

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Григорчук Галина Василівна

УДК 519.87.5., 62.97

ДИСЕРТАЦІЯ
**МОДЕЛІ ТА ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ НА
ПРОТЯГЛИХ КВАЗИЦИЛІНДРИЧНИХ ОБЕРТОВИХ ОБ'ЄКТАХ**

151 – автоматизація та комп'ютерно – інтегровані технології
15 – автоматизація та приладобудування

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ Григорчук Г.В.

Науковий керівник:
Олійник Андрій Петрович
Доктор технічних наук, професор

Івано-Франківськ – 2021

АНОТАЦІЯ

Григорчук Г.В. Моделі та засоби підвищення ефективності автоматизованого контролю технологічних процесів на протяглих квазіциліндричних обертових об'єктах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 – автоматизація та комп'ютерно – інтегровані технології (15 – автоматизація та приладобудування). – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2020.

Метою дисертаційного дослідження є підвищення експлуатаційної надійності та ритмічності роботи конструкції протяглих обертових елементів в цукровій промисловості, гарантування високих, якісних та кількісних показників технологічного процесу управління автоматизованими системами керування, що функціонує в складних умовах експлуатації, розроблення й удосконалення існуючих математичних моделей обертових циліндричних об'єктів для контролю і забезпечення надійної роботи в складі автоматизованої системи керування.

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу визначення технічного стану елементів конструкції технологічного обладнання цукрової промисловості, що має геометричну конфігурацію протяглих обертових об'єктів методами автоматизованого контролю за їх станом з використанням теоретичних та експериментальних методів. З метою економії ресурсів на проведення ремонтних робіт переважну увагу зосереджено на використанні методів математичного моделювання технологічних процесів, які вимагають мінімальної експериментальної діагностичної інформації.

У вступі обґрунтовано актуальність задач дослідження, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, зазначено наукову новизну та сформульоване практичне значення отриманих результатів, проведено аналіз особистого внеску в публікації за темою роботи, визначено мету, об'єкт і предмет дослідження, проаналізовано кількість публікації та ступінь апробації роботи.

У першому розділі проведено аналіз протяглих обертових об'єктів (ПОО) як об'єктів контролю, вивчено особливості їх конструкцій, проведено аналіз існуючих методів експериментальних досліджень ПОО з зазначенням наявних.

Здійснено аналіз існуючих математичних моделей для оцінювання параметрів напруженого стану досліджуваних об'єктів з зазначенням невирішених задач моделювання, намічено задачі, що можуть бути вирішені в процесі виконання роботи.

Вказано, що необхідно розробити такі інженерні методики розрахунку параметрів технічного стану (напружений стан з урахуванням топології об'єкту, бандажування елементів конструкції, аеродинамічні характеристики лопатевого агрегату ПОО), які б дали змогу з точністю, що обумовлена виробничими вимогами, характеризувати зміну технічного стану ПОО без додаткової детальної інформації про всі сили та навантаження, фактори хімічного, теплового, аеродинамічного впливу, які діють на об'єкт в процесі його тривалої експлуатації. Виокремлено наступний клас задач, які необхідно вирішити в процесі дослідження технічного стану ПОО і визначено математичне моделювання процесу деформування та напруженого стану ПОО за зміною їх просторової конфігурації:

сучасні методи оцінювання технічного стану елементів конструкції протяглих обертових об'єктів, які використовують в цукровій промисловості;

математичне моделювання напружено-деформованого стану технологічних елементів конструкції в цукровому виробництві на основі зміни їх просторової конфігурації і, зокрема, процесу бандажування;

математичне моделювання аеродинамічних впливів на вентилятори ПОО з урахуванням зношеності лопатей з оцінюванням точності аеродинамічних моделей;

розроблення моделей та програмного забезпечення для відновлення елементів лопаткового апарату промислових вентиляторів, які використовують у цукровій промисловості;

розробка методики розрахунку економічної ефективності проведених досліджень технічного стану елементів конструкції ПОО, що використовуються в цукровій промисловості;

створення методів оцінювання довговічності технологічних елементів конструкції в цукровому виробництві на основі зміни їх просторової конфігурації та дії інших факторів силового впливу.

У другому розділі формалізовано клас задач технічної діагностики та контролю, некоректних з математичної погляду, для яких будується регуляризований алгоритм. Наведено розв'язання задачі оцінювання зміни напружено-деформованого стану модельного об'єкта з реальною геометричною конфігурацією за даними про переміщення точок поверхні. Побудовано розв'язання задачі про НДС технологічної труби, яка в процесі експлуатації підлягає бандажуванню на основі розв'язання задачі Ламе для двохшарової труби. Досліджено зміну напружено-деформованого стану в реальному технологічному об'єкті цукрової промисловості що в процесі експлуатації зазнає значних технологічних впливів та має складну просторову конфігурацію осі. Вивчено особливості зміни 6 компонент тензору напружень за переміщеннями 6 точок поверхні досліджуваного ТОЦП (технологічний об'єкт цукрової промисловості).

У третьому розділі запропоновано систему оцінювання аеродинамічних характеристик лопаткового агрегату складних технічних систем – вентиляторів різного призначення в цукровій промисловості, газоперекачувальних агрегатів, авіаційних двигунів тощо. Проведено вибір системи координат для еліптичних профілів з різними величинами малих півосей, створено математичну модель процесу обтікання з використанням інтегрального рівняння Фредгольма II роду для визначення дотичної компоненти швидкості потоку, запропоновано метод його чисельного розв'язку шляхом використання формули трапецій для наближеного інтегрування визначених інтегралів, створено відповідне програмне забезпечення. Розглянуто випадки для різних значень півосей та кількості контрольних точок. Проведено тестові розрахунки для модельних еліптичних профілів під різними кутами атаки та з різною величиною малих півосей верхньої та нижньої поверхонь, виявлено добре узгодження з даними про розрахунки за іншими моделями. За допомогою розроблених підходів виконано моделювання зміни геометрії профілю завдяки відкладанню на поверхні профілю компонентів газорідних сумішей та при

зношенні лопатевого агрегату в процесі експлуатації внаслідок дії абразивних компонент. Досліджено зміну двох основних характеристик – коефіцієнту аеродинамічного опору та коефіцієнту підйимальної сили. Методику узагальнено на випадок системи лопатей з урахуванням кількості ушкоджених профілів та ступеня ушкодження. Вказано сферу галузі подальшого використання методики.

У четвертому розділі розглянуто автоматизацію виробничого та технологічного процесів з точки зору вдосконалення устаткування, технологічного оснащення і якості процесу, так і з точки зору забезпечення техніко-економічної ефективності.

Автоматизація цукрової промисловості забезпечує якісну, ефективну роботу всіх технологічних ділянок цукрового заводу тільки за допомогою комплексного підходу до рішення даної задачі.

Первинні перетворювачі і прилади з високими експлуатаційними характеристиками, використовувані в автоматичній системі управління технологічних процесів (АСУ ТП), дають можливість мати достовірні значення контрольованих параметрів технологічного процесу, роблять системи автоматизації функціонально завершеними і високонадійними.

Розроблена система автоматичного керування барабанною сушильною установкою для висушування цукру із забезпеченням регулювання вологості вихідної сировини і її температури. Задана вологість досягається зміною кількості теплого сухого повітря і зміною часу сушіння шляхом зміни кута нахилу осі сушильного барабану. Задана температура вихідної сировини досягається зміною кількості холодного сухого повітря.

А також визначається питання щодо розробки методики та програмного забезпечення для системи відновлення початкової конфігурації лопаткового апарату елементів конструкції методом напилення відновлювального шару шляхом мікродугового оксидування алюмінію та його сплавів. Основним результатом досліджень є побудова стохастичної моделі, яка дає змогу оцінити частку чи відсоток площі поверхні, обробленої заданою кількістю імпульсів. Форму сліду кожного імпульсу вважаємо круговою та незмінною. З ростом кількості імпульсів відсоток

площі обробленої поверхні експоненціально наближується до максимуму. Параметр цієї експоненціальної залежності прямо пропорційний відношенню площі, покритої одним імпульсом до площі всієї поверхні (принаймні в інтервалі значень цього відношення від 0,0001 до 0,001). Точність цієї моделі є не гіршою 1% принаймні з ймовірністю 0,95. Модель побудована методом статистичного аналізу комп'ютерно змодельованого процесу.

Для оцінювання реального технічного стану діючих магістральних та технологічних трубопроводів, циліндрично-оберткових об'єктів вивчено питання щодо оцінки технічного ресурсу з урахуванням термінів експлуатації об'єктів, режимів дії на них силових факторів різної природи, які обумовлюють зміну несучої здатності об'єктів. Водночас використано статистичні підходи, які передбачають надання додаткової інформації про способи навантаження досліджуваного об'єкта, наявність навантажень, що мають періодичний характер. Для цього вивчено компоненти, які характеризують зміну напружень деформованого стану. Для визначення довговічності конструкцій необхідно з'ясувати, чи підпорядковується закон зміни напружень нормальному закону розподілу. При цьому вибираємо ті сектори на циліндричному об'єкті, на яких зміна напружень є максимальною. Потенційно можливо контролювати процес зміни напружень в кожній точці розрахункової сітки, але в такому випадку виникає необхідність мати справу зі значними обсягами обчислень. Запропоновано розрахункову схему для оцінювання довговічності технологічних оберткових об'єктів з використанням статистичного критерію, а також спосіб визначення зміни напружено-деформованого стану вказаних об'єктів. Реалізовано методику перевірки гіпотези про нормальний закон розподілу випадкової величини – зміни напруженого стану об'єкта дослідження. Встановлено напрямки наступних досліджень.

Розглянуто завдання економіко-соціального характеру, тобто наскільки фінансово обґрунтованими є реалізація заходів технічної діагностики та контролю, а також удосконалення управління ними з погляду забезпечення безаварійної роботи цих об'єктів. Для вирішення цих питань виникає потреба побудови відповідних математичних моделей теоретико-експериментального характеру. Задля цього

використано апарат звичайних диференціальних рівнянь. Такий підхід можна використовувати експериментально за умови, коли всі функції, що моделюються, є асимптотичними сталими величинами. Під час проведення контролю діагностичних заходів на технічних об'єктах з метою підвищення ефективності управління, необхідно застосовувати ефективні методи, які б дали змогу одержувати відчутний результат при відносно невеликих затратах.

Наукова новизна одержаних результатів:

вперше:

- запропоновано розв'язок задач неперервно-деформованого стану елементів конструкції технологічного обладнання цукрової промисловості на основі задачі Ламе для двошарової труби, що дозволяє забезпечити ідентифікацію і більш точний контроль параметрів об'єкту в процесі керування ним АСК;

- побудовано математичну модель для реальних елементів конструкції технологічного обладнання з урахуванням їхньої складної конфігурації за даними про переміщення мінімальної кількості точок, конкретніше – залежність змінної u від аргументу x заданої функції;

- розроблено математичну модель для оцінювання економічної ефективності розробки та впровадження нових методів автоматизованого контролю та технічної діагностики;

- удосконалено методи оцінювання аеродинамічних впливів на технологічне обладнання (вентилятори сушки) в умовах використання як об'єктів керування вентиляторів і сушок цукрової промисловості, що, на відміну від існуючих АСК, дозволяє, з урахуванням вказаних впливів, забезпечити вищий рівень надійності та ритмічності автоматизованим керуванням;

- удосконалено методи формалізації некоректних задач, що виникають у процесі керування елементами конструкції обладнання цукрової промисловості, що, на відміну існуючого, підвищує надійність функціонування АСК шляхом мінімізації збурюючих впливів;

- набули подальшого розвитку методи оцінки довговічності протяглих обертових об'єктів, що використовуються в цукровій промисловості для

гарантування високоякісних і кількісних показників процесів цукрової промисловості, і, як наслідок, підвищення надійності та ритмічності останніх.

Ключові слова: протяглі обертові об'єкти, напружено-деформований стан, аеродинамічні характеристики, відновлення поверхонь, довговічність, економічна ефективність.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Григорчук Г. В., Григорчук В. Л., Григорчук Л. І. Аналіз процесів експлуатації обертових об'єктів складної просторової конфігурації та методів контролю їх технічного стану. *Методи та прилади контролю якості*. Івано-Франківськ, 2017. №1 (38). С. 103–111. (Категорія "Б").

(Здобувачем здійснено аналіз існуючих обертових об'єктів складної просторової конфігурації та методів контролю їх технічного стану).

2. Григорчук Г. В. Математичне моделювання процесів деформації обертових об'єктів складної просторової конфігурації. *Методи та прилади контролю якості*. Івано-Франківськ, 2017. №2 (39). С.102–107. (Категорія "Б").

(Робота виконана одноосібно).

3. Григорчук Г.В., Олійник А. П., Григорчук Л.І. Визначення напруженого стану барабанної труби та бандажу при роботі сушильних агрегатів. *Методи та прилади контролю якості*. Івано-Франківськ, 2018. №1 (40). С. 132–136. (Категорія "Б")

(Здобувачем здійснено аналіз існуючих математичних моделей визначення зміни напружено-деформованого стану ПОО).

4. Олійник А. П., Фешанич Л. І., Григорчук Г. В. Розроблення системи оцінювання аеродинамічних характеристик лопаткового агрегату складних технічних систем. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування ім. Адмірала Макарова*. Миколаїв, № 1 (475), 2019. С. 103–108. (Категорія "Б").

(Здобувачем проведено дослідження геометрії лопаток вентиляторів промислового призначення досліджено залежність результатів від положення розрахункових точок).

5. Oliynyk A. P., Grygorchuk G. V., Nezamay B. S., Feshanych L. I. *Usage of the apparatus of ordinary differential equations in modelling of economic and environmental systems* Математичне моделювання в економіці, №3, 2019. ISSN 2409-8876 С. 57–66 DOI: 10.35350/2409-8876-2019-16-3-57-66.

(Здобувач приймав участь у створенні моделі для оцінки економічної ефективності розроблених засобів контролю, проведено розрахунки в середовищі MathCAD).

6. Олійник А. П., Григорчук Г. В., Клапоушак О. І., Фешанич Л.І. Оцінка довговічності об'єктів за даними про переміщення точок їх поверхні. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. Хмельницький, 2020. С.158–162. (DOI 10.31891/2307-5732). (Категорія "Б") (Індексується в Index Copernicus).

(Здобувачем запропоновано методику визначення зміни напружено-деформованого стану технологічного обладнання цукрової промисловості за відомими переміщеннями точок поверхні).

7. Григорчук Г. В., Григорчук Л. І., Олійник А. П., Рис В. В. Моделювання деформування об'єктів, що працюють в умовах температурних впливів. *Прикарпатський вісник наукового товариства ім. Шевченка. Число. Івано-Франківськ*, 2019. №1 (53). С. 38–44.

(Здобувачем запропонована методика врахування температурних перепадів при визначенні деформацій об'єктів, що досліджуються).

8. Grygorchuk G. V., Oliynyk A. P., Grygorchuk L. I. The research of the model deformation process of rotating objects. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І Вернадського. Серія: технічні науки*. Київ, 2019. Том 30 (69) Категорія «Б» ISSN: 2663-5941 №3. Частина I. С.86–90. (Індексується в Index Copernicus).

(Здобувачем здійснено аналіз існуючих математичних моделей визначення зміни напружено-деформованого стану ПОО).

