) отримаємо:

$$\frac{g}{g} \frac{\partial \delta}{\partial x} - 3 \frac{\partial}{\partial x} (c\delta^2) + \frac{kg}{g} \frac{\partial \delta}{\partial z} = 0. \quad (3.113)$$

Для подальшого знаходження невідомого коефіцієнту c , який входить в (3.95), будемо враховувати, що товщина стікаючої плівки рідини залежить від координат x та z (рисунок 3.5). Припустимо залежність δ від координати x виражається деякою функцією $U(x)$, а від z – $W(z)$:

$$\delta(x, z) = U(x)W(z). \quad (3.114)$$

Підставляємо введений добуток двох функцій (3.114) замість товщини плівки в вираз (3.113):

$$\frac{g}{g} \frac{dU}{dx} W - 3U^2 W^2 \frac{\partial c}{\partial x} - 6c U W^2 \frac{dU}{dx} + k \frac{g}{g} U \frac{dW}{dz} = 0. \quad (3.115)$$

Для подальших перетворень домножимо (3.115) на $\frac{1}{UW}$:

$$\frac{g}{g} \frac{U'_x}{U} - 3UW \frac{\partial c}{\partial x} - 6c U'_x W + k \frac{g}{g} \frac{W'_z}{W} = 0. \quad (3.116)$$

Враховуючи, що алгебраїчна сума в рівнянні (3.116) дорівнює нулю то його можна розділити на два окремих рівняння, до першого з яких будуть входити додатні члени рівняння, а до другого – від'ємні. Отже, перше з них матиме вигляд:

$$\frac{g}{g} \frac{U'_x}{U} = -k \frac{g}{g} \frac{W'_z}{W}. \quad (3.117)$$

Оскільки, $\frac{g}{g} \frac{U'_x}{U} = -k \frac{g}{g} \frac{W'_z}{W} = const$ то дану рівність можна записати у вигляді добутку двох постійних $\frac{-g}{g} \cdot c_3$, одна з яких є невідомою, а саме c_3 . В результаті дане рівняння знову можна розділити на два диференціальних рівняння.

$$\begin{cases} \frac{dU}{dx} = -U \cdot c_3 \\ \frac{dW}{dx} = W \cdot \frac{c_3}{k} \end{cases} \quad (3.118)$$

Розв'язки яких мають вигляд:

$$\begin{cases} U = c_4 e^{-c_3 x} \\ W = c_5 e^{\frac{c_3}{k} x} \end{cases} \quad (3.119)$$

З урахуванням (3.116) товщина плівки, що виражається як добуток даних двох функцій вказана нижче:

$$\delta = \delta_0 e^{c_3 \left(\frac{z}{k} - x \right)} \quad (3.120)$$

де $\delta_0 = c_4 c_5$ - товщина плівки рідини в точці початку координат $\delta_0 = \delta(0;0)$.

Друге рівняння, яке отримане після розділення виразу (3.116) на дві частини, до якого входять його від'ємні члени, матиме вигляд:

$$3UW \frac{\partial c}{\partial x} = -6c U_x' W \quad (3.121)$$

Після домноження обох частин рівняння на $\frac{1}{3UW}$, розділення змінних та врахування попередньо записаної рівності $\frac{U_x'}{U} = c_3$, отримаємо:

$$\frac{\partial c}{\partial x} = -2c_3 c \quad (3.122)$$

Розв'язком даного рівняння є:

$$c(x, z) = c_0(z) e^{-2c_3 x}, \quad (3.123)$$

де $c_0(z)$ – значення постійної, яка входить до виразу (3.100) вертикальної складової швидкості, на початку плівки вловленої рідини.

Як видно з виразів (3.123) та (3.120) з'являється нова невідома константа c_3 , для знаходження якої виділимо елементарну площадку розмірами $dx \times dz$ та скористаємось рівнянням імпульсів відносно осі x :

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_0^{\delta} u^2 dy - g\delta = -\nu \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=0}. \quad (3.124)$$

Враховуючи знайдений попередньо вираз (3.100) для вертикальної складової швидкості u та значення на стінці її частинної похідної по координаті

у $\frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=0} = \frac{g\delta}{\nu} - 3c\delta^2$ рівняння (3.124) матиме вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_0^{\delta} \left[\left(\frac{g\delta}{\nu} - 3c\delta^2 \right) y - \frac{g}{2\nu} y^2 + cy^3 \right] dy - g\delta = -\nu \left(\frac{g\delta}{\nu} - 3c\delta^2 \right). \quad (3.125)$$

Після розкриття дужок та зведення подібних отримаємо:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{2}{15} \frac{g^2 \delta^5}{\nu} - \frac{61}{60} c \frac{g\delta^6}{\nu} + \frac{68}{35} c^2 \delta^7 \right) = 3\nu c \delta^2. \quad (3.126)$$

Беремо частинну похідну по координаті x та домножаємо обидві частини рівняння на $\frac{1}{\delta^2}$:

$$\left(\frac{2}{3} \frac{g^2}{\nu} \delta^2 - \frac{61}{10} c \frac{g\delta^3}{\nu} + \frac{68}{5} c^2 \delta^4 \right) \frac{\partial \delta}{\partial x} + \left(\frac{136}{35} c \delta^5 - \frac{61}{60} \frac{g\delta^4}{\nu} \right) \frac{\partial c}{\partial x} = 3\nu c. \quad (3.127)$$

Підставляємо в (3.127) попередньо отримані вирази для товщини плівки δ (3.120) та константи c (3.123), яка входить до рівняння вертикальної складової швидкості руху рідини, що виражені через константу c_3 :

$$\left[\frac{2}{3} \frac{g^2}{\nu} \delta_0^2 e^{2c_3 \left(\frac{z}{k} - x \right)} - \frac{61}{10} c_0(z) e^{-2c_3 x} \frac{g}{\nu} \delta_0^3 e^{3c_3 \left(\frac{z}{k} - x \right)} + \frac{68}{5} c_0^2(z) e^{-4c_3 x} \delta_0^4 e^{4c_3 \left(\frac{z}{k} - x \right)} \right] \cdot \delta_0 c_3 e^{c_3 \left(\frac{z}{k} - x \right)} +$$

$$+ \left[\frac{136}{35} c_0(z) e^{-2c_3 x} \delta_0^5 e^{5c_3 \left(\frac{z}{k} - x \right)} - \frac{61}{60} \frac{g}{\nu} \delta_0^4 e^{4c_3 \left(\frac{z}{k} - x \right)} \right] \cdot 2c_3 c_0(z) e^{-2c_3 x} = -3\nu c_0(z) e^{-2c_3 x}. \quad (3.128)$$

Для подальшого розв'язання отриманого рівняння (3.128) осереднимо отриманий вираз для товщини плівки (3.120) по висоті стінки H , по якій осаджується рідина:

$$\frac{1}{H} \int_0^H e^{c_3 \left(\frac{z}{k} - x \right)} dx = \frac{1}{c_3 H} e^{c_3 \frac{z}{k}} (1 - e^{-c_3 H}). \quad (3.129)$$

Розглянемо випадок, при якому добуток $c_3 H$ має значення близьке до нуля, враховуючи слідство з чудових меж, отримаємо:

$$\lim_{c_3 H \rightarrow 0} \frac{1}{c_3 H} (1 - e^{-c_3 H}) = 1. \quad (3.130)$$

Враховуючи (3.130) вираз (3.129) матиме вигляд:

$$\frac{1}{H} \int_0^H e^{c_3 \left(\frac{z}{k} - x \right)} dx = e^{c_3 \frac{z}{k}}. \quad (3.131)$$

Враховуючи (3.131) рівняння (3.128) записується наступним чином:

$$\left[\frac{2}{3} \frac{g^2}{\nu} \delta_0^2 e^{2c_3 \frac{z}{k}} - \frac{61}{10} c_0(z) e^{-2c_3 x} \frac{g}{\nu} \delta_0^3 e^{3c_3 \frac{z}{k}} + \frac{68}{5} c_0^2(z) e^{-4c_3 x} \delta_0^4 e^{4c_3 \frac{z}{k}} \right] \cdot \delta_0 c_3 e^{c_3 \frac{z}{k}} +$$

$$+ \left[\frac{136}{35} c_0(z) e^{-2c_3 x} \delta_0^5 e^{5c_3 \frac{z}{k}} - \frac{61}{60} \frac{g}{\nu} \delta_0^4 e^{4c_3 \frac{z}{k}} \right] \cdot 2c_3 c_0(z) = -3\nu c_0(z). \quad (3.132)$$

Зводячи подібні доданки та згруповуючи їх відносно $c_0(z)$ отримаємо наступне квадратне рівняння відносно даної складової:

$$c_0^2 \frac{612}{35} \delta_0^5 e^{5c_3 \frac{z}{k}} c_3 + c_0 \left(3\nu - \frac{427}{60} \frac{g}{\nu} \delta_0^4 c_3 e^{4c_3 \frac{z}{k}} \right) + \frac{2}{3} \frac{g^2}{\nu^2} \delta_0^2 e^{2c_3 \frac{z}{k}} = 0. \quad (3.133)$$

Дане рівняння буде мати наступні корені:

$$c_0(z) = \frac{-\left(3\nu - \frac{427}{60} \frac{g}{\nu} \delta_0^4 c_3 e^{4c_3 \frac{z}{k}} \right) \pm \sqrt{\left(3\nu - \frac{427}{60} \frac{g}{\nu} \delta_0^4 c_3 e^{4c_3 \frac{z}{k}} \right)^2 - \frac{612}{35} \frac{g^2}{\nu^2} \delta_0^7 e^{7c_3 \frac{z}{k}} c_3}}{\frac{1224}{35} \delta_0^5 e^{5c_3 \frac{z}{k}} c_3}. \quad (3.134)$$

Розглянемо частинний випадок при якому рівняння (3.133) спрощується, а саме $3\nu \ll \frac{427}{60} \frac{g}{\nu} \delta_0^4 c_3 e^{4c_3 \frac{z}{k}}$, тоді отримаємо

$$c_0^2 \frac{612}{35} \delta_0^3 e^{3c_3 \frac{z}{k}} c_3 - c_0 \frac{427}{60} \frac{g}{\nu} \delta_0^2 c_3 e^{2c_3 \frac{z}{k}} + \frac{2}{3} \frac{g^2}{\nu^2} = 0. \quad (3.135)$$

В такому разі корені рівняння будуть мати вигляд:

$$c_0(z) = \frac{\frac{427}{60} \frac{g}{\nu} \delta_0^4 c_3 e^{4c_3 \frac{z}{k}} \pm \sqrt{\left(\frac{427}{60} \right)^2 \frac{g^2}{\nu^2} \delta_0^4 c_3^2 e^{4c_3 \frac{z}{k}} - \frac{4896}{105} \frac{g^2}{\nu^2} \delta_0^3 e^{3c_3 \frac{z}{k}} c_3}}{\frac{1224}{35} \delta_0^3 e^{3c_3 \frac{z}{k}} c_3}. \quad (3.136)$$

Даний вираз (3.136) може приймати як дійсні так і комплексні значення. Умова, що забезпечує тільки дійсні значення має вигляд:

$$\left(\frac{427}{60} \right)^2 \frac{g^2}{\nu^2} \delta_0^4 c_3^2 e^{4c_3 \frac{z}{k}} \geq \frac{4896}{105} \frac{g^2}{\nu^2} \delta_0^3 e^{3c_3 \frac{z}{k}} c_3, \quad (3.137)$$

приведемо дану нерівність до стандартного вигляду показникової нерівності:

$$e^{\frac{c_3 z}{k}} \geq \frac{0,921}{c_3 \delta_0}, \quad (3.138)$$

розв'язком якої є:

$$z \geq \frac{k}{c_3} \ln \frac{0,921}{c_3 \delta_0}. \quad (3.139)$$

Для того щоб враховувалась координата z тільки в напрямку потоку необхідно виконання наступної умови

$$c_3 \delta_0 \geq 0,921. \quad (3.140)$$

Лінеаризуємо відносно z вираз для постійної $c_0(z)$, для цього скористаємось розкладанням в ряд Маклорена, отримаємо

$$c_0(z) = 0,203 \frac{g}{\nu \delta_0} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{0,921}{c_3 \delta_0}} - \frac{c_3 z}{k} \left(1 - \frac{1 - \frac{1,384}{c_3 \delta_0}}{\sqrt{1 - \frac{0,921}{c_3 \delta_0}}} \right) \right]. \quad (3.141)$$

Цей вираз спрощується для випадку $c_3 \delta_0 \gg 0,921$

$$c_0(z) \approx 0,093 \frac{g}{\nu c_3 \delta_0^2} \left(1 - \frac{2c_3}{k} z \right). \quad (3.142)$$

Враховуючи вираз (3.142) для константи c рівняння, яке виражає залежність вертикальної складової швидкості u від координат x, y, z , буде мати вигляд:

$$u(x, y, z) = \frac{g}{g} y \left[\delta - \frac{y}{2} + \frac{0,093}{c_3 \delta_0^2} (y^2 - 3\delta^2) \left(1 - \frac{2c_3}{k} z \right) e^{-2c_3 x} \right]. \quad (3.143)$$

Як видно з даного виразу для вертикальної складової швидкості та товщини плівки стікаючої рідини (3.120) залишається невідомою константа c_3 , для знаходження якої скористаємось рівнянням балансів витрат. Схема для якого наведена на рисунку 3.5.

$$Q_{u0} + Q_{w0} = Q_{u1} + Q_{w1}, \quad (3.144)$$

де $Q_{u0} = \int_0^L \int_0^{\delta(o,z)} u(o, y, z) dy dz$ – витрата рідини, яка поступає в плівку вертикально

зверху; $Q_{w0} = \int_0^H \int_0^{\delta(x,0)} w(x, y) dy dx$ – витрата рідини, яка поступає в плівку

горизонтально на початку координат; $Q_{u1} = \int_0^L \int_0^{\delta(H,z)} u(H, y, z) dy dz$ – витрата рідини,

яка витікає з плівки вертикально знизу; $Q_{w1} = \int_0^H \int_0^{\delta(x,0)} w(x, y) dy dx$ – витрата рідини,

яка витікає з плівки горизонтально в кінці стінки по якій рухається плівка.

Після інтегрування отриманих виразів для витрат та підстановки їх (3.144) отримаємо трансцендентне рівняння:

$$R(c_3) = \Delta Q_{u1} + \Delta Q_{w1} = 0, \quad (3.145)$$

де $\Delta Q_{u1} = Q_{u1} - Q_{u0}$ – різниця витрат у вертикальному напрямку;

$\Delta Q_{w1} = Q_{w1} - Q_{w0}$ – різниця витрат у горизонтальному напрямку.

При цьому ці різниці витрат з рівняння (2.96) по модулю повинні бути рівні $|\Delta Q_{u1}| = |\Delta Q_{w1}|$. В першому наближенні скористаємось програмою Mathcad для оцінювання порядку малості кожного з доданків, що входять до результатів інтегрування витрат, послідовно виключаючи їх з обчислення. При цьому будемо розглядати приклад в якому густина рідини плівки $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, густина суміші $\rho_{\text{сум}} = 100 \text{ кг/м}^3$, прискорення вільного падіння $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, товщина плівки на початку координат $\delta_0 = 1 \text{ мм}$, динамічна в'язкість води $\mu = 8,94 \cdot 10^{-4} \text{ Па}\cdot\text{с}$, висота стінки каналу по якій стікає рідина $H = 0,05 \text{ м}$, довжина стінки $L = 0,2 \text{ м}$,

напруження внутрішнього тертя $\tau = 400$ Па. В результаті використання даного підходу отримаємо наступні вирази для вертикальної і горизонтальної різниці витрат:

$$\Delta Q_u \approx -0,058 \frac{gL\delta_0^2}{\nu c_3} e^{\frac{4c_3L}{k}}, \quad (3.146)$$

$$\Delta Q_w \approx \frac{\tau\delta_0^2}{4\mu c_3} e^{\frac{2c_3L}{k}}. \quad (3.147)$$

Враховуючи вирази 3.146 та 3.147 трансцендентне рівняння 3.145 буде мати вигляд:

$$-0,058 \frac{gL\delta_0^2}{\nu c_3} e^{\frac{4c_3L}{k}} + \frac{\tau\delta_0^2}{4\mu c_3} e^{\frac{2c_3L}{k}} = 0 \quad (3.148)$$

отже його розв'язком є

$$c_3 = \frac{k}{2L} \ln \frac{4,31\tau}{\rho g L}. \quad (3.149)$$

Як видно з виразу (3.120), який визначає форму плівки рідини, вона залежить від константи c_3 . А саме, її знак вказує на напрямки збільшення/зменшення товщини плівки, його можна визначити розв'язуючи рівняння:

$$\ln 4,31 \cdot Cr = 0, \quad (3.150)$$

де Cr – введений умовний критерій визначаючий форму плівки, який рівний з

$$\text{виразу (3.149) - } Cr = \frac{\tau}{\rho g L}.$$

Нулем рівняння 3.150 являється число 0,232, саме воно являється граничним значенням критерію, таким чином:

- якщо $\frac{\tau}{\rho g L} > 0,232$, то товщина плівки рідини зменшується в бік збільшення координати x (вертикально вгору) та збільшується горизонтально в бік зростання координати z (рисунок 3.6 а);

- якщо $\frac{\tau}{\rho g L} = 0,232$, то товщина плівки рідини не змінюється по всій поверхні її стікання $\delta = \delta_0$;

- якщо $\frac{\tau}{\rho g L} < 0,232$, то товщина плівки рідини збільшується в бік зростання координати x (вертикально вниз) та зменшується горизонтально в бік зростання координати z (рисунок 3.6 б).

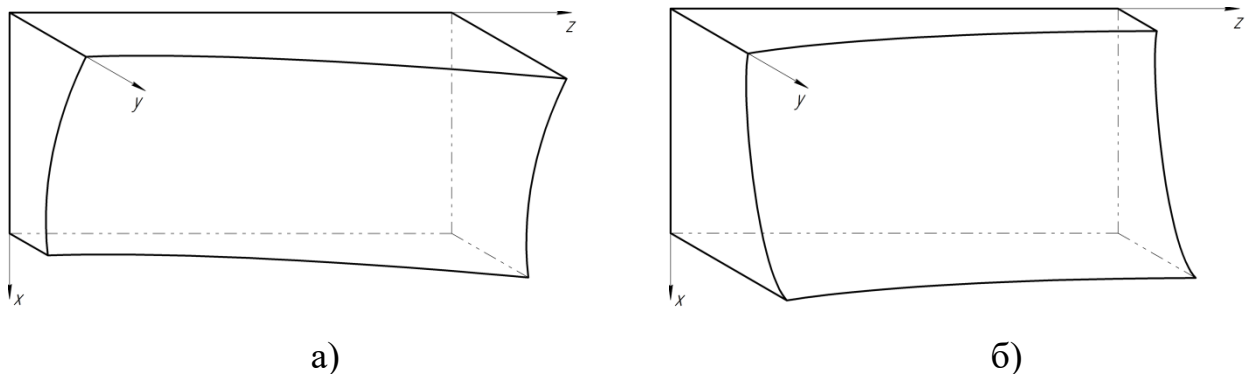


Рисунок 3.6 – Форма плівки стікаючої рідини при значенні критерію більше за граничне значення (а) та менше за нього (б)

Підставляючи (3.149) в (3.120), (3.143) та (3.111) запишемо вираз для товщини плівки та складових швидкості вертикальної та поздовжньої відповідно

$$\delta = \delta_0 \left(\frac{4,31\tau}{\rho g L} \right)^{\frac{z-kx}{2L}}, \quad (3.151)$$

$$u(x, y, z) = \frac{g}{9} y \left[\delta_0 \left(\frac{4,31\tau}{\rho g L} \right)^{\frac{z-kx}{2L}} - \frac{y}{2} + \frac{0,186L}{k\delta_0^2 \ln \left(\frac{4,31\tau}{\rho g L} \right)} \left(y^2 - 3\delta_0^2 \left(\frac{4,31\tau}{\rho g L} \right)^{\frac{z-kx}{L}} \right) \left(1 - \frac{2z}{k} \left(\frac{4,31\tau}{\rho g L} \right)^{\frac{z-kx}{2L}} \right) \left(\frac{4,31\tau}{\rho g L} \right)^{\frac{kx}{L}} \right], \quad (3.152)$$

$$w(x, y, z) = \left[\frac{\tau}{\mu} + \frac{kg}{9} \left(\delta_0 \left(\frac{4,31\tau}{\rho g L} \right)^{\frac{z-kx}{2L}} - \frac{y}{2} \right) \right] y. \quad (3.153)$$

Враховуючи отримані вирази для товщини плівки (3.151) та дані, що наведені, вище побудуємо графіки її форми на границях. На рисунку 3.7 а наведена форма плівки на її початку та в кінці, на рисунку 3.7 б – форма плівки вгорі та внизу.

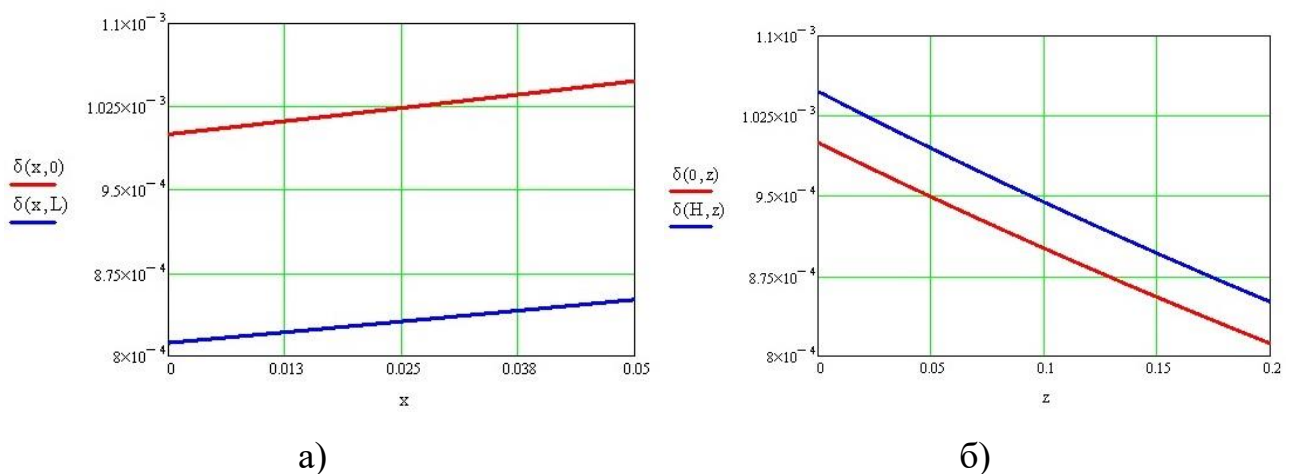


Рисунок 3.7 – Форма плівки на її границях:

- а) по висоті на початку поверхні осадження $\delta(x, 0)$ та в її кінці $\delta(x, L)$;
- б) по довжині внизу поверхні осадження $\delta(H, z)$ та вгорі $\delta(0, z)$

Проаналізувавши отримані результати маємо, що по висоті поверхні осадження, а саме на її початку $\delta(x, 0)$ товщина плівки змінюється в діапазоні [1 мм; 1,048 мм] тобто на 4,8% збільшується, в її кінці $\delta(x, L)$ [0,812 мм; 0,851 мм] – збільшується на 4,8%; по довжині поверхні осадження вгорі $\delta(0, z)$ [1 мм; 0,812 мм] – зменшується на 18,8 %, внизу $\delta(H, z)$ [1,048 мм; 0,851 мм] –

зменшується на 18,8%. На рисунку 2.8 наведена площина, яка являється границею розділу фаз.

Середню товщину плівки можна знайти осереднивши вираз (3.109) по довжині та висоті поверхні осадження, отримаємо:

$$\bar{\delta} = \frac{1}{L \cdot H} \cdot \int_0^L \int_0^H \delta(x, z) dx dz = k \cdot \frac{\delta_0}{\frac{k^2}{L^2} \cdot \ln^2 \frac{4,31}{\rho g L} \cdot HL} \cdot \left(\sqrt{\frac{4,31 \tau}{\rho g L}} - 1 \right) \left[1 - \left(\frac{4,31 \tau}{\rho g L} \right)^{\frac{k H}{2 L}} \right]. \quad (3.154)$$

Для спрощення даного виразу введемо позначення $\psi = \sqrt{\frac{4,31 \tau}{\rho g L}}$, тоді вираз

(3.153) буде мати вигляд:

$$\bar{\delta} = \delta_0 \cdot \frac{(\psi - 1) \left(1 - \psi^{\frac{k H}{2 L}} \right)}{k \cdot \frac{H}{L} \cdot \ln \psi}. \quad (3.155)$$

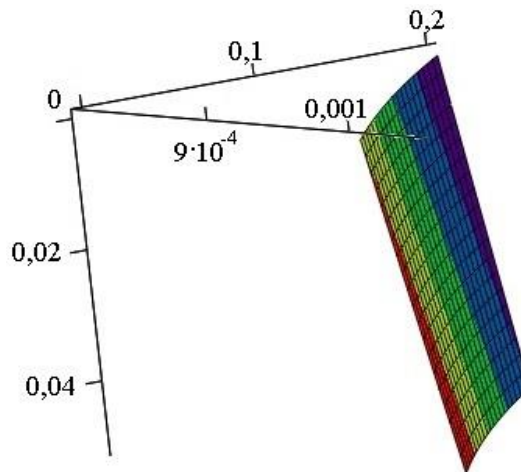


Рисунок 3.8 – Площина, яка являється границею розділу фаз

Визначити початкову товщину плівки рідини, до усталеного її стікання можливо з об'ємної концентрації рідини в суміші c_p :

$$c_p = \frac{2\delta_0 H}{BH}, \quad (3.156)$$

звідси початкова товщина плівки рідини

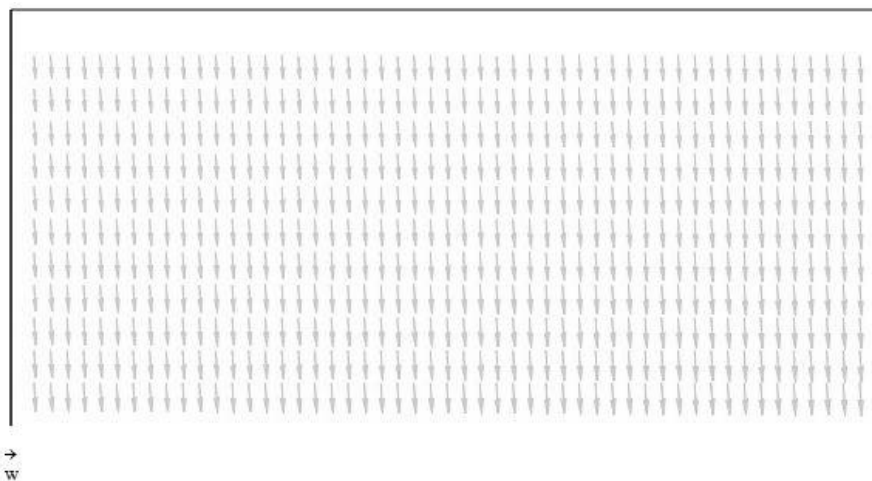
$$\delta_0 = \frac{1}{2} c_p B. \quad (3.157)$$

Для отримання такої важливої величини, як середня значення швидкості, осереднимо отримані вирази для поздовжньої (3.111) та вертикальної (3.143) складової швидкостей по ширині плівки:

$$\bar{u}(x, z) = \frac{1}{\delta(x, z)} \cdot \int_0^{\delta(x, z)} u(x, y, z) dy = \frac{g\delta^2}{3\nu} \cdot \left(1 - \frac{0,349}{C_3\delta} e^{-2C_3x} \right), \quad (3.158)$$

$$\bar{w}(x, z) = \frac{1}{\delta(x, z)} \cdot \int_0^{\delta(x, z)} w(x, y, z) dy = k \cdot \frac{g\delta^2}{3\nu} \cdot \left(1 + \frac{3}{2k} \cdot \frac{\tau}{\rho g \delta} \right). \quad (3.159)$$

За допомогою програмного комплексу Mathcad можливо побудувати вектори швидкості плівки осередненої по її товщині. Для даних наведених вище, результати побудови вказані на рисунку 3.9.



Рисунки 3.9 – Вектори швидкості плівки осередненої по її товщині

Крім осереднених значень компонентів швидкості по товщині плівки представляють інтерес їх значення на поверхні розділу фаз, для їх знаходження

скористаємось (3.111) та (3.143) виключаючи змінну y , замінивши її на вираз (3.120) для $\delta(x, z)$. Отже, маємо наступні значення для поздовжньої та вертикальної складових швидкостей:

$$w(x, z)_s = w(x, \delta(x, y), z) = k \cdot \frac{g\delta^2}{2\nu} \cdot \left(1 + \frac{2}{k} \cdot \frac{\tau}{\rho g \delta} \right), \quad (3.160)$$

$$u(x, z)_s = u(x, \delta(x, y), z) = \frac{g\delta^2}{2\nu} \cdot \left(1 - \frac{0,372\delta}{C_3\delta_0^2} e^{-2C_3x} \right). \quad (3.161)$$

На рисунку 3.10 а наведені ізолінії поздовжньої складової швидкості, 3.10 б – вертикальної.

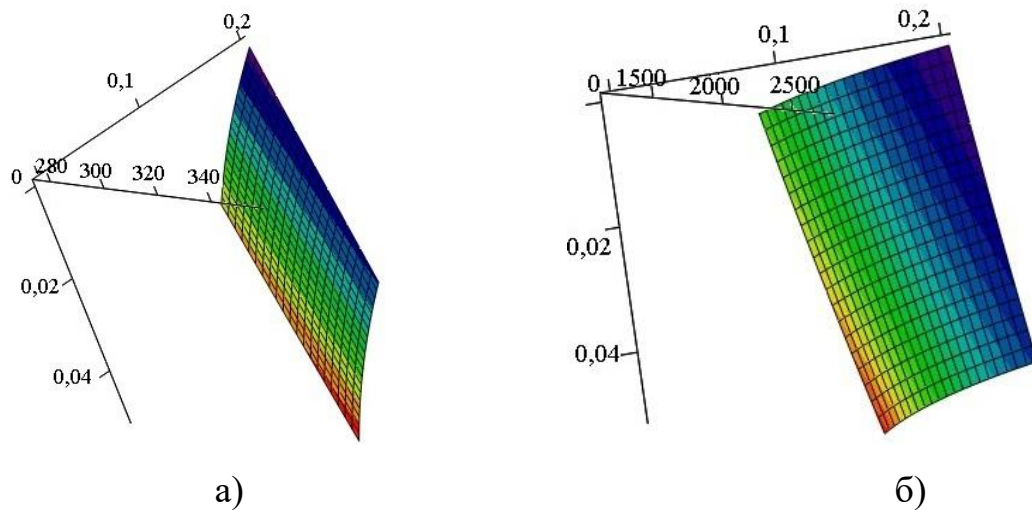


Рисунок 3.10 – Ізолінії поздовжньої (а) та вертикальної (б) складових швидкості

Як вказувалось вище, плівка рідини під дією основного потоку стікає під деяким кутом до вертикальної поверхні осадження. Для визначення цього кута будемо враховувати, що лінії току рідини на поверхні розділу фаз співпадають зі значеннями швидкостей на її поверхні, які в свою чергу рівні $u_s = \frac{dx}{dt}$, $w_s = \frac{dz}{dt}$.

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \frac{g\delta^2}{2\nu} \cdot \left(1 - \frac{0,372\delta}{C_3\delta_0^2} e^{-2C_3x} \right); \\ \frac{dz}{dt} = k \cdot \frac{g\delta^2}{2\nu} \cdot \left(1 + \frac{2}{k} \cdot \frac{\tau}{\rho g \delta} \right). \end{cases} \quad (3.162)$$

Спростимо перше рівняння системи (3.162) враховуючи, що множником його складової $\frac{0,372\delta}{C_3\delta_0^2} e^{-2C_3x}$ являється спадаюча експоненціальна функція, а отже прямує до нуля, отримаємо:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \frac{g\delta^2}{2\nu}; \\ \frac{dz}{dt} = k \cdot \frac{g\delta^2}{2\nu} \cdot \left(1 + \frac{2}{k} \cdot \frac{\tau}{\rho g \delta} \right). \end{cases} \quad (3.163)$$

Розділимо друге рівняння системи (3.163) на перше, результуюче співвідношення буде мати вигляд

$$\frac{dz}{dx} = k \cdot \left(1 + \frac{2}{k} \cdot \frac{\tau}{\rho g \delta} \right) = const, \quad (3.164)$$

після врахування геометричного змісту похідної, знаходимо початковий кут відхилення лінії току від вертикальної направляючої

$$\alpha_0 = \arctg \left(\frac{dz}{dx} \right) \Big|_{\delta=\delta_0}. \quad (3.165)$$

Розглянемо частинний випадок у якому $\frac{\tau}{\rho g \delta_0} \gg \frac{k}{2}$, отримаємо

$$\alpha_0 = \arctg \frac{2\tau}{\rho g \delta_0}. \quad (3.166)$$

Необхідно відмітити, що до даного виразу входить квадрат поздовжньої швидкості на поверхні розділу фаз. Даний кут складає $\alpha_0 = 89^\circ$ для даних наведених вище для прикладу.

3.7 Висновки до Розділу 3

Розроблена математична модель статичного розрахунку попередньо деформованого стану динамічних відбійних елементів сепараційних пристроїв, що базується на застосуванні аналітичних залежностей методу скінченних елементів та дозволяє визначити максимально можливі деформації пружних елементів.

Представлений розв'язок стаціонарної задача гідроаеропружності, який дозволяє обчислити критичну швидкість двофазного газорідинного потоку, при якій виникає явище дивергенції відбійних елементів динамічних сепараційних пристроїв.

Проведена ідентифікація параметрів математичних моделей стаціонарної та нестаціонарної задачі гідроаеропружності, що дозволяють визначати невідомі параметри даних моделей, такі як коефіцієнти жорсткості пружних елементів.

Розроблена математична модель процесу гідроаеропружної взаємодії потоку з деформівними синусоїдальними стінками, яка дозволяє розрахувати радіус кривизни синусоїдальної кривої в її амплітудних значеннях.

Розроблена та розв'язана математична модель стікання плівки вловленої рідини, що дозволяє визначити такі гідродинамічні показники як товщина, швидкість на напрямок векторів швидкості плівки вловленої рідини.

Основні наукові результати розділу опубліковані в працях [118; 119; 120; 121].