9. Григорчук Г. В., Олійник А. П. Розробка системи оцінки аеродинамічних характеристик лопатей сушильного агрегату та його технологічних вентиляторів. *Методи та прилади контролю якості*. Івано-Франківськ. 2018. №2 (41). С.82–90. (Категорія "Б").

(Здобувач проводив дослідження геометрії лопаток оцінки точності чисельних методів інтегрування інтегральних рівнянь).

10. Григорчук Г. В., Григорчук Л. І. Дослідження напруженого стану барабанної труби та бандажу при роботі сушильних агрегатів. *World Science. Multidisciplinary Scientific Edition. Warsaw*. 2018. №6 (34). С. 64–67. DOI: https://doi/10.31435/rsglobal_ws/12062018/5822 . (Індексується в Index Copernicus).

(Здобувач брав участь у постановці математичної моделі процесу бандажування елементів конструкції технологічного обладнання на основі задачі Ламе для двошарової труби). (Індексується в Index Copernicus).

11. Олійник А. П., Григорчук Г. В., Говдяк Р. М. Застосування методів математичного моделювання для оцінки технічного стану трубопроводів та стану довкілля. *Методи та прилади контролю якості*. Івано-Франківськ, 2019. №1(42). С.97–104.)] (Категорія "Б").

(Здобувачем запропонована адаптація моделі напружено-деформованого стану до реальної просторової конфігурації технологічних трубопроводів).

Опубліковані праці апробаційного характеру:

1. Григорчук Г. В., Григорчук Л. І., Роп'як Л. Я. Комп'ютерна програма для моделювання процесу плазмово-електролітичного оксидування алюмінію. *Інтелектуальний продукт вчених і винахідників Прикарпаття 2016 р.* Івано-Франківськ, 2016. С. 39–41.

2. Григорчук Г. В. Математична модель та аналіз геодезичного дослідження стовбура свердловини при видобутку сланцевого газу / Григорчук Г. В. Петраш А. І. Григорчук Л. І. / Матеріали Всеукраїнської наукової конференції . "Сучасні проблеми теорії ймовірностей та математичного аналізу". Ворохта, 2017. с. 65-68.

3. Григорчук Г. В. Дослідження економічної моделі в задачах технічного контролю та автоматизації. / Григорчук Г.В., Григорчук Л. І., Олійник А. П., Незамай Б. С./ *Z. Gloger Wolomin International and Regional Cooperation University International Multidisciplinary Conference SCIENCE AND TECHNOLOGY OF THE PRESENT TIME: PRIORITY DEVELOPMENT DIRECTIONS OF UKRAINE AND POLAND 19–20 October Volume 4, 2018. с. 94-96.*

4. Григорчук Г. В. Шляхи розв'язання задач управління діючими циліндричними обертовими об'єктами / Григорчук Г.В., Олійник А. П., Григорчук Л. І. / Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій : матеріали Міжнар. наук.-техн. конф. до 100 річчя з дня заснування НАН України та на вшанування пам'яті Івана Пулюя (100 річчя з дня смерті), м. Тернопіль, 22–24 трав. 2018 р. Тернопіль : ТНТУ, С. 177-179.

5. Григорчук Г. В. Задання економічної моделі в задачах діагностики технічного контролю та автоматизації промислових об'єктів. / Григорчук Г. В., Григорчук Л. І. / *Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference International Trends in Science and Technology Vol.1, May 31, 2019, Warsaw, Poland* с. 23-27.

6. Grygorchuk G., Oliynyk A., Grygorchuk L., Tyrlych V., Rys V. Estimation of the durability of technological rotating objects by data on the displacement of their surface points. 2020 10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Deggendorf, Germany, 16-18 Sept. 2020. P. 265–268. DOI: 10.1109/ACIT49673.2020.9209013. ISBN:978-1-7281-6759-6. (Індексується в Scopus та Web of Science).

SUMMARY

Grygorchuk G.V. Models and means to increase the efficiency of automated control of technological processes on long quasi-cylindrical rotating objects. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 151 – Automation and computer-integrated technologies (15 – automation and instrumentation). – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2020.

The thesis deals with the solution of the scientific and practical problem for determining the technical condition of thbane structural elements of the technological equipment applied by the sugar industry, which has a geometric configuration of long rotating objects by automated control over their condition using theoretical and experimental methods. In order to save resources on repair work, the main attention is paid to the usage of methods of mathematical modeling of technological processes that require minimal experimental diagnostic information.

The introduction substantiates the relevance of research objectives, shows the relationship with scientific programs, plans, topics, scientific novelty and practical significance of the results, analysis of personal contribution to the publication on the topic, defines the purpose, object and subject of research, the number of publications and the degree of approbation of the work were analysed.

In the first section the analysis of LRO (long rotating objects) as objects of control is carried out, features of their designs are studied, the analysis of existing methods of experimental researches of LRO with the indication of available is performed.

The analysis of existing mathematical models for estimating the parameters of the stress state of the studied objects with the indication of unsolved modeling problems is carried out, the problems that can be solved in the process of work are outlined.

The analysis of existing mathematical models for estimating the parameters of the stress state of the studied objects with the indication of unsolved modeling problems, the problems that can be solved in the process of work.

It is indicated that it is necessary to develop such engineering methods for calculating the parameters of technical condition (stress- strain state taking into account the topology of the object, banding structural elements, aerodynamic characteristics for the blade unit of long rotating objects), which would allow with accuracy due to production requirements to characterize changes in long cylindrical objects without additional detailed information about all forces and loads, factors of chemical, thermal, aerodynamic influence which acted on object in the course of its long operation. The following class of problems is singled out that need to be solved in the process of studying the technical condition of long rotated objects and mathematical modeling of the process of deformation and stress state of long cylindrical objects by changing their spatial configuration:

- analysis of modern methods for assessing the technical condition of structural elements of long cylindrical objects used in the sugar industry;
- mathematical modeling of the stress-strain state of technological elements of the structure in sugar production on the basis of changes in their spatial configuration, and, in particular, the process of their banding;
- mathematical modeling of aerodynamic effects on long rotating objects fans taking into account the wear of the blades with an assessment of the accuracy of aerodynamic models;
- development of models and software for restoration of elements of the blade unit of industrial fans used in the sugar industry;
- development of methodology for calculating the economic efficiency of research on the technical condition of long rotating objects design elements used in the sugar industry;
- creation of methods for assessing durability of technological design elements in sugar production on the basis of changes in their spatial configuration and the action of other force factors.

In the second section the class of problems for technical diagnostics and control, incorrect from the mathematical point of view is formalized for which the regularizing algorithm is constructed. The solution is given to the problem of assessing the change in the stress-strain state of a model object with a real geometric configuration based on the data on the movement of surface points. The solution to the problem of stress strained state of the

technological pipe, which in the process of operation is subject to banding is constructed on the basis of the solution of the Lamé problem for a two-layer pipe. The change of the stress-strain state in the real technological object of the sugar industry is investigated, which in the process of operation undergoes significant technological influences and has a complex spatial configuration of the axis. The peculiarities of the change of 6 components of the stress tensor by the displacements of 6 points of the surface of the investigated thermal objects of the sugar industry are studied.

The features of the change of 6 components of the stress tensor along the displacements of 6 points of the surface of the investigated TOCP (technological object of the sugar industry) have been studied.

In the third section, a system is proposed for assessing the aerodynamic characteristics of a blade unit of complex technical systems – fans for various purposes in the sugar industry, gas pumping units, aircraft engines, etc. The choice of the coordinate system for elliptical airfoils with different values of the semi-minor axes was carried out, a mathematical model of the flow process was created using the Fredholm integral equation of the second kind to determine the tangential component of the flow velocity, the method for its numerical solution was proposed by using the trapezoid formula for the approximate integration of certain integrals, the corresponding software. The cases are considered for different values of the semi-axes and the number of control points. The test calculations for model elliptical profiles at different angles of attack and with different values of the minor semi-axes of the upper and lower surfaces are carried out; good correlation is revealed with the data on calculations by other models. With the help of the developed approaches, the modeling of the change in the geometry of the profile was carried out due to the deposition of the components of gas-liquid mixtures on the surface of the profile and the wear of the blade unit during operation due to the action of abrasive components. The change in two main characteristics - the aerodynamic drag coefficient and the lift coefficient - is investigated. The technique is summarized for the case of a blade system, taking into account the number of damaged profiles and the degree of damage. The area of the industry for the further use of the method is indicated.

The fourth chapter examines the automation of production and technological processes from the point of view of improving equipment, technological equipment and process quality, and from the point of view of ensuring technical and economic efficiency.

Automation of the sugar industry ensures high-quality, efficient operation of all technological sections of the sugar refinery only by an integrated approach to solving this problem.

Primary converters and devices with high performance characteristics, used in the automatic control system of technological processes (ACS TP), allow to have reliable values of the controlled parameters of the technological process, make the automation systems functionally complete and highly reliable.

The system for automatic control of a drum drying unit for drying sugar with the provision of adjusting the moisture content of the feedstock and its temperature has been developed. The specified humidity is achieved by changing the amount of warm dry air and changing the drying time by changing the angle of inclination of the drying drum axis. The specified temperature of the feedstock is achieved by changing the amount of cold dry air.

And also, the issue of developing a methodology and software is being determined for a system for restoring the initial configuration of a blade unit of structural elements by spraying a reducing layer by micro-arc oxidation of aluminum and its alloys. The main result of the research is the construction of a stochastic model that makes it possible to estimate the proportion or percentage of the surface area processed by a given number of impulses. The shape of each impulse trace is assumed to be circular and constant. As the number of pulses increases, the percentage of the treated surface area exponentially approaches its maximum. The parameter of this exponential dependence is directly proportional to the ratio of the area covered by one pulse to the area of the entire surface (at least in the range of values of this ratio from 0.0001 to 0.001). The accuracy of this model is no worse than 1%, at least with a probability of 0.95. The model is constructed by the method of statistical analysis of a computer-simulated process.

To assess the real technical condition of existing main and process pipelines, cylindrical- rotating objects, the issues of assessing the technical resource has been studied, taking into account the service life of the objects, the modes of action on them of various

nature force factors, which cause a change in the bearing capacity of the objects. At the same time, statistical approaches were used, providing for the provision of additional information on the methods of loading the object under study, the presence of loads that have a periodic nature. For this, the components characterizing the change in the stresses of the deformed state are studied. To determine the durability of structures, it is necessary to find out whether the stress variation law obeys the normal distribution law. In this case, we select those sectors on the cylindrical object, on which the change in stresses is maximum. It is potentially possible to control the process of changing stresses at each point of the computational grid, but in this case, it becomes necessary to face a significant amount of computation. The calculation scheme is proposed for assessing the durability of technological rotating objects using a statistical criterion, as well as a method for determining the change in the stress-strain state of these objects. A technique for testing the hypothesis about the normal distribution of a random variable – a change in the stress state of the object of research has been implemented. Directions for further research have been established.

The problem of an economic and social nature is considered, i.e., how financially justified are the implementation of measures of technical diagnostics and control, as well as improving their management from the point of view of ensuring the trouble-free operation of these objects. To solve these issues, it becomes necessary to construct appropriate mathematical models of theoretical and experimental nature. For this, the apparatus of ordinary differential equations was used. This approach can be used experimentally under the condition that all simulated functions are asymptotic constants. When monitoring diagnostic measures at technical facilities in order to improve management efficiency, it is necessary to apply effective methods that allow you to get tangible results at relatively low costs.

Scientific novelty of the obtained results:

for the first time it has been:

- proposed the solution to the problems for continuously deformed state of structural elements of the sugar industry technological equipment on the basis of the Lamé problem

for a two-layer pipe, which allows for identification and more accurate monitoring the object parameters in the process of its control by ACS;

- built a mathematical model for real structural elements of technological equipment, taking into account their complex configuration according to the data on the movement of the minimum number of points, in particular – the dependence of the variable depending on the argument x of the given function;

- developed a mathematical model to assess the economic efficiency of the development and implementation of new methods of automated monitoring and technical diagnostics;

- improved methods for assessing aerodynamic effects on technological equipment (drying fans) when used as control objects for fans and dryers of the sugar industry, which, in contrast to the existing ACS, allows, taking into account these influences, to provide a higher level of reliability and rhythm with automated control;

- improved methods of formalizing incorrect tasks arising in the process of controlling structural elements in sugar industry equipment, which, in contrast to the existing one, increases the reliability of ASC by minimizing disturbing influences;

- further developed the methods for assessing the durability of extended rotating objects used in the sugar industry to guarantee high-quality and quantitative indicators of the sugar industry processes and, as a consequence, to increase the reliability and rhythm of the latter.

Keywords: long rotating objects, stress-strain state, aerodynamic characteristics, surface restoration, durability, economic efficiency.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ТОРП – теплотехнологічний об’єкт з розподіленими параметрами.

ПОО – протяглий обертовий об’єкт.

НДС- напружене деформування стану.

САПР-система автоматизованого проектування.

АСК-автоматизована система керування.

АСП-автоматизована система проектування.

АСУ ТП- автоматизована система управління технологічними процесами.

ТОЦП-технологічний об’єкт цукрової промисловості.

ОК- об’єкт контролю.

ОРП -об’єкт з розподіленими параметрами.

ПУ- початкові умови.

ГУ -граничні умови.

$H_n(x)$ - многочлен Ерміта степеня n .

λ, μ - коефіцієнти Ламе.

T - температура.

a – коефіцієнт температуропровідності.

(α, β, γ) – напрямний вектор прямої.

χ^2 – функція розподілу Пірсона.

s, φ, r - кординати пов’язані з циліндричним тілом відповідно вздовж осі.

тіла , по полярному куту та по радіусу осі тіла.

$I_r(\varepsilon)$ перший інваріант тензору деформації.

$[\cdot]$ - ціла частина числа.