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЧИСЛОВІ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ У ДИНАМІЧНИХ СЕПАРАЦІЙНИХ ПРИСТРОЯХ

4.1 Аналіз результатів експериментальних досліджень

Як вказувалось в другому розділі першим етапом проведення досліджень являється визначення швидкості газового потоку, що викликає втрату динамічної та статичної стійкості. Для цього проводились експериментальні дослідження пружних відбійних елементів з товщиною 0,4 мм, 0,5 мм, 0,6 мм та довжиною 200 мм, їх висота відповідає висоті каналу. Дані відбійні елементи були виготовлені з матеріалу ПВХ (полівінілхлорид), що має наступні механічні властивості: модуль пружності на згин $E_{ПВХ} = 2800$ МПа; коефіцієнт Пуассона $\nu_{ПВХ} = 0,385$ [122]. При цьому у пластин була відсутня попередня деформація до встановлення їх в канал. Методика проведення експериментальних досліджень була описана в другому розділі. Для визначення швидкості набігаючого потоку був використаний термоанемометр Hot Wire Anemometer НТ-9829, при цьому вимірювання швидкості проводились без встановлення пружних відбійних елементів у каналі. Результати вимірювань частоти та амплітуди коливань пружного відбійного елемента з товщиною 0,5 мм зведені до таблиці 4.1.

Після проведення вимірювань можна виділити декілька режимів роботи пружного відбійного елемента, для полегшення аналізу результатів були введені умовні позначення вказані на рисунку 4.1:

- перший режим (швидкість входу газового потоку менша за 4 м/с, $Re\ 35,3 \cdot 10^3$) – відсутні коливання, з'являється тільки статичний прогин, як вказано на рисунку 4.1 а. При цьому при швидкості входу меншій за 2,2 м/с відхилення елемента не спостерігається, оскільки газовий протік проходить

через шпарини між верхньою, нижньою стінками каналу та пружним відбійним елементом;

- другий режим (діапазон швидкості 4 м/с – 7,4 м/с, $Re\ 35,3 \cdot 10^3 - 65,3 \cdot 10^3$) – початок коливання відбійного елемента, при цьому він доторкається до верхньої та нижньої стінки у зв'язку з виникнення не тільки згинних, а й крутильних коливань, що схематично вказано на рисунку 4.1 б. При подальшому збільшенні швидкості положення 3 відносно якого коливається пластинка наближається до стінки 2;

- третій режим (діапазон швидкості 7,4 м/с – 11,6 м/с, $Re\ 65,3 \cdot 10^3 - 102,4 \cdot 10^3$) – елемент починає торкатись стінки 2 (рисунок 4.1 в) в тому числі продовжуються згинно крутильні коливання. За границю роботи було взято швидкість 11,6 м/с, оскільки витримуючи при цій швидкості пружний відбійний елемент притискається до стінки 2 та припиняє рухатись.

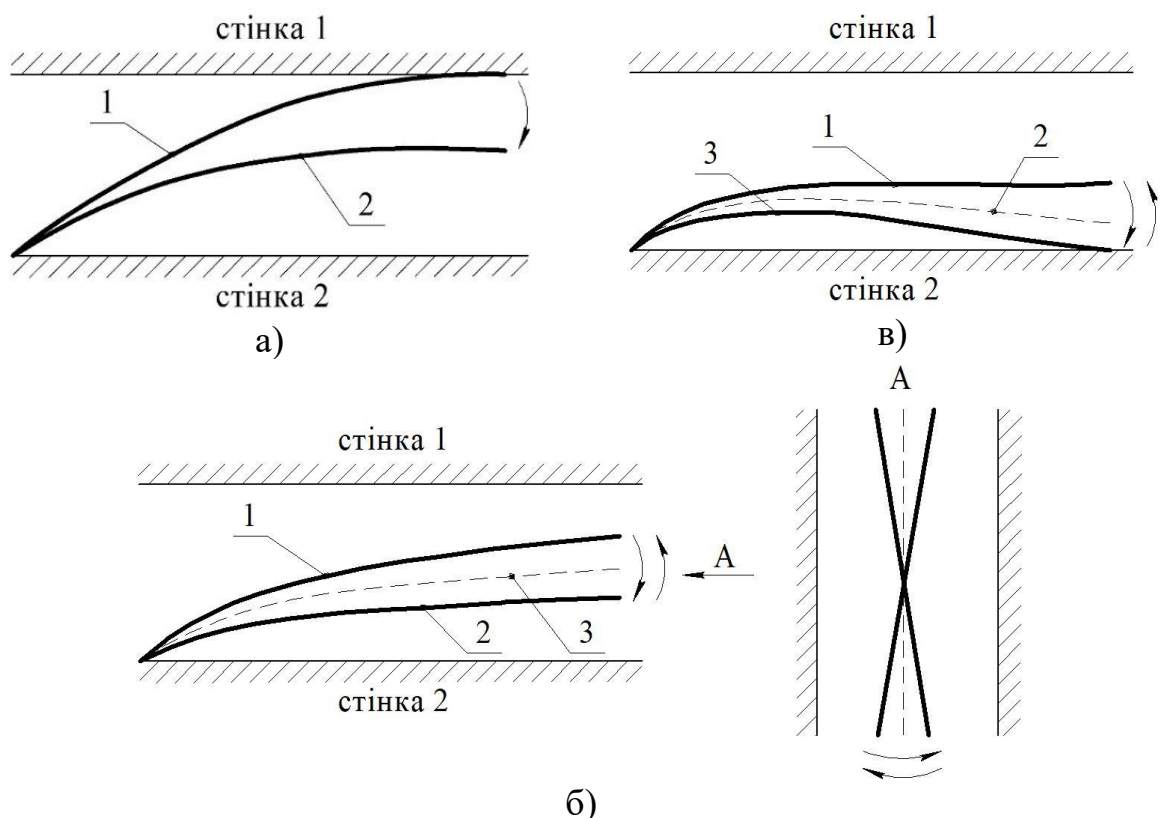


Рисунок 4.1–Режими роботи пружного відбійного елемента (0,4 мм, 0,5 мм)

1- мінімальне відхилення; 2 – максимальне відхилення;

3 – положення відносно якого коливається пружний відбійний елемент

Таблиця 4.1 – Результати експерименту для пружного відбійного елемента виготовленого з ПВХ з товщиною 0,5 мм

№	Швидкість входу газорідного потоку, м/с	Частота коливань, Гц	Розмах коливань, мм	Відхилення пружного елемента (положення «рівноваги»), мм
1	2,6	0	0	5
2	3	0	0	10
3	3,3	0	0	19
4	3,7	0	0	24
5	4	0	0	26
6	4,2	15,3	40	<u>39</u>
7	4,6	15,4	43	<u>41</u>
8	5,5	15	50	<u>54</u>
9	6,5	15,1	70	<u>54</u>
10	6,9	14,9	80	<u>59</u>
11	7,4	14,8	59	<u>71</u>
12	8	15,1	55	<u>89</u>
13	8,6	15,6	49	<u>94</u>
14	9,5	15,8	49	<u>94</u>
15	10,5	16	49	<u>94</u>
16	11,6	15,9	39	<u>99</u>

Розглянемо залежність кожного з параметрів коливань від швидкості входу газового потоку. Для опису залежності між відхиленням пружного елемента/положенням «рівноваги» (A) в залежності від швидкості (V) на кожному з трьох вище перелічених режимів скористаємось трьома функціями. Почнемо з першого режиму на якому виникають статичні відхилення від

початкового положення, до нього входять перші шість точок з таблиці вказаної вище. Для цього будемо використовувати лінійну функцію:

$$A = b_1 V + b_0. \quad (4.1)$$

При цьому вільний член не будемо покладати рівним нулю, оскільки помітні відхилення починають з'являтися при швидкості вищій за 2,2 м/с, до цього газовий потік проходить над верхньої та нижньої частиною пластини.

Для визначення коефіцієнтів регресії був використаний метод найменших квадратів:

$$F = \sum_{i=1}^n (A_i - b_0 - b_1 \cdot V_i)^2 \rightarrow \min. \quad (4.2)$$

Оскільки задача визначення коефіцієнтів лінійного поліному зводиться до пошуку мінімуму функції, прирівняємо до нуля частинні похідні по коефіцієнтам, що визначаємо:

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial b_0} = -2 \cdot \sum_{i=1}^n (A_i - b_0 - b_1 \cdot V_i) = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial b_1} = -2 \cdot \sum_{i=1}^n (A_i - b_0 - b_1 \cdot V_i) \cdot V_i = 0. \end{cases} \quad (4.3)$$

Виконаємо перетворення для отримання в результаті системи лінійних рівнянь з двома невідомими (b_1 , b_0):

$$\begin{cases} b_0 \cdot n + b_1 \cdot \sum_{i=1}^n V_i = \sum_{i=1}^n A_i, \\ b_0 \cdot \sum_{i=1}^n V_i + b_1 \cdot \sum_{i=1}^n V_i^2 = \sum_{i=1}^n (V_i \cdot A_i). \end{cases} \quad (4.4)$$

Для їх визначення скористаємось методом оберненої матриці:

$$\begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n & \sum_{i=1}^n V_i \\ \sum_{i=1}^n V_i & \sum_{i=1}^n V_i^2 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n A_i \\ \sum_{i=1}^n (V_i \cdot A_i) \end{pmatrix}. \quad (4.5)$$

Отже, для першого режиму роботи за допомогою програми MahtCAD були отримані наступні значення коефіцієнтів регресії $b_0 = -44,6$, $b_1 = 18,8$. В результаті рівняння регресії буде мати вигляд:

$$A = 18,8 \cdot V - 44,6. \quad (4.6)$$

Прирівнюючи дане рівняння до нуля визначаємо швидкість при якій починають виникати відхилення, отримуємо 2,4 м/с, що складає 9 % від експериментально отриманого значення (2,2 м/с).

Для проведення кількісної оцінки тісноти зв'язку між величинами при їх описанні лінійним поліном слугує коефіцієнт кореляції:

$$r_{xy} = \frac{\overline{VA} - \bar{V} \cdot \bar{A}}{S_A \cdot S_V}, \quad (4.7)$$

де \bar{A} , \bar{V} , \overline{VA} – середнє значення величин отриманих за допомогою експерименту:

$$\bar{V} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i, \quad \bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i, \quad \overline{VA} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_i \cdot V_i); \quad (4.8)$$

S_A , S_V – вибіркові дисперсії:

$$S_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n A_i^2}{n} - \bar{A}^2}, \quad S_V = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n V_i^2}{n} - \bar{V}^2}. \quad (4.9)$$

В результаті обчислень отримаємо значення коефіцієнту кореляції рівним 0,98, що за шкалою Чедока відповідає дуже високому ступеню прямого зв'язку між швидкістю та відхиленням.

На наступних режимах роботи при виникненні коливань за допомогою лінійного поліному проводилось описання положення «рівноваги» в залежності від швидкості газового потоку. Коефіцієнти поліному визначались, як і у попередньому випадку за допомогою методу найменших квадратів, їх значення: $b_0 = -17$, $b_1 = 12,2$. В результаті рівняння регресії буде мати вигляд:

$$A = 12,2 \cdot V - 17. \quad (4.10)$$

При цьому коефіцієнт кореляції складає 0,97, що за шкалою Чедока відповідає дуже високому ступеню прямому зв'язку між швидкістю та положенням «рівноваги».

На рисунку 4.2 вказаний графік залежності положення пластини від швидкості набігаючого газового потоку. На рисунку вертикальними лініями показані границі режимів роботи сепараційного елемента, що описані вище.

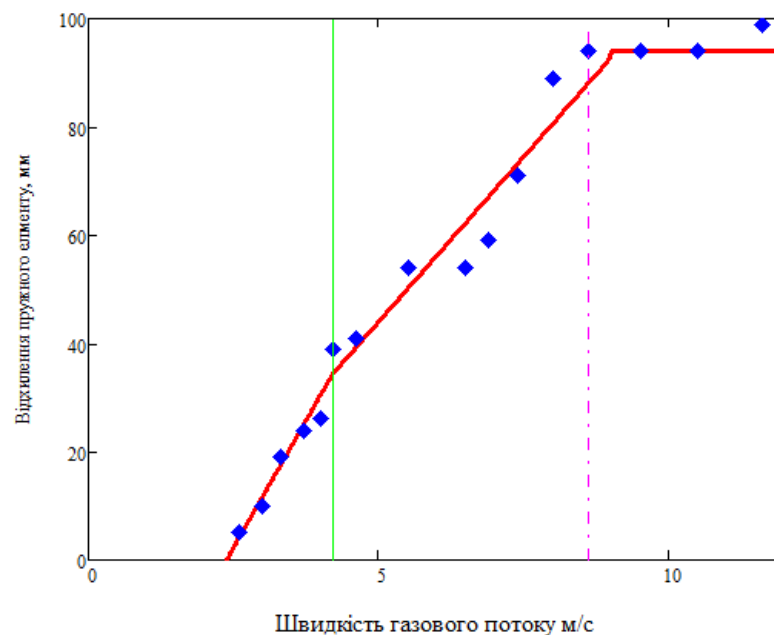


Рисунок 4.2 – Графік залежності положення пластини від швидкості набігаючого газового потоку

Наступним параметром, залежність якого розглядалась від швидкості входу газового потоку (V), являється розмах коливань (X). При цьому для описання залежності на другому режимі роботи (4,2 м/с – 7,4 м/с) використовується поліном другого ступеня:

$$X = a_0 + a_1 \cdot V + a_2 \cdot V^2. \quad (4.11)$$

Як і для лінійного поліному, визначення невідомих коефіцієнтів поліному другого ступеню можна провести за допомогою методу найменших квадратів:

$$F = \sum_{i=1}^n (X_i - a_0 - a_1 \cdot V_i - a_2 \cdot V_i^2)^2 \rightarrow \min. \quad (4.12)$$

При цьому необхідно прирівняти до нуля три частинні похідні по коефіцієнтам a_0, a_1, a_2 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial a_0} &= -2 \cdot \sum_{i=1}^n (X_i - a_0 - a_1 \cdot V_i - a_2 \cdot V_i^2) = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial a_1} &= -2 \cdot \sum_{i=1}^n (X_i - a_0 - a_1 \cdot V_i - a_2 \cdot V_i^2) \cdot V_i = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial a_2} &= -2 \cdot \sum_{i=1}^n (X_i - a_0 - a_1 \cdot V_i - a_2 \cdot V_i^2) \cdot V_i^2 = 0. \end{aligned} \quad (4.13)$$

В даному випадку при виконанні перетворень отримаємо систему лінійних рівнянь з трьома невідомими (a_0, a_1, a_2):

$$\begin{cases} a_0 \cdot n + a_1 \cdot \sum_{i=1}^n V_i + a_2 \cdot \sum_{i=1}^n V_i^2 = \sum_{i=1}^n X_i, \\ a_0 \cdot \sum_{i=1}^n V_i + a_1 \cdot \sum_{i=1}^n V_i^2 + a_2 \cdot \sum_{i=1}^n V_i^3 = \sum_{i=1}^n (X_i \cdot V_i), \\ a_0 \cdot \sum_{i=1}^n V_i^2 + a_1 \cdot \sum_{i=1}^n V_i^3 + a_2 \cdot \sum_{i=1}^n V_i^4 = \sum_{i=1}^n (X_i \cdot V_i^2). \end{cases} \quad (4.14)$$

Отже, вирішення вищевказаної системи за допомогою методу оберненої матриці має вигляд:

$$\begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n & \sum_{i=1}^n V_i & \sum_{i=1}^n V_i^2 \\ \sum_{i=1}^n V_i & \sum_{i=1}^n V_i^2 & \sum_{i=1}^n V_i^3 \\ \sum_{i=1}^n V_i^2 & \sum_{i=1}^n V_i^3 & \sum_{i=1}^n V_i^4 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n X_i \\ \sum_{i=1}^n (X_i \cdot V_i) \\ \sum_{i=1}^n (X_i \cdot V_i^2) \end{pmatrix}. \quad (4.15)$$

Використовуючи дані зведені до таблиці 4.1 для другого режиму роботи за допомогою програми MathCAD були отримані наступні значення коефіцієнтів регресії $a_0 = 121,2$; $a_1 = -39,8$, $a_2 = 4,9$. В результаті рівняння регресії буде мати вигляд:

$$X = 121,1 - 39,8 \cdot V + 4,9 \cdot V^2. \quad (4.16)$$

Для перевірки значимості регресійної моделі використовується критерій Фішера, розрахунок якого виконується за формулою:

$$F = \frac{R^2}{1 - R^2} \cdot \frac{f_2}{f_1}, \quad (4.17)$$

де R – коефіцієнт кореляції, що визначається за нижче наведеною формулою;
 f_1, f_2 – число ступенів свободи.

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \hat{X}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - M_X)^2}}, \quad (4.18)$$

де X_i – експериментальні значення розмаху коливань;

\hat{X}_i – теоретичні значення, розраховані за отриманою регресійною залежністю;

M_X – середнє значення X_i .

Враховуючи, що число пояснюючих змінних дорівнює одиниці ($k = 1$), то число ступенів свободи поясненої дисперсії $f_1 = 1$. Число ступенів свободи непоясненої дисперсії обчислюється в залежності від кількості експериментальних точок та кількості пояснюючих змінних $f_2 = n - k - 1 = 5 - 1 - 1 = 3$. Отже, отриманий коефіцієнт кореляції складає 0,999, а визначений критерій Фішера 1806. Визначений за таблицею критерій Фішера, для прийнятого рівня значимості $\alpha = 0,05$ та вищевказаних ступенів свободи складає $F_{таб} = 10,13$. Оскільки фактичне значення $F > F_{таб}$, то знайдена оцінка рівняння регресії статистично надійна.

На наступному режимі роботи (7,4 м/с – 11,6 м/с) залежність між розмахом коливань та швидкістю газового потоку, як і у попередньому випадку проводилась за допомогою поліному другого ступеню, з визначенням його коефіцієнтів методом найменших квадратів. Отримана залежність має вигляд:

$$X = 286,2 - 41,5 \cdot V + 1,9 \cdot V^2. \quad (4.19)$$

Як і у попередньому випадку проведемо оцінку точності описання залежності між розмахом коливань та швидкістю газового потоку за допомогою критерію Фішера. Враховуючи, що кількість експериментальних точок що використовувалась змінилась, то число ступенів свободи непоясненої дисперсії дорівнює 5. Отже, коефіцієнт кореляції складає 0,902, критерій Фішера $F = 21,9$, його табличне значення $F_{таб} = 6,61$. Враховуючи, що фактичне значення критерію Фішера більше за табличне то коефіцієнт детермінації являється статистично значимим.

Отримана залежність між швидкістю входу газового потоку та розмахом коливань для обох режимів роботи показана на рисунку 4.3. На рисунку за допомогою вертикальних ліній позначені границі режимів роботи.

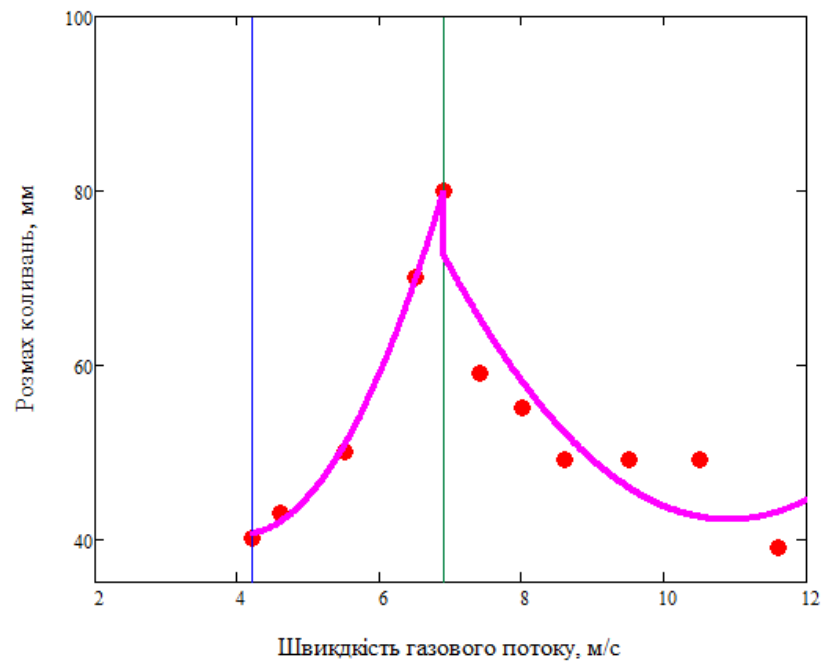


Рисунок 4.3 – Графік залежності розмаху коливань від швидкості входу газового потоку на двох режимах роботи

Останнім параметром коливань, що досліджувався під час проведення експерименту являється частота коливань, для оцінки її зміни від збільшення швидкості знайдемо відсоткове відношення її мінімального значення від максимального. Для даних наведених в таблиці 4.1 воно складає 96,7 %, а отже даний параметр в досліджуваному діапазоні швидкостей практично не змінюється, а отже при використанні динамічного сепараційного елемента для віброкоагуляції краплин частоту можна вважати сталою.

В тому числі вимірювалась частота та амплітуда пружного відбійного елемента з товщиною 0,4 мм, що був виготовлений з матеріалу ПВХ, властивості якого вказані вище. Результати вимірювань подані в таблиці 1, додаток Б. Для обробки результатів експерименту, як і у попередньому випадку, використовувався метод найменших квадратів. Отримані регресійні залежності, коефіцієнти кореляції, критерії Фішера зведені до таблиці 4.2. Графіки залежності положення пружного відбійного елемента, розмаху коливань від швидкості входу газового потоку наведені на рисунках 1 та 2 відповідно додатку Б. При цьому можна виділити три режими роботи, як і у

випадку відбійного лементу з товщиною 0,5 мм, в таблиці 4.3 наведені границі цих режимів.

Розглянемо більш детально роботу пружного відбійного елемента товщиною 0,6 мм, виготовлено з ПВХ, властивості якого вказано вище. Його особливістю являється наявність чотирьох режимів роботи (рисунок 4.4), що відрізняються від видільних для товщини пластин 0,4 мм та 0,5 мм:

- перший режим (діапазон швидкостей 3,3 м/с – 4,8 м/с, $Re\ 29,1 \cdot 10^3 - 42,3 \cdot 10^3$) – початок коливань відбійного елемента, при цьому він не доторкається жодної стінки каналу, що схематично показано на рисунку 4.4 а. Необхідно відмітити, що при швидкості входу меншій за 3,3 м/с відхилення елемента не спостерігаються, а у випадку їх виникнення являються надто малими для вимірювання;

- другий режим (діапазон швидкостей 4,8 м/с – 6,6 м/с, $Re\ 42,3 \cdot 10^3 - 58,3 \cdot 10^3$) – коливання пружного відбійного елемента продовжуються при цьому елемент починає доторкатись до стінки 1, як вказано на рисунку 4.4 б. При цьому положення елемента 2 наближається до стінки 2, доторкання відбуваються за рахунок збільшення розмаху коливань;

- третій режим (діапазон швидкостей 6,6 м/с – 9,9 м/с, $Re\ 58,3 \cdot 10^3 - 87,4 \cdot 10^3$) – починаються згинно-крутильні коливання, про що свідчить торкання до верхньої та нижньої стінки каналу. Оскільки, положення елемента 2 наближалось при збільшенні швидкості до стінки 2, елемент перестав торкатись 1 стінки. Даний режим роботи схематично показано на рисунку 4.4 в;

- четвертий режим (діапазон швидкостей 9,9 м/с – 13,1 м/с, $Re\ 87,4 \cdot 10^3 - 115,6 \cdot 10^3$) – елемент починає торкатись стінки 2, при цьому згинно-крутильні коливання продовжуються (рисунок 4.4 г). Хоча 13,1 м/с було вказано, як границю роботи, але це являється максимальною швидкістю потоку яку можна отримати на за допомогою експериментального стенду.

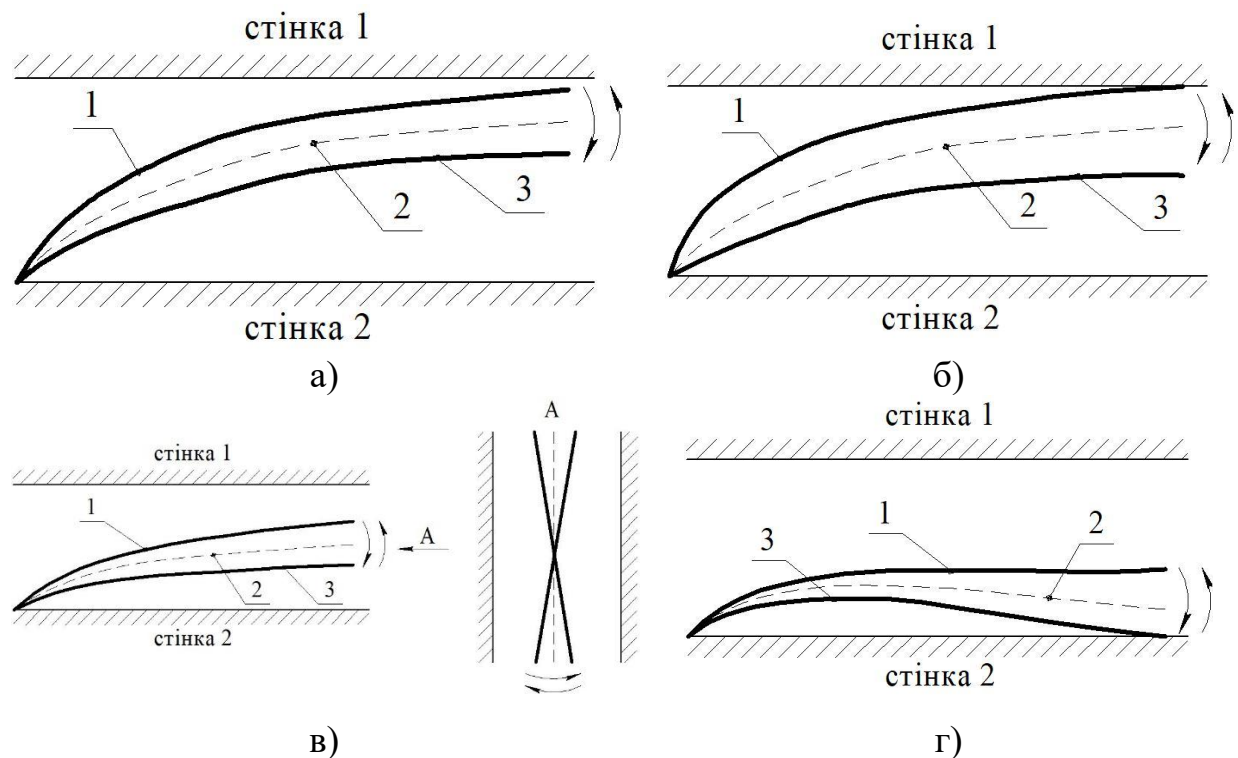


Рисунок 4.4 – Режими роботи пружного відбійного елемента (0,6 мм)

1 – мінімальне відхилення; 2 – максимальне відхилення;

3 – положення відносно якого коливається пружний відбійний елемент

Результати експериментальних досліджень зведені до таблиці 2 додатку Б. Аналіз отриманих результатів проводився за допомогою методу найменших квадратів для знаходження коефіцієнтів поліномів першого та другого ступенів, що описують залежність між розмахом коливань, положенням пружного відбійного елемента та швидкістю входу газового потоку. В результаті графік залежності положення пластини від швидкості набігаючого газового потоку побудований на рисунку 4.5. Вертикальними лініями на даному рисунку показано границі режимів, як видно на другому та третьому з них одержані лінії, що описують залежність положення пружного відбійного елемента від швидкості газового потоку мають однаковий кут нахилу до вертикальної осі. Отже на даних режимах можна описувати зв'язок між параметрами за допомогою однієї залежності. Розглядаючи більш детально четвертий режим роботи, необхідно відмітити, що лінія як і у попередніх випадках являється практично горизонтальною.

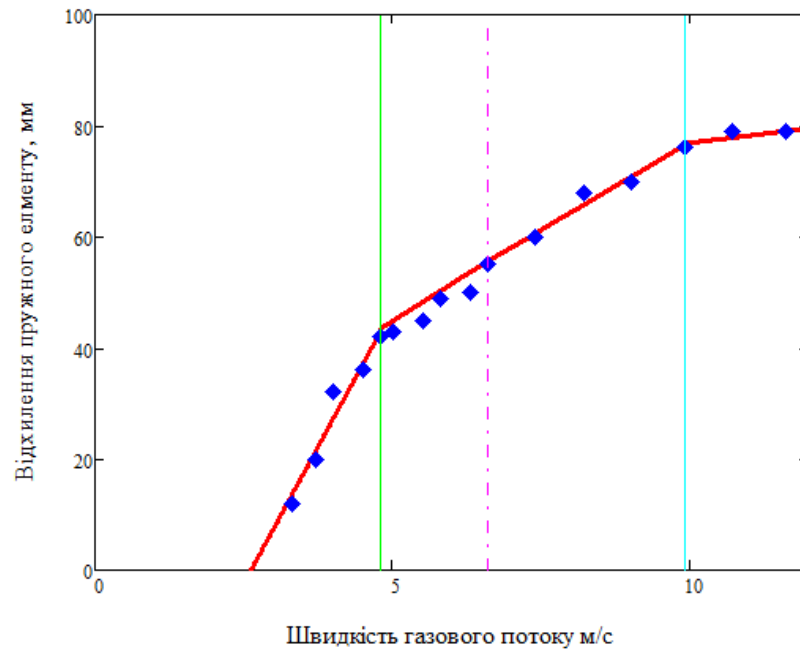


Рисунок 4.5 – Графік залежності положення пластини від швидкості набігаючого газопотоку

Розглянемо більш детально отриманий графік залежності розмаху пружного відбійного елемента від швидкості набігаючого газопотоку, який поданий на рисунку 4.6. Як і у випадку пластин з товщиною 0,4 мм та 0,5 мм на режимах роботи сепараційного елемента при якому відсутнє доторкання до стінки каналу 2 (рисунок 4.4) функція, що описує залежність між розмахом коливань та швидкістю потоку, зростаюча; на останньому режиму роботи – спадна, як і у всіх попередніх випадках. Необхідно відмітити, що на третьому режимі роботи залежність являється практично лінійною, з огляду на коефіцієнт біля змінної в квадраті.

Відсоткове відношення мінімальної так максимальної частоти коливань пружного відбійного елемента складає 78,8%, що може вплинути на коагуляцію краплин.

Результати аналізу експериментальних даних зведені до таблиці 4.2 та 4.3.

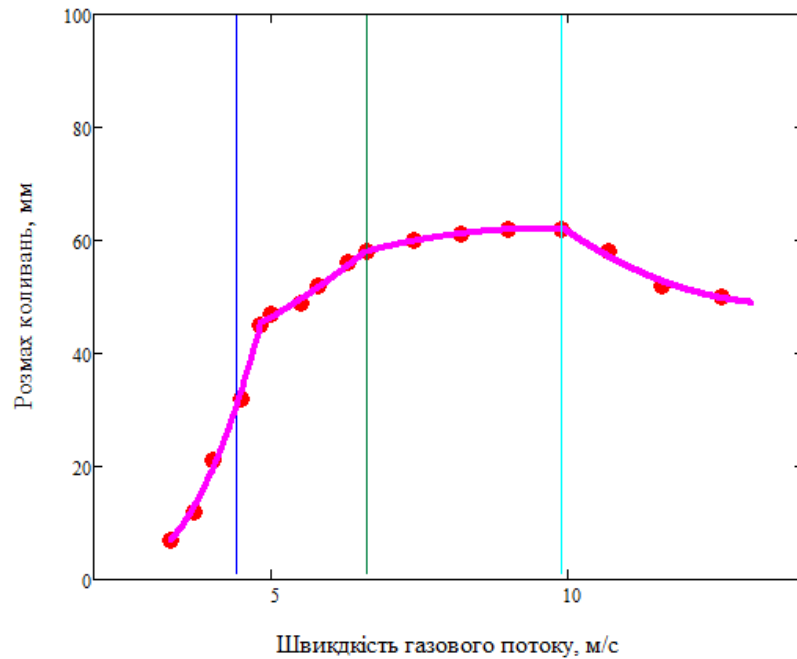


Рисунок 4.6 – Графік залежності розмаху коливань пружного відбійного елемента від швидкості входу газového потоку

В якості альтернативного матеріалу для виготовлення пружних відбійних елементів з товщиною 0,4 мм було запропоновано ABS (акрилонітрил бутадієн стирол) пластик, що має наступні механічні властивості: модуль пружності на згин $E_{ABS} = 1700$ МПа; коефіцієнт Пуассона $\nu_{ABS} = 0,3$ [125]. Як і у випадку пружних відбійних елементів виготовлених з ПВХ товщиною 0,4 мм та 0,5 мм, роботу вищевказаного елемента можна розділити на три режими, що були вище описані. Результати експериментальних досліджень зведені до таблиці 3 додатку Б.

Як видно з результатів експериментальних досліджень робота сепараційного елемента, пружний відбійний елемент в якому виготовлений з ABS-пластику, має ряд особливостей, а саме: досить широкий перший режим роботи (коливання відсутні) 1,1 м/с – 5,3 м/с ($Re\ 9,7 \cdot 10^3 - 46,7 \cdot 10^3$) та третій (елемент здійснює крутильні коливання при цьому торкаючись стінки 2) 6,3 м/с – 11,6 м/с ($Re\ 55,6 \cdot 10^3 - 102,4 \cdot 10^3$), в тому числі на першому режимі спостерігаються значні відхилення пружного елемента 15 мм – 60 мм; на противагу до цього досить короткий другий режим роботи 5,5 м/с – 6,3 м/с

($Re\ 48,5 \cdot 10^3 - 55,6 \cdot 10^3$). Необхідно відмітити, що за границю роботи було прийнято швидкість 11,8 м/с ($Re\ 104,2 \cdot 10^3$) за якої елемент під дією потоку притискається до стінки 2.

Обробка результатів експерименту проводилась за допомогою методу найменших квадратів для знаходження невідомих коефіцієнтів поліномів першого та другого ступенів. Перевірка значимості регресійних моделей проводилась за допомогою кореляційних коефіцієнтів та критерію Фішера. Отримані результати були зведені до таблиці 4.2 та 4.3.

На рисунку 3 додатку Б наведено графік залежності відхилення пружного відбійного елемента від положення рівноваги в залежності від швидкості газового потоку. Як видно з даного рисунку на третьому режимі роботи залежність між відхиленням та швидкістю являється зростаючою функцією, у випадку виготовлення пластини з ПВХ лінія була практично горизонтальною.

На рисунку 4 додатку Б наведено графік залежності розмаху коливань пружного відбійного елемента від швидкості входу газового потоку на двох режимах роботи. Зважаючи на те що на другому режимі роботи було отримано тільки три точки поведінки пластини на цьому проміжку була описана за допомогою лінійної залежності.

Таблиця 4.2 – Рівняння регресії для різних матеріалів та товщин пластин

Матеріал, товщина	Добуток $E \cdot h^3$	Рівняння регресії залежності різних параметрів від швидкості (значення відповідних критеріїв достовірності подано в дужках)			
		відхилення	положення «рівноваги»	розмах на 2 – му режимі роботи	розмах на 3 – му режимі роботи
1	2	3	4	5	6
ПВХ 0,4 мм	179	$A = 10,6 \cdot V - 1$ $r_{xy} = 0,95$	$A = 6,1 \cdot V - 24$ $r_{xy} = 0,97$	$X = 36,1 - 6,9 \cdot V + 1,7 \cdot V^2$ $F_{маб} = 18,51, F = 53$	$X = 666,2 - 118,9 \cdot V + 5,8 \cdot V^2$ $F_{маб} = 6,61, F = 6337$
ПВХ 0,5 мм	350	$A = 18,8 \cdot V - 44,6$ $r_{xy} = 0,98$	$A = 12,2 \cdot V - 17$ $r_{xy} = 0,97$	$X = 121,1 - 39,8 \cdot V + 4,9 \cdot V^2$ $F_{маб} = 10,13, F = 1806$	$X = 286,2 - 41,5 \cdot V + 1,9 \cdot V^2$ $F_{маб} = 6,61, F = 21,9$
ПВХ 0,6 мм	604	–	$A = 19,8 \cdot V - 52$ *1 $r_{xy} = 0,98$	$X = 68,8 - 48,7 \cdot V + 9 \cdot V^2$ *1 $F_{маб} = 10,13, F = 422$	$X = 21,1 - 8,5 \cdot V - 0,4 \cdot V^2$ *3 $F_{маб} = 10,13, F = 596,8$
			$A = 6,8 \cdot V - 9$ *2,3 $r_{xy} = 0,89$		
			$A = 63,8 \cdot V - 1,3$ *2,3 $r_{xy} = 0,989$	$X = 37,1 - 2,3 \cdot V + 0,8 \cdot V^2$ *2 $F_{маб} = 7,71, F = 513,2$	$X = 229 - 26,4 \cdot V + V^2$ *4 $F_{маб} = 18,5, F = 118,6$

*1 – елемент починає коливатись відносно положення рівноваги не торкаючись жодної стінки. *2 – елемент коливаючись торкається стінки 1. *3 – елемент торкається тільки верхньої та нижньої стінки каналу. *4 – елемент торкається тільки верхньої, нижньої стінки каналу та стінки 2.

Продовження таблиці 4.2.

1	2	3	4	5	6
АБС 0,4	109	$A = 10 \cdot V - 0,5$ $r_{xy} = 0,985$	$A = 8 \cdot V - 12,6$ *3 $r_{xy} = 0,936$	$X = 34,4 \cdot V - 117$ $r_{xy} = 0,998$	$X = 181 - 20 \cdot V + 0,8 \cdot V^2$ $F_{таб} = 6,61, F = 6337$
			$A = 2,6 \cdot V - 47,3$ *4 $r_{xy} = 0,994$		

*1 – елемент починає коливатись відносно положення рівноваги не торкаючись жодної стінки. *2 – елемент коливаючись торкається стінки 1. *3 – елемент торкається тільки верхньої та нижньої стінки каналу. *4 – елемент торкається тільки верхньої, нижньої стінки каналу та стінки 2.

Таблиця 4.3 – Границі режимів роботи

Матеріал, товщина	Добуток $E \cdot h^3$	Мінімальна швидкість при якій виникають відхилення, м/с	Швидкість при якій виникають коливання, м/с	Максимальна швидкість, при якій є коливання, м/с	Максимальне значення положення рівноваги, мм	Границі режимів роботи	Відсоткове відношення мінімальної та максимальної частоти, %
1	2	3	4	5	6	7	8
ПВХ 0,4 мм	179	1,1	5,9	10,5	80	1,6 м/с – 5,5 м/с 5,5 м/с – 8 м/с 8 м/с – 10,5 м/с	91,9

1	2	3	4	5	6	7	8
ПВХ 0,5 мм	350	2,2	4,2	11,6	99	2,2 м/с – 4,2 м/с 4,2 м/с – 7,4 м/с 7,4 м/с – 11,6 м/с	96,7
ПВХ 0,6 мм	604	2,8 ^{*1}	3,3	13,1	90	3,3 м/с – 4,8 м/с 4,8 м/с – 6,6 м/с 6,6 м/с – 9,9 м/с 9,9 м/с – 13,1 м/с	78,8
АБС 0,4	109	0,05	5,51	11,8	79	1,1 м/с – 5,51 м/с 5,51 м/с – 6,3 м/с 6,3 м/с – 11,6 м/с	72

*1 – мінімальна швидкість за якої пластина починає деформуватись та відхилятися від стінки.

4.2 Аналіз результатів числових моделювань

Числові моделювання були проведені за методикою описаною в підрозділі 2.4 для динамічних сепараційних елементів показаних на рисунку 2.1 а. Для підтвердження результатів числових моделювань проведемо порівняння їх результатів з даними фізичного експерименту описаними в попередньому підрозділі. На рисунку 4.7 показані для прикладу вектори швидкості газового потоку отримані за результатами числового моделювання для швидкості набігаючого на пружні відбійні елементи газового потоку 3,5 м/с ($Re\ 30,9 \cdot 10^3$).

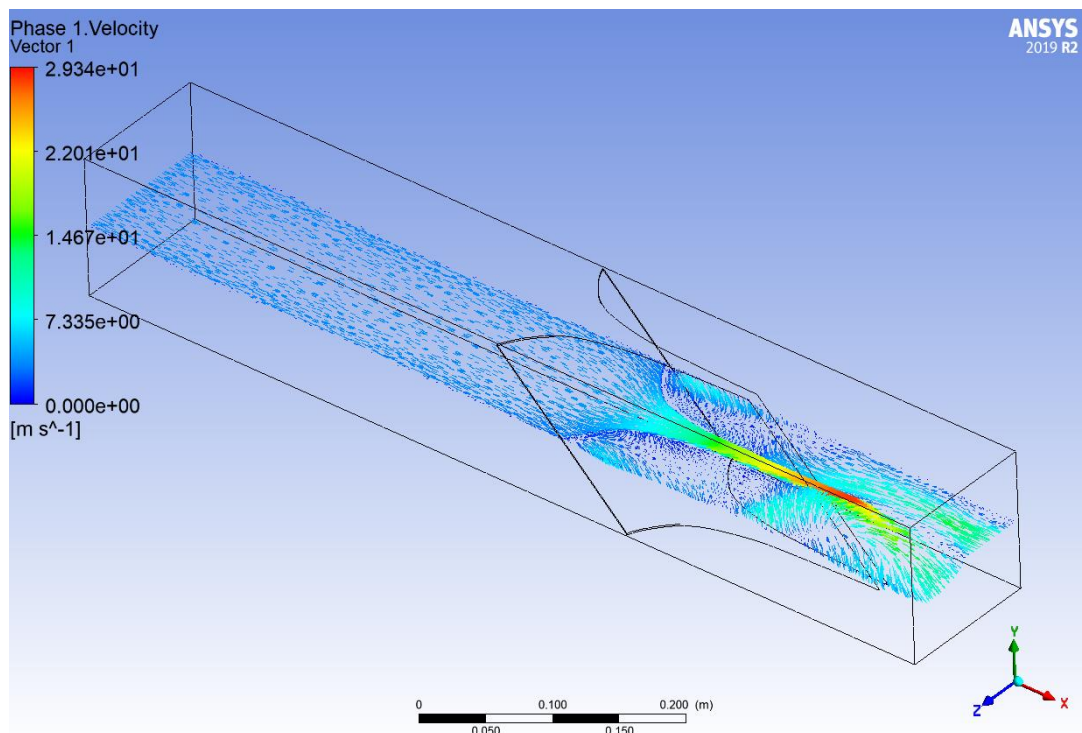


Рисунок 4.7 – Вектори швидкості газового потоку

Отримані відхилення за результатами числового моделювання та фізичного експерименту зведені до таблиці 4.4 (матеріал пластини ПВХ пластик, товщина пружного відбійного елементу 0,5 мм). Як видно з отриманих даних числове моделювання дає завищені значення відхилень пружного відбійного елементу. Найбільше відхилення складає 13%. В тому числі за результатами числового моделювання відрізняється швидкість за якої починаються коливання, при цьому в меншу сторону.

Таблиця 4.4 - Порівняння відхилень отриманих з числового та фізичного експерименту

Швидкість набігаючого потоку, м/с	Відхилення (фізичний експеримент), мм	Відхилення (числовий експеримент), мм
2,6	5	6
3	10	12
3,3	19	21
3,7	24	30
4	26	-

Таблиці 4.5 – Порівняння частоти та розмаху коливань отриманих з числового та фізичного експерименту

Швидкість набігаючого потоку, м/с	Частота коливань (фізичний експеримент), Гц	Частота коливань (числовий експеримент), Гц	Розмах коливань (фізичний експеримент), мм	Розмах коливань (числовий експеримент), мм
4	0	14,1	0	38
4,2	15,3	14,2	40	39
4,6	15,4	14,1	43	40
5,5	15	13,9	50	47
6,5	15,1	14	70	68
6,9	14,9	13,8	80	79
7,4	14,8	14,1	59	57
8	15,1	14,5	55	52
8,6	15,6	14,6	49	45
9,5	15,8	14,9	49	46
10,5	16	15	49	47
11,6	15,9	14,8	39	35

До таблиці 4.5 зведені розмах та частоту коливань пружних відбійних елементів в залежності від швидкості набігаючого газового потоку отримані з числового та фізичного експериментів (матеріал пластини ПВХ пластик, товщина пружного відбійного елементу 0,5 мм). При цьому розмах коливань отриманий за результатами числового експерименту та частота відрізняються в меншу сторону. Максимальна різниця між частотами складає 9%, а між розмахами 7%. За результатами числового моделювання в тому числі можна отримати траєкторію руху передньої кромки пружного відбійного елементу, що дозволяє робити висновки в тому числі про час виходу на стабільні коливання пружного відбійного елементу при зміні швидкості. На рисунку 4.8 а,б показано траєкторія руху передньої кромки пружного відбійного елементу товщиною 0,5 мм та швидкості набігаючого потоку 4 м/с ($Re\ 35,3 \cdot 10^3$). Графік був побудований в програмному комплексі Mathcad за точками імпортованими в окремий файл з ANSYS Transient Structural. На початковому етапі коливання затухаючі, починаючи з 92 секунди вони являються усталеними.

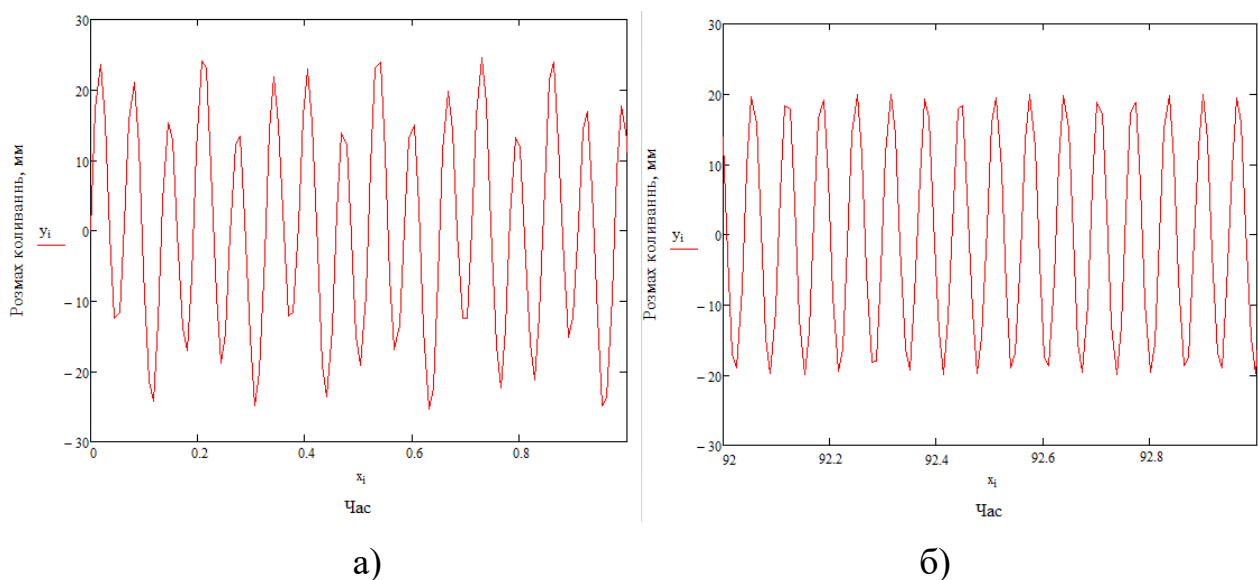


Рисунок 4.8 – Коливання передньої кромки відбійного елементу
(швидкість 4 м/с, товщина – 0,5 мм)

Аналізуючи результати експерименту та числового моделювання можна зробити висновок, що методика числового моделювання описана в розділі 2.4 може бути використана для розрахунку динамічних сепараційних елементів.

Моделюючи за методикою описаною вище гідроаеропружну взаємодію саме газорідного потоку з пружними відбійними елементами динамічних сепараційних пристроїв було отримано наступні залежності між ефективністю розділення газорідного потоку та значенням прохідного перетину, вони зведені до таблиці 4.6, в тому числі до таблиці 4.7 було зведені значення гідравлічного опору в залежності від швидкості газового потоку. В якості моделі багатофазного потоку було обрано Ейлеровську модель, в тому числі було задано в якості взаємодії між фазами поверхневий натяг та змочуваність поверхні. На рисунку 4.9 наведено рисунок розподілу об'ємної долі в серединному перетині при 4 м/с за якого не спостерігається втрата стійкості пружного відбійного елементу. На рисунку 4.10 наведений рисунок розподілу об'ємної долі в серединному перетині при 20 м/с ($Re\ 176,5 \cdot 10^3$) за якого спостерігається втрата стійкості пружного відбійного елементу.

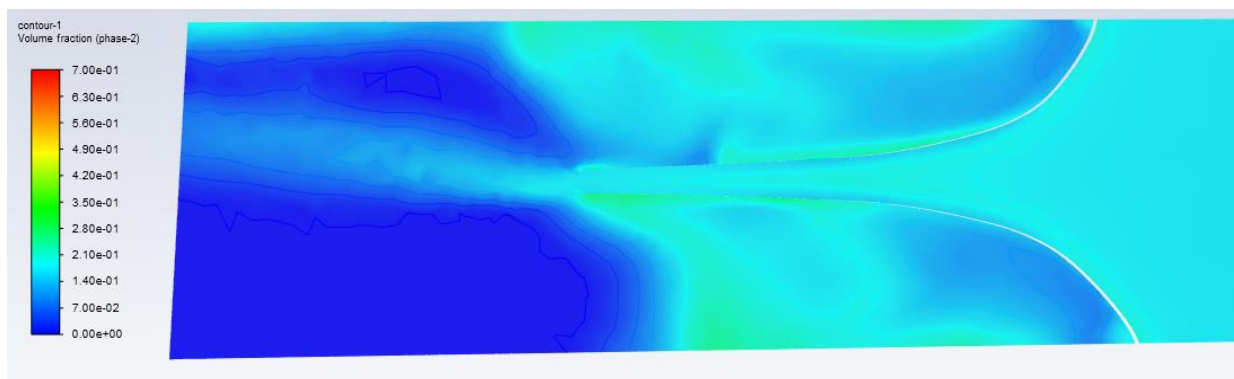


Рисунок 4.9 - Розподілу об'ємної долі в серединному перетині

За результатами проведених моделювань можна зробити висновок, що осадження рідких частинок відбувається в обох випадках на внутрішній та зовнішній частині пружних відбійних елементів, у випадку відсутності коливань, якщо відбувається втрата стійкості то осадження відбувається на зовнішній частині пружних елементів та концентрація часток збільшується в середині прохідного перетину.

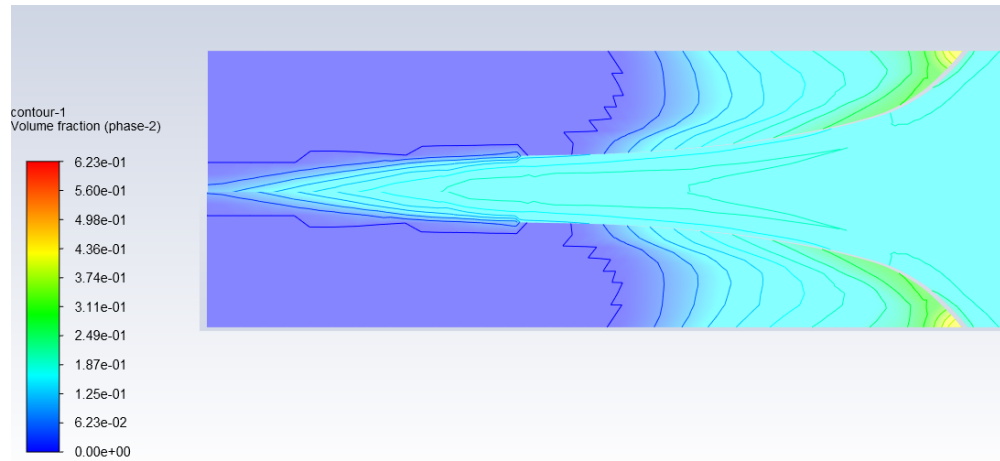


Рисунок 4.10 – Розподілу об’ємної долі в серединному перетині при 20 м/с

Таблиця 4.6 - Оптимальні значення зазору для деяких швидкостей

№	Швидкість потоку, м/с	Запор між пластинами, мм	Об’ємна доля рідини на виході·10 ⁴	Ефективність уловлення рідини, %
1	2	5	1,5	25,1
2	5	5	1,5	23,9
3	6	12,4	1,6	22,1
4	8	12,4	1,6	22,1
5	9	12,4	1,6	22,2
6	10	15,6	1,6	20,4
7	11	15,6	1,6	20,4
8	12	16	1,6	20,3
9	13	16	1,6	20,3
10	14	19,3	1,6	19,6
11	15	19,	1,6	19,6
12	16	19,3	1,6	19,6
13	17	19,3	1,6	19,7
14	18	19,3	1,6	19,7
15	19	19,3	1,6	19,7
16	20	19,3	1,6	19,7
17	25	19,3	1,6	19,3

Значення отримані в результаті чисельного розрахунку гідроаеропружної взаємодії пружних елементів газодинамічних сепараційних пристроїв та розрахований коефіцієнти гідравлічного опору зведені до таблиці 4.11.

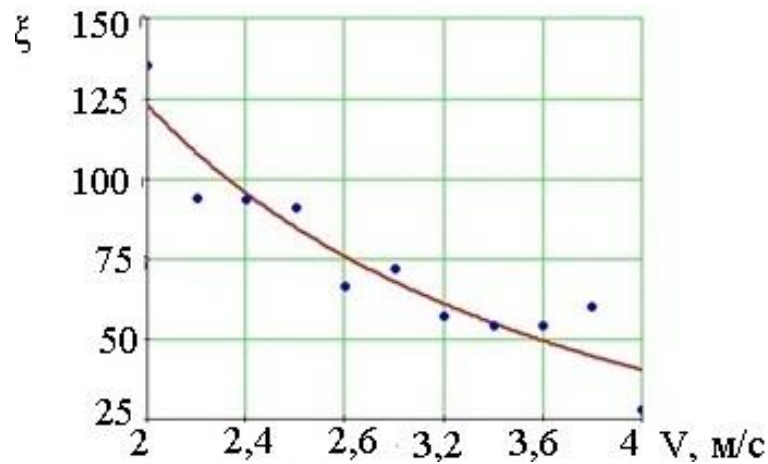


Рисунок 4.11 – Графік залежності гідравлічного опору від швидкості руху газорідного потоку

Таблиця 4.7 - Результати розрахунків

№	Швидкість на вході в канал V , м/с	Тиск на вході в канал p_1 , Па	Тиск на виході з каналу p_2 , Па	Гідравлічний опір Δp , Па	Коефіцієнт гідравлічного опору
1	2	489	63	426	135
2	2,2	546	94	452	94
3	2,4	500	84	416	93
4	2,6	567	89	478	91
5	2,8	530	135	395	66
6	3	557	65	492	72
7	3,2	531	92	439	57
8	3,4	546	82	464	54
9	3,6	574	57	517	55
10	3,8	766	135	631	60
11	4	405	86	319	28

Як видно з отриманих результатів, була визначені залежність між гідравлічним опором та швидкістю потоку для динамічних сепараційних елементів.

Виходячи з того, що пружні елементи послідовно розміщуються у сепараційному каналі динамічного сепараційного пристрою, та для забезпечення високого ступеня розділення запропонована залежність для визначення оптимальної кількості даних елементів:

$$\eta = 1 - (1 - \eta_1)^n, \quad (4.20)$$

де η – необхідна ефективність сепарації динамічного сепараційного пристрою;

η_1 – ефективність сепарації окремої пари пружних елементів;

n – кількість пружних елементів в одному сепараційному каналі.

Звідки, кількість пружних елементів, n , буде рівна:

$$n = \frac{\ln(1-\eta)}{\ln(1-\eta_1)} \quad (4.21)$$

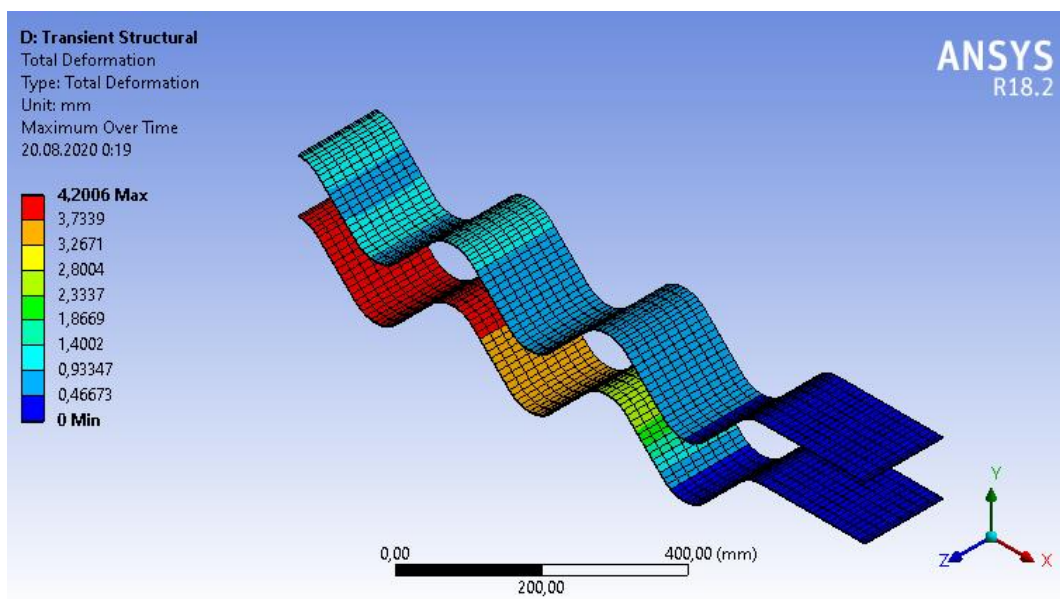
Так для досягнення ефективності розділення вище 90% необхідно 8 підряд встановлених елементів у формі похилого параболічного напівцилідру у сепараційному каналі.

4.3 Ідентифікація невідомих параметрів моделі за результатами числових експериментів

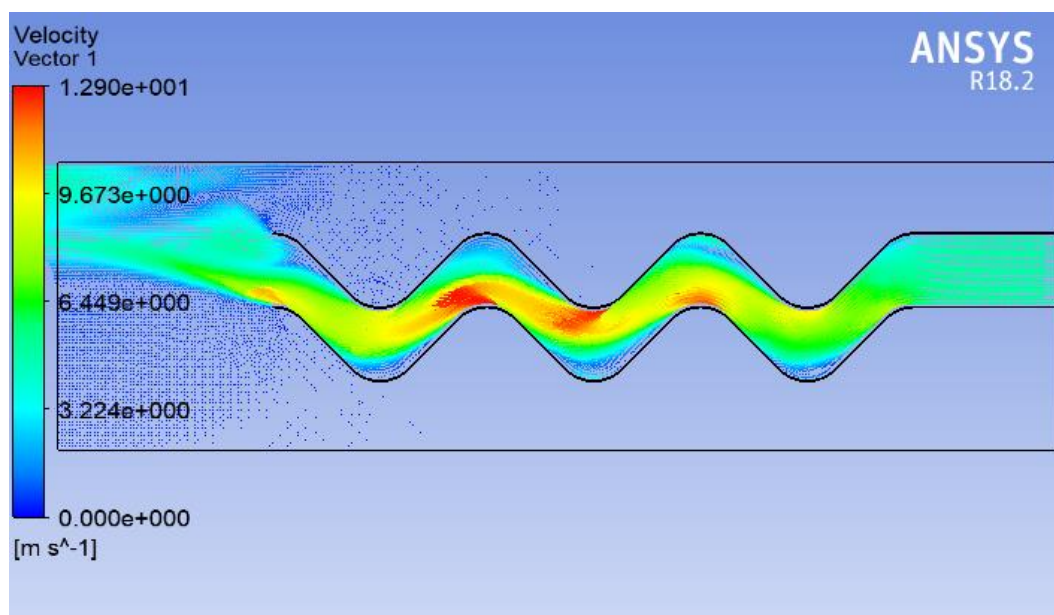
Враховуючи, що методика проведення числових моделювань була підтвердженою то аналогічно було проведено моделювання і для пружних відбійних елементів синусоїдальної форми. При цьому матеріал пластин задавався анізотропним таким чином, що б в поздовжньому напрямку забезпечувались деформації, а в поперечному напрямку елемент був жорстким.

Був запропонований композитний матеріал з ПВХ пластику та волокон металу, для того що б забезпечити помітні зміни кривизни каналу [118].

До таблиці 4.8 зведені результати числових розрахунків, а саме максимальні деформації пружних синусоїдальних каналів, інтегрована по поверхні сила в залежності від швидкості входу потоку. На рисунках 4.12 – 4.17 наведені результати деформації пружних елементів (а) та поля векторів швидкості (б) при різних значеннях швидкості газорідного потоку.



а)



б)

Рисунок 4.12 – Деформації пружних синусоїдальних елементів (а) та поле векторів швидкості (б) для швидкості входу 5 м/с ($Re\ 44,1 \cdot 10^3$)

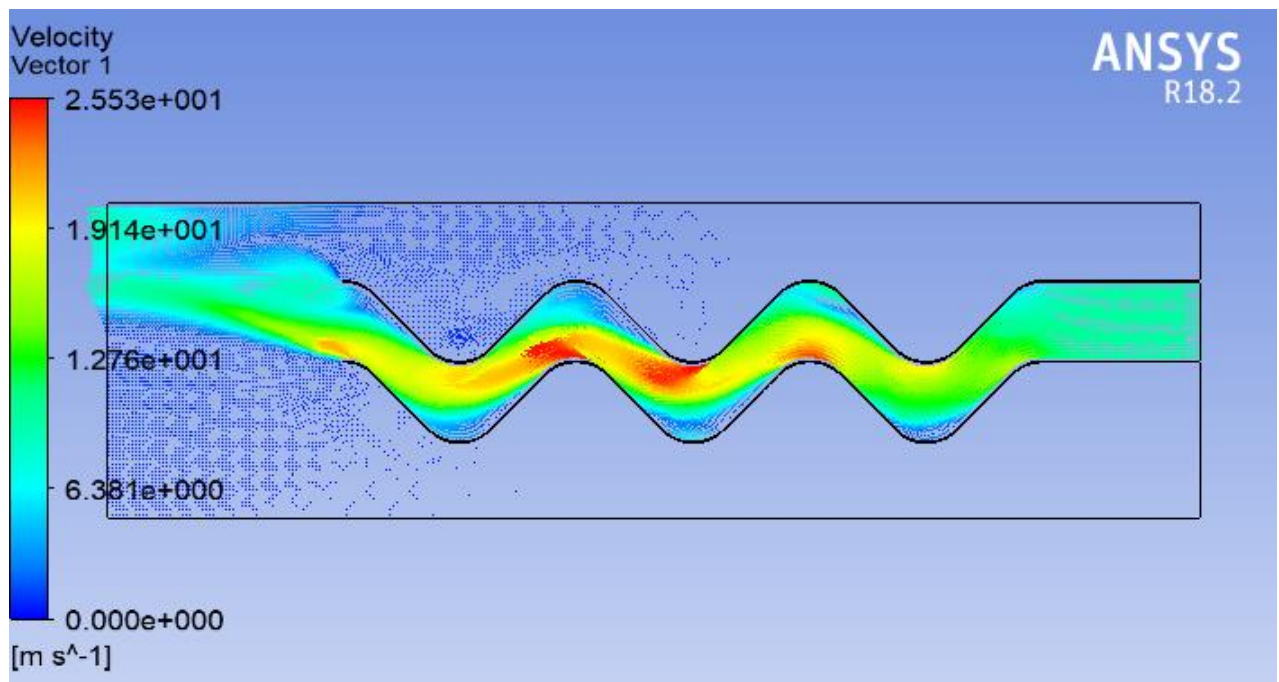
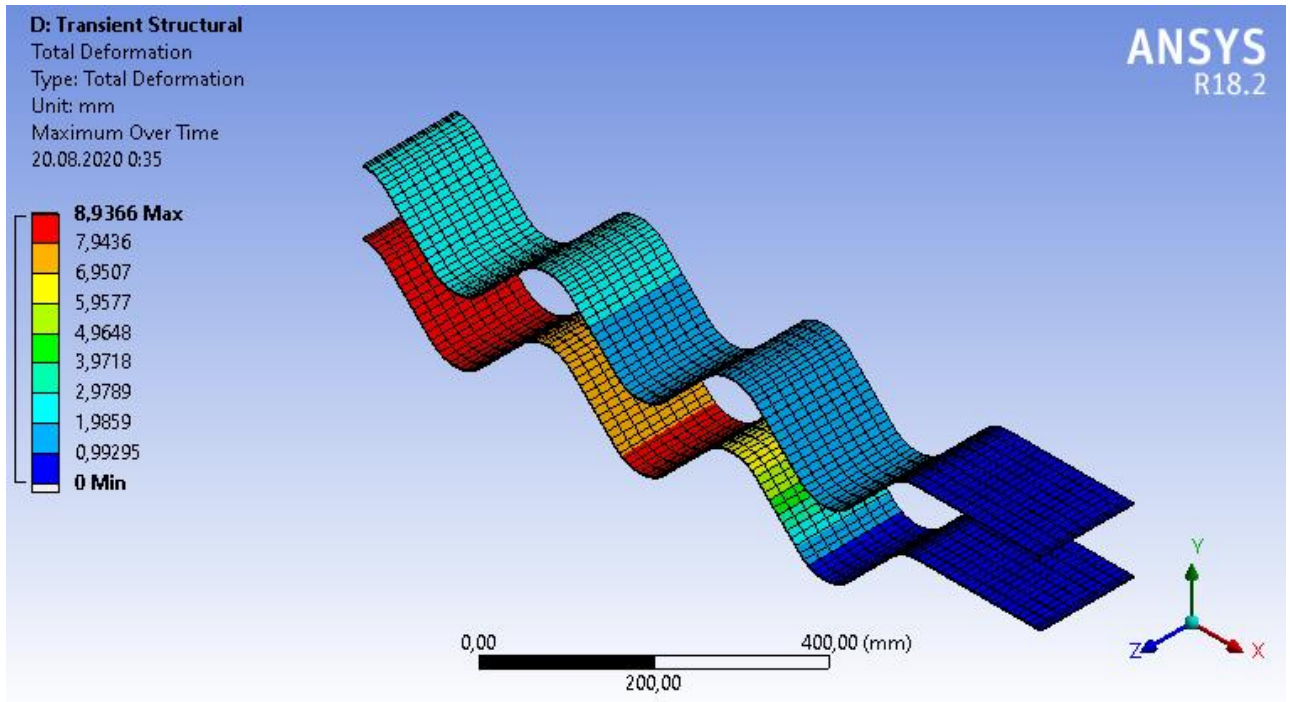


Рисунок 4.13 – Деформації пружних синусоїдальних лементів (а) та поле векторів швидкості (б) для швидкості входу 10 м/с ($Re\ 88,3 \cdot 10^3$)