ЗМІСТ

ВСТУП	22
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ ДЛЯ ПРОТЯГЛИХ ОБЕРТОВИХ ОБ'ЄКТІВ.....	29
1.1 Особливості роботи ПОО як об'єкту керування.....	29
1.2 Аналіз існуючих методів контролю та керування для ПОО.....	43
1.3 Аналіз методів математичного моделювання в задачах контролю та управління ПОО. Виділення не вирішених.....	46
1.4 Обґрунтування методів та постановка задач дослідження.....	53
1.5 Висновки по першому розділу.....	54
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ДЕФОРМУВАННЯ ТА НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ПРОТЯГЛИХ ОБЕРТОВИХ ОБ'ЄКТІВ ПРИ РІЗНИХ ТИПАХ НАВАНТАЖЕННЯ, ЯК ОБ'ЄКТІВ КЕРУВАННЯ.....	56
2.1 Вибір класу задач моделювання , для побудови моделі напружено-деформованого стану для ПОО.....	56
2.2 Математичне моделювання процесу бандажування елементів конструкції ПОО.....	63
2.3 Математичне моделювання процесу деформування та напруженого стану ПОО складної геометричної конфігурації з урахуванням теплових навантажень.....	68
2.4 Висновки по другому розділу.....	76
РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ ВПЛИВІВ НА ЕЛЕМЕНТИ КОНСТРУКЦІЇ ПОО ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ФУНКЦІОНУВАННЯ АСК.....	77
3.1 Модель обтікання елементів конструкції ПОО – лопатей вентиляторів.....	77

	3.2 Чисельний метод розв’язання задачі визначення аеродинамічних характеристик елементів конструкції ПОО.....	82
	3.3 Дослідження аеродинамічних характеристик лопаток елементів конструкцій ПОО та оцінка точності методу.....	87
	3.4 Висновки по третьому розділу	92
РОЗДІЛ 4.	ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ОЦІНКА ЇХНЬОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ У ПРОЦЕСІ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ПОО...	93
	4.1. Автоматичне керування барабанною сушильною установкою для висушування цукру із забезпеченням регулювання вологості вихідної сировини і її температури.....	93
	4.2 Розроблення методики та програмного забезпечення для процесу зміцнення зношених деталей ПОО шляхом обробки іскровими зарядами.....	103
	4.3. Оцінювання довговічності технологічних обертових об’єктів за даними про переміщення точок їх поверхні.....	119
	4.4.Оцінювання ефективності розроблених засобів шляхом дослідження економічної моделі в задачах діагностики, технічного контролю та автоматизації.....	125
	4.5. Висновки по четвертому розділу.....	133
	ВИСНОВКИ	135
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	139
	ДОДАТКИ.....	149
	ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми досліджень. Важливість задачі оцінювання технічного стану діючих технологічних об'єктів залишається актуальною, зокрема в цукровій промисловості України, оскільки використовують обладнання, яке тривалий час підлягає експлуатації в складних, нестаціонарних умовах, зазнаючи дії силових, теплових та інших видів навантажень, які негативно впливають на технічний стан. У процесі експлуатації відбувається зміна технологічних параметрів обладнання, геометричних характеристик, міцностних властивостей, що потребує розроблення системи автоматизованого контролю такого обладнання. Найчастіше обладнання цукрової промисловості має форму протяглих циліндричних об'єктів, які характеризуються спряженням ділянок різної геометрії. Суттєво змінюється в процесі експлуатації аеродинамічна характеристика лопатевого апарату вентиляційних установок і сушильних камер, що потребує організації автоматизованого контролю за їх станом і виробленням рекомендацій щодо забезпечення їх робочого стану. Водночас важливого значення набуває розроблення математичних моделей процесів, що характерні для елементів конструкцій технологічного обладнання в цукровій промисловості, та розробка програмних засобів їх реалізації. Створена система повинна бути економічно ефективною, забезпечувати можливість гарантування високої довговічності конструкції та можливості внесення змін до конструкцій елементів обладнання з метою відновлення їх технологічних показників.

Проблеми експлуатації протяглих циліндричних об'єктів вивчали М.Горбійчук, В.Грудз, Л.Заміховський, Д.Ковалюк, П.Лебедев, А.Олійник, Й.Перун, Д.Тимків, В.Харіоновський, Л.Шлапак, К.Штангеев. Питаннями конструювання математичних моделей процесів, характерних для протяглих обертових об'єктів, займались О.Білоцерковський, А.Верлань, С.Древицький, В.Дубовой, П.Іцкович-Лотоцький, С.Нішт, Р.Кветний, С.Москвіна.

Однак роботи перелічених авторів не вирішують усіх проблем, пов'язаних із поставленими задачами.

Тому, завдання оцінювання технічного стану протяглих циліндричних об'єктів, що експлуатуються в цукровій промисловості України, залишається актуальною науково-технічною задачею. Такі циліндричні об'єкти потребують забезпечення стабільної експлуатації в складних економічних (коли виділяється недостатньо коштів на модернізацію обладнання), технологічних (зміна режимів роботи обладнання), нестационарних умовах експлуатації. Вирішення цієї задачі сприятиме підвищенню довговічності обладнання, забезпечить його високі технологічні показники, дозволить розробити ефективні режими автоматизованого контролю, підвищити ефективність і регулярність контрольних міроприємств.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами

Тема дисертаційної роботи відповідає науковому напряму кафедри прикладної математики Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, а також тематиці науково дослідних робіт:

- “Методичні засади математичного моделювання та засобів реалізації моделей для процесів і систем нафтогазового комплексу та їх вплив на стан довкілля”, 2017, № держреєстрації 0116U004186;
- “Розроблення математичних моделей, засобів їх реалізації для процесів та систем промисловості, екології та в медицині” № держреєстрації 0117U003757;
- “Розробка нових методів оцінювання технічного стану металоконструкцій довготривалої експлуатації з використанням засобів фізичної мезомеханіки”, № Д-13-17-П; № держреєстрації 0117U004217;
- “Розроблення екологічно безпечної технології контролю структури та складу газорідних потоків” № ДЗ/77-2019, № держреєстрації 0919U002939;
- “Дослідження нових методів керування видобутком вуглеводнів через одержання онлайнної інформації про фазовий склад газорідних свердловинних потоків”, № держреєстрації 0114U004337.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційного дослідження є підвищення експлуатаційної надійності та ритмічності роботи конструкції протяглих обертових елементів в цукровій промисловості, досягнення високих якісних та

кількісних показників технологічного процесу управління автоматизованими системами керування, що функціонує в складних умовах експлуатації, та розроблення й удосконалення існуючих математичних моделей обертових об'єктів для контролю і забезпечення надійної роботи в складі автоматизованих систем керування.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

1. проаналізувати сучасні методи оцінювання технічного стану елементів конструкції протяглих обертових об'єктів, що використовуються в цукровій промисловості;

2. розробити математичне моделювання напружено-деформованого стану технологічних елементів конструкції в цукровому виробництві на основі заміни їх просторової конфігурації і, зокрема, процесу їх бандажування;

3. розробити математичне моделювання аеродинамічних впливів на вентилятори ПОО з урахуванням зношеності лопатей із оцінкою точності аеродинамічних моделей;

4. розробити моделі та програмне забезпечення для відновлення елементів лопаткового апарату промислових вентиляторів, що використовуються в цукровій промисловості;

5. розробити систему автоматичного керування процесом сушіння утфелі в барабанній сушильній установці, що дозволить зменшити витрати енергії на сушіння за рахунок оптимального підбору часу;

6.- створити методи оцінювання довговічності технологічних елементів конструкції в цукровому виробництві на основі зміни їх просторової конфігурації та дії інших факторів силового впливу.

7. розробити методику розрахунку економічної ефективності проведених досліджень технічного стану елементів конструкції ПОО, що використовуються в цукровій промисловості;

Об'єкт дослідження. Протягли обертові елементи конструкції технологічного обладнання цукрової сушки в комплексі з автоматизованими системами керування.

Предмет дослідження. Методи контролю технічного стану елементів конструкції технологічного обладнання цукрової промисловості для забезпечення надійності і ритмічності їх керування автоматизованими системами контролю.

Методи дослідження.

У процесі дисертаційного дослідження з метою оцінювання параметрів технічного стану елементів конструкції технологічного обладнання цукрової промисловості використано теоретичні й експериментальні методи: методи теорії пружності, методи розв'язання некоректних задач, методи інтегральних рівнянь, методи аеродинаміки, чисельні методи та програмування методів у середовищі теорії надійності та довговічності, методи теорії ймовірності, методи оксидування поверхонь, методи вимірювання переміщень точок поверхні, методи диференціальних рівнянь для побудови прикладних моделей в економіці.

Наукова новизна одержаних результатів:

вперше:

- запропоновано розв'язок задач неперервно-деформованого стану елементів конструкції технологічного обладнання цукрової промисловості на основі задачі Ламе для двошарової труби, що дозволяє забезпечити ідентифікацію і більш точний контроль параметрів об'єкту в процесі керування ним АСК;
- побудовано математичну модель для реальних елементів конструкції технологічного обладнання з урахуванням їхньої складної конфігурації за даними про переміщення мінімальної кількості точок, конкретніше – залежність змінної у від аргументу x заданої функції ;
- розроблено математичну модель для оцінювання економічної ефективності розробки та впровадження нових методів автоматизованого контролю та технічної діагностики;
 - удосконалено методи оцінювання аеродинамічних впливів на технологічне обладнання (вентилятори сушки) в умовах використання як об'єктів керування вентиляторів і сушок цукрової промисловості, що, на відміну від існуючих АСК, дозволяє, з урахуванням вказаних впливів, забезпечити вищий рівень надійності та ритмічності автоматизованим керуванням;

- удосконалено методи формалізації некоректних задач, що виникають у процесі керування елементами конструкції обладнання цукрової промисловості, що, на відміну існуючого, підвищує надійність функціонування АСК шляхом мінімізації збуруючих впливів;
- розроблено систему автоматичного керування процесом сушіння утфелі в барабанній сушильній установці, що дозволить зменшити витрати енергії на сушіння за рахунок оптимального підбору часу;
- набули подальшого розвитку методи оцінки довговічності протяглих обертових об'єктів, що використовуються в цукровій промисловості для гарантування високоякісних і кількісних показників процесів цукрової промисловості, і, як наслідок, підвищення надійності та ритмічності останніх.

Практичне значення отриманих результатів

- розроблено автоматичне керування барабанною сушильною установкою для висушування цукру із забезпеченням регулювання вологості вихідної сировини та її температури;
- розроблене програмне забезпечення для моделювання процесу мікродугового оксидування алюмінію та його сплавів “PEO-andromeda” (Plasma electronic oxidation) з використанням електроіскрової обробки, що відновлюють початкову форму елементів конструкцій ПОО як об'єктів керування. Одержано свідоцтво про авторське право на твір;
- створено комплексну методику дослідження реального технічного стану технологічного обладнання цукрової промисловості, яка впроваджена на Староконстянтинівському та Теофіпольському цукрових заводах Хмельницької області, що підтверджено відповідними актами впровадження;
- створено модель оцінювання економічної ефективності яка може бути використана для розв'язання невирішених економічних завдань в інших галузях промисловості.

Особистий внесок здобувача.

Усі наукові результати дисертаційного дослідження отримано автором самостійно.

У роботах:

[1]- Здобувачем здійснено аналіз існуючих обертових об'єктів складної просторової конфігурації та методів контролю їх технічного стану;

[2]- Робота виконана одноосібно;

[3]- Здобувачем здійснено аналіз існуючих математичних моделей визначення зміни напружено-деформованого стану ПОО;

[4]- Здобувачем проведено дослідження геометрії лопаток вентиляторів промислового призначення досліджено залежність результатів від положення розрахункових точок;

[5]- Здобувач брав участь у створенні моделі для оцінки економічної ефективності розроблених засобів контролю, проведено розрахунки в середовищі Math Cad;

[6]- Здобувачем запропоновано методика визначення зміни напружено-деформованого стану технологічного обладнання цукрової промисловості за відомими переміщеннями точок поверхні;

[7]- Здобувачем запропонована методика врахування температурних перепадів при визначенні деформацій об'єктів, що досліджуються;

[8] – Здобувачем здійснено аналіз існуючих математичних моделей визначення зміни напружено-деформованого стану ПОО;

[9]- Здобувач проводив дослідження геометрії лопаток оцінки точності чисельних методів інтегрування інтегральних рівнянь;

[10]- Здобувач брав участь у постановці математичної моделі процесу бандажування елементів конструкції технологічного обладнання на основі задачі Ламе для двошарової труби;

[11]- Здобувачем запропонована адаптація моделі напружено-деформованого стану до реальної просторової конфігурації технологічних трубопроводів.

Апробація результатів роботи:

- 1) _науковий семінар кафедри АТП і МП (щорічно з 2017 р.) ІФНТУНГ;
- 2) науковий семінар кафедри ПМА, (2019, 2020 рр.) ІФНТУНГ;
- 3) 10Th International Conference on Advanced Computer Information Technologies Geggendorf, Germany, 16-18 September 2020;
- 4) МНТК “ Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій”, 2015; ТНТУ ім. Пулюя;
- 5) Всеукраїнська наукова конференція “Сучасні проблеми теорії ймовірності та математичного аналізу”, 2017 Ворохта;
- 6) Z. Gloger Wolomin International and Regional Cooperation University International Multidisciplinary Conference SCIENCE AND TECHNOLOGY OF THE PRESENT TIME: PRIORITY DEVELOPMENT DIRECTIONS OF UKRAINE AND POLAND , 2018
- 7) Міжнародна наукова конференція “Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій до 100-річчя з дня заснування НАН України та на вшанування пам’яті Івана Пулюя”, 2018, ТНТУ ім. І. Пулюя, Тернопіль
- 8) 8 Міжнародна конференція “Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазового обладнання”, пам’яті професора Ігоря Кісіля., 2018, ІФНТУНГ, Івано-Франківськ.
- 9) XIII International Scientific and Practical Conference “International Trends in Science and Technology” Vol.1, 31.05.2019, Warsaw, Poland.

Публікації: За результатами роботи опубліковано 19 статей, з них 1-Scopus, 8 – у фахових виданнях України, 3 – у іноземних виданнях і 7 матеріалів Міжнародних та Всеукраїнських конференцій.

Структура та об’єм роботи: робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи складає 161 сторінку, в тому числі 145 сторінок основного тексту, 30 рисунків, 4 таблиці, 5 додатків на 16 сторінках.

Бібліографія налічує 115 джерел на 9 сторінках.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ ДЛЯ ПРОТЯГЛИХ ОБЕРТОВИХ ОБ'ЄКТІВ

1.1 Особливості роботи ПОО як об'єкту керування

У багатьох галузях економіки України використовується обладнання та устаткування, що характеризується такими факторами, які впливають на їхню роботу, зокрема:

- значні перепади температур у процесі виготовлення продукції [31, 20, 22];
- зміна просторової конфігурації вказаних об'єктів порівняно з початковою проектною конфігурацією [66, 94, 65, 94];
- дія силових факторів різної природи, які зумовлюють вказану зміну [69, 18, 98];
- тривалий час експлуатації в різних, часто не практичних режимах експлуатації [63];
- змішані нестационарні режими експлуатації, зумовлені заміною виробничих завдань.

Для дослідження вибираються протяглі об'єкти що працюють в умовах оберткових рухів. Практично, йтиметься про об'єкти наведені в таблиці 1.1

Протяглі оберткові об'єкти, що працюють під дією термічних впливів.

Таблиця 1.1 – Класифікація досліджування ПОО .

<i>Теплові об'єкти</i>		
За технологічним призначенням	За джерелом теплової енергії	За конфігурацією робочого простору
Плавильні печі Нагрівальні печі Термічні печі Випалювальні печі Сушки Печі перегонки Печі хімічної промисловості	Полуменеві печі Електричні печі	Камерні печі Прохідні печі Методичні печі Печі з висувним подом Печі з обертковим подом Шахтні печі Циліндричні печі Печі киплячого шару Циклонні печі Тунельні печі

Ця класифікація визначена за такими ознаками [7, 8, 37, 38, 78, 97, 49, 52]:

1. За технологічним призначенням:

- плавильні печі, призначені для плавлення матеріалів (металів, мінералів, скла тощо). До них належать доменні та мартенівські печі, вагранки, печі для плавлення кольорових металів, склоплавильні й інші;
- нагрівальні печі, які використовують для нагрівання металу перед обробленням тиском, прокаткою, куванням, штампуванням;
- термічні печі для нагрівання матеріалів з метою термічного оброблення (загартування, відпалювання, нормалізації);
- випалювальні печі, призначені для випалювання матеріалів. До них відносять печі для випалювання кераміки, вапна, цементного клінкеру, сірчаного колчедану тощо;
- сушарки для видалення вологи з матеріалів чи для висушування пофарбованих виробів;
- печі для одержання з одного продукту іншого шляхом його перегонки. До них належать печі нафтопереробних заводів, печі для одержання штучного рідкого палива, коксові батареї для печей хімічної промисловості;
- печі хімічної промисловості для нагрівання матеріалів з метою проведення хімічних процесів.