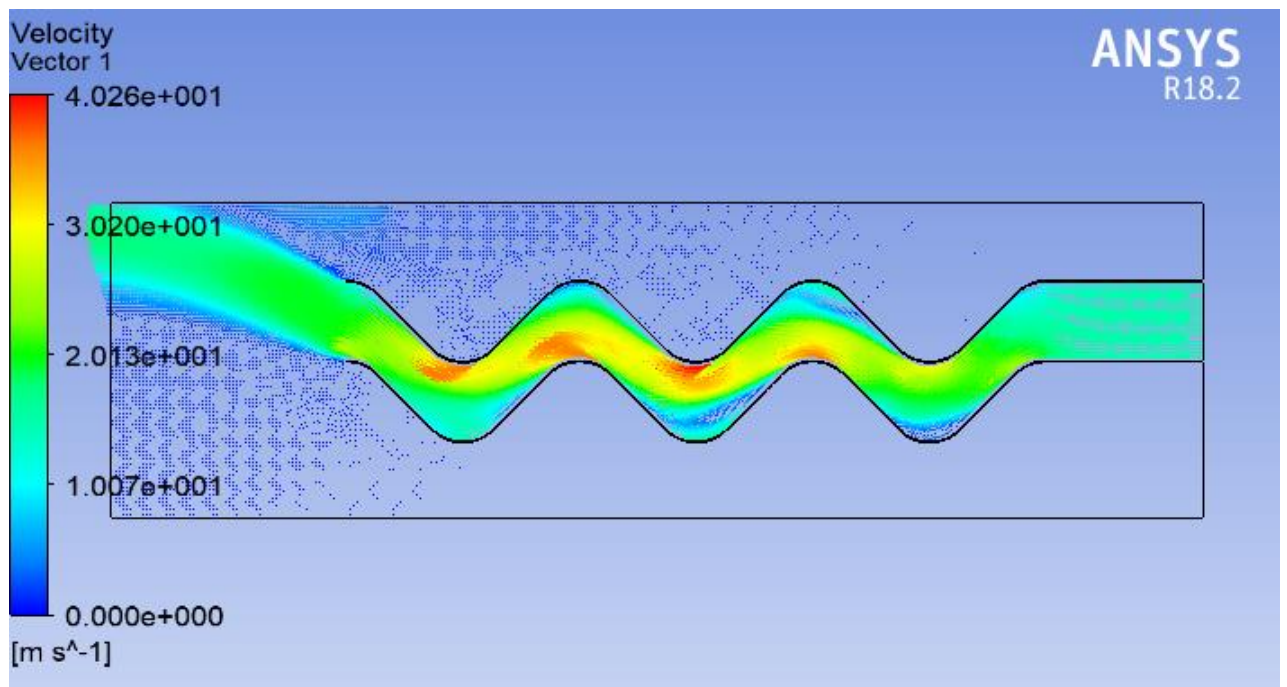
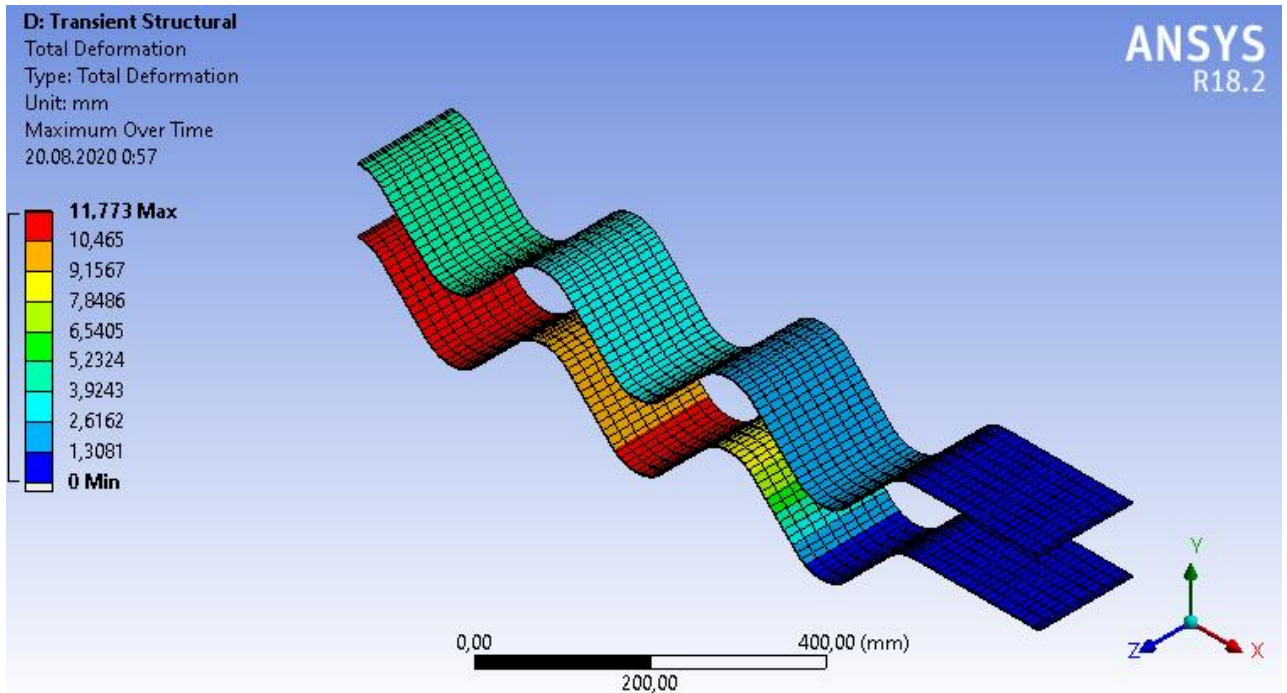
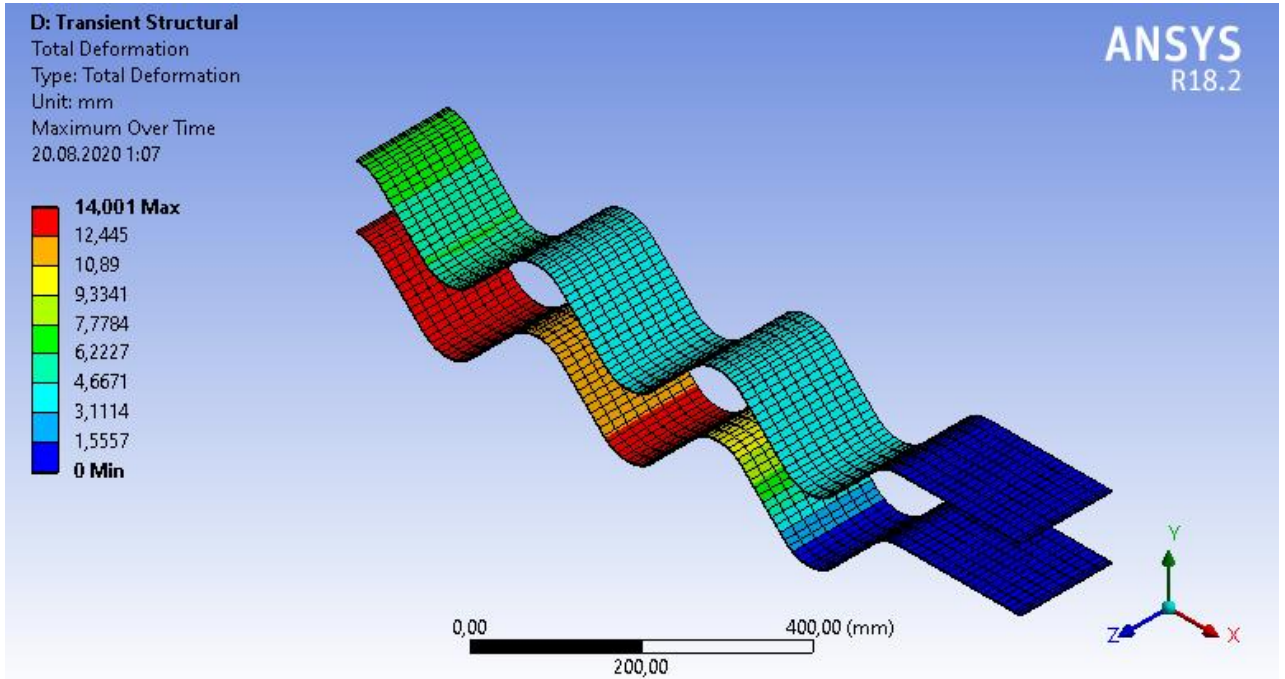
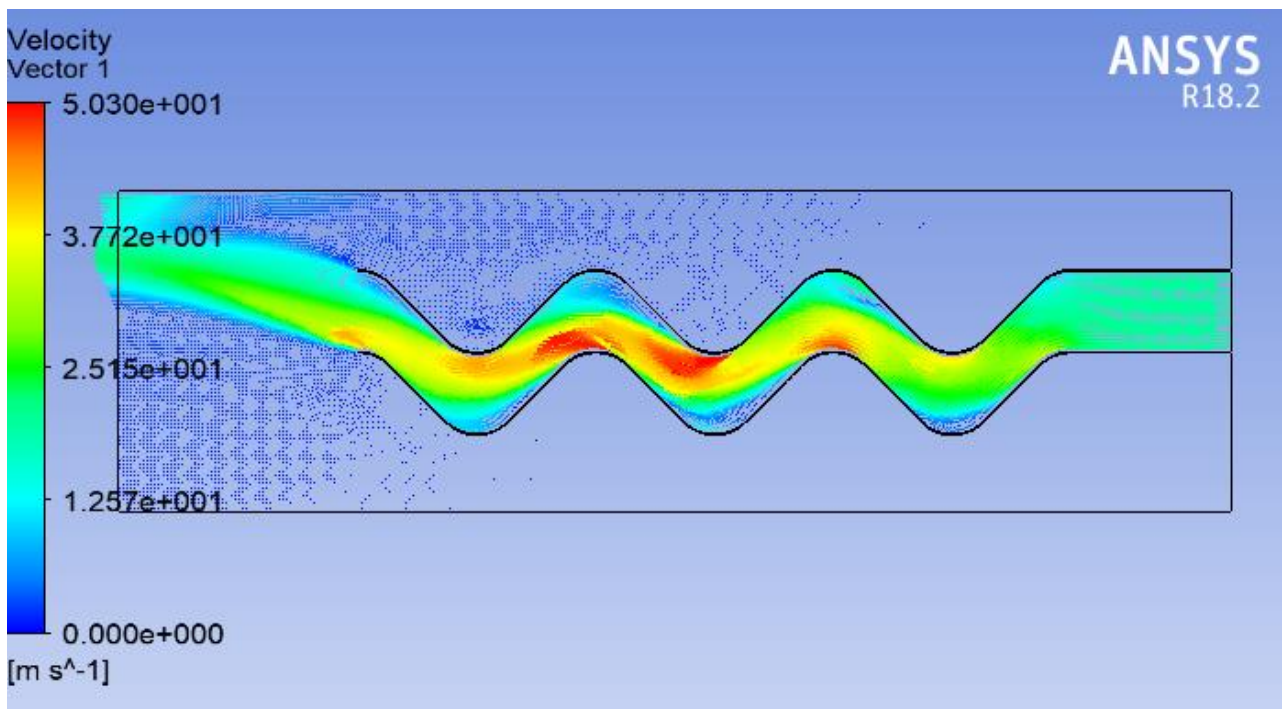


Рисунок 4.14 – Деформації пружних синусоїдальних лементів (а) та поле векторів швидкості (б) для швидкості входу 15 м/с ($Re\ 132,4 \cdot 10^3$)

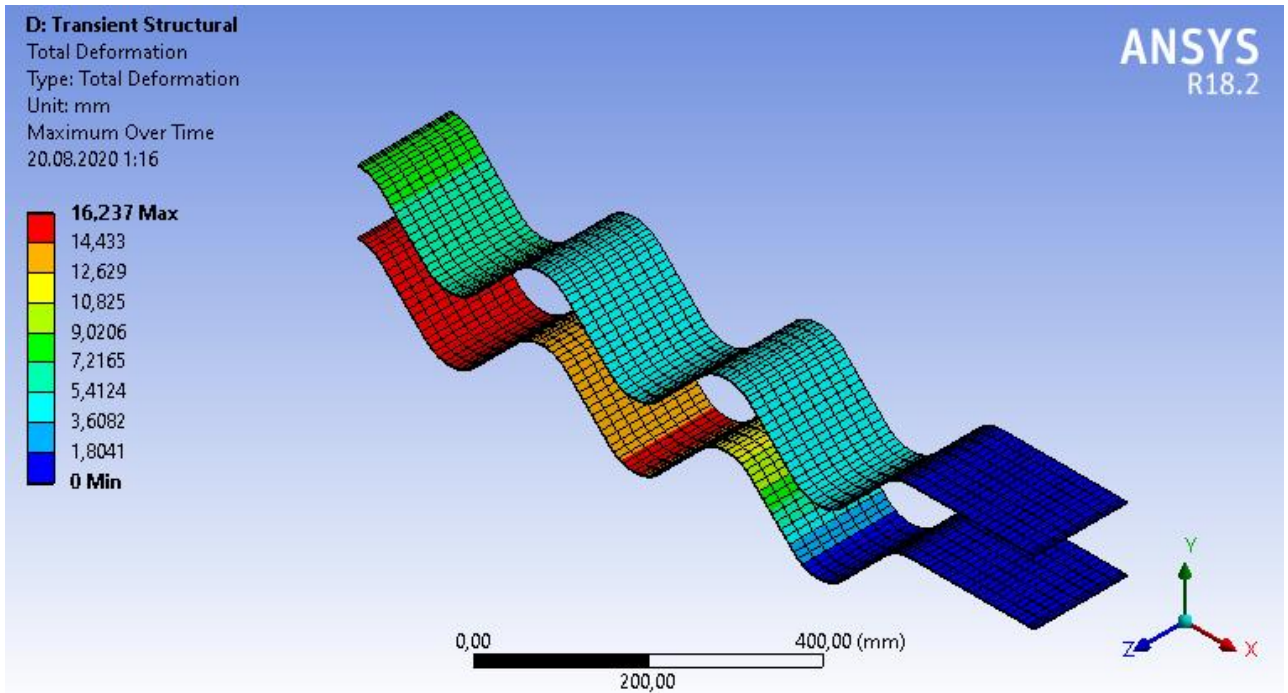


a)

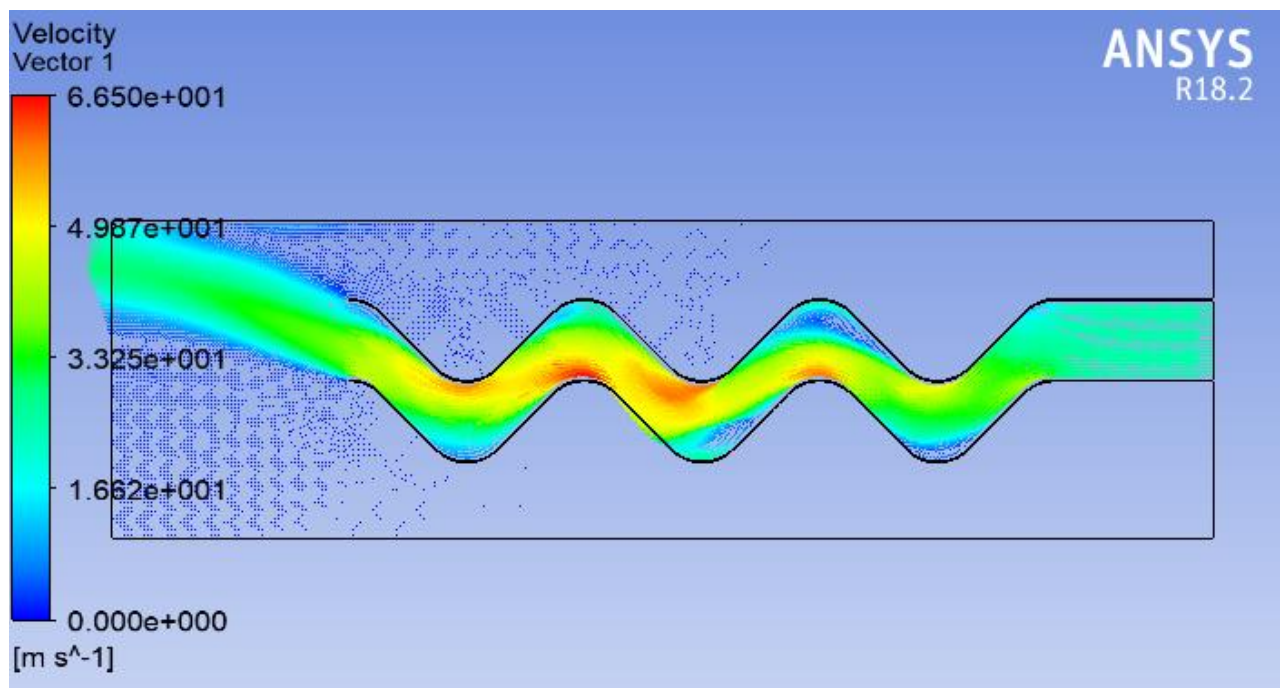


б)

Рисунок 4.15 – Деформації пружних синусоїдальних лементів (а) та поле векторів швидкості (б) для швидкості входу 20 м/с ($Re\ 176,6 \cdot 10^3$)

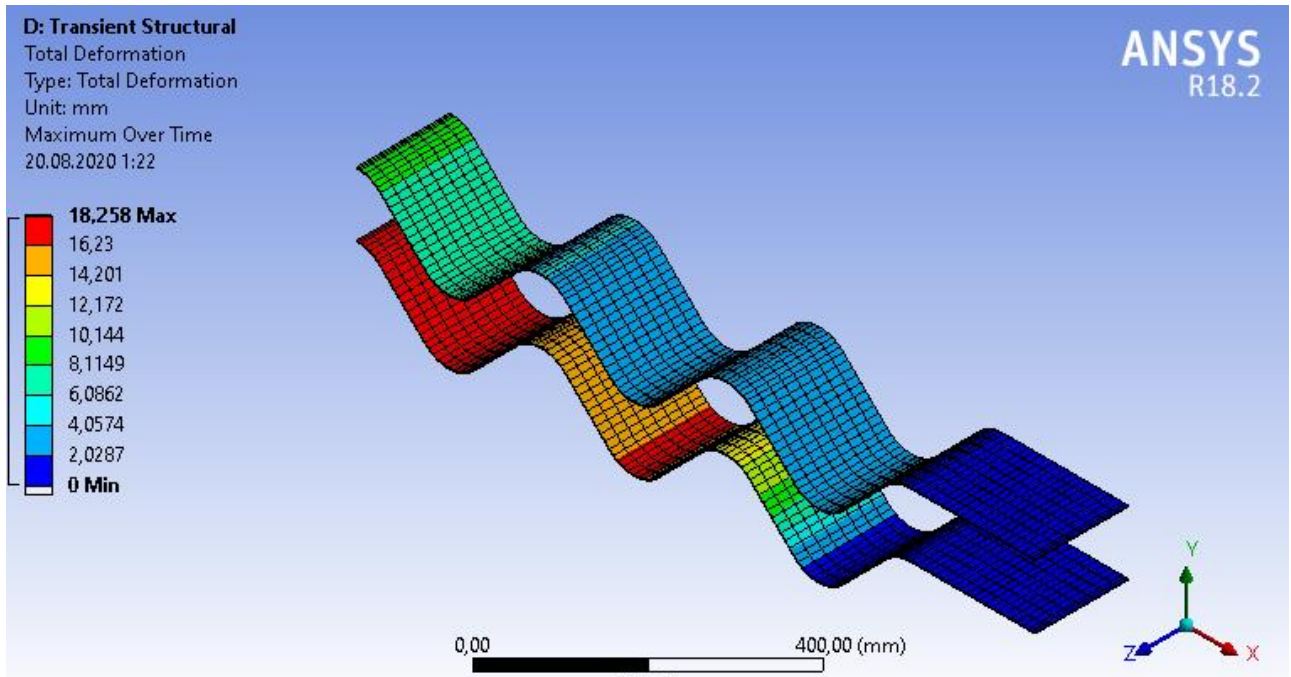


a)

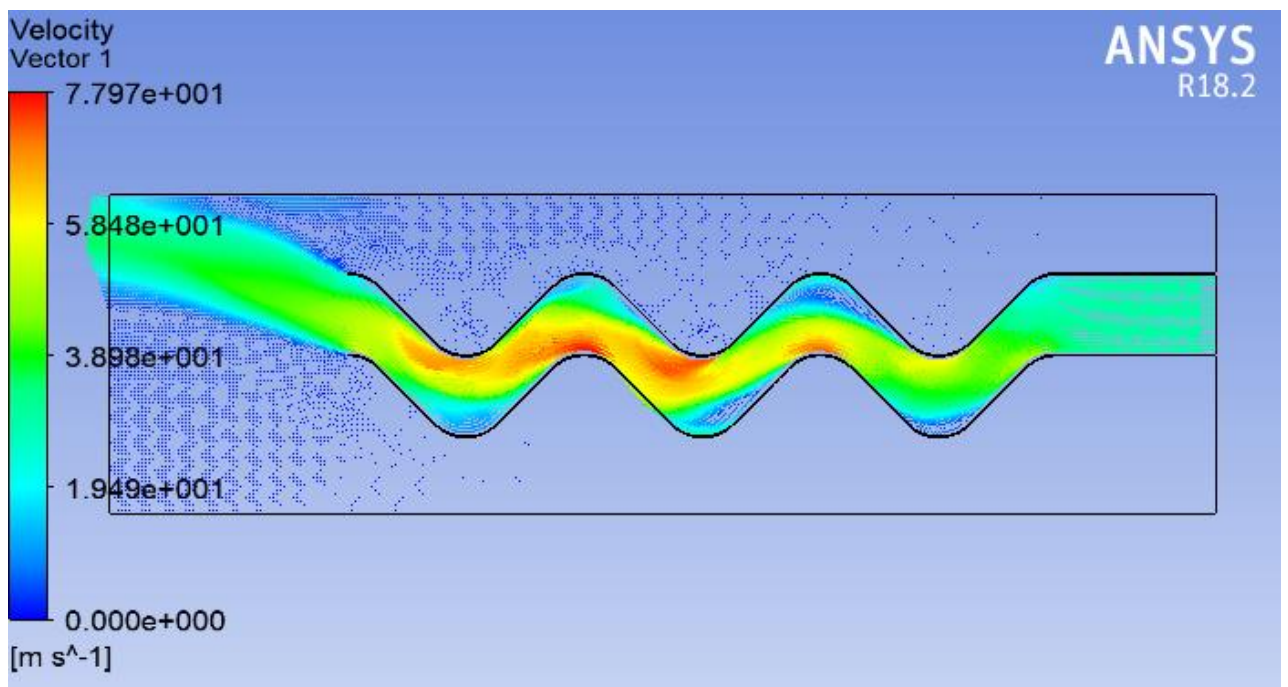


б)

Рисунок 4.16 – Деформації пружних синусоїдальних лементів (а) та поле векторів швидкості (б) для швидкості входу 25 м/с ($Re\ 220,6 \cdot 10^3$)



a)



б)

Рисунок 4.17 – Деформації пружних синусоїдальних лементів (а) та поле векторів швидкості (б) для швидкості входу 30 м/с ($Re\ 264,8 \cdot 10^3$)

Таблиця 4.8 - Максимальні деформації пружних синусоїдальних каналів, інтегрована по поверхні сила в залежності від швидкості входу потоку

Швидкість входу потоку, м/с	Максимальні поздовжні/поперечні деформації правого елемента, мм	Максимальні поздовжні/поперечні деформації лівого елемента, мм	Інтегрована по поверхні сила на правому елементі, Н	Інтегрована по поверхні сила на лівому елементі, Н
5	4,2	1	40	11
	2,8	0,5		
10	8,2	2,9	95	31
	4,7	1,7		
15	11	4,6	152	58
	6,2	2,2		
20	13,1	7,4	234	100
	7,3	3,9		
25	14,7	8,5	282	120
	8,2	4,9		
30	16,7	8,9	373	173
	9,1	3,2		

Розглянемо більш детально отримані результати, в попередньому розділі було наведено математичну модель, що дозволяє оцінити зміну кривизни синусоїдального елемента, для проведення її математичної ідентифікації необхідно знати інтегровані сили на поверхнях синусоїдальних елементів [123; 124]. Дана розрахункова методика дозволить оцінити на скільки змінюється кривизна каналу та кут його розкриття в залежності від швидкості входу газового потоку.

При цьому при проведенні числових моделювань було визначено особливість динамічних сепараційних пристроїв саме з синусоїдальними каналами, а саме, що спостерігається лише затухаючі коливання. Так наприклад при зміні швидкості входу від 0 м/с до 30 м/с коливання продовжуються на протязі 180 с.

Зважаючи на величезну кількість досліджень каналів синусоїдальної форми в [18] скористаємось для аналізу ефективності вже отриманими автором даними.

Для цього подамо дані в більш зручному вигляді для проведення аналізу на рисунку 4.18.

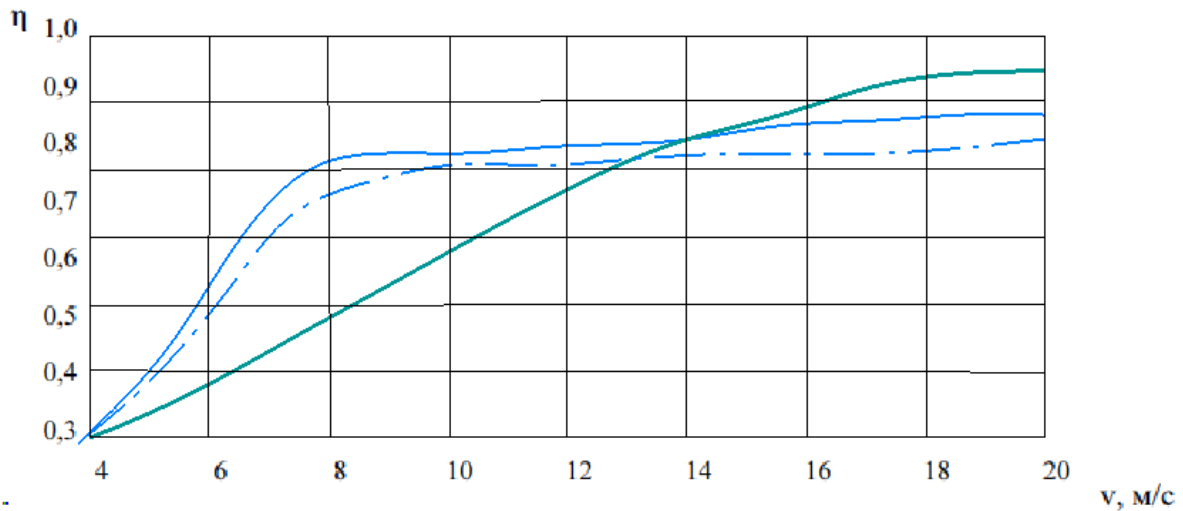


Рисунок 4.18 - Залежність ефективності сепарації η від швидкості газового потоку v в каналі:

- $R=25 \times 10^{-3}$ м, $L=200 \times 10^{-3}$ м, $\varphi=90^0$
- $R=55 \times 10^{-3}$ м, $L=200 \times 10^{-3}$ м, $\varphi=90^0$
- - $R=100 \times 10^{-3}$ м, $L=200 \times 10^{-3}$ м, $\varphi=90^0$

Як видно з рисунку 4.18 при кривизні каналу 25 мм та підвищенню швидкості газорідного потоку з 4 м/с до 7,4 м/с спостерігається більш стрімке підвищення ефективності розділення від 0,3 до 0,7 м/с, при цьому при кривизна каналу 55 мм підвищення ефективності не відбувається так стрімко, але можливе більш високе значення саме тому при деформації синусоїдального каналу можливо забезпечити перехід між двома геометричними конфігураціями каналу.

В результаті чисельного моделювання, були отримані такі параметри: еквівалентна сила $F = 152$ Н; загальний поздовжній зсув $\Delta l = 4,6 \cdot 10^{-3}$ м. Зміни довжини для однієї хвилі дорівнюють $\delta l = \Delta l/n = 4,6 \cdot 10^{-3}/3 = 0,0015$ (м). Відповідність $\delta = \Delta l/F = 4,6 \cdot 10^{-3}/152 = 3,0 \cdot 10^{-5}$ (м/Н). Початковий хвильовий параметр $\lambda_0 = 20,138$ м⁻¹. Початковий радіус кривизни $R_0 = 0,0474$ м.

Після деформацій параметр хвилі $\lambda = 20,04$ м⁻¹. Початковий радіус кривизни $R = 0,0483$ м. Отже, відповідні варіації дорівнюють $\delta \lambda = \lambda_0 - \lambda = 20,1 - 20,0 = 0,1$

(m^{-1}) та $\delta R = R - R_0 = 0,0005$ (м) відповідно. Крім того, амплітуда $a = 0,0515$ м, а її зміна $\delta a = a_0 - a = 5,17 \cdot 10^{-4}$ (м).

Всі основні параметри до і після деформації з відповідними змінами будуть узагальнені в таблиці 4.9.

Таблиця 4.9 – Оцінка параметрів математичної моделі

Параметр	Початкове значення	Значення після деформації	Зміна
Переміщення $\Delta\delta/n$, м	0,312	0,3135	0,0015
Параметр хвилі λ , m^{-1}	20.138	20,040	0,098
Амплітуда a , м	0,052	0,0515	0,0005
Радіус кривизни R , м	0,051	0,0474	0,0009

Слід зазначити, що зміну можна отримати з рівняння (3.84). У цьому випадку початкове значення передавальної функції дорівнює $\Phi_0 = 5,2 \cdot 10^{-3}$ (m^2), а зміна амплітуди $\delta a = \Phi_0 \cdot \delta\lambda = 5,19 \cdot 10^{-4}$ (м). Отже, відносна похибка оцінки зміни амплітуди дорівнює 1,2 %.

Нарешті, зміну радіуса кривизни можна отримати з рівняння (3.92). У цьому випадку початкове значення передавальної функції дорівнює $\Psi_0 = 9,0 \cdot 10^{-3}$ (m^2), а зміна радіуса кривизни $\delta R = \Psi_0 \cdot \delta\lambda = 8,82 \cdot 10^{-4}$ (м). Отже, відносна похибка оцінки зміни амплітуди дорівнює 7,0 %.

4.4 Висновки до Розділу 4

Виходячи з аналізу результатів проведених фізичних експериментів було визначено режими роботи пружних елементів у формі похилого параболічного напівциліндру в залежності від швидкості набігаючого потоку, товщини та матеріалу пружних елементів при турбулентних режимах руху ($Re \geq 17,6 \cdot 10^3$).

Встановлені залежності положення пластини та розмаху коливань від швидкості набігаючого газового потоку. Оцінку точності описання залежності між розмахом коливань та швидкістю газового потоку проведено за допомогою

критерію Фішера та визначені рівняння регресії залежності різних параметрів від швидкості.

В результаті проведених числових моделювань визначені гідродинамічні показники роботи пружних елементів у формі похилого параболічного напівциліндру такі як гідравлічний опір та ефективність розділення газокраплинної суміші. Так при зростанні швидкості потоку від 2 м/с до 4 м/с гідравлічний опір знижується від 426 Па до 319 Па. Ефективність розділення суміші для однієї пари пружних елементів при швидкості потоку від 2 м/с до 25 м/с має значення від 25,1% до 19,3 %. Досягнення високого ступеня розділення ($\eta \geq 90\%$) можливе при встановленні 8 підряд пружних елементів.

За результатами числових моделювань взаємодії набігаючого потоку та пружних елементів синусоїдальної форми визначена ефективність сепарації, яка досягає 95%. Визначені гідроаеропружні характеристики такі як максимальні деформації пластин (16,7 мм) та інтегрована по поверхні пластин сила (373 Н) при швидкості потоку 30 м/с. Проведена ідентифікація невідомих параметрів математичної моделі, в ході якої визначені передавальна функція Ψ_0 та зміна радіуса кривизни δR .

Основні наукові результати розділу опубліковані в працях [118; 122; 123; 124].

РОЗДІЛ 5

ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВИКОРИСТАННЯ ДИНАМІЧНИХ СЕПАРАЦІЙНИХ ПРИСТРОЇВ ТА ЇХ РОЗРАХУНКУ

5.1 Впровадження результатів досліджень динамічних сепараційних пристроїв в науковій, промисловій та навчальній практиках

Результати дисертаційної роботи, а саме результати фізичних та числових моделювань динамічних сепараційних пристроїв, розроблені науково-обґрунтовані методики і математичні моделі, представляють практичних інтерес для хімічної, нафтопереробної та суміжних галузей промисловості. Наукові результати були не одноразово використані та апробовані при виконанні науково-дослідних робіт, господарських договорів та проведенні навчального процесу, а також під час проходження закордонних стажувань, що підтверджується відповідними актами впровадження та сертифікатами. При цьому конструкції динамічних сепараційних пристроїв, представлених у роботі, захищені патентами України на корисну модель, у кількості 3 штук, також подана одна заявка на корисну модель.

При виконанні НДР (МОН України ДР №0117U003931, СумДУ №15.01.06-01.17/20.3П) “Розробка та впровадження енергоефективних модульних сепараційних пристроїв для нафтогазового та очисного обладнання” що виконувалась на протязі 2017 – 2020 рр. співробітниками кафедри ХІ, кафедри КМ ім. В. Марцинковського та кафедри ТМВІ факультету ТеСЕТ результати дисертаційної роботи використані під час розробки наукового підходу до фізичного та математичного моделювання гідродинамічних процесів при сепарації газорідних систем; визначенні основних сепараційних характеристик, які представляють можливість оцінити гідравлічний опір та прогнозувати розрахункову ефективність сепарації високодисперсних систем в динамічних сепараційних пристроях і багатофункціональних модульних сепараторах за результатами фізичних та математичних моделювань; науковому

обґрунтуванні практичних рекомендацій щодо виготовлення, програми та методики випробувань дослідних зразків на основі доопрацьованих експериментальних зразків сепараційних пристроїв; науковому обґрунтуванні практичних рекомендацій щодо проектування та інженерних методик для розрахунку багатофункціональних сепараторів з метою підвищення ефективності сепарації та зниження гідравлічного опору з визначенням оптимальних конструктивних параметрів динамічних сепараційних елементів (додаток В).

При виконанні НДР "Створення нових гранульованих матеріалів для ядерного палива та каталізаторів в активному гідродинамічному середовищі" (МОН України ДР №0120U102036, СумДУ №15.01.06-20/22.3П-01) що виконується починаючи з 2020 р. кафедри ХІ, кафедри КМ ім. В. Марцинковського та кафедри ТМВІ наукові результати використані при розробці математичних моделей впливу активного гідродинамічного і тепломасообмінного режимів на процеси гранулоутворення та сепарації (додаток В).

Під час виконання договору № 51.18-2020.СП/01 з ТОВ "Аграрник" наукові результати дисертаційної роботи були використані при проведенні серій математичних моделювань сепараційного обладнання для розділення двофазних систем, що дозволило обґрунтувати доцільність конструкцій сепараційного обладнання, його ефективність та ступінь розділення двофазних систем. Застосування даних результатів дозволило підвищити якість цільового продукту (додаток Г).

В ході виконання договору № 51.18-20196.СП/03 від 23 жовтня 2019 р. на надання наукових послуг за темою "Теоретичні основи процесів стиснення, теплообміну і сепарації в поршневіх компресорних машинах та установках", замовник ТОВ "ПРОМ-ЕНЕРГО ПРОДУКТ", виконавець – Сумський державний університет, результати дисертаційних досліджень були використані при наданні практичних рекомендацій щодо проектування, виготовлення та експлуатації сепараційного обладнання та динамічних сепараційних пристроїв, які в свою чергу представляють високу науково-практичну цінність для

технологій промислового видобутку, підготовку до транспортування та переробки нафти та газу (додаток Г).

При проходженні закордонного стажування в University of West Bohemia (Plzen, Czech Republic) з 01.07.2019 по 25.09.2019 р. наукові результати були використані при проведенні досліджень тепло та масообмінних процесів між рідинною та газоподібними фазами потоку у обладнанні хімічних виробництв методами обчислювальної гідродинаміки, а саме за допомогою програмного комплексу ANSYS та його модулів Fluent Flow та Transient Structural (додаток В).

В ході виконання дисертаційної роботи були запропоновані конструкції динамічних сепараційних пристроїв (рисунок 5.3 та 5.4), які були захищені патентами України на корисну модель, а саме: UA102445 “Спосіб вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідного потоку”; UA 111039 “Спосіб вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідного потоку”; UA130464 “Пристрій для сепарації дисперсної рідини з газового потоку” (додаток Д). Також подана заявка на корисну модель “Пристрій вловлювання дисперсних часток/краплин/бульбашок з потоку стискаємої або нестискаємої рідини” (додаток Д) [59; 88; 125; 126].