2. За джерелом теплової енергії:

- полуменеві печі, в яких тепла енергія створюється спалюванням палива. Полуменеві поділяють на печі, що працюють на твердому, рідкому, газоподібному паливі;
- електричні печі нагрівають за допомогою електроенергії. За використанням електричної енергії розрізняють електричні печі опору, дугові, індукційні, контактні, електронні, інфрачервоного нагріву.

3. За конфігурацією робочого простору:

- камерні печі, в яких матеріал у процесі нагрівання нерухомо лежить на поді. Температура робочого простору камерних печей у всіх точках простору майже однакова;

- прохідні печі, у яких матеріал, поступово нагріваючись, переміщується від завантажувального до вивантажувального кінця. Температура теплоносія в певних точках робочого простору підтримується приблизно однаковою;

- методичні печі, які мають робочий простір, витягнутий за довжиною. Нагрівання матеріалів у них здійснюється за принципом проти руху;

- печі із висувним подом – камерні печі, у яких для зручності завантаження та вивантаження матеріалів під печі висувається;

- печі з обертовим подом або карусельні, в яких матеріал, що нагрівається, лежить нерухомо на поді, а під, обертаючись, переміщує його в робочому просторі;

- шахтні печі, які мають вертикальне розташування робочого об'єму, заповненого кусковим матеріалом. Матеріал у них завантажується зверху, а вивантажується знизу;

- циліндричні обертові печі у формі обертового циліндра (футерований всередині), розміщеного під невеликим кутом. Матеріал поступово нагрівається, пересуваючись від верхнього завантажувального кінця до нижнього, де і вивантажується з печі;

- печі киплячого шару, в яких частинки матеріалу чітко визначених розмірів піднімаються струменем теплоносія на певну висоту, після чого опускаються і процес повторюється;

- циклонні печі, в яких матеріал нагрівається в завислому стані. Теплообмін здійснюється дуже інтенсивно;

- тунельні печі – печі з робочим простором у вигляді довгого каналу. Матеріал переміщується в печі на вагонетках.

Надалі ми будемо розглядати циліндричні обертові печі (циліндричні обертові об'єкти) і об'єкти, які відносять до циліндричних обертових (барабанні сушила) .

Обертова циліндрична піч – це порожнистий сталевий циліндр, футерований всередині вогнетривкими виробами, що обертається навколо своєї осі. Циліндр дещо нахилений до горизонталі, і тому матеріали, що завантажуються в нього, пересипаються під час обертання і пересуваються від високого кінця до низького,

назустріч продуктам згоряння палива, спалюваного в пальниках, встановлених у нижньому торці барабана.

Ефективність роботи **обертових печей цементної промисловості** залежить від наладки технологічного устаткування, процесу випалу клінкера й режиму експлуатації печей під час випуску клінкера високої активності, мінімальних витратах палива й високих техніко-економічних показниках.

Комплекс процесів у обертових печах, які працюють під впливом теплової енергії, дуже великий і складний. Процеси горіння палива, руху газів і матеріалу, теплообміну і фізико-хімічних перетворень сировинної суміші тісно пов'язані між собою і кожен із процесів має вирішальне значення. Вони визначають основні заходи під час проведення наладки:

- добір оптимального хімічного та мінералогічного складу клінкера на сировинній суміші;

- забезпечення необхідних умов для високоефективної роботи печі і загальної стабільності процесу;

- вибір раціональної конструкції теплообмінних пристроїв для інтенсивного теплообміну та зниження втрат теплоти;

- відпрацювання раціонального режиму спалювання палива;

- забезпечення ощадливого його витрачання й інтенсивності високотемпературних процесів;

- вибір оптимальних режимних параметрів і відпрацювання методів управління процесами.

Продуктивність печей, питома витрата палива залежать не лише від конструктивних і технологічних вихідних характеристик, а й від режиму роботи. Форсування режиму до певної межі не тільки підвищує продуктивність, але й збільшує кількість затребуваного матеріалу, температуру відведених газів, питому витрату теплоти. Подальше форсування може призвести до зменшення продуктивності через велику потребу в матеріалі за умови різкого підвищення питомої витрати теплоти. Зменшення навантажень печей порівняно з оптимальними

навантаженнями також зменшує продуктивність їх роботи: усунення зон, пересушування матеріалу тощо.

Вибір і підтримування оптимальних нормативів, показників і параметрів технологічного процесу істотно впливає на отримання продукції заданої якості і, відповідно, навіть на утримування підприємства.

Випал клінкеру - найскладніший, важливий і енергоємний процес. Загальні енерговитрати виробництва цементу розподіляються приблизно так: підготовка сировини - 10%, випал клінкеру - 79%, помел цементу - 10%, інші - 1%. Тому налагодження процесу випалу, зниження енерговитрат, передусім витрат пального, набувають виняткового значення.

В основі налагоджувальних робіт лежить аналіз процесів, які у печі, під впливом численних чинників, змінюються. Не завжди проведення звичайних налагоджувальних робіт гарантує повну оптимізацію процесу випалу клінкеру. Вдосконалення роботи організацій корисними методами наладки, випробуваннями технологічного устаткування сприяє підвищенню технічної культури експлуатації, підвищенню ефективності цементного виробництва та прискоренню освоєння проектних потужностей підприємств.

Останніми роками інтенсивний розвиток цементної промисловості, впровадження пічних установок великої одиничної потужності, залучення до виробничого процесу сировинних матеріалів нижчої якості ставлять перед цементним виробництвом нові завдання [27].

Головною ланкою в ланцюзі агрегатів технологічних ліній є пічний агрегат, від експлуатації і надійності якого залежать техніко-економічні показники всього цементного заводу.

До складу пічного агрегату входять: обертова піч (мокрого чи сухого способів виробництва), внутрішньопічний чи позапічний теплообмінник, охолодник клінкеру, дозатори і пристрої подавання сировинних матеріалів, спалювальні пристрої, тягодуттєве устаткування, апарати для очищення і викидання в атмосферу газів і повітря, що виходять із печі й охолоджувача клінкеру, а також різне допоміжне устаткування.

В цементному машинобудуванні простежуємо тенденцію до скорочення довжини обертових печей шляхом винесення підготовчих операцій із печі в позапічний теплообмінник.

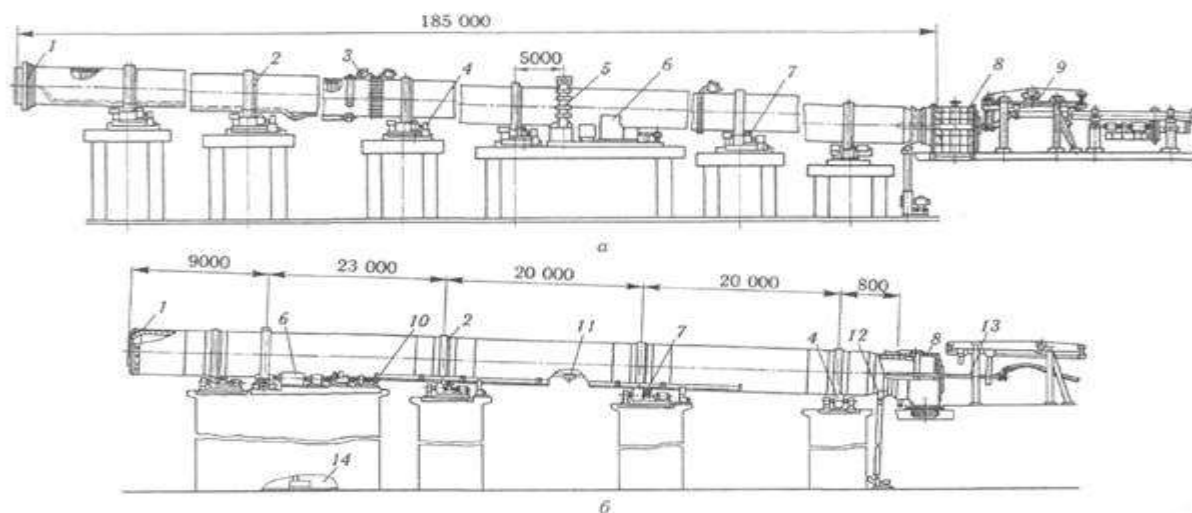
На заводах мокрого способу виробництва, як правило, використовують довгі обертові печі, обладнані внутрішньопічними теплообмінними пристроями (зокрема, ланцюговими завісами). Влаштовані всередині печі теплообмінні пристрої визначають її довжину [27].

Підготовлений шлам, що має вологість у середньому 35...45 %, насосами подається в живильник для дозування і живлення печі, розміщений у верхній частині пилової камери. Із живильника шлам зливною трубою надходить у завантажувальну частину печі, яка у місці входу в пилову камеру має ущільнення. Крупні частинки запилених газів, що виходять із печі в пилову камеру, осідають, а дрібніші спрямовуються на остаточне очищення в електрофільтр. Іноді для кращого очищення між пиловою камерою та електрофільтром додатково встановлюють батарейні відцентрові циклони. Корпус печі — циліндрична труба, яка своїми бандажами спирається на роликові опори. Корпус зварюють на місці монтажу з окремих зон різної товщини залежно від місцевих навантажень. Товщина прогінних зон корпусу залежить від діаметра і довжини печі, довжини прогонів, температури нагрівання, розподілених навантажень і становить 20...40 мм.

В обертових довгих печах мокрого способу виробництва, оснащених внутрішньогрубними пристроями, усі теплові процеси відбуваються від подачі шламу і його сушіння до виходу готової продукції — цементного клінкеру. Залежно від руху сировини ці печі мають кілька технологічних зон: сушіння, підігрівання, декарбонізації, екзотермічних реакцій, спікання й охолодження. Для інтенсифікації процесу теплової підготовки сировини всередині печі встановлюють різні конструкції теплообмінних пристроїв, зокрема завіси з якірних ланцюгів, чарункові чи лопатеві теплообмінники.

В обертових коротких печах сухого способу виробництва попередня теплова обробка сировинного борошна відбувається поза піччю — у позапічних циклонних теплообмінниках, які можуть оснащуватися також реактором-декарбонізатором.

Завершальні термохімічні операції — декарбонізація і утворення клінкеру — відбуваються в печі [27].



а — мокрому способу виробництва 5 x 185 м; б — сухого способу виробництва 4,5 x 80 м;
 1 — завантажувальний кінець; 2 - бандаж; 3 — термопари зі струмознімачем; 4 – роликові опори; 5 - зубчастий вінець; 6 — привід; 7 — гідравлічний упор; 8 - розвантажувальна головка; 9 – паливна форсунка; 10 - пристрій для охолодження корпусу повітря; 11 - пристрій для автоматичного вимірювання температури корпусу; 12 – пристрій для охолодження розвантажувальної горловини; 13 — мазутна форсунка; 14 — станція рідкого змащення приводу

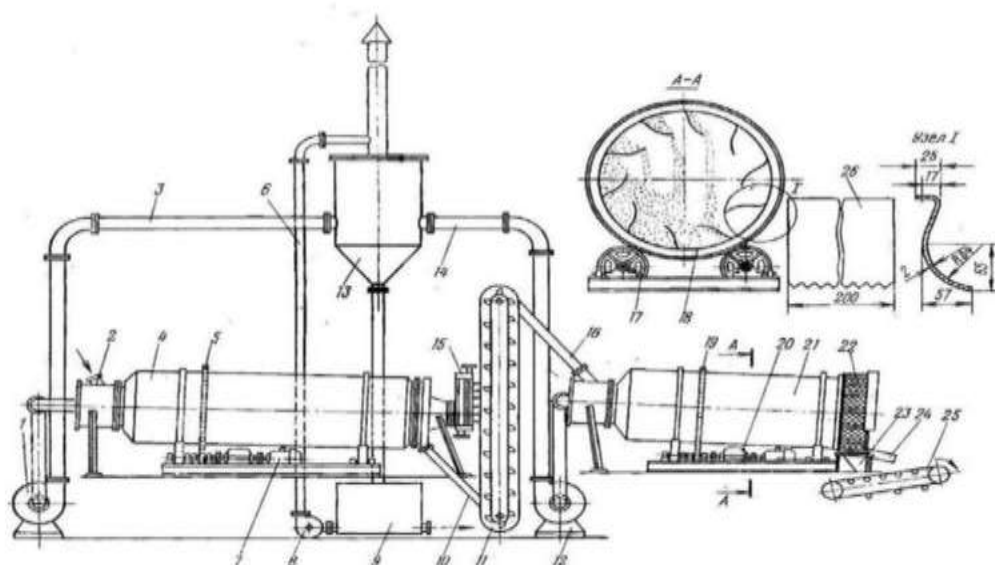
Рисунок 1.1 – Обертові печі

Невеликі обертові печі застосовують для виробництва керамзиту (спучених глин), а також для випалювання вапна і гіпсу. У більш великих обертових печах випалюють каустичний і металургійний магнезит і шамот.

Барабанні сушки застосовують для сушіння сипучих і дрібношматкових матеріалів. Такі сушарки мають форму похилого під кутом 4-6° до горизонту порожнього барабана, що обертається зі швидкістю 0,5-8 об/хв. Матеріал, що сушиться, завантажують у верхній кінець барабана, і в процесі його обертання він пересувається до розвантажувального пристрою. Сушіння здійснюється димовими газами, що надходять з боку завантаження матеріалів і йдуть з кінця вивантаження (деякі сушки працюють за принципом протитечії). Довжина барабана складає зазвичай 8-14 м при діаметрі від 1,5 м до 2,8 м. Барабан спирається бандажами, що охоплюють циліндричний кожух, на ролики і приводиться в обертання

електродвигуном з допомогою редуктора і пари зубчастих коліс, одне з яких закріплене у вигляді вінця на барабані. Для запобігання сповзання барабана встановлюють упорні ролики, дотичні з бандажми збоку. Завантаження і вивантаження матеріалу відбувається безперервно. Для ущільнення місць стиків обертового барабана і нерухомих частин топкової камери та камери для відбору відпрацьованих газів роблять лабіринтові ущільнення. Сушильні барабани забезпечують різними системами внутрішніх пристроїв для розділення матеріалу на дрібні потоки і пересипання його під час сушіння для інтенсивного омивання газами.

Сушильні апарати для висушування цукру-піску [27]. Для процесу сушіння цукру використовують сушильно-охолоджувальні установки одно- або двобарабанні, багатотрубні сушильні агрегати або установки з псевдокиплячим шаром цукру-піску [28].

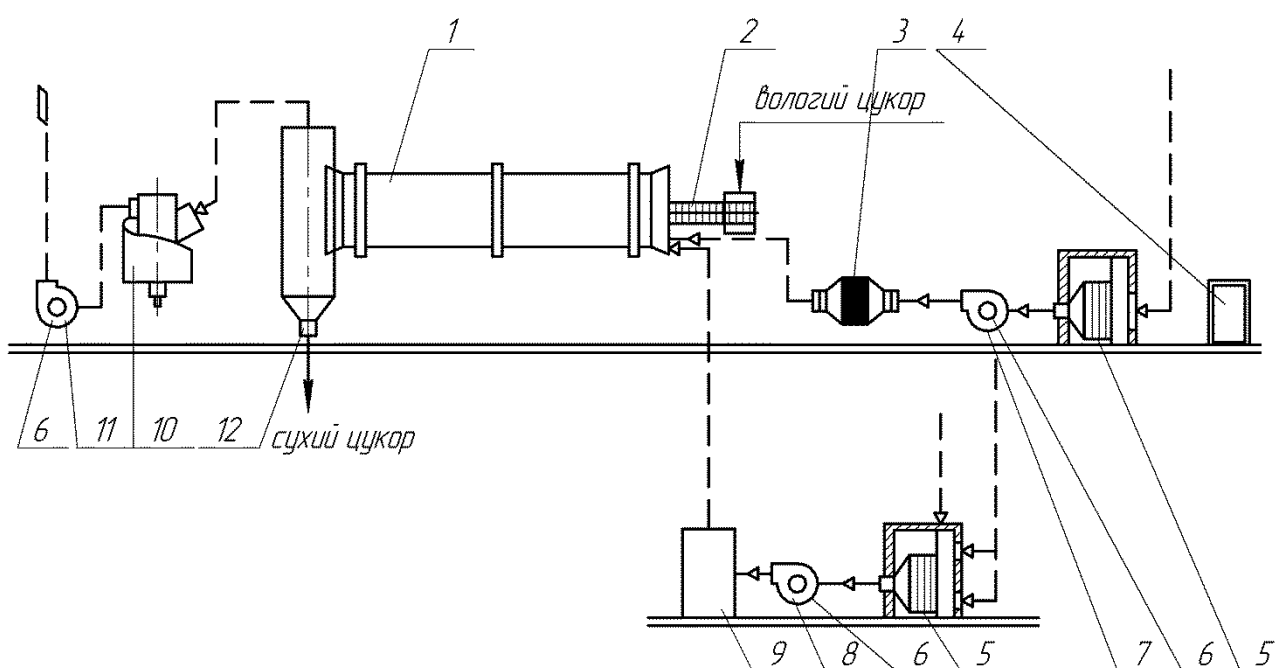


1,12 – вентилятори; 2, 10, 16, 24 – лотки; 3, 14 – повітряні комунікації; 4 – сушильний барабан; 8 – насос; 9 – збірник; 11 – елеватор; 13 – циклон; 15 – калорифер; 21 – охолоджуючий барабан; 22 – пояс сит; 25 – транспортер; 26 – лопатки.

Рисунок 1.2 – Двобарабанна сушильно-охолоджувальна установка.

Двобарабанна сушильно-охолоджувальна установка повинна складатись з конвективного сушильного барабана і охолоджувального барабана такого ж типу. Вологий цукор подають у сушильний барабан, що опирається бандажми на дві пари

роликів, нахилений під кутом до горизонту не більше, ніж 4° за напрямом пересування цукру, й обертається з частотою не більшою, ніж 4 оберти за хвилину. Вологий цукор сушать очищеним у фільтрі і нагрітим у калорифері повітрям, яке всмоктується в апарат вентилятором 1. У вихідному патрубку через вісь встановлюють заслінку з противагою. Після виходу цукру заслінка під його вагою відхиляється вниз і пропускає цукор. Під час припинення виходу цукру заслінка під дією противаги закриває вихідний патрубок, попереджаючи засмоктування повітря в апарат [27].



1 - Сушильно-охолоджувальний барабан; 2 - шнек завантаження вологого цукру; 3 - калорифери; 4 - система управління обладнанням; 5 - масляні самоочисні фільтри; 6 - напрямні апарати; 7 - вентилятор подачі гарячого повітря; 8 - вентилятор подачі холодного повітря; 9 - кондиціонер для охолодження повітря; 10 - вихровий уловлювач цукрової пилу; 11 - вентилятор затягування відпрацьованого повітря; 12 - вивантаження цукру [27].

Рисунок 1.3 – Однобарабанна сушильно-охолоджуюча установка.

Висушений цукор з протилежного кінця надходить в охолоджувальний барабан, через який вентилятором пропускають очищене у фільтрі охолоджувальне повітря. За своєю конструкцією охолоджувальний барабан подібний до сушильного,

але на виході частина суцільної поверхні замінена на сито. Окремі кристали цукру проходять через сито, а грудочки через край сита надходять у клерувальну мішалку [27].

Більшість цукрових заводів оснащено однобарабанными сушильно-охолоджуючими установками.

Сушильні установки такого типу мають задовільні технологічні показники, досить компактні, але збільшення їх продуктивності можливе лише через підвищення температури гарячого повітря, що негативно впливає на якість висушеного цукру і приводить до збільшення енерговитрат.

Для висушування жому використовують барабанні сушки з розподільною системою. Ці сушарки можуть відрізнятися розмірами, формою і кількістю насадок, виконанням приводу й ущільнень, деякими іншими конструктивними особливостями, але принцип їх роботи однаковий.

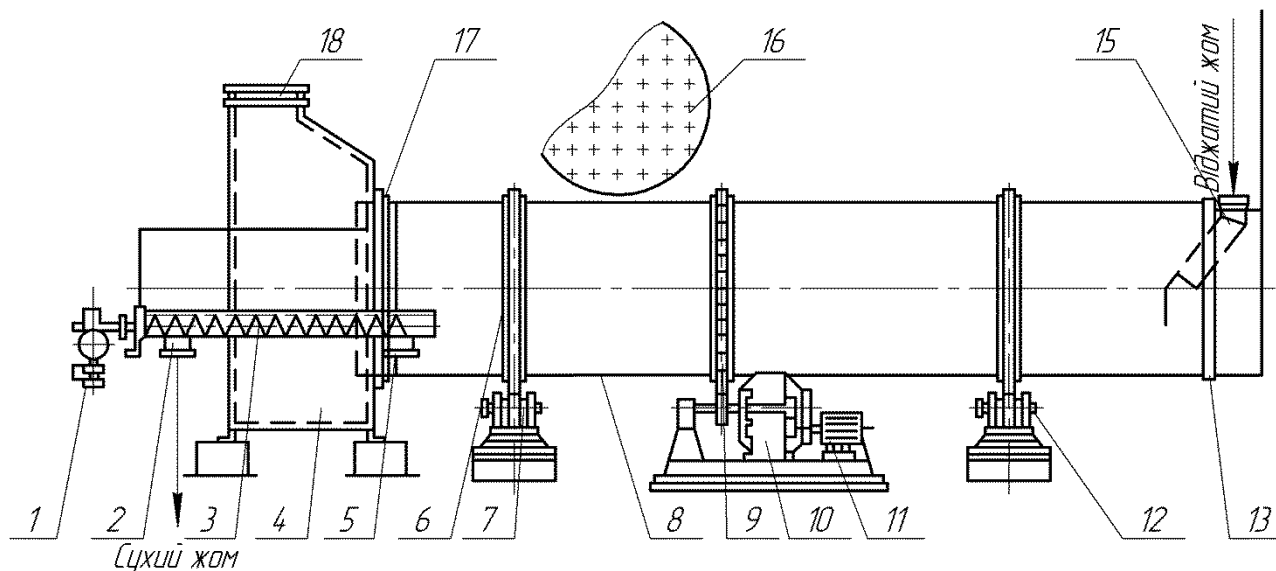
Барабанный жомосушильний апарат складається з корпусу, на якому закріплено два опорних бандажа. Бандажі спираються на дві пари роликів. Барабан приводиться в обертання від електродвигуна через редуктор за допомогою шестерні і зубчастого вінця, укріпленого на корпусі барабана. Можливий варіант приводу з використанням фрикційної передачі. Доцільно встановлювати привід барабана з можливістю регулювання його частоти обертання. Це дозволяє використовувати жомосушильні барабани для сушіння таких продуктів, як зерно, сіно і т. п.

Раніше барабани встановлювали з невеликим ухилом у напрямку переміщення висушеного жому. На сьогодні барабани встановлюють горизонтально. Жом у процесі висушування надійно переміщується до виходу завдяки кінетичній енергії сушильного агента і конструкції насадок.

Вихідний отвір топкового пристрою забезпечений лотком для завантаження, по якому подається пресований жом всередину барабана. Корпус апарату з топкової та розвантажувальної камерами з'єднаний через ущільнення [27].

Усередині барабана, в передній його частині, на внутрішній поверхні укріплено похилі гвинтові лопасті, за допомогою яких жом переміщається вздовж барабана до задньої його частини, заповненої хрестоподібними насадками, призначеними для

рівномірного заповнення перерізу барабана жомом і збільшення поверхні контакту з сушильним агентом.



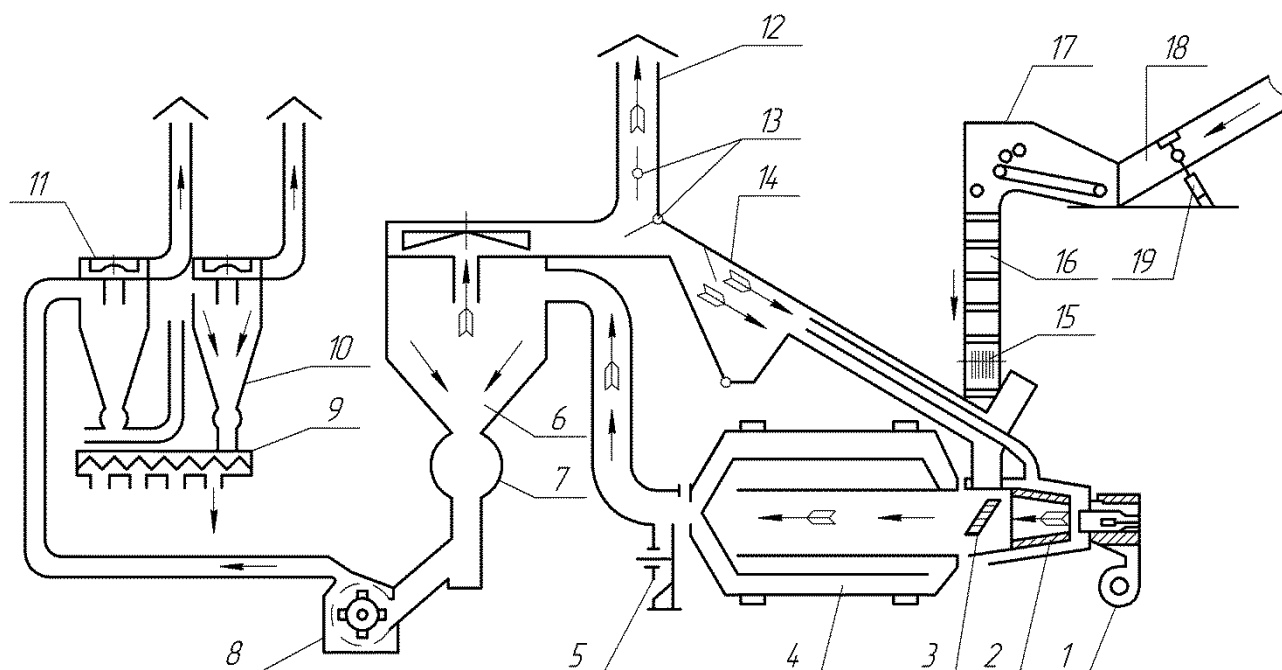
1 — привід шнека; 2 і 5 — патрубки; 3 — шнек; 4 — розвантажувальна камера; 6 — бандаж; 7 — опорний ролик; 8 — корпус; 9 — зубчастий вінець; 10 — редуктор; 11 — електродвигун; 12 — опорний ролик; 13 і 17 — ущільнення; 14 — вихідний отвір топки; 15 — лоток для завантаження; 16 — хрестоподібні насадки; 18 — штуцер.

Рисунок 1.4. – Барабанний жомосушільний апарат.

Принцип роботи жомосушільного барабана такий. Пресований жом лотком надходить до гвинтової лопасті і далі на систему насадок, де рівномірно розподіляється по полицям. У процесі обертання жом пересипається з однієї насадки на іншу, просувається до розвантажувальної камери і висушується [27]. З розвантажувальної камери сушений жом виводиться шнеком через патрубок. Шнек приводиться в рух від електродвигуна.

Топкові гази надходять в барабан і рухаються в одному напрямку (прямо точно) з жомом. При цьому гази з високою температурою (800-900° С) стикаються з найбільш вологим жомом, швидко охолоджуються, досушують жом до кінцевої вологості (10-13 %) і далі через верхню частину розвантажувальної камери зі штуцером за допомогою димососа викидаються в атмосферу [27].

Агрегат для приготування трав'яного борошна. Приготування трав'яного борошна відбувається в основному на пневмобарабанних сушарках безперервної дії. Теплоносій з топки (400 – 1000°C) надходить до сушильного барабана. Теплоносій-суміш повітря з продуктами горіння. Сюди ж з бункера-живильника завантажувальним транспортером подається попередньо подрібнена до 10–30 мм зелена маса. Завдяки обертанню барабана зелена маса перевертається і переміщується в напрямку теплоносія. Частки, що висихають раніше, стають легшими і швидше виносяться теплоносієм з сушильного барабана.



1 – система підігрівання та подачі палива; 2 – теплогенератор; 3 – завантажувальний лоток; 4 – сушильний барабан; 5 – уловлювач важких включень; 6 – циклон сухої маси; 7 – шлюзовий затвор; 8 – молоткова дробарка; 9 – розподільний шнек; 10 – циклон охолодження борошна; 11 – циклон відведення борошна; 12 – вихлопний трубопровід; 13 – регулятор кратності рециркуляції; 14 – пристрій рециркуляції; 15 – регулювальний бітер; 16 – завантажувальний конвеєр; 17 – живильник зеленої маси; 18 – приймальний лотік; 19 – гідросистема піднімання [27].

Рисунок 1.5. – Конструктивно-функціональна схема агрегату АВМ-0,65Р.

Суша маса разом з теплоносієм потрапляє до великого циклона, в якому відокремлюється від теплоносія і через шлюзовий затвор надходить до молоткової дробарки. У ній висушена маса подрібнюється до розмірів, що визначаються

встановленим решетою. Одержане борошно пневмопроводом надходить до малого циклону, відокремлюється від повітря, через шлюзовий затвор потрапляє в шнековий розподільник і розфасовується в мішки або подається на гранулювання. Температуру теплоносія й експозицію сушіння маси встановлюють з таким розрахунком, щоб вологість висушеної маси була в межах 10–14 % для подрібнення її на вітамінне борошно або 15–18 % – для вітамінної січки. Функціональна схема автоматизації пневмо-барабанної сушарки для сушіння вітамінного борошна.

Основним параметром управління є кінцева вологість трав'яного борошна, яка визначає якість технологічного процесу. Найдоцільнішою є система управління, яка забезпечує максимальну продуктивність сушарки за умови кінцевої вологості матеріалу 10—12 %. Але здійснення такого управління зараз є неможливим через відсутність надійних технічних засобів для вимірювання вологості трав'яного борошна в потоці у виваженому стані. Сучасні системи здійснюють управління процесом непрямыми методами. Управління здійснюється за температурою агенту сушіння, який виходить із сушарки [27].