Отримані результати у використанні навчальному процесі кафедр ХІ та КМ ім. В. Марцинковського, факультету ТеСЕТ, СуМДУ, при вивченні дисциплін «Гідроаеропружність», «Обладнання газо- та нафтопереробних виробництв», «Процеси та обладнання газороздільних установок», «Технологічні лінії та комплекси нафтопереробних виробництв», «САПР технологічних ліній та комплексів хімічних і нафтогазопереробних виробництв».

5.2 Практичні рекомендації до інженерних розрахунків та компонування динамічних сепараційних пристроїв

Ґрунтуючись на результатах дисертаційних досліджень, а саме на розроблених математичних моделях та параметрах які вони дозволяють визначати (швидкість дивергенції, максимальні деформації та частоти і

амплітуди коливань) з однієї сторони, та на існуючі традиційні методики, способи та алгоритми технологічного і конструктивного розрахунку сепараційного нафтогазового та хімічного обладнання з іншої, розроблений загальний алгоритм розрахунку динамічних сепараційних пристроїв. Алгоритм складається з декількох послідовних етапів представлених нижче (рисунок 5.1):

- на першому етапі проводиться аналіз вхідних даних для розрахунку, з метою оцінки їх повноти та наявності обмежень. До вхідних даних відноситься прогнозована швидкість газорідного потоку у сепараторі, робочі температура та тиск, вміст дисперсної фази у вхідному газовому потоці та її фракційний склад, наявність у рідинній дисперсній фазі шкідливих та/або корисних домішок, габаритні розміри сепаратору, запланована ефективність сепарації (допустимий вміст рідини після проходження сепараційних пристроїв), та ін.;

- на другому етапі проводиться вибір типу сепараційних пристроїв в залежності від конструкцій апарату, а саме вибір між пакетом динамічних сепараційних пристроїв з пружними елементами похилої параболічної форми, пакетом динамічних сепараційних пристроїв пружними елементами синусоїдальної форми або динамічним сепараційним пристроєм з чотирма входами з плоскими пружними елементами;

- на третьому етапі проводиться попередній розрахунок сепараційних каналів, у які будуть встановлені пружні елементи та визначаються їх розміри (довжина, висота та товщина), обирають матеріал для виготовлення пластин. В ході даного розрахунку необхідно враховувати що пружні елементи у попередньо-здеформованому положенні не повинні дотикатись стінок каналів;

- четвертим етапом є обчислення основних режимних параметрів роботи динамічних сепараційних пристроїв, тобто технологічних розрахунків, в ході якого визначаються критична швидкість потоку при якій виникає явище дивергенції, максимальні деформації пластин, а саме максимальне відхилення від попередньо-здеформованого положення для пластин параболічної форми та зміна радіусу кривизни для пластин синусоїдальної форми, частоти та амплітуди коливань пластин. В останню чергу на даному визначається ефективність розділення газорідної суміші, тобто вміст рідини в газовому потоці після

проходження пакету динамічних сепараційних пристроїв, яка порівнюється з допустимим вмістом краплинної рідини.

• на п'ятому етапі проводиться уточнюючий конструктивний розрахунок динамічних сепараційних пристроїв, під час якого розраховують всі розміри, необхідні для подальшого проектування та виготовлення сепараційного пристроїв.

Слід зазначити, що етапи 3 та 4 можуть повторюватись поки у ході технологічних розрахунків не буде досягнуто необхідного значення вмісту дисперсної рідини на виході із динамічних сепараційних пристроїв.

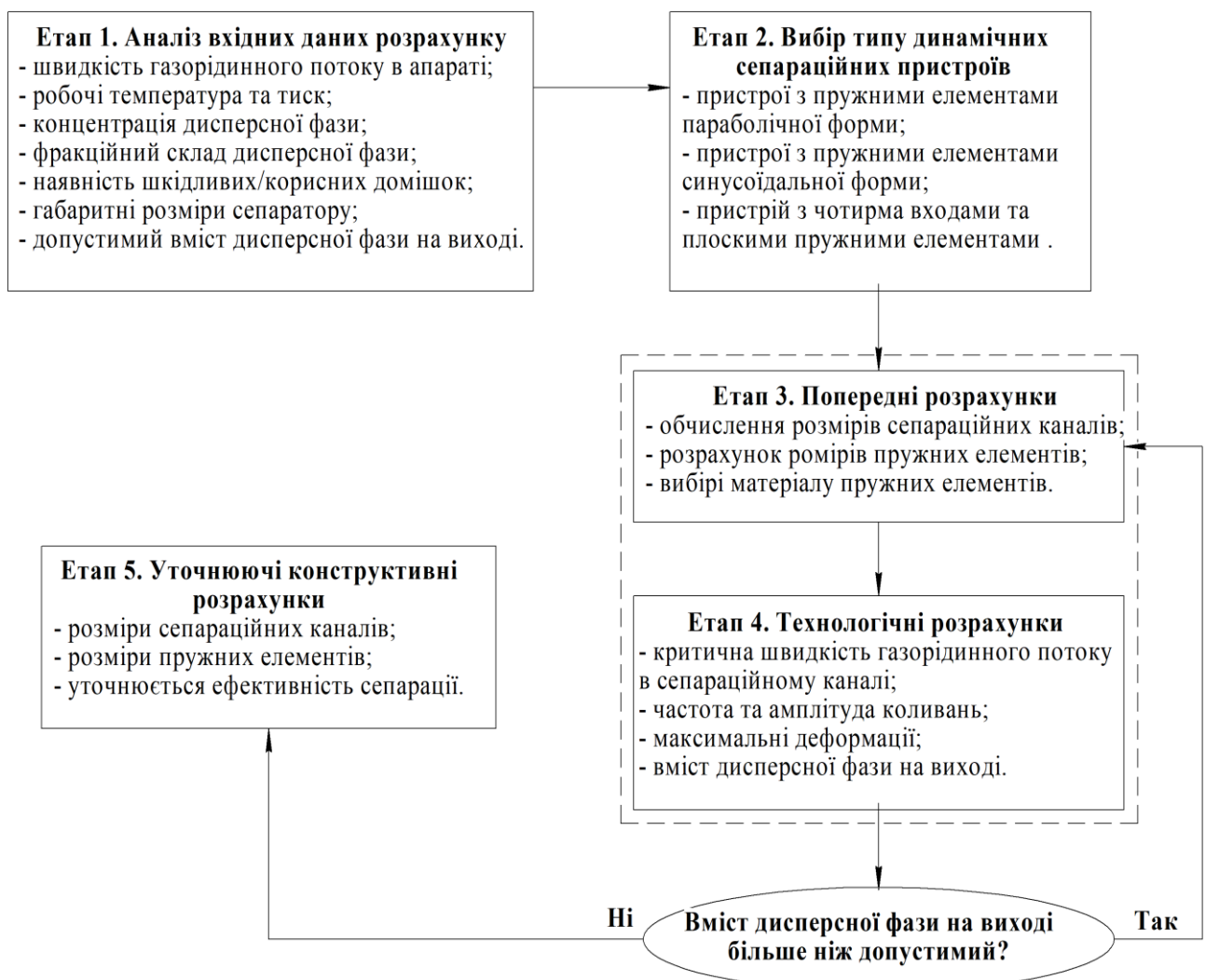


Рисунок 5.1 – Узагальнений алгоритм інженерного розрахунку динамічних сепараційних пристроїв.

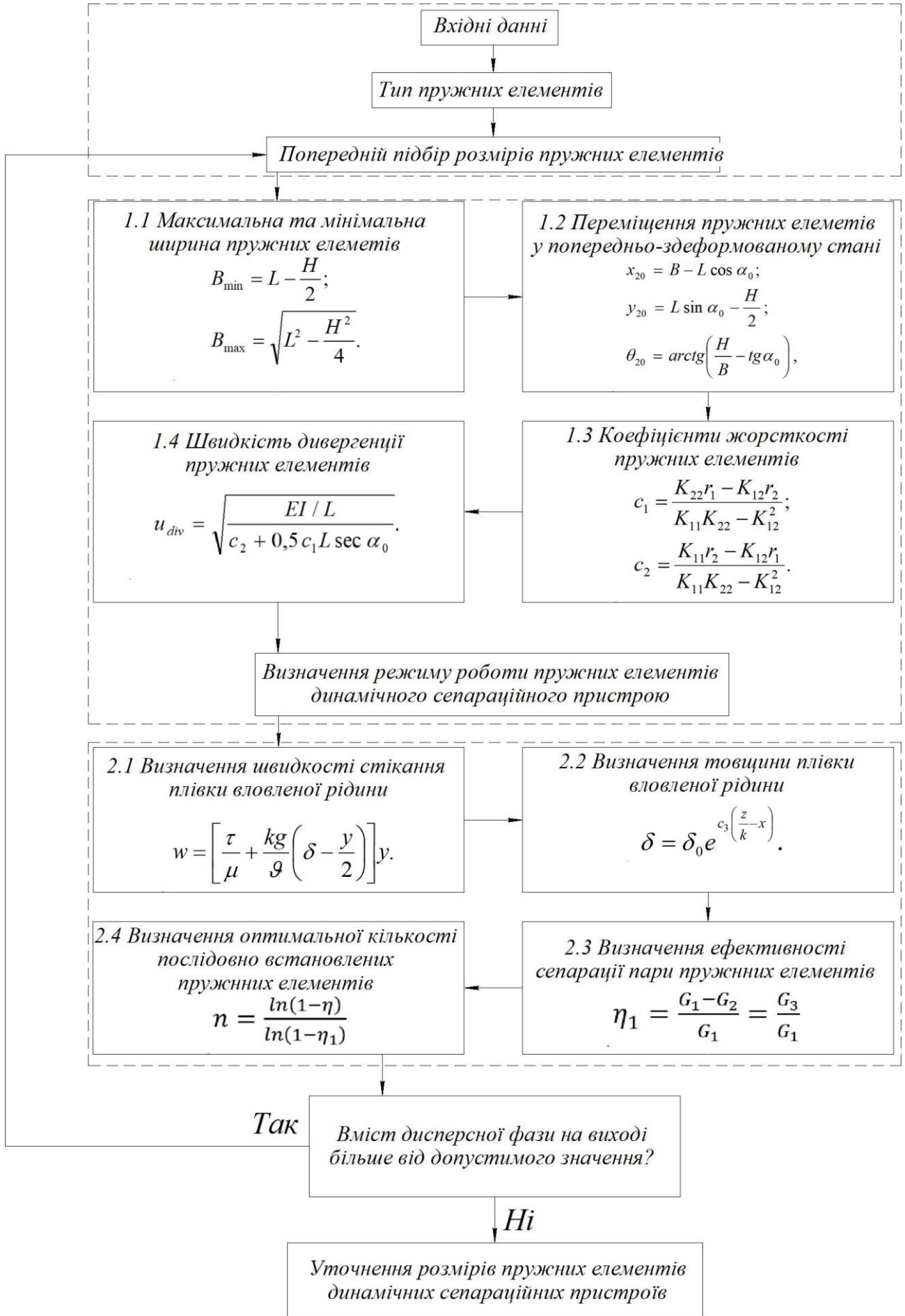


Рисунок 5.2 – Алгоритм інженерного розрахунку динамічних сепараційних пристроїв

Існуюче сепараційне обладнання, що застосовується на установках підготовки та переробки нафти та газу, стабілізації нафти/конденсату, відрізняється застарілим конструктивним оформленням та низьким ступенем розділення багатofазних потоків. Як зазначалось, одним із підходів до його вдосконалення є застосуванням динамічних сепараційних пристроїв [127]. Розглянуті у роботі конструкції даних пристроїв встановлюються у нафтогазовому обладнанні для очищення газорідинних потоків від краплинної рідини. Розглянемо способи компонування динамічних сепараційних пристроїв у технологічному обладнанні.

Пакети динамічних сепараційних пристроїв з параболічними або синусоїдальними пружними елементами доцільно встановлювати у багатofазні багатofункціональні нафтогазові сепаратори, типу підігрівачів-деемульсаторів Heater-Treater, в яких газорідинний потік рухається у горизонтальному напрямку, при цьому вони дозволять отримати очищений газовий потік, відділити дрібнодисперсні частки рідини, які можуть бути як корисними вуглеводневими компонентами так і шкідливими домішками, наприклад сірководень. Пакети динамічних сепараційних пристроїв в об'ємі сепараторів розміщують в так званих секціях “відстоювання” або секціях коалесценції вище рівня рідини, над пакетами коалесційних насадок. На рисунку 5.3 зображені можливі способи встановлення пакетів динамічних сепараційних пристроїв у нафтогазові сепаратори.

При цьому динамічний сепараційний пристрій з чотирма входами має більш широкий діапазон застосування, оскільки він повинен встановлюватись перед вихідним патрубком газового потоку, тому його можна компонувати у вертикальні та горизонтальні газосепаратори, бензосепаратори та підігрівачі-деемульсатори, в яких газорідинний потік може рухатись як вертикально так і горизонтально. На рисунку 5.4 зображені способи встановлення даного пристрою у підігрівач деемульсатор типу “Heater-Treater” та вертикальний бензосепаратор. З урахуванням особливостей динамічних сепараційних пристроїв варіанти їх компонування у фазних розділювачах (рисунок 5.5)

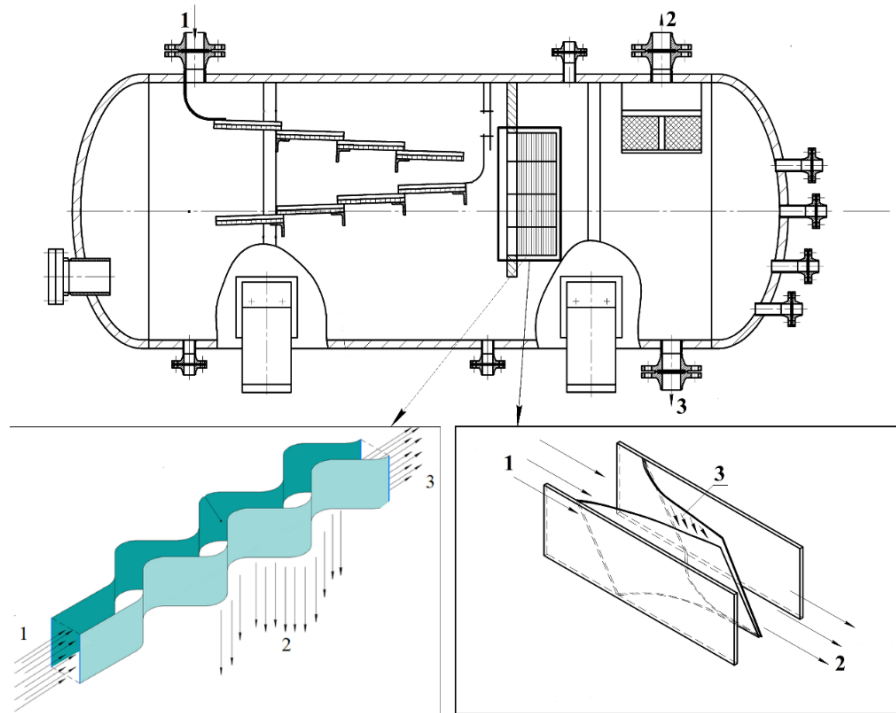


Рисунок 5.3 – Компонування динамічних сепарційних пристроїв у багатофазному горизонтальному сепараторі (1 – газорідний потік, 2 – очищений газ, 3 – відділена рідина)

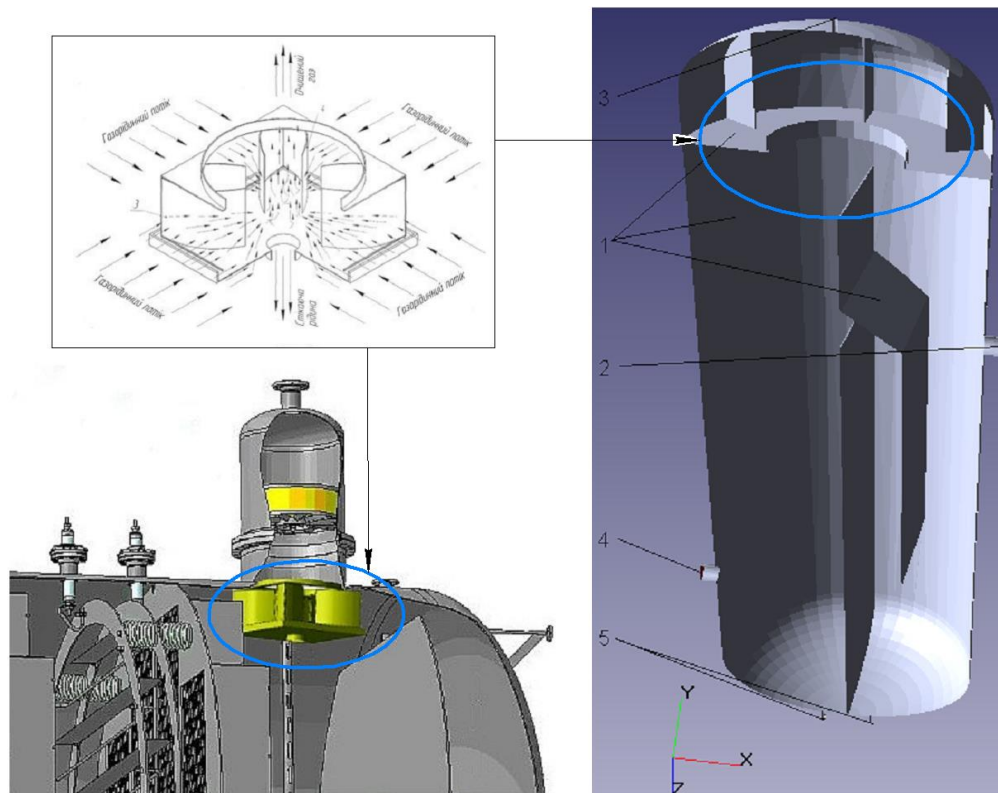


Рисунок 5.4 – Динамічний сепарційний пристрій встановлений перед вихідними патрубками для газу підігрівача-деемультатору типу “Heater-Treater” (зліва) та вертикальний бензосепаратор (з права)

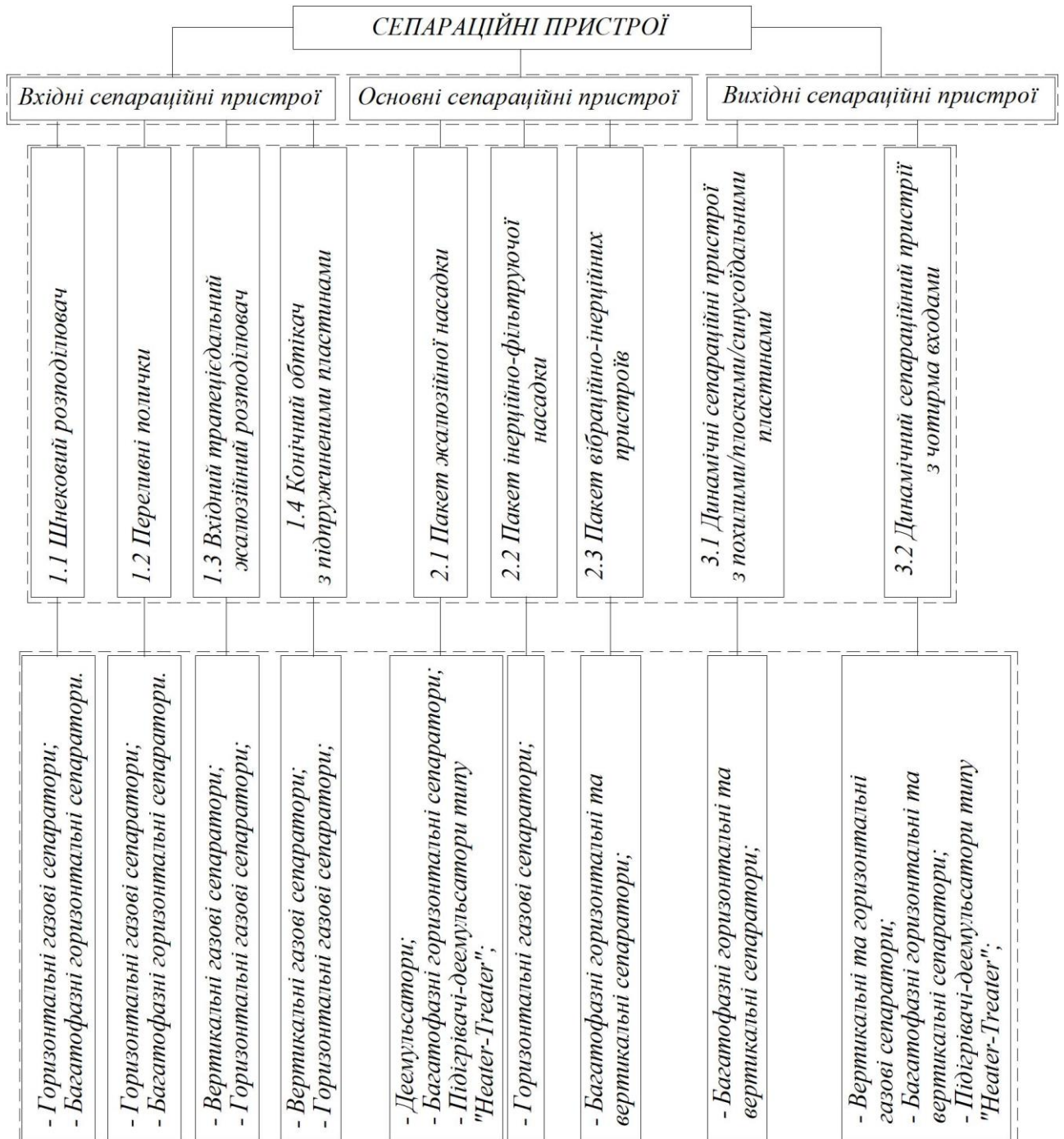


Рисунок 5.5 – Компонування сепараційних пристроїв у фазних розділювачах

Слід зазначити що запропоновані способи та варіанти компонування зображені на рисунку 5.5, не враховують технологічних факторів при проектуванні, виготовленні та експлуатації сепараційних пристроїв. Тому з метою скорочення термінів розробки та раціонального вибору компонування запропонована класифікація за конструктивними та технологічними ознаками, що будуть враховувати тип пристрою, його розміщення і призначення, а також методи обробки деталей та елементів сепараційних пристроїв, конструкційні

матеріали, їх характерну форму, габаритні розміри та масу. Модульні сепараційні пристрої можуть бути розміщені у фазних розділювачах на вході потоку, в основній зоні розділення або на виході газодисперсного потоку. За типом (за принципом дії) як зазначалось раніше вони діляться на інерційно-гравітаційні, інерційно-фільтруючі та вібраційно-інерційні, при цьому маючи різне призначення, а саме вирівнювання потоку, груба очистка (початкова, ефективність сепарації $< 30\%$) та тонка очистка (ефективність $> 90\%$). Також за способом встановлення в сепараторах вони можуть бути роз'ємними (блочні або пакетні конструкції) та не роз'ємними (які приварюються до корпусу сепаратора). За способом обробки та виготовлення деталей можна поділити на ті що підлягають механічній обробці різанням і слюсарній обробці, а також ті що виготовлені за допомогою адитивних технологій. При цьому вони можуть бути виготовлені з металів або з неметалевих матеріалів, а також їх комбінації. Також за формою елементів конструкції СП є круглі, плоскі та синусоїдальні деталі. За масою їх можна умовно поділити на ті що легше 10 кг, від 10 до 100 кг, та більше 100 кг, а за габаритними розмірами до $100 \times 100 \times 100$ мм, від $100 \times 100 \times 100$ мм до $1000 \times 1000 \times 1000$ мм та більше $1000 \times 1000 \times 1000$ мм.

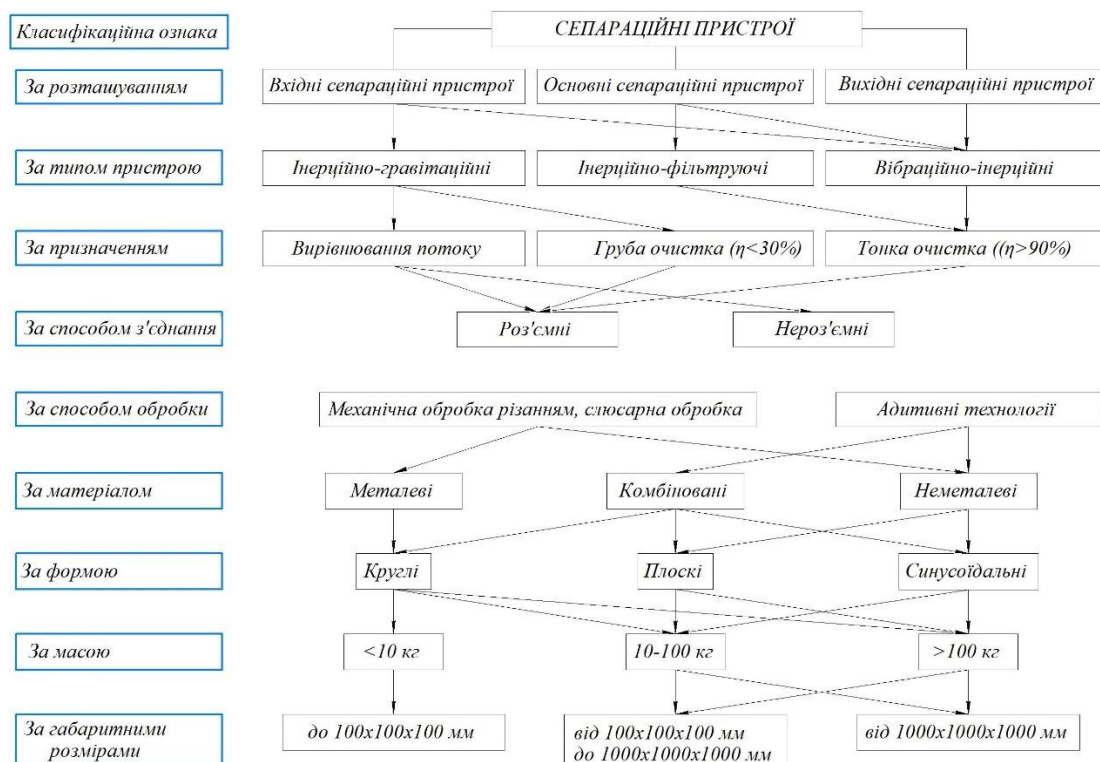


Рисунок 5.6 – Конструкторсько - технологічні ознаки класифікації СП

При цьому на основі даної класифікації розроблений структурний код модульних сепараційних пристроїв, що дозволить за вищевказаними ознаками розробити різні компоувальні рішення для забезпечення ефективної роботи обладнання [128].

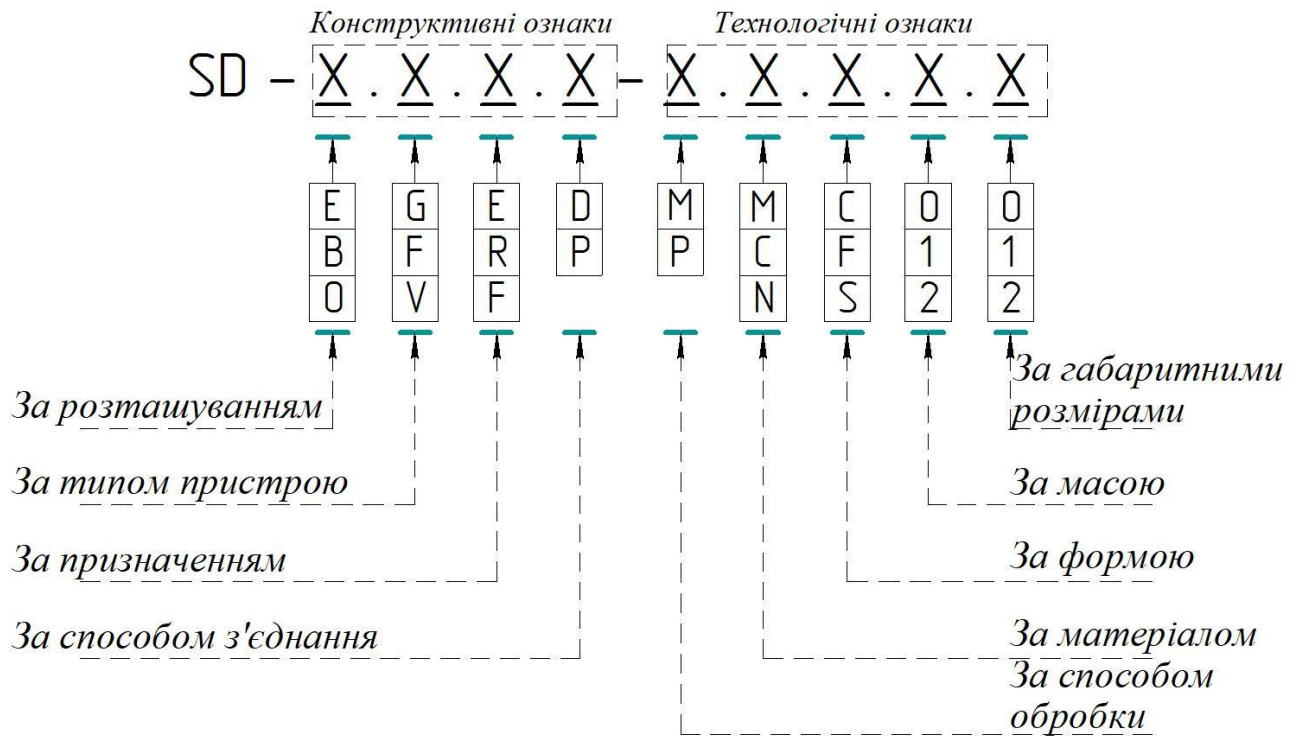


Рисунок 5.7 – Структурний код для класифікації модульних сепараційних пристроїв

Слід зазначити, що в процесі складання експериментальної установки та проведення моделювань процесу взаємодії газодисперсного потоку та пружних елементів динамічних сепараційних пристроїв були виявлені особливості конструкції та складання даних пристроїв, які можуть негативно впливати на процес взаємодії потоку та пружних елементів у реальних промислових установках так і процесі . Так при несиметричному закріпленні пружних елементів у сепараційному каналі частота їх коливань буде відрізнятися, що може викликати завихрення потоку та підвищення гідравлічного опору, внаслідок чого не можливо досягти усталеного процесу та необхідної ефективності розділення. Також послідовні секції сепараційних каналів які з'єднуються фланцями, з метою полегшення монтажу та проведення ремонтних робіт, будуть не

концентричні можуть також виникнути вищезазначені ефекти. У зв'язку з цим для запропонованих конструкцій модульних динамічних сепараційних пристроїв розроблені послідовності їх складання та запропоновані допуски взаємного розміщення поверхонь елементів їх конструкції які дозволять уникнути описаних ефектів, за рахунок високої точності складання, та досягти визначених в ході досліджень в рамках дисертаційної роботи гідродинамічних показників та гідроаеропружних характеристик. На рисунку 5.8 зображена послідовність складання модульного динамічного сепараційного пристрою з похилими параболічними пружними елементами, на рисунку 5.9 представлення конструкція даного пристрою у рознесеному вигляді. Граф для складання динамічного сепараційного пристрою з допусками взаємного розміщення поверхонь (концентричності та паралельності) зображений на рисунку 5.10.