Крім основної системи управління процесом, сушарка оснащена системою управління температури на виході з топки, яка забезпечує повне згоряння палива, системою захисту за умови згасання факела, а також системою дистанційного управління всіма електроприводами, за допомогою якої здійснюється запуск, зупинка під час завершення роботи або аварійних ситуаціях.

Широке впровадження автоматизації - найбільш ефективний шлях підвищення продуктивності праці.

На багатьох об'єктах для організації правильного технологічного процесу необхідно тривало підтримувати задані значення різних фізичних параметрів або змінювати їх у часі за певним законом. Унаслідок різних зовнішніх впливів на об'єкт ці параметри відхиляються від заданих. Оператор або машиніст повинен так впливати на об'єкт, щоб значення регульованих параметрів не виходили за допустимі межі, тобто управляти об'єктом. Окремі функції оператора можуть виконувати різні автоматизовані прилади. Їхній вплив на об'єкт здійснюється за командою людини, яка стежить за станом параметрів. Таке управління називають автоматизованим. Щоб

повністю виключити людину з процесу управління, система повинна бути замкнутою: прилади повинні стежити за відхиленням регульованого параметра і, відповідно, давати команду на управління об'єктом. Така замкнута система управління називається системою автоматичного регулювання (САР).

Перші найпростіші автоматизовані системи регулювання для підтримки заданих значень рівня рідини, тиску пари, швидкості обертання з'явилися в другій половині XVIII ст. з розвитком парових машин. Створення перших автоматизованих регуляторів відбувалося інтуїтивно і було заслугою окремих винахідників. Для подальшого розвитку засобів автоматизації необхідні були методи розрахунку автоматичних регуляторів. Уже в другій половині XIX ст. була створена струнка теорія автоматичного регулювання, заснована на математичних методах. У роботах Д. К. Максвелла "О регуляторах"; (1866 р.) і І. А. Вишнеградського "Про загальну теорію регуляторів" (1876 р.), "Про регулятори прямої дії" (1876 р.) регулятори і об'єкт регулювання вперше розглядали як єдину динамічну систему. Теорія автоматичного регулювання безперервно розширюється і поглиблюється.

Сучасний етап розвитку автоматизації характеризується значним ускладненням завдань автоматичного управління: збільшенням числа регульованих параметрів і взаємозв'язком об'єктів регулювання; підвищенням необхідної точності регулювання, їх швидкодії; збільшенням дистанційного керування і т. д. Ці завдання можуть бути вирішені тільки на базі сучасної електронної техніки, широкого впровадження мікропроцесорів і універсальних комп'ютерів.

Отже, для всіх вказаних об'єктів можна встановити наступні особливості:

- наявність складної геометричної форми, спряження секторів різної геометричної природи – циліндричні, конічні, тороподібні труби;
- наявність елементів конструкції, які мають форму труб кількох шарів виконання, що зумовлює потребу контролювання напружено-деформованого стану в зоні бандажування;
- наявність суттєвих термічних впливів на об'єкт зі складною геометричною конфігурацією;

- наявність елементів конструкції, які зазнають аеродинамічних впливів (вентилятори, технологічні лопаті, тощо).

Виникає потреба автоматизованого контролю технічного стану вказаних об'єктів; оцінки їх залишкового ресурсу, забезпечення безаварійної роботи та високої якості продукції.

1.2 Аналіз існуючих методів контролю та керування для ПОО.

Об'єктивні тенденції розвитку ПОО – зношення обладнання в процесі експлуатації, строго нестаціонарний режим експлуатації, зростаючі вимоги до якості продукції, “старіння” матеріалу, з якого виготовлено досліджувані об'єкти, недостатність коштів на його вдосконалення або оновлення- створюють потребу в розширенні робіт із діагностування їхнього технічного стану та прийняття управлінських рішень щодо подальшої експлуатації. Значний інтерес до оцінки реального технічного стану такого обладнання проявляється як в Україні, так і в інших країнах, де використовують та експлуатують досліджувані об'єкти (Польща Чехія, Німеччина і ін) [39, 101]. Застосування різних методів діагностування забезпечує більш повну відповідність між станом ПОО та обсягом робіт, які виконують з метою технічного обслуговування та ремонту, що дозволяє здійснювати обґрунтоване планування останніх [63].

Діагностичне обстеження ПОО, як і будь-якого іншого об'єкта, складається переважно з таких етапів:

- постановка задачі дослідження;
- дослідження документації, яка містить основні вхідні технічні параметри об'єкта дослідження, що характеризують його роботу та практичну довговічність;
- одержання інформації про стан об'єкта в даний момент часу методом проведення контрольних вимірювань та дефектоскопії [63];
- зіставлення вхідних даних із даними, одержаними в результаті вимірювань;
- проведення аналізу та формування висновків, які містять інформацію про фактичний технічний стан, безпечні режими експлуатації, необхідність та обсяг ремонтних робіт.

Такий підхід реалізується як в Україні, так і в Західній Європі, США, Японії та Австралії. Простежується тенденція щодо перерозподілу затрат на спорудження та експлуатацію відповідних технічних систем. Водночас особливу увагу зосереджено на проведенні ремонтних робіт, своєчасній реконструкції та заміні такого обладнання на визначених підприємствах, подальша експлуатація якого є економічно недоцільною [49,52]. Проте в умовах України більша увага все ж приділяється проведенню ремонтних робіт через те, що це дозволяє раціонально використовувати доволі обмежені ресурси, виділені на ремонт, реконструкцію та підтримання належного технічного стану.

В основі більшості методів неруйнівного контролю технічного стану ПОО, які застосовують у складних умовах експлуатації, лежить метод про зміну деяких фізико-механічних полів, визначених в об'ємі або на поверхні досліджуваних тіл під дією факторів різної природи - силових, теплових, вібраційних, аеродинамічних тощо. Відповідно до особливостей задач, що підлягають вирішенню, встановлюємо фактор вимірюваних величин, їхню природу фізико-механічного характеру, оцінюємо та формалізуємо ефективно, що дає змогу одержувати діагностичну інформацію. Діагностику ПОО здійснюємо за допомогою комплексу вимірювальних засобів і методів неруйнівного контролю, серед яких необхідно виділити візуально-оптичний метод [65, 98], вібродіагностичний [65, 90, 97], акустично-емісійний [91, 98], термографічний [46, 78], магнітний [65, 98], ультразвуковий [47, 65] та ізометричний [58], методи товщинометрії [61, 65, 97], методи контролю корозійного стану [61, 65, 80], методи металографічних досліджень тощо. Кожен із зазначених методів вимагає певних умов для його ефективної реалізації – зокрема, вказані методи можуть бути контактними та дистанційними. До контактних відносять методи, у ході застосування яких відбувається прямий контакт між поверхнею досліджуваного тіла та вимірювальною апаратурою. За відсутності такої необхідності застосовуються дистанційні методи. Іншими ознаками, за якими класифікують методи, є стаціонарність, неперервність. Класифікують ще за способом вимірювання – неперервними чи дискретними сигналами, за місцем проведення досліджень –

зовнішні (коли виміри здійснюють для контролю зовнішніх параметрів) і внутрішні (коли вимірюють внутрішні параметри об'єкта).

Важливими характеристиками методів апаратних досліджень є також вимоги до об'єкта досліджень щодо стану поверхні, доступність поверхонь для реалізації певних класів методів, габарити об'єкта й апаратури, зовнішні умови, в яких проводять вимірювання, та їх вплив на вимірювальну апаратуру. Під час застосування вказаних методів важливого значення набуває можливість їх спільного використання, одержання на основі результатів вимірювань кількох характеристик досліджуваного об'єкта. Інформація про вимірювання значень фізико-механічних величин на поверхні або в об'ємі досліджуваного тіла має, як правило, дискретний характер, тобто значення вимірюваних величин задаються лише на певній множині точок досліджуваного тіла. Тому для одержання інформації про значення даного поля на всьому досліджуваному тілі необхідно використовувати методи математичної обробки результатів вимірювання різного рівня складності. В ході роботи можуть бути розв'язані такі задачі:

- одержання діагностичної інформації в будь-якій точці досліджуваного тіла в початковий момент часу [65, 91, 97];
- одержання діагностичної інформації шляхом обчислення вторинних характеристик об'єкта діагностування за деякою початковою інформацією [80, 98,] та підготовка даних для інформаційних систем [61, 78, 97];
- визначення типу залежності між величинами для першого класу одно – та багатопараметричних залежностей [61, 63];
- встановлення невідомих характеристик досліджувальних тіл [63, 69, 77];
- одержання діагностичної інформації шляхом побудови та реалізації моделей, що базуються на законах збереження з широким класом граничних і початкових умов [65, 69, 80].

На основі матеріалів численних науково технічних конференцій можна зробити висновок про те, що найбільш актуальними проблемами діагностики та керування ПОО є:

- визначення залишкового ресурсу ПОО, що експлуатується в складних умовах тривалий час;
- визначення реальних конфігурацій ПОО та елементів їх конструкцій і зміну пружно-деформованого стану в них;
- розроблення методів моделей для оцінювання аеродинамічних параметрів ПОО та їх зміни в процесі експлуатації.

Вказані задачі вимагають достатньо точної інформації про деформацію об'єкта, зміну напружено-деформованого стану під дією силових факторів різної природи – як експлуатаційних, так і факторів силового впливу невідомої природи, величини та місць прикладання.

Перелічені проблеми та особливості реалізації експериментальних методів показують, що для одержання таких важливих характеристик як зміна напруженого стану ПОО під дією різних силових факторів, аеродинамічних характеристик та їх зміни для технологічних елементів ПОО лише експериментальних методів не достатньо. Необхідно застосувати за результатами їхньої реалізації комплексні підходи, пов'язані з комбінованим використанням експериментальних методів для одержання початкової діагностичної інформації з методами математичної обробки результатів експериментальних досліджень, зокрема побудови на їхній основі відповідних моделей процесів.

1.3. Аналіз методів математичного моделювання в задачах контролю та управління ПОО. Виділення невирішених

Існуючі методи визначення оцінки напружено-деформованого стану добре відомі, вони базуються на побудові точних розв'язків теорії пружності [97, 101], опору матеріалів [97, 98], теорії пластичності [90, 91]. Проте реалізація цих методів пов'язана з рядом проблем. А саме:

- можливість такого розв'язання для невеликої кількості модельних ділянок, тоді як практичні задачі пов'язані з необхідністю розроблення методів оцінювання напружено-деформованого стану об'єктів складної геометричної конфігурації, до

ділянок, що можуть складно формалізуватись або бути спряженням кількох ділянок різної конфігурації;

- складність у постановці коректного завдання початкових і граничних умов для задач оцінки ПОО;

- проблеми в заданні вільних членів, які характеризують сили та навантаження, що діють на досліджувані тіла.

Аналогічні проблеми виникають при спробі коректної постановки задачі оцінки аеродинамічних характеристик елементів конструкції вентиляторів і сушильних агрегатів. Реалізація відомих методів дискретних вихорів [20] вимагає точного задання характеристик профілю лопасті, що не завжди можливо в реальних конструкціях.

Актуальність і доцільність підвищення ефективності моделювання ТОРП зумовлена масштабами їх використання, великим промисловим значенням, широким колом задач моделювання. Незважаючи на велику кількість задач моделювання тепло-технологічних ОРП, їх можна умовно поділити залежно від кількості просторових вимірів:

а) задача моделювання *одновимірного температурного розподілу*, що виникає при нагріванні виробів та передбачає варіювання значень температурного поля для отримання необхідного розподілу. Прикладом цього класу задач, розглянутих у роботах [8, 34, 77, 99], є моделювання розподілу температурного поля пластини шириною $2S$, що описується функцією $Q(x, t)$ в часі t ($0 \leq t < T$) і за товщиною x ($-S \leq x \leq S$). Посередині відрізка $[-S, S]$ при $t > 0$ цей розподіл описується лінійним диференціальним рівнянням у частинних похідних другого порядку:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = a \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2}, \quad (1.1)$$

де a – коефіцієнт теплопровідності. Для однозначності розв'язку рівняння (1.1) вводяться граничні умови, наприклад:

$$\lambda \frac{\partial Q}{\partial x}(s, t) = a_1 [u_1(t) - a(-s, t)], t > 0 \quad (1.2)$$

$$-\lambda \frac{\partial Q}{\partial x}(-s, t) = \alpha_2 [u_2(t) - a(-s, t)], t > 0 \quad (1.3)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності; α_1 і α_2 – коефіцієнти теплообміну між тепловим середовищем печі та пластиною, $u_1(t)$ і $u_2(t)$ – температура середовища з однієї й з іншої сторони пластини відповідно.

б) задача моделювання нагріву в загальному випадку, розглянута в роботах [11, 38, 47], коли тіло має кінцеві розміри в усіх трьох просторових вимірах. Якщо позначити деяку ділянку тривимірного простору, яку займає тіло, через D , а через G – поверхню, що обмежує D , то функція $Q(x, y, z, t)$ визначатиме розподіл температури в однорідному тілі D і відповідатиме рівнянням теплопровідності:

$$Q = \Delta Q, (x, y, z) \in D, t > 0 \quad (1.4)$$

з початковою умовою

$$Q(x, y, z, 0) = Q_0(x, y, z), \quad (1.5)$$

де $-\Delta$ оператор Лапласа в прямокутній системі координат:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (1.6)$$

Прикладом цього класу задач є задача моделювання керуючих впливів уздовж деякого напрямку всередині ділянки D . Наприклад, нагрів тіла D відбувається за допомогою тепла, яке виділяє електричний струм, що проходить провідником усередині тіла D . Якщо провідник має форму кривої, то рівняння можна задати параметрично:

$$x = x(\xi), y = y(\xi), z = z(\xi), \quad \xi_0 \leq \xi \leq \xi_1, \quad (1.7)$$

де ξ - параметр і $x(x_0), y(\xi_0), z(z_0), x(x_1), y(y_1), z(z_1)$ – координати точок входу та виходу провідника з тіла D відповідно.

Позначивши потужність, що виділяється струмом на одиницю довжини через $w(t)$, математичну модель процесу можна записати так:

$$Q = Q + w(t)\sigma(x - x(\xi))\sigma(y - y(\xi))\sigma(z - z(\xi)). \quad (1.8)$$

Зазначимо, що, оскільки не існує принципової різниці при моделюванні ОРП залежно від кількості просторових вимірів, надалі в прикладах і формулюваннях часто розглядаються задачі одновимірного розподілу, наведені вище.

Задача моделювання заданого розподілу температурного поля, як зазначено в [11, 37, 47, 78], фактично є задачею оптимізації функціонування теплотехнологічних процесів ОРП. У цьому випадку математична модель враховує обмеження, пов'язані з технологічними особливостями функціонування теплових агрегатів (температура та розміри робочого простору, калорійність палива тощо):

$$Q(x, T) = Q^*(x), \quad -S \leq x \leq S, \quad (1.9)$$

де T – деякий момент часу; $Q^*(x)$ – заданий або бажаний розподіл температури.

Залежно від *виду обмежень* у цьому класі можна умовно виділити такі групи задач:

а) задачі з *обмеженням на функцію стану* об'єкта: при недопустимості різких перепадів температури, зокрема градієнта температурного поля $Q(x, t)$ всередині тіла [9, 37, 38]:

$$|\text{grad}_x Q(x, t)| \leq A, \quad (1.10)$$

де A – задане стале число, що характеризує гранично допустиме максимальне або мінімальне значення температури в печі. Зауважимо, що в одновимірному випадку нерівність (1.10) відповідає обмеженню на частинну похідну по просторовій змінній:

$$|\text{grad}_x Q(x, t)| = \left| \frac{\partial Q(x, t)}{\partial x} \right| \leq A, \quad -S \leq x \leq S, \quad t \geq 0 \quad (1.11)$$

при недопустимості оплавлення поверхні матеріалу:

$$Q(S, t) \leq A, Q(-S, t) \leq A \quad t \geq 0, \quad (1.12)$$

де A – гранично допустима температура поверхні тіла, за якої не виникає оплавлення матеріалу.

б) задачі *моделювання динаміки управляючих впливів*, що виникають при великій інерційності процесу, пов'язані з обмеженнями на діапазон зміни управляючого органу.

Залежно від *виду математичного опису ТОРП* розглядаються такі групи задач:

- математична модель ТОРП, задана *лінійним рівнянням* виду (1.1);

- математична модель ТОРП, задана *нелінійним або неоднорідним рівнянням* з коефіцієнтами, що залежать від просторових координат або часу, виду:

$$c\rho \frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial Q}{\partial x} \right] \quad (1.13)$$

де c – теплоємність; ρ – щільність; λ – теплопровідність, які можуть бути задані функціями x, t, Q .

в) задача *моделювання термонапруг*, що виникають всередині тіла при нагріванні, у якій, крім розподілу температури, враховують поля термонапруги $\sigma(x, t)$, які виступають в моделі у вигляді обмежень:

$$A \leq \sigma(x, t) \leq B, \quad -S \leq x \leq S, \quad t \geq 0. \quad (1.14)$$

5. У [3, 11, 12, 97, 115] розглядаються задачі *моделювання просторового переміщення* оброблюваних виробів або нагрівальних агентів. Якщо позначити розподіл температур агента, що нагріває, через $Q_1(x, t)$, а розподіл температур агента, що нагрівається, – $Q_2(x, t)$, тоді рівняння, що описує зміну $Q_1(x, t)$ у вибраній системі координат, матиме вигляд:

$$\frac{\partial Q_1(x,t)}{\partial t} + v_1(x) \frac{\partial Q_1(x,t)}{\partial x} + \alpha_1(x) Q_1(x, t) = f_1(x,t), \quad 0 < x < l, \quad t > 0, \quad (1.15)$$

де $v_1(x)$ – швидкість руху агента, що нагріває, в додатньому напрямку x ; $\alpha_1(x)$ – коефіцієнт теплообміну агента, що нагріває, з зовнішнім середовищем; $f_1(x,t)$ – загальний потік тепла, який надходить до агента, що нагріває.

Аналогічні рівняння можна записати для агента, що нагрівається:

$$\frac{\partial Q_2(x,t)}{\partial t} \pm v_2(x) \frac{\partial Q_2(x,t)}{\partial x} + \alpha_2(x) Q_2(x,t) = f_2(x,t), 0 < x < l, t > 0, \quad (1.16)$$

де знак “плюс” перед другим доданком береться при прямотоці, а знак “мінус” – при протитоці.

Для вирішення відповідних задач розглядаємо умови однозначності. Диференціальне рівняння теплопровідності описує нескінченну множину процесів (задач) передачі теплоти. Тобто, в загальному випадку, дає загальне рішення диференціального рівняння (задачі), яке задовольняє будь-який процес теплопровідності. Для того, щоб отримати конкретне рішення (частинне) конкретної задачі теплопровідності, необхідно задати крайові умови. У теорії теплопровідності крайові умови називають умовами однозначності, що визначаються в такий спосіб:

- геометричні умови – форми, розміри тіла, у яких протікає процес теплопередачі;
- фізичні умови – фізичні властивості тіла (ρ, λ) р с;
- початкові умови (ПУ, розподіл температур у початковий момент часу всього тіла);
- граничні умови (ГУ, умови на границі тіла) – взаємодія тіла з навколишнім середовищем.

Початкові умови необхідні тільки для розв’язання нестационарних задач теплопровідності і визначаються так:

$$t|_{\tau=0} = f(x, y, z), C^0 \quad (1.17)$$

де x, y, z - координати точок тіла. За умови рівномірного розподілу температури в тілі маємо:

$$t|_{\tau=0} = t_0 = const, C^0 \quad (1.18)$$

Граничні умови розподіляємо на декілька типів (родів).

а) Граничні умови I роду. Задається розподіл температур на границі тіла (крайові умови Діріхле) для моменту часу $\tau > 0$

$$t|_{\Gamma} = t_c = f_t(x, y, z, \tau), C^0, \quad (1.19)$$

де t_{Γ}, t_c – температура на границі, поверхні тіла.

При $t|_{\Gamma} \neq f_t(\tau)$ маємо, що $t|_{\Gamma} = t_c = \text{const}$.

б) Граничні умови II роду. Задається густина теплового потоку на границі тіла (крайові умови Неймана) при $\tau > 0$

$$q|_{\Gamma} = q_{\Pi} = f_q(x, y, z, \tau), \text{Вт/м}^2. \quad (1.20)$$

Або

$$-\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial n} \right|_{\Gamma} = q|_{\Gamma}, \quad (1.21)$$

де $q|_{\Gamma}, q|_{\Pi}$ – густина теплового потоку на границі, поверхні тіла; $n^T = (n_x \ n_y \ n_z)$ – вектор зовнішньої нормалі до поверхні тіла.

При $q|_{\Gamma} \neq f_q(\tau)$ маємо, що $q_{\Gamma} = q_{\Pi} = \text{const}$.

Для граничних умов II роду необхідне обов'язкове задання рівня температури тіла. У нестационарній задачі – це початкові умови. Тому для нестационарної задачі густину теплового потоку можна задавати на всій поверхні тіла. При стаціонарній задачі хоча б у одній точці поверхні тіла повинні бути задані інші умови, наприклад, I роду.

в) Граничні умови III роду (граничні умови конвективного теплообміну). Задається температура навколишнього середовища (рідини або газу) і закон теплообміну між поверхнею тіла й рідиною – закон Ньютона-Ріхмана, який формулюємо так: густина теплового потоку пропорційна різниці температур між поверхнею тіла й рідиною. Процес теплообміну між поверхнею тіла і середовищем є дуже складним процесом і залежить від великої кількості параметрів.

Отже, диференціальне рівняння теплопровідності (1.16) спільно із заданими умовами однозначності дає повне математичне формулювання крайової задачі теплопровідності. Сформульовану задачу можна розв'язувати або аналітичним способом для простіших випадків (теплообмін у плоскій або циліндричній стінках та ін.), або числовими методами (що буде розглянуто далі).

1.4 Обґрунтування методів та постановка задач дослідження

У процесі вирішення задачі контролю технічного стану ПОО на основі аналізу сучасного стану, можна виділити такі проблемні моменти, що вимагають вирішення:

1. Недостатня достовірність одержаних результатів.

Оскільки вимірювання всіх величин, які надалі використовують для перерахунку параметрів напружено-деформованого стану, аеродинамічних характеристик, термічних напружень проводять з певною похибкою, це суттєво впливає на точність результатів моделювання.

2. Великі витрати на проведення контрольних заходів.

У багатьох випадках проведення заходів контролю вимагає зупинки робочого обладнання, що впливає на виконання промислових завдань, закупівлі високовартісного обладнання або замовлення досліджень у відповідних фірм, залучення значних ресурсів для підготовки доступу до об'єктів ресурсу ЕОМ, залучення персоналу та відповідної техніки.

3. Обмеженість у використанні методів контролю.

На точність результатів, отриманих із використанням більшості з зазначених методів експериментальних досліджень, впливають:

- зовнішні кліматичні умови;
- ступінь чистоти поверхні;
- агресивність навколишнього середовища;
- інформація про початковий напружений стан конструкції та геометричні характеристики лопатевого агрегату;
- якість робіт з виробництва та монтажу обладнання;
- умови та режими експлуатації;
- інформація про фізико-механічні властивості матеріалу.

Всі вказані параметри чинять взаємний вплив один на одного, тому часто видається неможливим встановити, який саме фактор силового впливу чинить основний тиск на конструкцію, що зумовлює зміну НДС, впливає на довговічність та надійність конструкції.

Реалізація комплексу методів математичного моделювання на основі незначного обсягу даних експериментальних досліджень дозволяє оцінити реальний технічний стан об'єкта, параметри його надійності та тривалості ефективної експлуатації без точної деталізації того, якою була картина силових впливів у період тривалої експлуатації об'єкта. З цією метою виділяється клас задач, які необхідно розв'язати в процесі дослідження технічного стану ПОО і математичне моделювання процесу деформування та напруженого стану ПОО за зміною їх просторової конфігурації:

- аналіз сучасних методів оцінювання технічного стану елементів конструкції протяглих обертових об'єктів, які використовують у цукровій промисловості;

- математичне моделювання напружено-деформованого стану технологічних елементів конструкції в цукровому виробництві на основі зміни їхньої просторової конфігурації, і, зокрема, процесу бандажування;

- математичне моделювання аеродинамічних впливів на вентилятори ПОО з урахуванням зношення лопатей з оцінкою точності аеродинамічних моделей;

- розроблення моделей і програмного забезпечення для відновлення елементів лопаткового апарату промислових вентиляторів, які використовують у цукровій промисловості;

- розроблення методики розрахунку економічної ефективності проведених досліджень технічного стану елементів конструкції ПОО, які використовуються в цукровій промисловості;

- створення методів оцінки довговічності технологічних елементів конструкції в цукровому виробництві на основі зміни їхньої просторової конфігурації та дії інших факторів силового впливу

1.5 Висновки по першому розділу

У цьому розділі проведено аналіз ПОО як об'єктів контролю, вивчено особливості їхніх конструкцій, проведено аналіз існуючих методів експериментальних досліджень ПОО із зазначенням конкретних проблем;

Проаналізовано існуючі математичні моделі для оцінювання параметрів напруженого стану досліджуваних об'єктів із зазначенням невирішених задач моделювання, намічено задачі, що можуть бути вирішені в процесі реалізації роботи.

Вказано, що необхідно розробити такі інженерні методики розрахунку параметрів технічного стану (напружений стан з урахуванням топології об'єкту, бандажуванням елементів конструкції, аеродинамічні характеристики лопатевого агрегату ПОО), які б дозволяли з точністю, обумовленою виробничими вимогами, характеризувати зміну технічного стану ПОО без додаткової детальної інформації про всі сили та навантаження, фактори хімічного, теплового, аеродинамічного впливу, які діяли на об'єкт у процесі його тривалої експлуатації.

За результатами досліджень, наведеними в розділі 1, опубліковано роботи [27, 32].

РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ДЕФОРМУВАННЯ ТА НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ПРОТЯГЛИХ ОБЕРТОВИХ ОБ'ЄКТІВ ПРИ РІЗНИХ ТИПАХ НАВАНТАЖЕННЯ

2.1. Вибір класу задач моделювання, які дозволяють побудувати модель напружено-деформованого стану для ПОО

При аналізі технічного стану обертових об'єктів складної геометричної конфігурації, крім експериментальних методів [1, 2, 4, 6, 21, 38, 63, 87] оцінки основних характеристик, широко використовуються методи математичного моделювання [5, 34, 58, 69, 73, 81, 98, 109, 111], реалізація яких для діючих об'єктів ускладнюється природою явищ і процесів, що моделюються. Згідно з підходом, запропонованим у [98], будь-яка задача управління діючими об'єктами, або оцінки його технічного стану може мати три основних підходи до її розв'язання.

1. Нехай для об'єкта, що моделюється, відомими є початкові характеристики \bar{x} , до яких входять всі проектні параметри й очікувані умови експлуатації. В такому випадку значення параметрів \bar{y} , в які переходять у процесі експлуатації характеристики \bar{x} , можуть бути одержані шляхом розв'язання деякого функціонального рівняння виду:

$$\bar{y} = A(V_1, V_2, \dots, V_n) \cdot \bar{x} \quad (2.1)$$

де $A(V_1, V_2, \dots, V_n)$ - деякий оператор, який формалізує всі впливи V_1, V_2, \dots, V_n , що діють на об'єкт у процесі експлуатації; його структура є відомою. Фактично (1) - це рівняння або система рівнянь математичної фізики з коректно поставленими граничними та початковими умовами, для яких розв'язок (точний або наближений) існує і визначається однозначно, що доводиться відповідними математичними викладками та результатами [66]. Задача 1 як правило розв'язується на етапі проектування. При цьому характеристики V_1, V_2, \dots, V_n чітко формалізуються. З точки зору практичного використання, задача 1 для оцінки технічного стану або управління об'єктом може бути використана лише для одержання попередніх результатів про проектний стан об'єкта в процесі експлуатації для деяких модельних, найбільш

стандартних, значеннях параметрів V_1, V_2, \dots, V_n , що суттєво відрізняються від реальних умов експлуатації $V_1(t), V_2(t), \dots, V_n(t)$, які є функціями від часу. Часто вони враховують реальні умови експлуатації, проте переважно структура та кількісні характеристики цих функцій є невідомими [29].

2. Якщо для об'єктів відомими є характеристики \bar{x} , а також функції $V_1(t), V_2(t), \dots, V_m(t)$, які задають дію найбільш загальних силових, фізичних, кліматичних та інших факторів (наприклад, робочий тиск у системі, режим обертання, теплові характеристики тощо). $V_1(t), V_2(t), \dots, V_m(t)$, $m < n$ – відомі функції. Тоді задачу записуємо у вигляді [28]:

$$\bar{y} = A_t(V_1(t), \dots, V_m(t)) \cdot \bar{x}, \quad (2.2)$$

де A_t відрізняється від A , наведеного в (2.1), більш простою структурою. Крім цього, для системи або рівняння (2.2) також встановлюємо відповідності, проте більш прості, на відміну від (2.1), граничні та початкові умови. В окремих випадках у задачі (2.2) беремо до уваги зміни просторової конфігурації досліджуваного об'єкта.

3. Найбільш загальним та природнім випадком, що виникає під час розв'язання задач управління досліджуваними об'єктами або аспектів їхнього технічного стану, є такий [28].

У початковий момент часу (наприклад, на початку експлуатації) відомими є характеристики \bar{x} об'єкта, а за результатами технічного обстеження визначаються характеристики \bar{y} об'єкта, що є фактично зміненими в процесі експлуатації характеристиками \bar{x} . У реальних випадках \bar{x} та \bar{y} визначаються не на всій поверхні досліджуваного тіла (часто це є практично неможливо), а лише на деякій частині (підмножини) цього об'єкта. В такому випадку задача управління або технічного стану об'єкта формалізується так.

Необхідно розв'язати задачу [28]:

$$\begin{cases} \bar{y} = A \cdot \bar{x} \\ \bar{x}(\Omega) = \bar{x}_B \\ \bar{y}(\Omega) = \bar{y}_B \end{cases} \quad (2.3)$$

де Ω – частина ділянки, на якій задаються \bar{x}_B та \bar{y}_B , A – оператор з невідомою структурою, \bar{x}_B і \bar{y}_B – значення параметрів стану об'єкта на всій ділянці простору,

який він займає. Очевидно, задача (2.3) є некоректно поставленою, для її розв'язання необхідно запропонувати певні умови регуляризації [25]. У такому випадку задача (2.3) розкладається на такі підзадачі:

а) визначення \bar{x} та \bar{y} на всій області, яку займає досліджуваний об'єкт за відомими значеннями $\overline{x_B}$ та $\overline{y_B}$;

б) встановлення структури оператора A для визначення природи сил і навантажень, що діють на досліджуваний об'єкт, та їх кількісних характеристик.