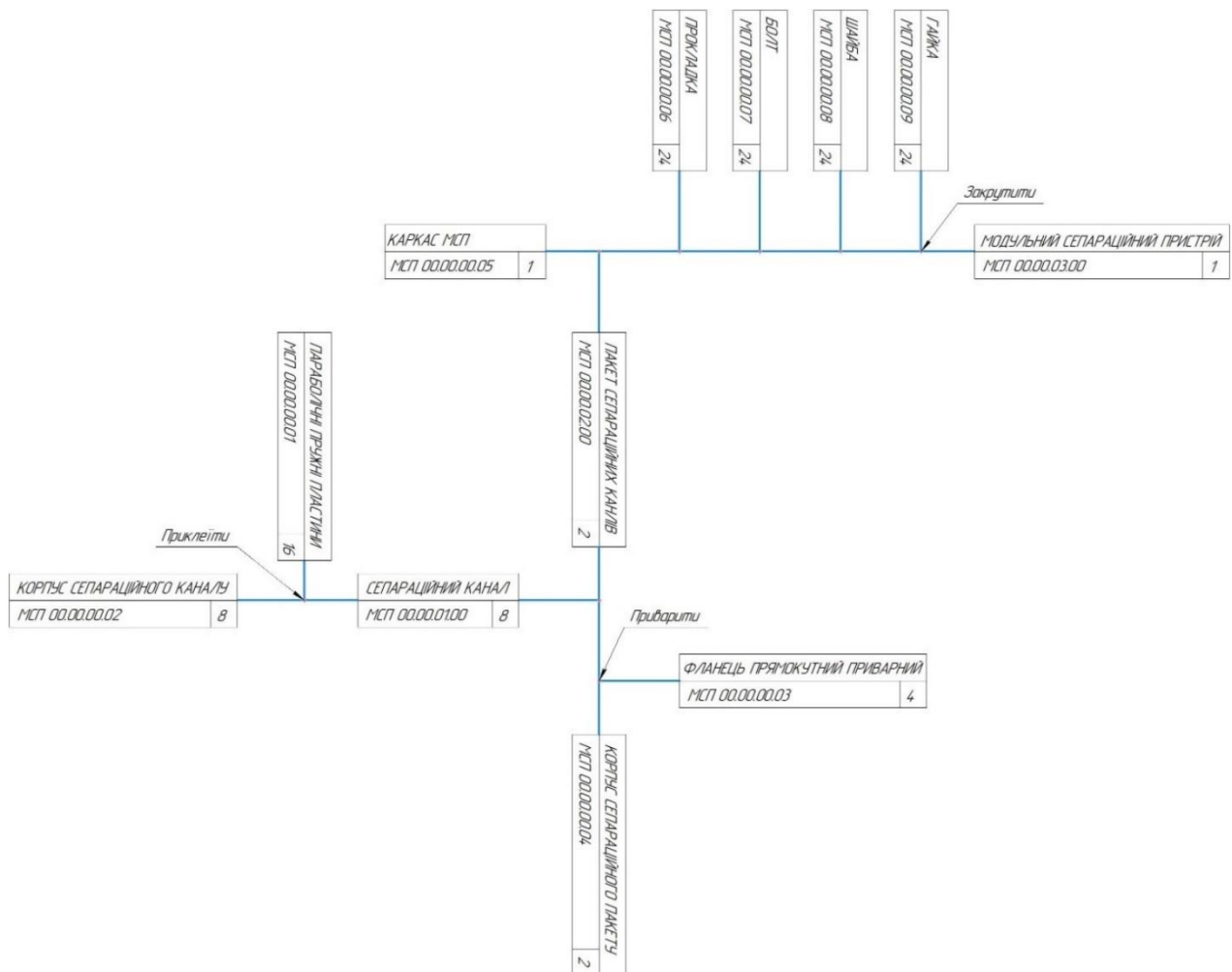


Рисунок 5.8 – Послідовність складання динамічного сепараційного пристрою

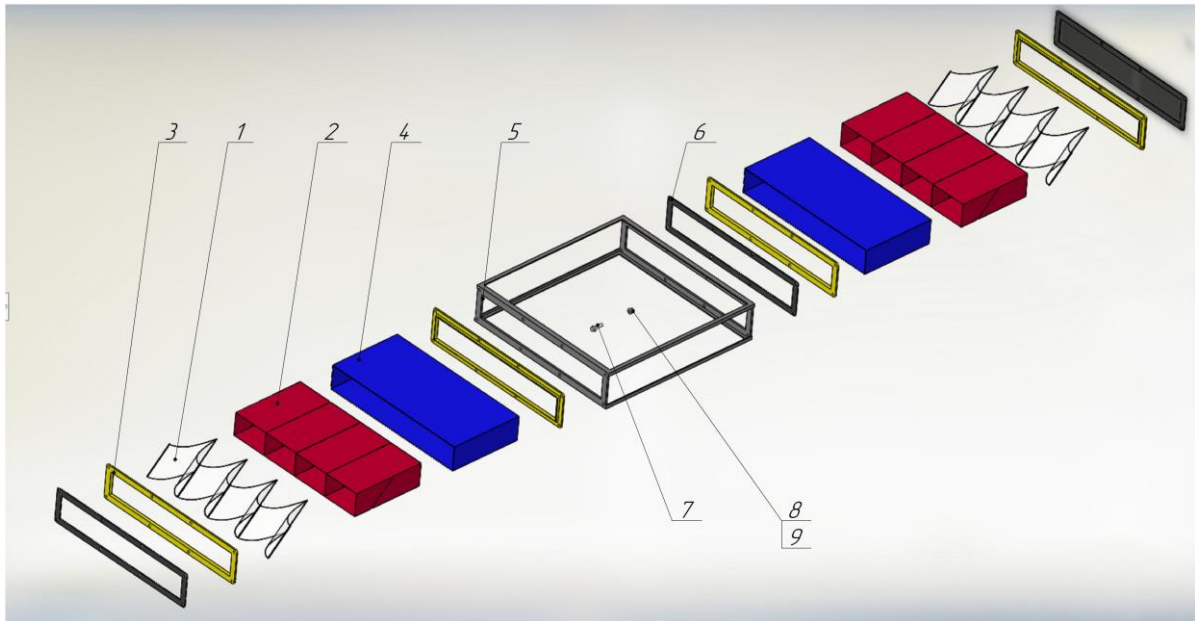


Рисунок 5.9 – Блок динамічного сепараційного пристрою

(1 – похилі параболічні пластини; 2 – корпус сепараційного каналу;
 3 – фланець прямокутний приварний; 4 – корпус сепараційного пакету;
 5 -каркас блоку МСП; 6 – прокладка; 7 – болт; 8 – шайба; 9 – гайка)

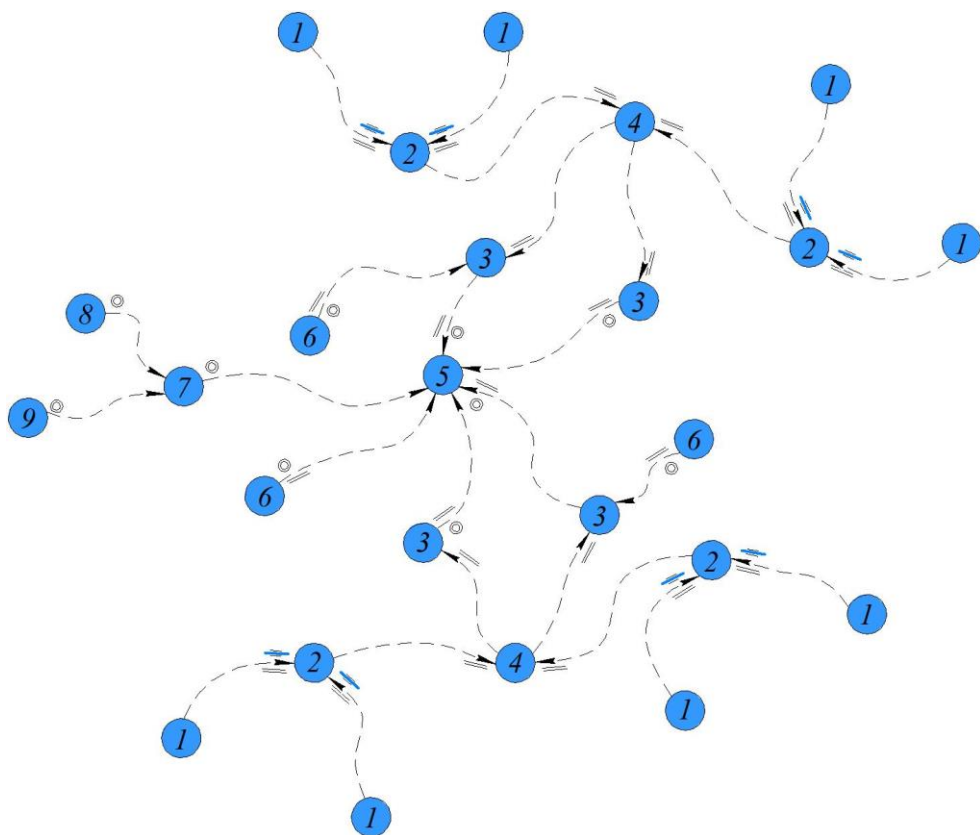


Рисунок 5.10 – Граф процесу складання модульного динамічного сепараційного пристрою з допусками взаємного розміщення поверхонь.

5.3 Висновки до Розділу 5

Представлено впровадження результатів дисертаційної роботи у науково-дослідних роботах, господарчих договорах та у навчальному процесі, що підтверджено відповідними актами впровадження.

Запропоновано варіанти компоновання динамічних сепараційних пристроїв з пружними елементами параболічної, плоскої та синусоїдальної форми в сепараційному обладнанні хімічних, нафто- та газопереробних виробництв.

На основі конструкторсько-технологічних ознак сепараційних пристроїв розроблено структурний код для класифікації модульних сепараційних пристроїв, що дозволить прискорити процес проектування та прийняття рішень щодо компоновання сепараційного обладнання.

Розроблено інженерний алгоритм розрахунку динамічних сепараційних пристроїв, який дозволяє визначити ефективність сепарації та раціональну кількість послідовно встановлених пар пружних елементів.

Розроблено послідовність складання динамічних сепараційних пристроїв що дозволить забезпечити ефективність та надійність їх експлуатації та уникнути ефектів, що негативно впливають на даний процес.

Основні наукові результати розділу опубліковані в працях [59; 88; 125; 126; 127; 128].

ВИСНОВКИ

1. В ході літературного огляду способів і обладнання для розділення гетерогенних систем та особливостей їх конструкцій, було обґрунтовано що перспективним напрямком є впровадження динамічних сепараційних пристроїв, які працюють як система автоматичного регулювання, за рахунок чого можливо підвищити ефективність та інтенсивність процесів розділення, уникнути бризковинесення рідини.

2. Розроблено математичну модель гідроаропружної взаємодії газорідинного потоку з пружними елементами динамічних сепараційних пристроїв, що враховує їх попередню деформацію при виготовленні. В тому числі за допомогою методу найменших квадратів проведена математична ідентифікація коефіцієнтів жорсткості для стаціонарної та не стаціонарної задачі гідроаропружності. Зокрема було визначено, що для запропонованих конструкцій втрата стійкості відбувається при швидкості близькій до 4 м/с.

3. Розроблено математичну модель, що дозволяє визначити зміну геометричних параметрів синусоїдального каналу, а саме його радіусу кривизни та довжини хвилі. Зокрема було визначено, що для запропонованої конструкції максимальні поздовжні деформації складають 16,7 мм.

4. Розроблено математичну модель стікання плівки вловленої рідини по стінкам каналу з урахуванням зміни її товщини по висоті і довжині каналу. Визначено для розглядуваних в роботі параметрів, що максимальна зміна товщини складає 18,8%.

5. За результатами проведення фізичного та числового експерименту було визначено, що при роботі сепараційних пристроїв з пружними відбійними елементами у формі похилого параболічного напівциліндру можна виділити три режими роботи, границі яких залежать від використовуваного матеріалу та товщини елементів. Максимальна різниця між результатами фізичного та числового експерименту склала 9%.

6. За результатами числового експерименту визначено, що ефективність розділення газорідинного потоку в пропонуваній конструкції

сепараційного пристрою з відбійними елементами у формі похилого параболічного напівциліндру склала 25,1%, визначено, що для ефективності розділення на рівні 90% необхідно встановлення підряд 8 таких елементів. У випадку сепараційного елемента з каналом синусоїдальної форми максимальна ефективність розділення складає 95%.

7. Розроблено рекомендації щодо способів компоновання динамічних сепараційних пристроїв у сепараційному обладнанні та загальний алгоритм їх інженерного розрахунку.

8. Розроблені нові конструкції динамічних сепараційних пристроїв, захищені патентами України на корисну модель. Проведено впровадження результатів дисертаційних досліджень у рамках науково-дослідних робіт (4 акти), господарських договорів (2 акти) та закордонних стажувань (1 акт).

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. A. B. Shelekhim and I. N. Beckman, "Gas separation processes in membrane absorber," *Journal of Membrane Science*, vol. 73, no. 1, pp. 73–85, 1992.
2. P. Bakonyi, G. Buitrón, I. Valdez-Vazquez, N. Nemestóthy, and K. Bélafi-Bakó, "A novel gas separation integrated membrane bioreactor to evaluate the impact of self-generated biogas recycling on continuous hydrogen fermentation," *Applied Energy*, vol. 190, pp. 813–823, 2017.
3. Henry Z. Kister, Paul M. Mathias, D. E. Steinmeyer, W. R. Penney, B. B. Crocker, James R. Fair, *Perry's Chemical Engineers' Handbook, Eighth Edition* By Don W. Green (eds), Section 14: Equipment for Distillation, Gas Absorption, Phase Dispersion, and Phase Separation, Overview.
4. Seader, J. and Henley, E. *Separation Process Principles*. John Wiley & Sons, 1998, Chapters 7 and 8.
5. Herbert J. Weber (1961) *Air Pollution Problems of the Foundry Industry*, *Journal of the Air Pollution Control Association*, 11:4, 157-172, DOI: 10.1080/00022470.1961.10467985.
6. S. Fore C.T. Mbohwa, (2010), "Cleaner production for environmental conscious manufacturing in the foundry industry", *Journal of Engineering, Design and Technology*, Vol. 8 Iss 3 pp. 314 – 333.
7. U.S. EPA (2012) *Emission Estimation Protocol for Iron and Steel Foundries, Version 1 Final*. Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, NC. December.
8. Колокольцев, С. Н. *Совершенствование технологий подготовки и переработки углеводородных газов*. Москва: «Ленанд» 2015. 584 с.
9. Ланчаков Г. А., Кульков А. Н., Зиберт Г. К. *Технологические процессы подготовки природного газа и методы расчета оборудования*. Москва: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000. 279 с.
10. Stewart, M., & Arnold, K. (2008). *Two-Phase Gas–Liquid Separators. Gas-Liquid And Liquid-Liquid Separators*, 65–130. doi:10.1016/b978-0-7506-8979-3.00003-9

11. J.H. Song, B.E. Jeong, H.J. Kim, S.S. Gil, "Three-phases separator sizing using drop size distribution", Offshore Technology Conference Publishing, 2010, DOI: 10.4043/20558-MS.
12. Склабінський В.І. Технологічні основи нафто- та газопереробки / Склабінський В.І., Ляпощенко О.О., Артюхов А.Є. Суми: Сумський державний університет, 2011. 187 с.
13. Тронов В.П. Сепарация газа и сокращение потерь нефти. Казань: ФЭН, 2002. 408 с.
14. Роммахи М., Логвин А.В., Ляпощенко О.О Фізична модель руху газокраплинних потоків сепараційними каналами та фільтруючими секціями інерційно-фільтруючих газосепараторів. Нафтогазова енергетика. 2011. № 2 (15). С. 5 11.
15. Mulyandasari V. Practical Engineering Guidelines for Processing Plant Solutions. KLM Technology Group, 2011, pp. 1- 47.
16. Настенко О.В. Моделювання процесів інерційно-фільтруючої сепарації газорідних сумішей: дисертація на здобуття наукового ступеня канд. технічних наук / Настенко О.В. ; Наук. кер. О.О. Ляпощенко. - Суми: СумДУ, 2016. 163 с.
17. Аль, Раммахи Мустафа Макки Мохаммедали Гидродинамические характеристики инерционно-фильтрующих сепараторов: диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук / Р.М. Аль; Науч. рук. В.И. Склабинский. Сумы: СумГУ, 2014. 208 с.
18. Ляпощенко О.О. Теоретичні основи процесів інерційно-фільтруючої сепарації: дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук : 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології / Олександр Олександрович Ляпощенко; Міністерство освіти і науки України, Національний університет «Львівська політехніка». Львів, 2016. 435 с. Бібліографія: с. 296–345.
19. Tarleton S., Wakeman R. Solid/Liquid Separation: Equipment Selection and Process Design. Elsevier Science, 2007. 464 p.
20. Skjefstad H.S, Stanko M. Experimental performance evaluation and design optimization of a horizontal multi-pipe separator for subsea oil-water bulk

separation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, V. 176, 2019, p. 203-219, ISSN 0920-4105, DOI: 10.1016/j.petrol.2019.01.027.

21. Durham, K.D., & Sams, G.W. (2003). Optimizing a Large-Vessel Separator Design for FPSO Operation in Bohai Bay. *Offshore Technology Conference*. DOI:10.4043/15356-ms.

22. Frankiewicz, T. and Lee, C.M., "Using Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulation to Model Fluid Motion in Process Vessels on Fixed and Floating Platforms," *SPE Annual Meeting in San Antonio Texas*, October 2002.

23. Koch-Glitsch FLEXICHEVRON® Mist Eliminators for Flue Gas Desulfurization.— Wichita: Koch-Glitsch, 2018. 12 p.

24. Sulzer Gas/Liquid Separation Technology. Winterthur: Sulzer Chemtech, 2017. 24 p.

25. Elhame Narimani, Shahrokh Shahhoseini. Optimization of vane mist eliminators. *Applied Thermal Engineering* 31 (2011) 188 - 193.

26. FILTERS ® Mesh & vane mist eliminator.

27. C. Richard Sivalls, P.E. Oil and gas separation design manual. SIVALLS, INC.

28. Liaposchenko O. I.Pavlenko, O.Nastenko The Model Of Crossed Movement And Gas-Liquid Flow Interaction With Captured Liquid Film In The Inertial-Filtering Separation Channels. *Separation and Purification Technology*. 2016.

29. Arthur L Kohl, Richard Nielsen. *Gas Purification*. Elsevier, 1997 p. 900.

30. Gokhale, S.J., Plawsky, J.L., Wayner, P.C. Inferred pressure gradient and fluid flow in a condensing sessile droplet based on the measured thickness profile. *Physics of Fluids*, V. 16(6), pp. 1942–1955, (2004). DOI: 10.1063/1.1718991.

31. Chernyshenko, S.I., Goulart, P., Huang, D., Papachristodoulou, A. (2014). Polynomial sum of squares in fluid dynamics: a review with a look ahead. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 372, art. no. 20130350, DOI: 10.1098/rsta.2013.0350.

32. Lioumbas, J. S., Paras, S. V., Karabelas, A. J. (2005). Co-current stratified gas–liquid downflow – Influence of the liquid flow field on interfacial structure.

International Journal of Multiphase Flow, Vol. 31(8), pp. 869–896, DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2005.05.002.

33. Ланчаков Г.А., Кульков А.Н., Зиберт Г.К. Технологические процессы подготовки природного газа и методы расчета оборудования. Москва.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000. 279 с.

34. Meza, C.E., Balakotaiah, V. (2008). Modeling and experimental studies of large amplitude waves on vertically falling films. Chemical Engineering Science, Vol. 63, pp. 4704–4734, DOI: 10.1016/j.ces.2007.12.030.

35. Trifonov, Y.Y. (2012). Stability and bifurcations of the wavy film flow down a vertical plate: The results of integral approaches and full-scale computations. Fluid Dynamics Research, V. 44(3), art. no. 19, DOI: 10.1088/0169-5983/44/3/031418.

36. Yu, Y.Q., Cheng, X. (2014). Three-dimensional simulation on behavior of water film flow with and without shear stress on water-air interface. International Journal of Heat and Mass Transfer, V. 79, pp. 561–572, DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.08.035.

37. Bo, S., Ma, X., Lan, Z., Chen, H., Chen, J. (2012). Numerical simulation on wave behaviour and flow dynamics of laminar-wavy falling films: Effect of surface tension and viscosity. The Canadian Journal of Chemical Engineering, V. 90, pp. 61–68, DOI: 10.1002/cjce.20512.

38. Дем'яненко М.М., Павленко І.В., Ляпощенко О.О. Розширення діапазону ефективної роботи динамічних сепараційних елементів за рахунок використання віброкоагуляції газорідного потоку. Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали V Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції. Суми: Сумський державний університет, 2018.

39. Медников Е.П. Акустическая коагуляция и осаждение аэрозолей / Е.П.Медников. Москва: АН СССР, 1963. 268 с

40. Фукс Н.А. Механика аэрозолей / Н.А. Фукс. Москва.: Изд-во АН СССР, 1955. 351 с.

41. Wang, X. G., Yang, J. G., Wang, Y. Y., & Li, Y. F. (2014). Acoustic Coagulation of Fine Particles from WFGD. *Advanced Materials Research*, 955-959, 2434–2439. doi:10.4028/www.scientific.net/amr.955-959.2434
42. Brittle, S., Desai, P., Ng, W.C., Dunbar, A., Howell, R., Tesar, & Zimmerman, W. B. (2015). Minimising microbubble size through oscillation frequency control. *Chemical engineering research & design*, Issue 104, 357 -366. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.08.002>.
43. Ruud E.M. Verdurmen, Maykel Verschueren, Michiel Gunging, Han Straatsma, Stefan Blei, et al.. Simulation of agglomeration in spray dryers: the EDECAD project. *Le Lait*, INRA Editions, 2005, 85 (4-5), pp.343-351.
44. Ma, D., Zheng, Q., Lin, W., & Guo, M. (2017). Improvements to dust filtration through acoustic agglomeration and atomization. *Aerosol Science and Technology*, 51(7), 824–832.
45. Kilikevičienė, K., Kačianauskas, R., Kilikevičius, A., Maknickas, A., Matijošius, J., Rimkus, A., & Vainorius, D. (2019). Experimental investigation of acoustic agglomeration of diesel engine exhaust particles using new created acoustic chamber. *Powder Technology*. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.09.057
46. Markauskas, D., Kačianauskas, R., Maknickas, A., 2015. Numerical particle-based analysis of the effects responsible for acoustic particle agglomeration. *Adv. Powder Technol.* 26, 698–704. DOI: 10.1016/j.appt.2014.12.008
47. Hoffmann, T.L., & Koopmann, G.H. (1996). Visualization of acoustic particle interaction and agglomeration: Theory and experiments. *The Journal of The Acoustical Society of America*, 99, 2130.
48. Nakajima, Y., Sato, T. (2003). Electrostatic collection of submicron particles with the aid of electrostatic agglomeration promoted by particle vibration. *Powder Technology*, 135-136, 266–284.
49. Dong, S., Lipkens, B., & Cameron, T.M. (2006). The effects of orthokinetic collision, acoustic wake, and gravity on acoustic agglomeration of polydisperse aerosols. *Journal of Aerosol Science*, 37(4), 540–553. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2005.05.008

50. Brandt O., Freund H., Heidemann E. Suspended matter in a sound field. *Zeit. fur Phys.*, V. 104, 1937, pp. 511 – 533.
51. Löffler, F. (1988). *Staubascheiden*, George Thieme Verlag.
52. Демьяненко М.Н., Ляпощенко А.А., Павленко И.В., Склабинский В.И. Решение уравнений Навье-Стокса и задачи гидроаэроупругости для процессов сепарации в криволинейных каналах. *Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна. Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління»*. – 2015. № 27. С. 53–64.
53. Sai, K.G.T., Kumar, A, Srinivasa, P.S.: Analysis of fluid-structure interaction on an aircraft wing. *Int. J. Eng. Innovative Technol.* 3(9), 146–152 (2014)
54. Ankilov, A. V., & Vel'misov, P. A. (2016). Stability of Solutions to an Aerohydroelasticity Problem. *Journal of Mathematical Sciences*, 219(1), 14–26. doi:10.1007/s10958-016-3079-4
55. Dai, Y., & Yang, C. (2014). Methods and advances in the study of aeroelasticity with uncertainties. *Chinese Journal of Aeronautics*, 27(3), 461–474. DOI: 10.1016/j.cja.2014.04.016
56. Xiang, J., Yan, Y., & Li, D. (2014). Recent advance in nonlinear aeroelastic analysis and control of the aircraft. *Chinese Journal of Aeronautics*, 27(1), 12–22. DOI:10.1016/j.cja.2013.12.009
57. E. Garrigues. A Review of Industrial Aeroelasticity Practices at Dassault Aviation for Military Aircraft and Business Jets. *Aerospace Lab, Alain Appriou*, 2018, pp.1-34.
58. Panda, Chinmaya & S R Pappu, Venkatasubramani. (2009). Aeroelasticity-In General and Flutter Phenomenon. 10.1109/ICETET.2009.23.
59. Пат. 102445 У Україна, МПК В01D 45/04 (2006.01). Спосіб вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідного потоку / О.О. Ляпощенко, І.В. Павленко, О.В. Настенко, Р.Ю. Усик, М.М. Дем'яненко; заявник та патентовласник Сумський держ. ун-т. - № у 201505124; заявл. 25.05.2015; опубл. 26.10.2015, бюл.№ 20.

60. A. Korobkin, E. I. Parau, J.-M. Vanden-Broeck The mathematical challenges and modelling of hydroelasticity. *The Royal Society Phil. Trans. R. Soc. A* (2011) 369, 2803–2812.
61. De Silva, C. W. (Editor). *Vibration and shock handbook*. Taylor and Francis, CRC Press, Boca Raton, FL, 2005
62. Korobkin, A., Parau, E. I., & Vanden-Broeck, J.-M. (2011). The mathematical challenges and modelling of hydroelasticity. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369(1947), 2803–2812. DOI:10.1098/rsta.2011.0116
63. Ryszard Gryboś, «Drgania Konstrukcji wzbudzone przepływem», Gliwice, 2005.
64. Bellew, S., Yde, A., & Verelst, D. R. (2014). Application of the Aero-Hydro-Elastic Model, HAWC2-WAMIT, to Offshore Data from Floating Power Plants Hybrid Wind- and Wave-Energy Test Platform, P37. In *Proceedings of the 5th International Conference on Ocean Energy (ICOE) Marine Renewables Canada*.
65. Derakhshan, Shahram & Moghimi, Mahdi & Motawej, Hadi. (2018). Development of a mathematical model to design an offshore wind and wave hybrid energy system.
66. C. Lindenburg. Phatas release "nov-2003" and "apr-2005" user's manual; program for horizontal axis wind turbine analysis and simulation. Technical Report ECN-I-05-005, ECN, Petten, 2005.
67. H. Markoe, M. H. Hansen, T. Buhl, T. van Engelen, E. S. Politis, V. Riziotis, N. K. Poulsen, A. J. Larsen, T. S. Mogensen, and J. G. Holierhoek. Aeroelastic stability and control of large wind turbines - main results. In *European Wind Energy Conference*, number BT4.1, Milan, Italy, 2007.
68. V. A. Riziotis and S. G. Voutsinas. Advanced aeroelastic modeling of complete wind turbine configurations in view of assessing stability characteristics. In *European Wind Energy Conference*, Athens, 2006.
69. Wang, L., Liu, X., & Kolios, A. (2016). State of the art in the aeroelasticity of wind turbine blades: Aeroelastic modelling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 195–210. DOI:10.1016/j.rser.2016.06.007

70. Kawai, T. (1973). The Application of Finite Element Method to Ship Structures, *Computers & Structures*, Vol.3, No.5, pp. 1175-1194, ISSN 0045-7949.
71. Lozina, Ž. (1988). A Comparison of Harmonic Acceleration Method with the Other Commonly Used Methods for Calculation of Dynamic Transient Response, *Computers & Structures*, Vol.29, No.2, pp. 227-240, ISSN 0045-7949.
72. Senjanovic, I., Vladimir, N., Hadzic, N., & Tomi, M. (2011). Beam Structural Modelling in Hydroelastic Analysis of Ultra Large Container Ships. *Recent Advances in Vibrations Analysis*. DOI:10.5772/21616.
73. Senjanović, I., Vladimir, N., Tomić, M., Hadžić, N., & Malenica, Š. (2014). Global hydroelastic analysis of ultra large container ships by improved beam structural model. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 6(4), 1041–1063. DOI: 10.2478/ijnaoe-2013-0230.
74. B. Stoevesandt et al. (eds.), *Handbook of Wind Energy Aerodynamics*, DOI: [10.1007/978-3-030-05455-7_23-1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-05455-7_23-1)
75. Павлено І.В., Дем'яненко М.М., Старинський О.Є. Оптимізаційне профілювання каналів динамічних сепараційних пристроїв з використанням сучасних програмних комплексів. Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали V Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції – Суми: Сумський державний університет, 2018. С. 231.
76. О.О. Ляпощенко, І.В. Павленко, Р.Ю. Усик, М.М. Дем'яненко, Моделювання процесів сепарації та розробка методики розрахунку трифазного сепаратора. *Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій: науковий журнал*. – Серія «Технічні науки». 2015. № 47. Т. 1. С. 62–66.
77. Starynskyi O.Ye., Demianenko M.M., Pavlenko I.V. Hydrodynamics simulation and forecasting the efficiency of separation equipment oil stabilization unit of gnidyntsy gas processing plant. II International Scientific and Technical Conference "Machines, equipment and materials for increasing domestic oil and gas production PGE - 2018", 2018. P. 340 - 342.
78. Sloboda, O., Korba, P., Hovanec, M., Pila, J. Numerical approach in aeroelasticity. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series*

DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2016.93.12>.

79. Afanasyeva, I. N., & Lantsova, I. Y. (2017). Numerical simulation of an elastic structure behavior under transient fluid flow excitation. DOI:10.1063/1.4973054
80. Zhang, W., Alahyari, A. A., & Chiappetta, L. (2016). A Fully Coupled Fluid–Structure Interaction Model for Foil Gas Bearings. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 139(2), 022501. DOI:10.1115/1.4034343
81. Athulya, A. S., & Miji Cherian, R. (2016). CFD Modelling of Multiphase Flow through T Junction. *Procedia Technology*, 24, 325–331. DOI: 10.1016/j.protcy.2016.05.043
82. Dhande, D. Y., & Pande, D. W. (2017). A two-way FSI analysis of multiphase flow in hydrodynamic journal bearing with cavitation. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 39(9), 3399–3412. DOI:10.1007/s40430-017-0750-8
83. Liaposhchenko, O., Pavlenko, I., Monkova, K., Demianenko, M., Starynskyi, O. Numerical simulation of aeroelastic interaction between gas-liquid flow and deformable elements in modular separation devices. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II*, Springer International Publishing, 2020. P. 765-774.
84. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера. Практическое руководство. Москва.: УРСС, 2003, 269 с.
85. Crowe, C.T., Schwarzkopf, J.D., Sommerfeld and M., Tsuji, Y. (2012): *Multiphase Flows with Droplet and Particles* 2nd edition.
86. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida Davis, M.R. and Fungtamasan, B. (1990): Two-phase Flow Through Pipe Branch Junctions. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 16, No. 5, January 1990, pp. 799-817.
87. Elazhary, A.M. (2012): Two-Phase Flow in a Mini-Size Impacting Tee Junction with a Rectangular Cross-Section, Ph.D. Thesis. Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba.
88. Пат. 111039 Україна, МПК В01D 45/00 (2016.01). Спосіб вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідного потоку /

О.О. Ляпощенко, О.В. Настенко, І.В. Павленко, М.М. Дем'яненко та ін.; заявник та патентовласник Сумський державний університет. № u201605061; заявл. 06.05.2016; опубл. 25.10.2016, бюл. № 20.

89. Anang Satria Chandranegara. (2016). Review: Improving Mist Eliminator Performance in Gas-Liquid Separators. DOI: 10.13140/RG.2.1.3342.4885

90. James, P. W., Azzopardi, B. J., Wang, Y., & Hughes, J. P. (2005). A Model for Liquid Film Flow and Separation in a Wave-Plate Mist Eliminator. *Chemical Engineering Research and Design*, 83(5), 469–477. DOI:10.1205/cherd.03363

91. Brunazzi, E., & Paglianti, A. (2000). Design of complex wire-mesh mist eliminators. *AIChE Journal*, 46(6), 1131–1137. DOI:10.1002/aic.690460605

92. Luan, Y., & Sun, H. (2010). Application of numerical simulation in the design of wire-mesh mist eliminator. 2010 International Conference On Computer Design and Applications. DOI:10.1109/iccda.2010.5540870

93. Narimani E., Shahhoseini Sh. (2010). The Effect of Vane Angle on the Mist Eliminator Efficiency. *International Review of chemical Engineering (.RE.1H.E.)*, vor.2, January 2010. Special Section on 1st Conference on Chemical Engineering and Advanced Materials VIRTUAL FORUM (17)

94. Perry R.H., Green D.W. *Perry's Chemical Engineers' Handbook* / R.H.Perry, D.W.Green (ed.). [8th ed.]. McGraw-Hill, 2007. 2640 p.

95. Василевский М.В. Расчет эффективности очистки газа в инерционных аппаратах / М.В.Василевский, Е.Г. Зыков. Томск: Изд-во ТПУ, 2005. 86 с.

96. Kharoua, N., Khezzar, L., & Nemouchi, Z. (2010). Hydrocyclones for De-oiling Applications—A Review. *Petroleum Science and Technology*, 28(7), 738–755. DOI:10.1080/10916460902804721

97. Маслов А.С. Совершенствование технологии подготовки газа с применением моделирующей системы: дис. канд. техн. наук.: 05.17.08 / Маслов Алексей Станиславович. Томск, 2003. 185 с.

98. Синайский Э.Г., Лапта Е. Я., Зайцев Ю. В. Сепарация многофазных многокомпонентных систем. Москва.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. 621 с.

99. Синайский Э.Г. Разделение двухфазных многокомпонентных смесей в нефтегазопромышленном оборудовании. Москва.: Недра, 1990. 272 с.
100. Гельфанд Б.Е. Безударное дробление капель. Временные характеристики. / Гельфанд Б.Е., Вьель Б., Гекальп И., Шаво К. // Прикладная механика и техническая физика. 2001. Т. 42, N 1.
101. Mitre, J.F., Lage, P.L. C., Souza, M.A., Silva, E., Barca, L. F., Moraes, A. O. S., Fonseca, E. F. (2014). Droplet breakage and coalescence models for the flow of water-in-oil emulsions through a valve-like element. *Chemical Engineering Research and Design*, 92(11), 2493–2508. DOI: 10.1016/j.cherd.2014.03.020
102. Демьяненко М.Н., Ляпощенко А.А., Павленко И.В., Склабинский В.И. Решение уравнений Навье-Стокса и задачи гидроаэроупругости для процессов сепарации в криволинейных каналах. *Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна. Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління»*. – 2015. № 27. С. 53 – 64.
103. Demianenko M., Liaposhchenko O., Pavlenko I., Luscinski S., Ivanov V. Methodology of experimental research of aeroelastic interaction between two-phase flow and deflecting elements for modular separation devices. *Advanced Manufacturing Processes. Springer, Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020. P. 1–11.
104. Ляпощенко О.О., Дем'яненко М.М., Старинський О.Є., Янович В.П., Павленко І.В. Експериментальне дослідження взаємодії газорідного потоку з деформівними елементами модульного сепараційного пристрою за допомогою PIV. *Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали та програма VII Всеукраїнської науково-технічної конференції*. Суми: Сумський державний університет, 2020. С.155-156.
105. Holierhoek, J.G. (2020). Aeroelastic Stability Models. *Handbook of Wind Energy Aerodynamics*, 1–45. DOI: 10.1007/978-3-030-05455-7_23-1
106. Bir G (2008) Multiblade coordinate transformation and its application to wind turbine analysis. In: *Proceedings of the 2008 ASME Wind Energy Symposium*

107. Skjoldan P, Hansen M (2009) On the similarity of the Coleman and Lyapunov-Floquet transformations for modal analysis of bladed rotor structures. *J Sound Vib* 327(3):424 – 439.
108. C.A. Klausmeier, “Floquet Theory; a Useful Tool for Understanding NonEquilibrium Dynamics”, *Theoretical Ecology*, (2008), 1, 153–161.
109. M. Bartuccelli et al., “On the Dynamics of a Vertically Driven Damped Planar Pendulum”, *Proc. Roy. Soc., London A*, Vol. 457, (2001), pp. 3007-3022.
110. Stol K, Balas M, Bir G (2002) Floquet modal analysis of a teetered-rotor wind turbine. *J Sol Energy Eng* 124(4):364–371.
111. Peters DA (1994) Fast floquet theory and trim for multibladed rotorcraft. *J Am Helicopter Soc* 39(4):82–89.
112. Павленко, І.В. Методи ідентифікації параметрів математичних моделей коливальних процесів: монографія / І.В. Павленко, В.І. Симоновський. Суми: СумДУ, 2020. 145 с.
113. Дем’яненко М.М., Старинський О.Є., Павленко І.В., Ляпощенко О.О. Розроблення методик проведення експериментальних досліджень впливу механічних коливань на газорідинний потік. Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали VI Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції Суми: Сумський державний університет, 2019. С. 143 - 144.
114. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям/ Под ред. М.О. Штейнберга. 3-е изд., перераб. и доп. Москва; Машиностроение, 1992. 672 с: ил.
115. ГОСТ 19.301-79 “Програма і методика випробувань. Вимоги до змісту і оформлення”.
116. Гусак О., Іванов В., Павленко І., Ляпощенко О., Дем’яненко М., Старинський О., Математичні моделювання процесів, протікаючих в динамічних сепараційних елементах. I Міжнародна науково-технічна конференція “Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2019” 2019. С. 238 - 239.

117. Ляпощенко О.О., Маренок В.М., Дем'яненко М.М., Старинський О.Є., Ковтун В.В., Голохвост О.О. Оптимізаційне моделювання модульних сепараційних пристроїв у багатофазних розділювачах. Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали VI Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції. Суми : Сумський державний університет. 2019. С. 243.

118. Demianenko, M., Volf, M., Pavlenko, V., Liaposhchenko, O., Pavlenko, I. The solution of the stationary aeroelasticity problem for a separation channel with deformable sinusoidal walls. *Journal of Engineering Sciences*. (2020). V. 7(1), pp. D5–D10.

119. Pavlenko, I.V., Liaposhchenko, O.O., Demianenko, M.M., Starynskyi, O.Ye. Static calculation of the dynamic deflection elements for separation devices. *Journal of Engineering Sciences*, 2017. Vol. 4(2), pp. B19-B24.

120. Pavlenko I., Liaposhchenko A., Ochowiak M., Demyanenko M. Solving the stationary hydroaeroelasticity problem for dynamic deflection elements of separation devices. *Vibrations in Physical Systems - Poznan University of Technology*, 2018. Volume 29. P. 1 – 7.

121. Pavlenko, I.; Liaposhchenko, O.; Ochowiak, M.; Olszewski, R.; Demianenko, M.; Starynskyi, O.; Ivanov, V.; Yanovych, V.; Włodarczak, S.; Doligalski, M. Three-Dimensional Mathematical Model of the Liquid Film Downflow on a Vertical Surface. *Energies*. 2020. 13, 1938.

122. Demianenko M., Volf M., Pavlenko I., Liaposhchenko O. Experimental studies on oscillation modes of vibration separation devices. *Journal of Engineering Sciences*. 2021. Vol. 8(1), pp. D1–D9.

123. Дем'яненко М. М., Старинський О. Є., Павленко І. В., Ляпощенко О. О. Використання засобів ідентифікації математичних моделей для створення інженерної методики розрахунку вібраційно-інерційних сепараційних пристроїв. Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали VI Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції – Суми: Сумський державний університет, 2019. С. 141-142.

124. Ляпощенко О.О., Павленко І.В., Дем'яненко М.М., Старинський О.Є., Ковтун В.В., Голохвост О.О. Застосування методів обчислювальної гідродинаміки до оптимізації конструкцій модульних сепараційних пристроїв багатофазних розділювачів. III Міжнародна науково-практична конференція "Прикладні науково-технічні дослідження (applied scientific and technical research)", Академія технічних наук України, Університет Короля Данила, Івано-Франківський національний університет нафти і газу. С. 132.

125. Пат. 130464 U Україна, МПК В01D 45/04 (2006.01) Пристрій для сепарації дисперсної рідини з газового потоку / Ляпощенко О.О., Павленко І. В., Дем'яненко М. М., Старинський О. Є., Ковтун В. В.; заявник та патентовласник Сумський державний університет. № u201806182; заявл. 04.06.2018; опубл. 10.12.2018, бюл.№ 23.

126. Пат. №145173 U Україна, МПК В01D 17/00 (2006.01) Пристрій для розділення двофазних газорідинних багатокомпонентних систем / Ляпощенко О. О., Стороженко В.Я., Скиданенко М.С., Павленко І.В., Шматенко В.А., Дем'яненко М.М., Старинський О.Є., Хуссейн С.; заявник та патентовласник Сумський державний університет. № u202003718; заявл. 19.06.2020; опубл. 26.12.2020, бюл. №22, 2020.

127. Ляпощенко О.О., Іванов В.О., Павленко І.В., Дем'яненко М.М., Старинський О.Є., Ковтун В.В. Оптимізаційне компонування фазних розділювачів з застосуванням модульних сепараційних пристроїв. Наукові праці ОНАХТ: науковий журнал. Серія «Технічні науки». 2018. Т.82. №1. С.128-133.

128. Ляпощенко О.О., Павленко І.В., Іванов В.О., Дем'яненко М.М., Старинський О.Є. Розроблення конструкторсько-технологічної класифікації модульних сепараційних пристроїв. XVIII Міжнародна науково-практична конференція «Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво». 2018. С. 120-122.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні результати дисертації:

1. Pavlenko I., Liaposhchenko A., Ochowiak M., Demyanenko M. Solving the stationary hydroaeroelasticity problem for dynamic deflection elements of separation devices. *Vibrations in Physical Systems - Poznan University of Technology*, 2018. Volume 29. P. 1 – 7. Особистий внесок - розв'язок стаціонарної задачі гідроаеропружності для динамічних сепараційних пристроїв.
2. Pavlenko, I.; Liaposhchenko, O.; Ochowiak, M.; Olszewski, R.; Demianenko, M.; Starynskyi, O.; Ivanov, V.; Yanovych, V.; Włodarczak, S.; Doligalski, M. Three-Dimensional Mathematical Model of the Liquid Film Downflow on a Vertical Surface. *Energies*. 2020. 13, 1938. Особистий внесок - удосконалення математичної моделі, що описує тривимірне стікання плівки вловленої рідини по осаджувальним поверхням модульних динамічних сепараційних пристроїв.
3. Demianenko M., Volf M., Pavlenko I., Liaposhchenko O. Experimental studies on oscillation modes of vibration separation devices. *Journal of Engineering Sciences*. 2021. Vol. 8(1), pp. D1 – D9. Особистий внесок - експериментальне дослідження гідродинаміки та гідроаеропружності динамічних сепараційних пристроїв.
4. Demianenko, M., Volf, M., Pavlenko, V., Liaposhchenko, O., Pavlenko, I. The solution of the stationary aeroelasticity problem for a separation channel with deformable sinusoidal walls. *Journal of Engineering Sciences*. (2020). Vol. 7(1), pp. D5 – D10. Особистий внесок - одержані залежності, що визначають зміну геометричної форми синусоїдального каналу динамічного сепараційного пристрою в результаті гідродинамічної та гідроаеропружної взаємодії з потоком.
5. Pavlenko, I.V., Liaposhchenko, O.O., Demianenko, M.M., Starynskyi, O.Ye. Static calculation of the dynamic deflection elements for separation devices. *Journal of Engineering Sciences*, 2017. Vol. 4(2), pp. B19 - B24. Особистий внесок - створення математичної моделі статичного розрахунку відбійних

елементів динамічних сепараційних пристроїв та розв'язав задачу статичної гідроаеропружності.

6. Liaposhchenko, O., Pavlenko, I., Monkova, K., Demianenko, M., Starynskyi, O. Numerical simulation of aeroelastic interaction between gas-liquid flow and deformable elements in modular separation devices. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II, Springer International Publishing*, 2020. P. 765-774. Особистий внесок - чисельний розв'язок нестационарної задачі гідродинаміки та гідроаеропружності динамічних сепараційних пристроїв.

7. Demianenko M., Liaposhchenko O., Pavlenko I., Luscinski S., Ivanov V. Methodology of experimental research of aeroelastic interaction between two-phase flow and deflecting elements for modular separation devices. *Advanced Manufacturing Processes. Springer, Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020. P. 1 – 11. Особистий внесок – спроектовано та виготовлено експериментальний стенд для дослідження гідродинаміки та гідроаеропружності динамічних сепараційних пристроїв.

Наукові праці, які свідчать про апробацію матеріалів дисертації:

8. Дем'яненко М.Н., Ляпощенко А.А., Павленко И.В., Склабинский В.И. Решение уравнений Навье-Стокса и задачи гидроаэроупругости для процессов сепарации в криволинейных каналах. *Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна. Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління»*. – 2015. № 27. С. 53 – 64. Особистий внесок - одержані залежності між гідродинамічними характеристиками потоку і пружними характеристиками динамічних відбійних елементів.

9. О.О. Ляпощенко, І.В. Павленко, Р.Ю. Усик, М.М. Дем'яненко, Моделювання процесів сепарації та розробка методики розрахунку трифазного сепаратора. *Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій: науковий журнал*. – Серія «Технічні науки». 2015. № 47. Т. 1. С. 62–66. Особистий внесок - проведено числове моделювання процесу розділення

багатокомпонентних гетерогенних систем із застосуванням динамічних сепараційних пристроїв.

10. Ляпощенко О.О., Іванов В.О., Павленко І.В., Дем'яненко М.М., Старинський О.Є., Ковтун В.В. Оптимізаційне компонування фазних розділювачів з застосуванням модульних сепараційних пристроїв. *Наукові праці ОНАХТ: науковий журнал. – Серія «Технічні науки»*. 2018. Т.8 2. №1. С. 128 - 133. Особистий внесок - створено підхід щодо раціонального вибору компонувань модульних сепараційних пристроїв і чисельно розв'язав задачу гідродинаміки потоку в динамічному сепараційному пристрої.

11. Ляпощенко О.О., Дем'яненко М.М., Старинський О.Є., Янович В.П., Павленко І.В. Експериментальне дослідження взаємодії газорідного потоку з деформівними елементами модульного сепараційного пристрою за допомогою PIV. *Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали та програма VII Всеукраїнської науково-технічної конференції. – Суми: Сумський державний університет, 2020. С. 155 - 156.*

12. Гусак О., Іванов В., Павленко І., Ляпощенко О., Дем'яненко М., Старинський О., Математичні моделювання процесів, протікаючих в динамічних сепараційних елементах. *I Міжнародна науково-технічна конференція “Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2019”* 2019. С. 238 - 239.

13. Дем'яненко М.М., Старинський О.Є., Павленко І.В., Ляпощенко О. О. Використання засобів ідентифікації математичних моделей для створення інженерної методики розрахунку вібраційно-інерційних сепараційних пристроїв. *Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали VI Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції – Суми: Сумський державний університет, 2019. С. 141-142.*

14. Дем'яненко М.М., Старинський О.Є., Павленко І.В., Ляпощенко О. О. Розроблення методики проведення експериментальних досліджень впливу механічних коливань на газорідний потік. *Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали VI Всеукраїнської*

міжвузівської науково-технічної конференції – Суми: Сумський державний університет, 2019. С. 143-144.

15. Дем'яненко М.М., Павленко І.В., Ляпощенко О.О. Розширення діапазону ефективної роботи динамічних сепараційних елементів за рахунок використання віброкоагуляції газорідного потоку. *Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали V Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції – Суми: Сумський державний університет, 2018. С. 134.*

16. Павленко І.В., Дем'яненко М.М., Старинський О.Є. Оптимізаційне профілювання каналів динамічних сепараційних пристроїв з використанням сучасних програмних комплексів. *Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали V Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції – Суми: Сумський державний університет, 2018. С. 231.*

17. Ляпощенко О.О., Павленко І.В., Дем'яненко М.М., Старинський О.Є., Ковтун В.В., Голохвост О.О. Застосування методів обчислювальної гідродинаміки до оптимізації конструкцій модульних сепараційних пристроїв багатофазних розділювачів. *III Міжнародна науково-практична конференція "Прикладні науково-технічні дослідження (applied scientific and technical research)", Академія технічних наук України, Університет Короля Данила, Івано-Франківський національний університет нафти і газу. 2019. С. 132.*

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

18. О.О. Ляпощенко, В.М. Маренок, М.М. Дем'яненко, О.Є. Старинський, В.В. Ковтун, О.О. Голохвост Оптимізаційне моделювання модульних сепараційних пристроїв у багатофазних розділювачах. *Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали VI Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції. – Суми: Сумський державний університет. 2019. С. 243.*

19. Ляпощенко О.О., Павленко І.В., Іванов В.О., Дем'яненко М.М., Старинський О.Є. Розроблення конструкторсько-технологічної класифікації модульних сепараційних пристроїв. *XVIII Міжнародна науково-практична*

конференція «Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво». 2018. С. 120-122.

20. Liaposhchenko, O.O., Starynskyi O.Ye., Demianenko M.M., Pavlenko I.V. Hydrodynamics simulation and forecasting the efficiency of separation equipment oil stabilization unit of Gnidyntsy gas processing plant. *II Міжнародна науково-технічна конференція “Машини обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку нафти і газу PGE – 2018”*, 2018. С. 340 - 342.

21. Пат. 102445 Україна, МПК В01D 45/04 (2006.01). Спосіб вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідинного потоку / О.О. Ляпощенко, І.В. Павленко, О.В. Настенко, Р.Ю. Усик, М.М. Дем'яненко; заявник та патентовласник Сумський державний університет. № u201505124; заявл. 25.05.2015; опубл. 26.10.2015, бюл.№ 20.

22. Пат. 111039 Україна, МПК В01D 45/00 (2016.01). Спосіб вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідинного потоку / О.О. Ляпощенко, О.В. Настенко, І.В. Павленко, М.М. Дем'яненко та ін.; заявник та патентовласник Сумський державний університет. № u201605061; заявл. 06.05.2016; опубл. 25.10.2016, бюл. № 20.

23. Пат. 130464 U Україна, МПК В01D 45/04 (2006.01) Пристрій для сепарації дисперсної рідини з газового потоку / О.О. Ляпощенко, І.В. Павленко, М.М. Дем'яненко, О.Є. Старинський, В.В. Ковтун; заявник та патентовласник Сумський державний університет. № u201806182; заявл. 04.06.2018; опубл. 10.12.2018, бюл. № 23.

24. Пат. №145173 U Україна, МПК В01D 17/00 (2006.01) Пристрій для розділення двофазних газорідинних багатокомпонентних систем / О.О. Ляпощенко, В.Я. Стороженко, М.С. Скиданенко, І.В. Павленко, В.А. Шматенко, М.М. Дем'яненко, О.Є. Старинський, С. Хуссейн; заявник та патентовласник Сумський державний університет. № u202003718; заявл. 19.06.2020; опубл. 26.12.2020, бюл. №22, 2020.

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Таблиця 1 – Результати експерименту для пружного відбійного елемента виготовленого з ПВХ товщиною 0,4 мм

№	Швидкість входу газорідного потоку, м/с	Частота коливань, Гц	Розмах коливань, см	Відхилення пружного елемента (положення «рівноваги»), мм
1	1,6	0	0	9
2	1,9	0	0	15
3	2,3	0	0	23
4	2,6	0	0	29
5	3	0	0	37
6	3,3	0	0	40
7	3,7	0	0	42
8	4	0	0	45
9	4,4	0	0	48
10	4,8	0	0	49
11	5,1	0	0	51
12	5,5	0	0	<u>51</u>
13	5,9	14,6	52	<u>54</u>
14	6,5	14,5	65	<u>62</u>
15	7,4	13,4	73	<u>63</u>
16	8	13,4	89	<u>64</u>
17	8,4	13,4	79	<u>78</u>
18	9,5	13,4	64	<u>79</u>
19	10,3	13,6	61	<u>80</u>

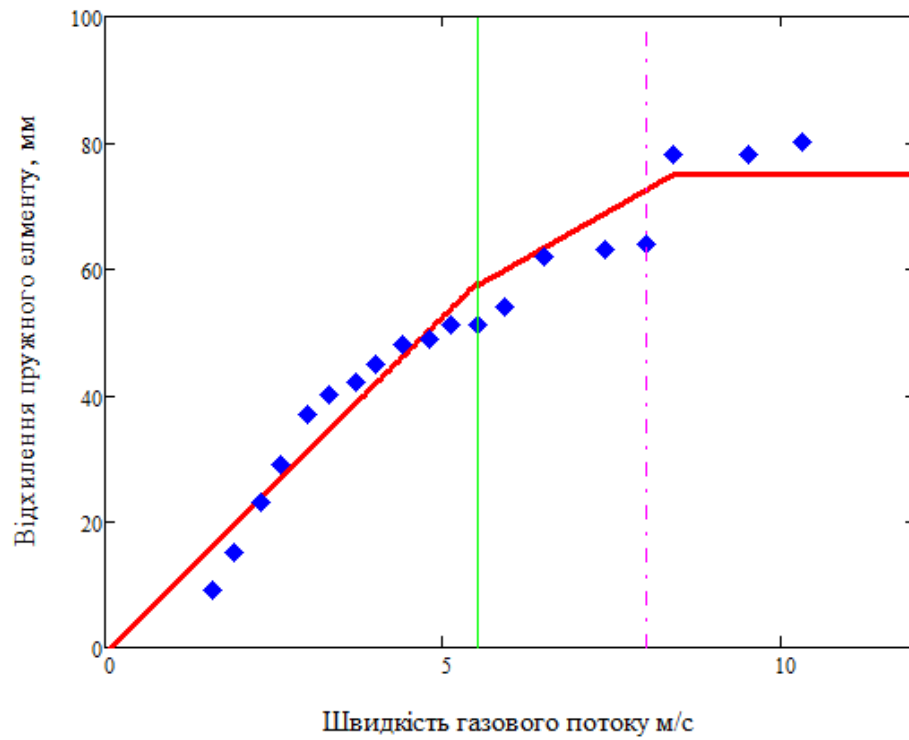


Рисунок 1 – Графік залежності положення пружного відбійного елемента виготовленого з ПВХ товщиною 0,4 мм від швидкості газопотоку

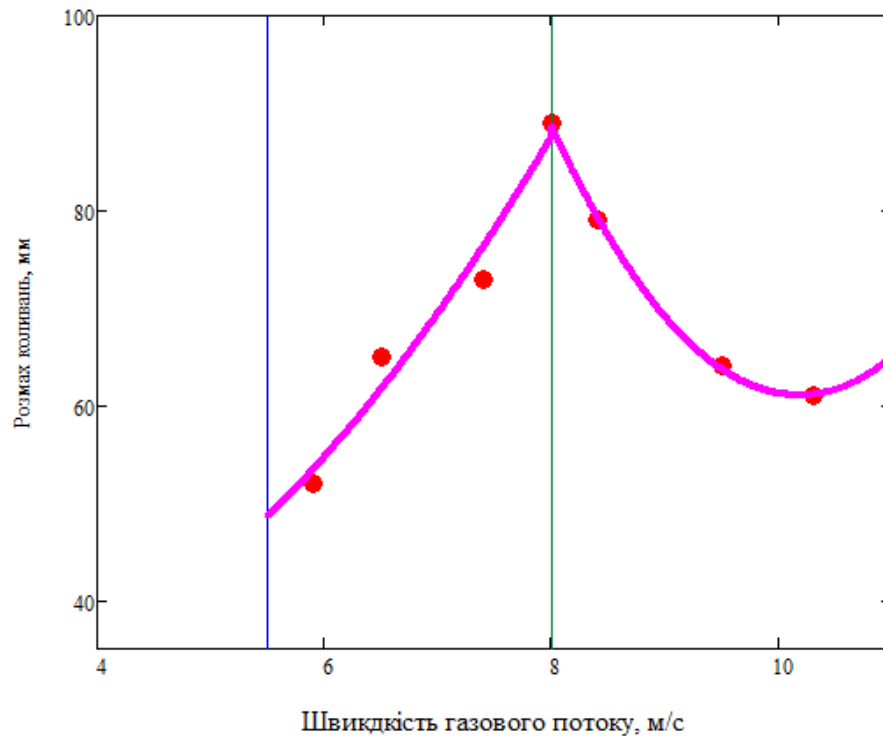


Рисунок 2 – Графік залежності розмаху коливань пружного відбійного елемента виготовленого з ПВХ товщиною 0,4 мм від швидкості входу газопотоку на двох режимах роботи

Таблиця 2 – Результати експерименту для пружного відбійного елемента виготовленого з ПВХ товщиною 0,6 мм

№	Швидкість входу газорідного потоку, м/с	Частота коливань, Гц	Розмах коливань, см	Відхилення пружного елемента (<u>положення «рівноваги»</u>), мм
1	3,3	19,2	7	<u>12</u>
2	3,7	18,8	12	<u>20</u>
3	4	18,7	21	<u>32</u>
4	4,5	18	32	<u>36</u>
5	4,8	17,7	45	<u>42</u>
6	5	17,5	47	<u>43</u>
7	5,5	17,2	49	<u>45</u>
8	5,8	17	52	<u>49</u>
9	6,3	16,9	56	<u>50</u>
10	6,6	16,7	58	<u>55</u>
11	7,4	16,5	60	<u>60</u>
12	8,2	16,4	61	<u>68</u>
13	9	16,5	62	<u>70</u>
14	9,9	18,5	62	<u>76</u>
15	10,7	18,8	58	<u>83</u>
16	11,6	20	52	<u>85</u>
17	13,1	20,8	50	<u>90</u>

Таблиця 3 – Результати експерименту для пружного відбійного елемента виготовленого з АБС пластику товщиною 0,4 мм

№	Швидкість входу газорідного потоку, м/с	Частота коливань, Гц	Розмах коливань, см	Відхилення пружного елемента (<u>положення «рівноваги»</u>), мм
1	1,1	0	0	7
2	1,91	0	0	21
3	2,8	0	0	31
4	3,7	0	0	38
5	4,6	0	0	41
6	5	0	0	49
7	5,3	0	0	52
8	5,51	11,4	62	57
9	6,1	11,4	80	60
10	6,3	10,9	88	64
11	7,1	10,7	82	66
12	7,8	10,2	78	68
13	8,4	10	72	70
14	9,5	9,67	66	72
15	10,5	8,42	65	75
16	11,2	8,3	63	76
17	11,6	8,2	60	79

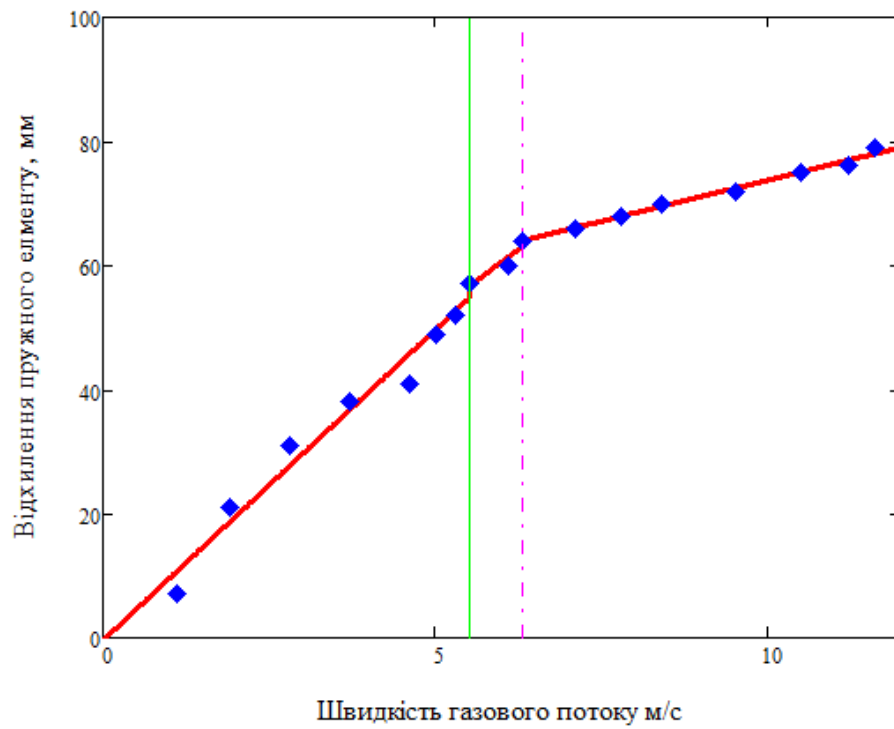


Рисунок 3 – Графік залежності положення пружного відбійного елемента виготовленого з АБС пластику товщиною 0,4 мм від швидкості газového потоку

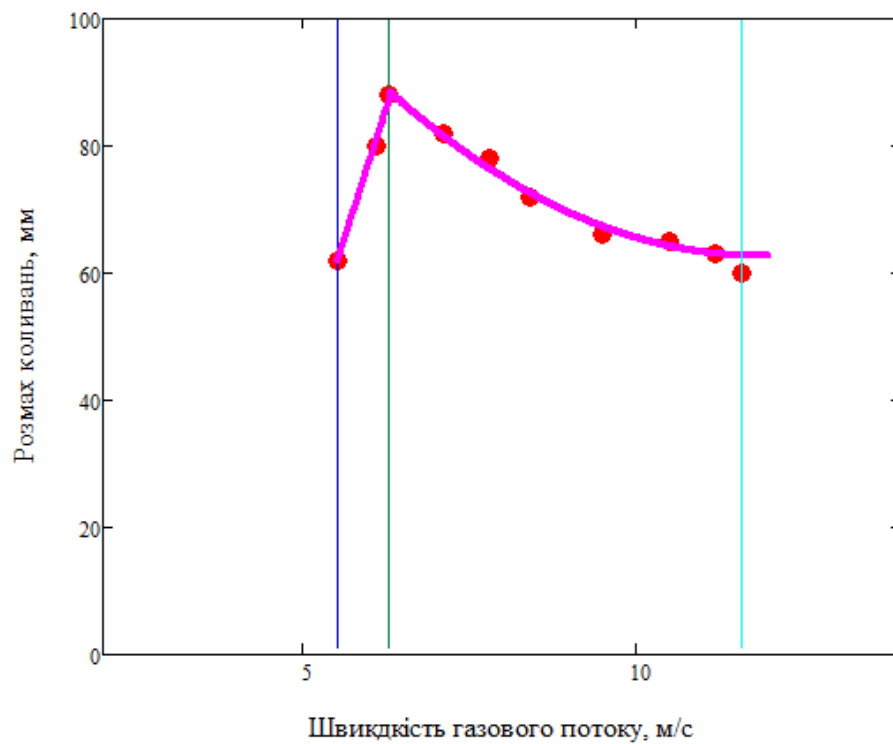


Рисунок 4 – Графік залежності розмаху коливань пружного відбійного елемента виготовленого з АБС пластику товщиною 0,4 мм від швидкості входу газového потоку на двох режимах роботи

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ ДИСЕРТАЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ В НАУКОВУ ДІЯЛЬНІСТЬ



АКТ впровадження (використання) результатів науково-дослідної роботи (етапу НДР) у навчальний процес

ДР №0117U003931 «Розробка та впровадження енергоефективних модульних сепараційних пристроїв для нафтогазового та очисного обладнання». Етап 2 - Теоретичні та експериментальні дослідження.

яка виконана в період з січня 2018 р. по грудень 2018 р.

розроблено стратегію оптимізаційних статичних та динамічних моделювань з аналізом режимно-технологічних та апаратурно-конструктивних способів інтенсифікації процесів сепарації; розвинуто науковий підхід до фізичного та математичного моделювання гідродинамічних процесів при сепарації газорідних систем; розширено уявлення про основні методи і механізми газодинамічної, інерційно-фільтруючої, вібраційно-інерційної сепарації; вперше визначено основні гідродинамічні характеристики модульних сепараційних пристроїв та комбінованих багатофункціональних сепараторів.

Керівник теми Ляпошенко Олександр Олександрович
(прізвище, ініціали)

Комісія в складі:

Голова комісії: проректор з наукової роботи, д.ф.-м.н., проф. Черноус А.М.
(посада, прізвище, ініціали)

Члени комісії: зав. кафедри ПОХНВ, д.т.н., проф. Склабінський В.І.
(посада, прізвище, ініціали)

гол. наук. співробітник, д.т.н., доц. Ляпошенко О.О.
(посада, прізвище, ініціали)

встановила впровадження в навчальний процес результатів досліджень та місце їх використання:




1. Результати досліджень були використані при підготовці випускних кваліфікаційних робіт бакалавра (Ковтун В.В., Борисова Н.В.), магістра (Старинський О.Є., Варуха Д.О., Курдес Ю.Ю.), а також спільної студентської наукової роботи Старинського О.Є., Ковтуна В.В. «Моделювання гідродинаміки та прогнозування ефективності роботи сепараційного обладнання установки стабілізації нафти», яку нагороджено дипломом 1 ступеня у II турі Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт 2017/2018 н.р. (галузь «Нафтова та газова промисловість»). У співавторстві зі студентами опубліковано 3 статті у фахових виданнях України, 6 тез доповідей у матеріалах науково-технічних конференцій, отримано 1 патент та подано 3 заявки на патенти України на корисну модель.

2. Виконавці НДР (д.т.н., г.н.с. Ляпошенко О.О., к.т.н., с.н.с. Іванов В.О., к.т.н., с.н.с. Павленко І.В., к.т.н., с.н.с. Литвиненко О.В., к.т.н., с.н.с. Острога Р.О., к.т.н., н.с. Литвиненко А.В., н.с. Дем'яненко М.М.) приймали участь у закордонних стажуваннях (терміном від 1 до 7 місяців) до University of West Bohemia (Чеська Республіка), Technical University of Kosice (Словацька Республіка), Poznan University of Technology (Республіка Польща), Technical University of Cluj-Napoca (Румунія) за програмою "Erasmus+" та

тематиками індивідуальних грантів («Numerical Simulation of Dynamic Processes of Vibration-Inertial Separation of Gas-Liquid Flows in Dynamic Separation Devices», «Investigation of the motion principles and entrainment kinetics of solid phase in the separation section of the fluidized bed apparatus», «Numerical Simulation of the Inertial Separation with the Imposition of Vibration on the Flow», «Numerical Simulation of Separation in the Gravitation Pneumatic Classifier» та інших). Проведені наукові семінари «Fixture Design for Multiproduct Manufacturing: Analysis, Optimization and Verification» (Іванов В.О., к.т.н., с.н.с., доцент кафедри ТМВІ СумДУ), «Identification of Parameters for Manufacturing Systems: Fixture Design Modelling» (Павленко І.В., к.т.н., с.н.с., доцент кафедри ЗМіДМ СумДУ) для магістрантів та аспірантів University of West Bohemia, навчальний курс «Advanced Fixture Design» (8 годин, Іванов В.О., к.т.н., с.н.с., доцент кафедри ТМВІ СумДУ) для магістрів Technical University of Cluj-Napoca, а для магістрантів Poznan University of Technology проведені воркшопи «Computer-aided Fixture Design» (Іванов В.О., к.т.н., с.н.с., доцент кафедри ТМВІ СумДУ), Mathematical Modelling of Mechanical Systems» (Павленко І.В., к.т.н., с.н.с., доцент кафедри ЗМіДМ СумДУ).

3. Виконано загальноуніверситетський Grant Project Contract №3/O-2018-30 «Development of international cooperation with Ukrainian higher education institutions in the field of energy and transport» (фінансувався Czech Development Agency) в складі консорціуму з University of West Bohemia (UWB), Одеський національний політехнічний університет (ОНПУ), Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХП»), Сумський державний університет (СумДУ) та Вінницький національний технічний університет (ВНТУ). Відповідальний виконавець від СумДУ — Іванов В. О., к.т.н., с.н.с., доцент кафедри ТМВІ.

“ 17 ” 12 2018 р.

Голова комісії:		А.М.Чорноус
	(підпис)	(прізвище, ініціали)
Члени комісії:		В.І.Склябінський
	(підпис)	(прізвище, ініціали)
		О.О.Ляпощенко
	(підпис)	(прізвище, ініціали)



ЗАТВЕРДЖУЮ
Перший проректор СумДУ

Карпуша В.Д.

(прізвище, ініціали)

12 2019 р.

АКТ

**впровадження (використання) результатів
науково-дослідної роботи (етапу НДР) у навчальний процес**

ДР №0117U003931 «Розробка та впровадження енергоефективних модульних
(номер держреєстрації, назва теми, етапу)
сепараційних пристроїв для нафтогазового та очисного обладнання».
Етап 3 - Узагальнення і оцінювання результатів науково-дослідних робіт.

яка виконана в період з січня 2019 р. по грудень 2019 р.

розроблено статичні та динамічні оптимізаційні моделі процесів компримування, сепарації та тепломасообміну в установках промислової підготовки нафти і газу, первинної переробки і газофракціонування з застосуванням інструментальних засобів САЕ-систем термодинамічного моделювання; визначені основні гідродинамічні та сепараційні характеристики, які представляють можливість оцінити гідравлічний опір та прогнозувати розрахункову ефективність сепарації високодисперсних систем в сепараційних пристроях і багатофункціональних модульних сепараторах за результатами фізичних та математичних моделювань; розширено уявлення про теоретичні основи процесів газодинамічної, інерційно-фільтруючої, вібраційно-інерційної сепарації газокраплинних потоків; винайдені нові об'єкти інтелектуальної власності захищені свідоцтвом про реєстрацію авторського права на твір та патентами України на корисну модель.

(назва результату НДР, що впроваджується)

Керівник теми Ляпошенко Олександр Олександрович

(прізвище, ініціали)

Комісія в складі:

Голова комісії: декан факультету ТеСЕТ, к.т.н., проф. Гусак О.Г.

(посада, прізвище, ініціали)

Члени комісії: зав. кафедри ПОХНВ, д.т.н., проф. Склабінський В.І.

(посада, прізвище, ініціали)

гол. наук. співробітник, д.т.н., проф. Ляпошенко О.О.

(посада, прізвище, ініціали)

встановила впровадження в навчальний процес результатів досліджень та місце їх використання²:

1. Результати досліджень були використані при курсовому проектуванні бакалаврів (Голохвост О.О., Самойленко В.О., Скотар А.П., Шаповал М.В., Шматенко В.А.) та магістрантів (Борисова Н.В., Ковтун В.В., Колос В.О.), при підготовці випускних кваліфікаційних робіт магістра (Ковтун В.В., Колос В.О.), а також спільної студентської наукової роботи Ковтуна В.В., Голохвоста О.О. «Оптимізаційне моделювання модульних сепараційних пристроїв багатофазних нафтогазових розділювачів» (наук. керівник – н.с. Старинський О.Є.), яку нагороджено дипломом III ступеня у II турі Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт 2018/2019 н.р. (галузь «Нафтова та газова промисловість»). У співавторстві зі студентами опубліковано 1 статтю у фаховому виданні України, 2 тези доповідей у матеріалах науково-технічних конференцій, отримано 4 патенти та подано 2 заявки на патенти України на корисну модель.

2. Виконавцями НДР (д.т.н., г.н.с. Ляпощенко О.О., д.т.н., с.н.с. Іванов В.О., к.т.н., с.н.с. Павленко І.В., н.с. Дем'яненко М.М., н.с. Старинський О.С.) отримано 6 міжнародних індивідуальних грантів та прийнято участь у закордонних наукових стажуваннях (терміном від 1 тижня до 3 місяців) до Poznan University of Technology та Kielce University of Technology (Республіка Польща), Technical University of Kosice (Словацька Республіка), University of West Bohemia (Чеська Республіка) за програмою Erasmus+ та тематиками індивідуальних грантів («Chemical Engineering and Plant Design», «Identification of Parameters for Technological Equipment Using Artificial Neural Networks», «CFD simulation of the heat and mass transfer processes between liquid and gas phases of the mixture flow inside of the chemical equipment» та інших). За результатами конкурсу Gene Haas Foundation International School отримано та виконується загальноуніверситетський грант Gene Haas Scholarships (15 000 USD, керівник — Іванов В. О., д.т.н., с.н.с. доцент кафедри технологія машинобудування, верстати та інструменти факультету технічних систем та енергоефективних технологій СумДУ). Науковий керівник НДР д.т.н., проф., г.н.с. Ляпощенко О.О. отримав грант від закордонного виробника сепараційного обладнання PFTechnology sp.z o.o. sp. k. і був запрошений як експерт для науково-технічного консультування з конструювання модульних сепараційних пристроїв, а також з метою технічного обстеження дослідного зразка промислової установки переробки твердих відходів методом піролізу EcoHydroCarbon Sp. z o.o. (Республіка Польща). В рамках програми Erasmus+ для бакалаврів Faculty of Mechanical Engineering and Management Poznan University of Technology (Республіка Польща) професором кафедри процесів та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв факультету технічних систем та енергоефективних технологій СумДУ, д.т.н., проф., г.н.с. Ляпощенко О.О. викладено навчальний курс «Chemical Engineering and Plant Design» (8 годин).

3. Результати НДР використано (впроваджено) при наданні наукових послуг за господарчим договором №51.18-20196.СП/03 «Теоретичні основи процесів стиснення, теплообміну і сепарації в поршневіх компресорних машинах та установках» (замовник – ТОВ «ПРОМ-ЕНЕРГО ПРОДУКТ», виконавець – СумДУ, науковий керівник – д.т.н., проф., г.н.с. Ляпощенко О.О.; відповідальний виконавець – начальник науково-навчального центру комплексного інжинірингу «SSUChemTech», к.т.н., с.н.с. Скиданенко М.С.; виконавці – д.т.н., с.н.с. Іванов В.О., к.т.н., с.н.с. Павленко І.В., н.с. Дем'яненко М.М., н.с. Старинський О.С.), в рамках яких проведено навчальний тренінг (28 годин) для керівного складу та провідних фахівців з нафтогазових технологій (у кількості 8 осіб) ПрАТ «Смарт-Холдинг», до яких входили представники керуючої компанії групи Smart Energy, ТОВ «ПРОМ-ЕНЕРГО ПРОДУКТ» та ПрАТ «Укргазвидобуток», а також розроблено та впроваджено відповідний Massive Open Online Courses (MOOC), режим доступу: <https://elearning.sumdu.edu.ua/s/7a-p9d>.

“ 12 ” 12 2019 р.

Голова комісії:		О.Г.Гусак
	(підпис)	(прізвище, ініціали)
Члени комісії:		В.І.Склабінський
	(підпис)	(прізвище, ініціали)
		О.О.Ляпощенко
	(підпис)	(прізвище, ініціали)

Примітки:

- 1) Акт затверджується проректором відповідно до напрямку діяльності у якому впроваджені результати НДР.
- 2) Назва нового (оновленого) курсу (спецкурсу) лекцій або їх розділів, практичних, лабораторних робіт, семінарських занять тощо; впровадження спеціалізованого програмного забезпечення, електронних засобів навчання тощо; публікація та використання у навчальному процесі наукових праць тощо; виконання магістерських, дипломних робіт, підготовка та захист дисертацій, які розроблені (опубліковані, здійснені) в результаті виконання НДР тощо.

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Перший проректор СумДУ
 Карпуша В.Д.
 (підпис) (прізвище, ініціали)
 20 р.



АКТ
впровадження (використання) результатів
науково-дослідної роботи (етапу НДР) у навчальний процес

ДР №0117U003931 «Розробка та впровадження енергоефективних модульних
 (номер держреєстрації, назва теми, етапу)
сепараційних пристроїв для нафтогазового та очисного обладнання».
Етап 4 - Апробація та впровадження результатів дослідно-конструкторських робіт.

яка виконана в період з січня 2020 р. по вересень 2020 р.

розроблено конструкторську та технологічну документацію до основного комплексу документів ескізного проекту і повного комплексу документів технічного проекту дослідного (експериментального) зразка; науково-обґрунтовані практичні рекомендації щодо виготовлення, програми та методики випробувань дослідних зразків на основі доопрацьованих експериментальних зразків сепараційних пристроїв; науково обґрунтовані практичні рекомендації до проєктування та інженерних методик для розрахунку багатфункціональних сепараторів з метою підвищення ефективності сепарації та зниження гідравлічного опору з визначенням оптимальних конструктивних параметрів модульних сепараційних елементів; винайдені нові об'єкти інтелектуальної власності захищені патентами України на корисну модель, визначені основні гідродинамічні та сепараційні характеристики модульних сепараційних пристроїв за результатами проведення попередніх і приймальних випробувань дослідних (експериментальних) зразків.

(назва результату НДР, що впроваджується)

Керівник теми Ляпощенко Олександр Олександрович
 (прізвище, ініціали)

Комісія в складі:

Голова комісії: декан факультету ТеСЕТ, к.т.н., проф. Гусак О.Г.
 (посада, прізвище, ініціали)

Члени комісії: зав. кафедри хімічної інженерії, д.т.н., проф. Склабінський В.І.
 (посада, прізвище, ініціали)

гол. наук. співробітник, д.т.н., проф. Ляпощенко О.О.
 (посада, прізвище, ініціали)

встановила впровадження в навчальний процес результатів досліджень та місце їх використання²:

1. Результати досліджень були використані при підготовці випускних кваліфікаційних робіт бакалаврів (Голохвост О.О., Самойленко В.О., Кормілець М.О., Коноплянников М.В., Шматенко В.А.), курсовому проєктуванні магістрантів (Голохвост О.О., Самойленко В.О., Коноплянников М.В., Шматенко В.А.), а також студентських наукових робіт Ковтуна В.В., Голохвоста О.О. «Оптимізаційні хіміко-технологічні моделювання промислових установок з підготовки та переробки вуглеводнів» (наук. керівник – н.с. Старинський О.Є.), Скотар А.П., Джая Квеста Алесандер Джованні «Оптимізація режимно-технологічних параметрів процесів переробки нестабільної вуглеводневої сировини» (наук. керівник – к.т.н., с.н.с. Острога Р.О.), Шматенко В.А.

«Моделювання технологічних процесів брагоректифікаційної установки у виробництві біоетанолу II покоління» (наук. керівник – к.т.н., с.н.с. Скиданенко М.С.) для участі у II турі Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт 2019/2020-2020/2021 рр. (галузі «Нафтова та газова промисловість», «Хімічні технології та інженерія»). У співавторстві зі студентами опубліковано 3 тези доповідей у матеріалах науково-технічних конференцій та подано 3 заявки на патенти України на корисну модель.

2. В результаті виконання НДР виконавці с.н.с. Іванов В.О., с.н.с. Павленко І.В. підготували, представили на розгляд та захистили дві дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

3. Виконавцями НДР (д.т.н., г.н.с. Ляпошенко О.О., д.т.н., с.н.с. Іванов В.О., к.т.н., с.н.с. Павленко І.В.) підготовлено та подано запити за програмою Mevlana Exchange Programme (Eskisehir Technical University, Yildiz Technical University). Виконавці НДР, в тому числі студенти Шоломицький О.Л., Амелін М.М., прийняли участь у виконанні загальноуніверситетських освітніх грантових проектів Gene Haas Scholarships (Gene Haas Foundation & Haas Automation), BE-JNG: Beginn der erfolgreichen internationalen nachhaltiger gemeinsamen Ausbil (57537752; DAAD).

4. Результати НДР використано (впроваджено) при наданні наукових послуг за господарчим договором №51.18-2020.СП/01 «Очищення зернових культур за рахунок вібраційно-інерційних ефектів» (замовник – ТОВ «Аграрник», виконавець – СумДУ, науковий керівник – к.т.н., с.н.с. Острога Р.О.; виконавці – н.с. Дем'яненко М.М., н.с. Старинський О.С.). Підготовлено та передано для погодження ПрАТ «Укргазвидобуток» і Представництву «Регал Петролеум Корпорейшн Лімітед» проект договору на надання наукових послуг з теми «Розрахунок і конструювання, експлуатація й обслуговування, діагностика та ремонт компресорного, теплообмінного, сепараційного обладнання», яким передбачено проведення науково-навчального тренінгу (22 години).

5. Виконавцями НДР (аспіранти - н.с. Дем'яненко М.М., н.с. Старинський О.С., Хухрянський О.М., студенти - Голохвост О.О., Шматенко В.А.) на матеріально-технічній базі науково-навчального центру комплексного інжинірингу «SSUChemTech» (нач. ННЦ «SSUChemTech» - к.т.н., с.н.с. Скиданенко М.С.) кафедри хімічної інженерії факультету TeCET СумДУ зібрано пересувний генератор холодного туману, яким дооснащено при модернізації дослідно-випробувальний стенд з моделювання та експериментальних досліджень процесів сепарації газорідних потоків та оптимізації конструкцій сепараційних вузлів, який використовується в тому числі при виконанні лабораторних і студентських наукових робіт. Генератор туману є допоміжним обладнанням дослідно-випробувального стенду і виробом подвійного призначення, рекомендований для застосування при розпилюванні дезінфікуючих розчинів для санітарної обробки замкнених приміщень і салонів транспорту, зокрема, для упередження поширення коронавірусної хвороби COVID-19. Проведено маркетингові дослідження щодо доцільності комерціалізації виготовленого пересувного генератора холодного туману, як окремого виду продукції ННЦ «SSUChemTech» СумДУ.

“ 30 ” 09 2020р.

Голова комісії:

(підпис)

О.Г.Гусак

(прізвище, ініціали)

Члени комісії:

(підпис)

В.І.Склябінський

(прізвище, ініціали)

О.О.Ляпошенко

(прізвище, ініціали)

Примітки:

- 1) Акт затверджується проректором відповідно до напрямку діяльності у якому впроваджені результати НДР.
- 2) Назва нового (оновленого) курсу (спецкурсу) лекцій або їх розділів, практичних, лабораторних робіт, семінарських занять тощо; впровадження спеціалізованого програмного забезпечення, електронних засобів навчання тощо; публікація та використання у навчальному процесі наукових праць тощо; виконання магістерських, дипломних робіт, підготовка та захист дисертацій, які розроблені (опубліковані, здійснені) в результаті виконання НДР тощо.



АКТ
впровадження (використання) результатів
науково-дослідної роботи (етапу НДР) у навчальний процес

ДР №0120U102036 «Створення нових гранульованих матеріалів для ядерного палива та каталізаторів в активному гідродинамічному середовищі»

(номер держреєстрації, назва теми, етапу)

Етап I - Теоретичні дослідження активних гідродинамічних режимів під час гранулоутворення за золь-гельною технологією

яка виконана в період з квітня 2020 р. по грудень 2020 р.

розроблено математичні моделі впливу активних гідродинамічних і тепломасообмінних режимів; отримали подальшого розвитку математичні моделювання гідродинамічних процесів при гранулоутворенні за золь-гельною технологією, в тому числі числові моделювання процесу вібраційної грануляції в активному гідродинамічному середовищі гелю; отримали рекомендації щодо обґрунтування можливостей модернізації дослідного стенду та підвищення енергоефективності процесу гранулоутворення.

(назва результату НДР, що впроваджується)

Керівник теми Склабінський Всеволод Іванович
 (прізвище, ініціали)

Комісія в складі:

Голова комісії: декан факультету ТсСЕТ, к.т.н., проф. Гусак О.Г.
 (посада, прізвище, ініціали)

Члени комісії: зав. кафедри XI гол. наук. співробітник, д.т.н., проф. Склабінський В.І.
 (посада, прізвище, ініціали)

пров. наук. співробітник, д.т.н., проф. Ляпошенко О.О.
 (посада, прізвище, ініціали)

встановила впровадження в навчальний процес результатів досліджень та місце їх використання²:

1. Результати досліджень були використані при курсовому проектуванні бакалаврів (Наталуха А.Р., Єсипчук С.С.) та магістрів (Гавриченко В.О., Лебедь К.В., Голохвост О.О., Коноплянников М.Г., Самойденко В.О., Нічволодін К.В., Шматенко В.А., Скотар А.П.), при підготовці випускних кваліфікаційних робіт магістра (Потапов Д.Р., Гончаренко В.П., Шаповал В.В.), а також студентських наукових робіт Голохвост О.О., Самойленко В.О. «Режимно-технологічна й апаратурно-конструктивна оптимізація сепараторів установки підготовки газу» (наук. керівник – д.т.н., професор, ст. наук. співробітник Ляпошенко О.О.), Наталуха А.Р. «Оптимізація з енергозбереження конвективного охолоджувача гранульованого суперфосфату» (наук. керівник – к.т.н., доцент, ст. наук. співробітник Юхименко М.П.), Наталуха А.Р., Єсипчук С.С. «Моделювання гідродинаміки відцентрових вихрових пристроїв для масообмінного та сепараційного обладнання» (наук. керівник – аспірант Старинський О.С.), Нічволодін К.В. «Дослідження процесу отримання гранульованих органічних добрив для вирощування екологічно безпечних продуктів» (наук. керівник – к.т.н., ст. наук. співробітник Острога Р.О.), Шматенко В.А., Скотар А.П.

«Моделювання технологічних процесів брагоректифікаційної установки у виробництві біоетанолу II покоління» (наук. керівник – к.т.н., ст. наук. співробітник, докторант Скиданенко М.С.), Яковчук В.В. «Дослідження вібраційних характеристик перфорованої еліптичної оболонки віброгранулятора» (наук. керівник – д.т.н., доцент, ст. наук. співробітник Павленко І.В.) для участі у II турі Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт 2020/2021 н.р. У співавторстві зі студентами опубліковано 4 тези доповідей у матеріалах науково-технічних конференцій та подано 2 заявки на патенти України (на корисну модель і на винахід).

2. Виконавцями НДР (к.т.н., ст. наук. співробітник, докторант Скиданенко М.С., ст. наук. співробітник Кононенко М.П., мол. наук. співробітник Покотило В.М., аспіранти – Дем'яненко М.М., Старинський О.Є., Хухрянський О.М.) розроблено та обґрунтовано практичні рекомендації щодо модернізації дослідного стенду з випробувань вібраційного, грануляційного і сепараційного обладнання та його вузлів, який використовується в тому числі при виконанні лабораторних і студентських наукових робіт на матеріально-технічній базі лабораторії грануляційного і масообмінного обладнання (ЛГМО) та науково-навчального центру комплексного інжинірингу «SSUChemTech» (нач. ННЦ «SSUChemTech» - к.т.н., ст. наук. співробітник Скиданенко М.С.) кафедри хімічної інженерії (XI) факультету ТеСЕТ СумДУ.

3. Виконавці НДР отримали 2 індивідуальних гранти і впродовж 16.11.2020-02.03.2021 р. проходять на наукове стажування за кордоном (Technical University of Kosice, Словачка Республіка) з тематики досліджень: к.т.н., ст. наук. співробітник, докторант Скиданенко М.С. «Numerical modeling of the vibration prilling process in active hydrodynamic environment», аспірант Хухрянський О.М. «Hydrodynamic and heat and mass transfer characteristics of modular combined disk-packed contact sections».

4. Виконавцями НДР (д.т.н., ст. наук. співробітник Ляпощенко О.О., д.т.н., ст. наук. співробітник Павленко І.В., к.т.н., ст. наук. співробітник Острога Р.О., к.т.н., ст. наук. співробітник, докторант Скиданенко М.С., аспіранти – Дем'яненко М.М., Старинський О.Є., Хухрянський О.М.) підготовлено та подано запит на науково-технічну розробку (НТР) «Модульний газорідинний реактор з рекуператором, контактором і сепаратором» (наук. керівник – д.т.н., професор, ст. наук. співробітник Ляпощенко О.О., відп. виконавець – аспірант Старинський О.Є.) на участь у конкурсі науково-технічних (експериментальних) розробок за державним замовленням, виконання яких розпочнеться у 2021 році за рахунок фонду державного бюджету.

5. В результаті виконання НДР виконавцем, ст. наук. співробітником Павленко І.В. підготовлено, представлено на розгляд та захищено дисертацію на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. Отримані наукові результати і підготовлений звіт про НДР є частиною дисертаційних робіт виконавців НДР: здобувача Павленка І.В. «Науково-теоретичні основи вібраційних процесів у гетерогенних системах»; аспірантів Дем'яненко М.М. «Підвищення ефективності розділення гетерогенних систем за рахунок динамічних процесів вібраційно-інерційної сепарації», Старинського О.Є. «Гідродинамічні показники сепарації багатокомпонентних систем у фазних розділювачах», Хухрянського О.М. «Гідродинамічні та тепломасообмінні характеристики модульних комбінованих тарілчастонасадкових контактних секцій»; докторанта Скиданенка М.С. «Теоретичні основи процесів вібраційного гранулювання мінеральних добрив у баштах».

“ 22 ” 12 2020 р.

Голова комісії:



О.Г.Гусак

(прізвище, ініціали)

Члени комісії:



В.І.Склябінський

(прізвище, ініціали)



О.О.Ляпощенко

(прізвище, ініціали)

Pilsen, September 25th, 2019

CERTIFICATE

This is to certify that Mrs. Maryna Demyanenko (Sumy State University) has undertaken the research stay at the University of West Bohemia (Pilsen, Czech Republic) from July 1st, 2019 to September 25th, 2019.

The program of the research covered the following topics: CFD simulation of the heat and mass transfer processes between liquid and gas phases of the mixture flow inside of the chemical equipment.

Roman Čermák



Roman Čermák, Ph.D.,
Vice-dean for international cooperation
Faculty of Mechanical Engineering,
University of West Bohemia

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ ДИСЕРТАЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ В ПРОМИСЛОВУ ПРАКТИКУ

ЗАТВЕРДЖУЮ
ДИРЕКТОР ТОВ «АГРАРНИК»
С.І. Демченко
_____ 2020 р.



АКТ про використання (впровадження) результатів дисертаційної роботи доктора філософії Дем'яненко М.М.

Комісія у складі: головний агроном ТОВ «Аграрник» Семенець І.К. та керівник НДДКР Острога Р.О., склали даний акт про те, що наукові результати та практичні рекомендації дисертаційної роботи Дем'яненко М.М. «Підвищення ефективності розділення гетерогенних систем за рахунок вібраційно-інерційної сепарації», представленої на здобуття наукового ступеня доктора філософії, використані (впроваджені) у діяльності ТОВ «Аграрник» при виконанні договору № 51.18-2020.СП/01, а саме проведення серій математичних моделювань сепараційного обладнання для розділення двофазних систем.

Використання зазначених результатів досліджень дозволило обґрунтувати доцільність конструкцій сепараційного обладнання, його енергоефективність та ступінь розділення двофазних систем. Застосування результатів досліджень дозволяє підвищити якість цільового продукту.

Використання наукових результатів та практичних рекомендацій дисертаційної роботи Дем'яненко М.М. «Підвищення ефективності розділення гетерогенних систем за рахунок вібраційно-інерційної сепарації» не передбачає будь-яких додаткових грошових виплат, Сумському державному університету або автору дисертаційної роботи, з боку ТОВ «Аграрник», окрім передбачених договором № 51.18-2020.СП/01.

Члени комісії:

Головний агроном



І.К. Семенець

Керівник НДДКР



Р.О. Острога



ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор
ТОВ «ПРОМ-ЕНЕРГО ПРОДУКТ»

Махновець В.П.



2019 р

АКТ

ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ (ВИКОРИСТАННЯ) РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВО-ДОСЛІДНОЇ РОБОТИ

ТДПУПГ Васицівського ГКР

15.11.19

Комісія в складі:

Голова Комісії:

Головний технолог – Нащочич В.Д.

члени Комісії:

Головний механік – Добровольський І.В.

Головний енергетик – Дмитрієв О.В.

Начальник відділу охорони праці,

навколишнього середовища та цивільного захисту - В.Ф. Побірей

склали даний акт про те, що результати науково-дослідної роботи (НДР) ДР №0117U003931 «Розробка та впровадження енергоефективних модульних сепараційних пристроїв для нафтогазового та очисного обладнання» (науковий керівник – доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник Ляпощенко О.О.) використані в виробничій діяльності ТОВ «ПРОМ-ЕНЕРГО ПРОДУКТ». Отримані наукові результати та практичні рекомендації представляють високу науково-практичну цінність, мають перспективи до впровадження в технологіях промислового видобутку, підготовки до транспортування та переробки нафти і газу.

Результати використані при наданні науково-консультаційних послуг з підготовки фахівців ТОВ «ПРОМ-ЕНЕРГО ПРОДУКТ» за темою «Теоретичні основи процесів стиснення, теплообміну і сепарації в поршневіх компресорних машинах та установках» (договір №51.18-20196.СП/03 від 23 жовтня 2019 р. на надання наукових послуг, замовник - ТОВ «ПРОМ-ЕНЕРГО ПРОДУКТ», виконавець - Сумський державний університет, факультет технічних систем та енергоефективних технологій, кафедра процесів та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв, науково-навчальний центр комплексного інжинірингу «SSUChemTech», науковий керівник – доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник Ляпощенко О.О.).

Голова Комісії:

Головний технолог

В.Д. Нащочич

члени Комісії:

Головний механік

І.В. Добровольський

Головний енергетик

О.В. Дмитрієв

Начальник відділу охорони праці,

навколишнього середовища та цивільного захисту

В.Ф. Побірей

ПАТЕНТИ



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **111039** (13) **U**
(51) МПК (2016.01)
B01D 45/00

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

<p>(21) Номер заявки: u 2016 05061</p> <p>(22) Дата подання заявки: 06.05.2016</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 25.10.2016</p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 25.10.2016, Бюл.№ 20</p>	<p>(72) Винахідник(и): Ляпощенко Олександр Олександрович (UA), Настенко Ольга Вікторівна (UA), Павленко Іван Володимирович (UA), Дем'яненко Марина Миколаївна (UA), Старинський Олександр Євгенович (UA)</p> <p>(73) Власник(и): СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007 (UA)</p>
--	---

(54) СПОСІБ ВЛОВЛЮВАННЯ ВИСОКОДИСПЕРСНОЇ КРАПЛИННОЇ РІДИНИ З ГАЗОРІДИННОГО ПОТОКУ**(57) Реферат:**

Спосіб вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідного потоку включає подачу газорідного потоку в сепараційний блок з пружними пластинами, що вигинаються у формі параболічного півциліндра під дією динамічного тиску та внутрішніх напружень, які виникають в пластинах, відхилення траєкторії руху краплин рідини під дією сил інерції від скривленої лінії струму газорідного потоку, що огинає пластили, осадження краплин на внутрішній поверхні пластин, наступну їх коагуляцію з утворенням плівки рідини та відведення з сепараційного блока плівки вловленої рідини, яка стікає по поверхні пластин. Подачу газорідного потоку до сепараційного блока з пружними пластинами, встановленими під прямим кутом до траєкторії руху газорідного потоку, здійснюють із чотирьох взаємно перпендикулярних його сторін. Укрупнюють краплини, які минули пружні пластили, за рахунок їх коалесценції в результаті зіткнення струменів газорідних потоків в сепараційному блоці та осаджують на дно блока. Вловлену рідину відводять з нього через дренаж, розташований посередні дна.

UA 111039 U



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **102445** (13) **U**
(51) МПК
B01D 45/04 (2006.01)

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

<p>(21) Номер заявки: u 2015 05124</p> <p>(22) Дата подання заявки: 25.05.2015</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 26.10.2015</p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 26.10.2015, Бюл.№ 20</p>	<p>(72) Винахідник(и): Ляпощенко Олександр Олександрович (UA), Павленко Іван Володимирович (UA), Настенко Ольга Вікторівна (UA), Усик Руслан Юрійович (UA), Дем'яненко Марина Миколаївна (UA)</p> <p>(73) Власник(и): СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007 (UA)</p>
--	--

(54) СПОСІБ ВЛОВЛЮВАННЯ ВИСОКОДИСПЕРСНОЇ КРАПЛИННОЇ РІДИНИ З ГАЗОРІДИННОГО ПОТОКУ

(57) Реферат:

Спосіб вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідного потоку включає подачу газорідного потоку в сепаратійний пакет з пластин, відхилення траєкторії руху краплин рідини під дією сил інерції від скривленої лінії струму газорідного потоку, що огинає пластини, осадження краплин на внутрішній поверхні пластин, наступну їх коагуляцію з утворенням плівки рідини, відведення з сепаратійної зони плівки вловленої рідини, яка стікає вздовж поверхні пластин. Подачу газорідного потоку здійснюють в сепаратійний пакет з плоско-паралельних скошених під гострим кутом пружних пластин, консольно-закріплених під гострим кутом до траєкторії руху газорідного потоку з можливістю вигинання їх у формі похилого параболічного півциліндра під дією динамічного тиску (швидкісного напору) потоку та внутрішніх напружень, що виникають в пластинах.

UA 102445 U



МІНІСТЕРСТВО
ЕКОНОМІЧНОГО
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **130464** (13) **U**
(51) МПК
B01D 45/04 (2006.01)

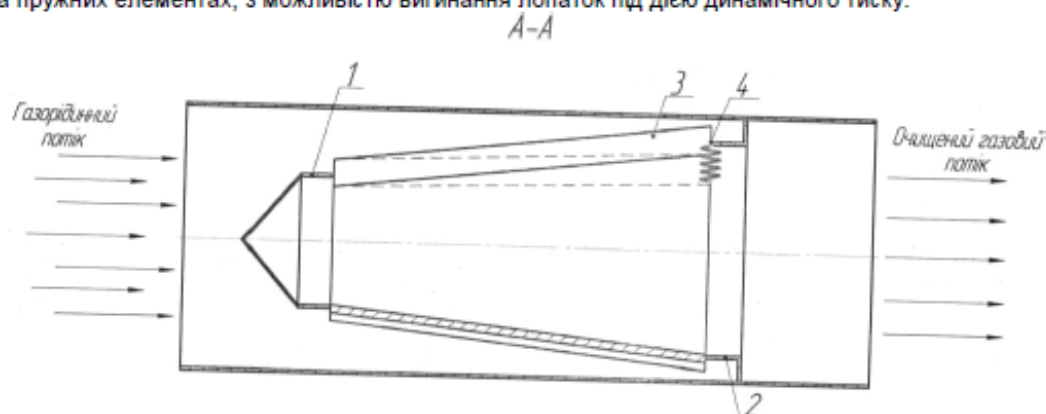
(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2018 06182	(72) Винахідник(и): Ляпошенко Олександр Олександрович (UA), Павленко Іван Володимирович (UA), Дем'яненко Марина Миколаївна (UA), Старинський Олександр Євгенович (UA), Ковтун Валерій Віталійович (UA)
(22) Дата подання заявки: 04.06.2018	(73) Власник(и): СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 10.12.2018	
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 10.12.2018, Бюл.№ 23	

(54) ПРИСТРІЙ ДЛЯ СЕПАРАЦІЇ ДИСПЕРСНОЇ РІДИНИ З ГАЗОВОГО ПОТОКУ

(57) Реферат:

Пристрій для сепарації дисперсної рідини з газового потоку, що містить конусний корпус, який складається з обтікаючого елемента на вході потоку в корпус та кільця жорсткості на виході потоку з корпусу, які з'єднані між собою поздовжніми лопатками, закріпленими на них по діаметру під кутом. Лопатки на обтікаючому елементі закріплені жорстко, а на кільці жорсткості - на пружних елементах, з можливістю вигинання лопаток під дією динамічного тиску.



Фиг. 2

UA 130464 U



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **145173** (13) **U**
 (51) МПК (2020.01)
B01D 17/00

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ
 ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
 "УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

<p>(21) Номер заявки: u 2020 03718</p> <p>(22) Дата подання заявки: 19.06.2020</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 26.11.2020</p> <p>(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 25.11.2020, Бюл.№ 22</p>	<p>(72) Винахідник(и): Ляпощенко Олександр Олександрович (UA), Стороженко Віталій Яковлевич (UA), Скиданенко Максим Сергійович (UA), Павленко Іван Володимирович (UA), Шматенко В'ячеслав Анатолійович (UA), Дем'яненко Марина Миколаївна (UA), Старинський Олександр Євгенович (UA), Абуалі Сейф Хусейн (UA)</p> <p>(73) Володілець (володільці): СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ (СУМДУ), вул. Римського-Корсакова, буд. 2, м. Суми, 40007 (UA)</p>
---	---

(54) ПРИСТРІЙ ДЛЯ РОЗДІЛЕННЯ ДВОФАЗНИХ ГАЗОРІДНИХ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ СИСТЕМ

(57) Реферат:

Пристрій для розділення двофазних газорідних багатокомпонентних систем містить корпус, встановлений в корпусі патрубки для входу сировини, виходу важких фракцій та виходу відділеного газу, розміщений вздовж осі корпусу вал з закріпленою в його нижній частині лопатевою мішалкою з лопатями. Корпус складається з верхньої частини, яка виконана як еліптичне днище, середньої частини, яка являє собою циліндричну обичайку меншого діаметра, ніж діаметр еліптичного днища, нижньої частини. Стінки циліндричної обичайки середньої частини корпусу входять в еліптичне днище, утворюючи переливну циліндричну перегородку, і в проміжку між еліптичним днищем та переливною циліндричною перегородкою встановлені два патрубки для виходу легкої фракції сировини. Нижня частина корпусу являє собою циліндричну обичайку з конічним днищем та встановленим в ньому патрубком виходу важкої фракції сировини. Циліндрична обичайка нижньої частини корпусу, яка має більший діаметр, ніж циліндрична обичайка середньої частини корпусу, в місці їх з'єднання утворюють ступінь. Містить вал, який встановлений вздовж осі корпусу, виконаний пустотілим, а лопаті, що в перерізі мають форму пустотілого прямокутника з закругленими кутами, розташовані в лопатевій мішалці рівномірно по колу та мають нахил від 0° до 90° до осі обертання вала.

UA 145173 U

ПРИСТРІЙ ВЛОВЛЮВАННЯ ДИСПЕРСНИХ ЧАСТОК/КРАПЛИН/БУЛЬБАШОК З ПОТОКУ СТИСКАЄМОЇ АБО НЕСТИСКАЄМОЇ РІДИНИ

Корисна модель належить до пристроїв вловлювання дисперсних часток/краплин/бульбашок з потоку стискаємої або нестискаємої рідини і може використовуватися в нафто-, газопереробній, хімічній та суміжних галузях промисловості.

Відомий спосіб вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідинного потоку, що включає подачу газорідинного потоку в сепараційний пакет з плоско-паралельних скошених під гострим кутом пружних пластин, консольно-закріплених під гострим кутом до траєкторії руху газорідинного потоку з можливістю їх вигинання у формі похилого параболічного півциліндра під дією динамічного тиску (швидкісного напору) потоку та внутрішніх напружень, що виникають в пластинах.

Вказаний спосіб дозволяє ефективно сепарувати краплинну рідину з газорідинного потоку, але для забезпечення більш високого ступеня очистки газу необхідно також вловлювати відносно дрібні частки, які можуть минати пружні пластини та рухатись далі з потоком, так як вони менше піддаються дії сили інерції.

За прототип обрано пристрій вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідинного потоку, що включає пакет подвійних гофрованих пластин обладнаних смугами, розміщеними в місцях западин пластин, поверхнями яких утворені сепараційні канали (Україна, патент на винахід №69701 А, МПК 7B01D45/04, 2004р.).

Недоліками цього пристрою є те що при високих швидкостях газового потоку відбувається різке збільшення значення гідравлічного опору, безпосередній контакт газового потоку та плівки вловленої рідини, руйнування структури плівки рідини та повторне унесення бризок, внаслідок чого досягнення високого ступеня очищення є неможливим.

В основу корисної моделі поставлена задача вдосконалення пристрою вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідинного потоку,

шляхом створення умов для зменшення гідравлічного опору при зростанні швидкості рідинного потоку, запобіганню руйнування структури плівки рідини, а отже появі вторинного унесення бризок що призводить до інтенсифікації процесу вловлювання краплинної рідини з газорідинного потоку, підвищення питомої продуктивності й ефективності сепарації за умови суттєвих коливань значень робочих режимних параметрів процесу.

Поставлена задача вирішується тим, що у відомому пристрої, що включає сепараційний пакет синусоїдальних пластин, згідно корисної моделі, синусоїдальні пластини виконані гнучкими, при цьому синусоїдальні пластини зі сторони подачі стискаємої або нестискаємої рідини закріплені жорстко, а зі сторони виходу рідини закріплені на рухомих опорах, для можливості видовження або стискання синусоїдальних пластин.

Направлення потоку стискаємої або нестискаємої рідини з суцільною та дисперсною фазами в сепараційний пакет з гнучких пластин синусоїдальної форми, зі сторони подачі потоку закріплених жорстко, зі сторони виходу потоку закріплені на рухомих опорах, з можливістю їх видовження/стискання у напрямку руху потоку під дією динамічного тиску (швидкісного напору) потоку та внутрішніх напружень, що виникають в пластинах, і як наслідок збільшення/зменшення вільного перерізу каналу, що дозволяє здійснити динамічне регулювання гідравлічного опору, створити умови для зменшення гідравлічного опору при зростанні швидкості потоку, стікання плівки вловленої рідини по рухомій частині синусоїдальних пластин, чим запобігають руйнуванню структури плівки рідини, появі вторинного унесення бризок, що призводить до інтенсифікації процесу вловлювання краплинної рідини з газорідинного потоку, підвищення питомої продуктивності й ефективності сепарації за умови суттєвих коливань значень робочих режимних параметрів процесу

Суть корисної моделі пояснюється кресленнями, де на фіг. 1 зображений сепараційний пакет синусоїдальних пластин; на фіг. 2 – схема роботи синусоїдального каналу.

Пристрій вловлювання дисперсних часток/краплин/бульбашок з потоку стискаємої або нестискаємої рідини, складається з сепараційного пакету 1, який містить синусоїдальні гнучкі пластини 2, жорстко закріплені зі сторони подачі потоку, а зі сторони виходу потоку закріплені на рухомих опорах 3

Пристрій працює наступним чином. Потік стискаємої або нестискаємої рідини з суцільною та дисперсною фазами, направляють в сепараційний пакет 1, який містить синусоїдальні гнучкі пластини 2, жорстко закріплені зі сторони подачі потоку та зі сторони виходу потоку закріплені на рухомих опорах 3, які під дією динамічного тиску (швидкісного напору) потоку та внутрішніх напружень, що виникають в синусоїдальних пластинах 2, видовжуються при зростанні швидкості або стискається при зменшенні швидкості у напрямку руху потоку і як наслідок збільшується або зменшується вільний переріз каналу відповідно. Дисперсні частки/краплини/бульбашки які містяться в суцільній фазі, під дією сил інерції відхиляються від скривленої лінії струму потоку, який огинає синусоїдальні пластини 2, що видовжились/стиснулися, та осаджується на їх поверхні 4 з наступною коагуляцією і утворенням плівки рідини, яка стікає вздовж поверхні 4 пластини 2. При зростанні швидкості/зменшенні швидкості потоку стискаємої або нестискаємої рідини зростає/спадає динамічний тиск (швидкісний напір) потоку та внутрішні напруження в пластинах 2, збільшується/зменшується видовження пластин, відповідно і площа вільного перерізу, а отже зменшується/збільшується гідравлічний опір.

Даний пристрій призначений як для розділення газорідних потоків так і для розділення двокомпонентних емульсій.