Розв'язання задачі:

а) розв'язання з вибором апарату інтерполяції або апроксимації даних, який дозволяє відтворити \bar{x} та \bar{y} за відомими $\overline{x_B}$ та $\overline{y_B}$. При цьому застосовується апарат інтерполяційних кубічних сплайнів або цих же сплайнів зі згладжуванням, а також апарату апроксимації залежно від інформації про точність вимірювання $\overline{x_B}$ та $\overline{y_B}$ або про природній характер зміни величини \bar{x} і \bar{y} у процесі експлуатації (лінійність залежностей, виділення найбільш характерних сил і навантажень, температурні режими, тощо) [28].

На етапі б) за визначеними \bar{x} та \bar{y} відновлюється структура оператора A . Наприклад, вибирається модель процесу деформації та напруженого стану, внаслідок чого розв'язується задача типу (2.2).

За відомим \bar{x} визначаються

$$\bar{y}_t = A_t^*(V_1(t), \dots, V_m(t)) \cdot \bar{x}. \quad (2.4)$$

Вибір оператора A_t вважається завершеним, якщо значення \bar{y}_t мало відрізняється від \bar{y} . За знайденим оператором

$$A_t = \lim_{T \rightarrow N} A_t^*,$$

який є результатом підбору A_t^* протягом N -разового розв'язання задачі (2.4) визначають не тільки значення \bar{y} , але і прогнозовані значення $\overline{y_B}$, які дозволяють робити прогнози стосовно оцінки залишкового ресурсу об'єкта [28].

Запропоновані підходи можуть бути проілюстровані таким прикладом. При вивченні геометричної конфігурації обертових печей на підприємствах із виробництва цементу, сушильного обладнання в цукровій промисловості тощо,

спрощену схему зазначених конструкцій (Рис. 2.1) можна подати як комбінацію спряжених прямолінійних конічних і тороподібних ділянок:

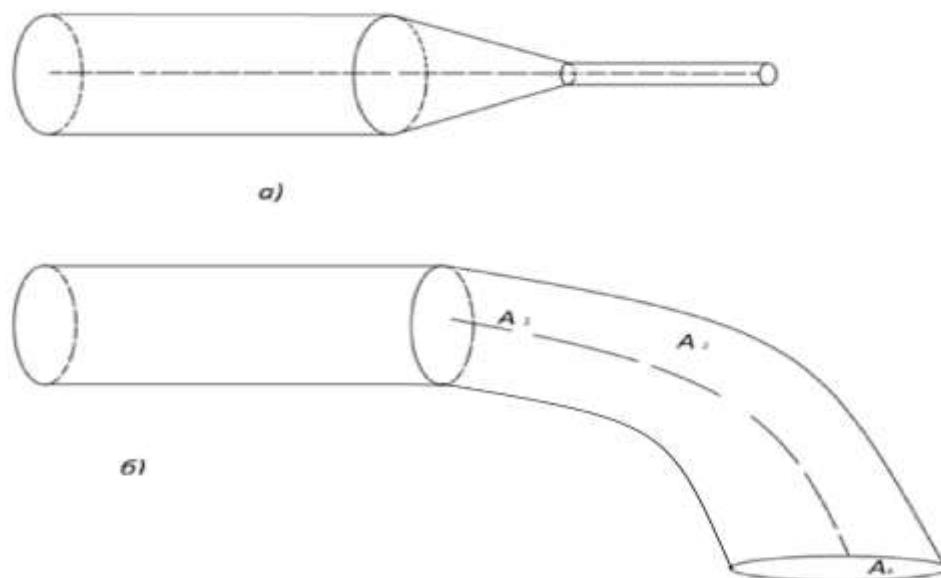


Рисунок 2.1 – Схеми спряження елементів конструкції обертових об'єктів:
а) прямолінійно-конічне спряження; б) прямолінійно-тороподібне спряження.

Нехай у контрольний і початковий моменти часу задаємо координати деякої множини точок на поверхні досліджуваних об'єктів. Використовуючи інтерполяційні процедури та методи диференціальної геометрії, можна одержати подання для трьох сказаних типів елементів конструкції досліджуваних тіл:

- для прямолінійної ділянки в початковий момент часу радіус-вектор будь-якої точки в початковий момент часу записуємо у вигляді:

$$\bar{V}_0 = \begin{cases} x = s \\ y = v \cos \varphi \\ z = v \sin \varphi \end{cases} \quad (2.5)$$

S-повздожня координата, $S \in [S_0, S_n]$, де S_0 - початкова, S_n – кінцева точка осі прямолінійної ділянки, $\varphi \in [0; 2\pi]$ - полярний кут; $V \in [R_1, R_2]$, R_1 -внутрішній, R_2 -зовнішній радіуси для контрольного моменту часу подання (2.5) трансформується в такий вираз:

$$\vec{r}_k = \begin{cases} x = S + (\alpha_n(S) \cdot \sin\varphi + \alpha_b(S)\cos\varphi)\rho(s, r, \varphi) \\ y = y(s) + (\beta_n(s)\sin\varphi + \beta_b(s)\cos\varphi)\rho(s, r, \varphi) \\ z = z(s) + (r_n(s)\sin\varphi + r_b(s)\cos\varphi)\rho(s, r, \varphi) \end{cases} \quad (2.6)$$

де $\rho(s, r, \varphi)$ – функція, що задає закон зміни радіуса ділянки $\{s, y(s), z(s)\}$ -координати деформованої осі ділянки; функції $y(s)$ та $z(s)$ – результати реалізації інтерполяційних процедур [32]. $\{\alpha_n(S), \beta_n(s), r_n(s)\}$ та $\{\alpha_b(S), \beta_b(s), r_b(s)\}$ – координатами одиничних векторів нормалі та бінормалі до осі трубопроводу. Дані визначаємо за відомими формулами з курсу диференціальної геометрії [115], для конічної ділянки подання для радіус-вектора в початковий момент часу записуємо у вигляді

$$\vec{V}_0 = \begin{cases} x = s \\ y = \rho(v, s)\cos\varphi \\ z = \rho(v, s)\sin\varphi \end{cases} \quad (2.7)$$

$$\text{де } \rho(v, s) = \frac{R_0 - R_1}{S_0 - S_1}s + \frac{R_1 S_0 - R_0 S_1}{S_0 - S_1} + v$$

R_0 і R_1 відповідно найбільший та найменший радіуси конічної ділянки;

S_0 і S_1 - початкова та кінцева повздовжні координати конічної ділянки;

$r \in [0; \delta]$; δ - товщина стінки.

В контрольний момент часу залежність (2.7) набуває виду

$$\vec{V}_k = \begin{cases} x = S + (\alpha_n(S) \cdot \sin\varphi + \alpha_b(S)\cos\varphi)\rho(s, r) \\ y = y(s) + (\beta_n(s)\sin\varphi + \beta_b(s)\cos\varphi)\rho(s, r) \\ z = z(s) + (r_n(s)\sin\varphi + r_b(s)\cos\varphi)\rho(s, r) \end{cases} \quad (2.8)$$

де, $\{S; y(s); z(s)\}; \{\alpha_n(S); \beta_n(s); r_n(s)\}; \{\alpha_b(S); \beta_b(s); r_b(s)\}$ - компоненти

точок.

Осі деформованої конічної ділянки, нормалі та бінормалі до неї відповідно, $\rho(s, r)$ – визначаємо аналогічно з (2.7). Якщо радіуси R_0, R_1 і координати S_0, S_1 змінюються в процесі деформації, ці значення підставляються у вираз (2.7) для $\rho(s, r)$. Для визначення координат $\{s, y(s), z(s)\}$ в поданні (2.8) доцільно використовувати техніку многочленів Ерміта з умовами:

$$\begin{aligned} H(S_0) &= \varepsilon_0 & H(S_1) &= \varepsilon_2 \\ H'(S_0) &= \varepsilon_1 & H'(S_1) &= \varepsilon_3, \end{aligned} \quad (2.9)$$

експериментально визначені значення $\varepsilon_0, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$, як правило, задовольняють умові

$$|\varepsilon_i| \ll 1, i=1,2,3,4. \quad (2.10)$$

Крім того, ε_0 та ε_1 мають відповідати умовам спряження прямолінійної та конічної ділянок. За умовами (2.9) многочлен набуває виду [42]:

$$H(S) = \varepsilon_1 \left[(S - S_1)^2 \left(\frac{2S}{(S_0 - S_1)^3} + \frac{-S_1 + 3S_0}{(S_0 - S_1)^3} \right) + \varepsilon_2 \left[\frac{(S - S_0)(S - S_1)^2}{(S_0 - S_1)^2} \right] + \varepsilon_3 [(S - S_0)^2 \left(\frac{-2S}{(S_1 - S_0)^3} + \frac{3S_1 - S_0}{(S_1 - S_0)^3} \right) + \varepsilon_4 \left[\frac{(S - S_0)^2 (S - S_1)}{(S_1 - S_0)^2} \right] \right]; \quad (2.11)$$

-для тороподібної ділянки в початковий момент часу:

$$\vec{V}_0 = \begin{cases} x = (R_0 + v \cos \varphi) \cos \theta \\ y = (R_0 + v \cos \varphi) \sin \theta \\ z = r \sin \varphi, \quad \varphi \in [0; 2\pi]; \end{cases} \quad (2.12)$$

$r \in [R_1; R_2]$ і $\theta \in [\varphi_1; \varphi_2]$ де R_1 і R_2 внутрішній і зовнішній радіуси тороподібної ділянки відповідно; R_0 - її радіус кривини; φ_1 та φ_2 - кути розкриття тороподібної ділянки ($\varphi_1 = 0; \varphi_2 = \frac{\pi}{2}$). Усі ці параметри є відомими з проектної документації. У контрольний момент часу подання (2.12) набуває виду:

$$\vec{V}_k = \begin{cases} x = (R_H + v \cos \varphi) \cos \theta \\ y = (R_H + v \cos \varphi) \sin \theta \\ z = r \sin \varphi, \quad \varphi \in [0; 2\pi]; \end{cases} \quad (2.13)$$

де R_H - новий радіус кривини тороподібної ділянки. За відомими (рис.2.1.) координатами точок $A_1(x_1, y_1, z_1), A_2(x_2, y_2, z_2), A_3(x_3, y_3, z_3)$ знаходитьсямо геометричне місце точок, рівновіддалених від A_1, A_2 і A_3 з наступної системи [32].

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 \end{cases} \quad (2.14)$$

Система (2.14) - це параметричне рівняння прямої, яке може бути (після перетворень) записане у виді:

$$\begin{cases} x = x_1 + \alpha t \\ y = y_1 + \beta t \\ z = z_1 + \gamma t \end{cases} \quad (2.15)$$

Де $(\alpha; \beta; \gamma)$ – напрямний вектор прямої, який визначаємо з (2.14). Рівняння площини, що проходить через точки (A_1, A_2, A_3) , записуємо у вигляді:

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = 0 \quad (2.16)$$

Підставляючи в рівняння (2.16) залежність (2.15), із урахуванням (2.13) знаходимо координати (x^*, y^*, z^*) точки перетину площини (2.16) з прямою (2.15) після чого:

$$R_H^2 = (x^* - x_1)^2 + (y^* - y_1)^2 + (z^* - z_1)^2 \quad (2.17)$$

Подання (2.5-2.6), (2.7-2.8) і (2.12-2.13) повністю описують недеформований і деформований об'єкт дослідження, після чого можна проводити оцінювання зміни напружено-деформованого стану об'єкта в рамках теорії пружності за відомою методикою [66,84]:

1. Знаходимо компоненти векторів локальних базисів для трьох типів ділянок за формулами (2.5)-(2.6)- для прямолінійної, (2.7)-(2.8)- для конічної і (2.12)-(2.13)- для тороподібної ділянок:

$$\bar{\Xi}_i^o = \frac{\partial \bar{v}_0}{\partial x_i}, x_1 = v; x_2 = \varphi; x_3 = s \quad (2.18)$$

для прямолінійної та конічної;

$$\bar{\Xi}_i^o = \frac{\partial \bar{v}_0}{\partial x_i}, x_1 = \gamma; x_2 = \varphi; x_3 = \theta \quad (2.19)$$

в початковий момент часу

$$\bar{\Xi}_i^k = \frac{\partial \bar{v}_0}{\partial x_i} \quad (2.20)$$

в контрольний момент часу.

2. Знаходимо компоненти матричного тензора

$$\begin{aligned} g_{ij}^0 &= \bar{\Xi}_i^o \cdot \bar{\Xi}_j^o \\ g_{ij}^k &= \bar{\Xi}_i^k \cdot \bar{\Xi}_j^k \end{aligned} \quad (2.21)$$

3. Знаходимо компоненти тензора деформації

$$E_{IJ} = \frac{1}{2} (g_{ij}^k - g_{ij}^0) \quad (2.22)$$

4. Знаходимо компоненти тензора напружень у рамках лінійної теорії пружності:

$$\sigma_{IJ} = \lambda I_r(\varepsilon) g_{IJ} + 2\mu \varepsilon_{IJ}, \quad (2.23)$$

де λ і μ параметри Ламе матеріалу, $I_r(\varepsilon)$ перший інваріант тензору деформації:

$$I_r(\varepsilon) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \varepsilon_{ij} g^{ij}, \quad (2.24)$$

де g^{ij} компоненти матриці оберненої до $\{g_{IJ}\}$, обчисленої за (2.21) для початкового моменту часу.

Таким чином, початкова модель процесу деформування та напруженого стану об'єктів складної геометричної форми, які працюють в умовах обертання навколо однієї з осей (як правило-поздовжньої), повністю розроблена.

2.2. Математичне моделювання процесу бандажування елементів конструкції ПОО

Однією з основних вимог, до сушильних агрегатів, типових ПОО, є забезпечення повного збереження продукту, а за необхідності – і покращення якості продукту. У зв'язку з цим конструкція сушки повинна, передусім, забезпечувати рівномірне нагрівання і сушіння матеріалу при надійному контролі температури та вологості в процесі сушіння. За таких умов були б неможливими втрати речовини, пов'язані з його виносом із відпрацьованим агентом сушіння. Реалізувати ці заходи можна за допомогою нових конструкційних рішень, автоматизованих методів розрахунку, перспективних матеріалів підвищеної міцності, нових економічних профілів прокату тощо.

Поставимо завдання розрахунку оптимальної конструкції барабанної конвективної сушки (для сушіння цукрового піску і жому) і бандажу, що є одним із основних засобів довготривалої роботи механізмів і дає змогу ефективно вирішувати проблему комплексної переробки. Бандажі забезпечують передачу тиску ваги всіх обертових частин апарату на опорні ролики. Бандажі є кільцями прямокутного перерізу. У барабанній сушці застосовується вільне кріплення бандажів через можливе значне теплове розширення барабана. Бандаж надягається не на кожух барабана, а безпосередньо на прокладки, а віддаль від однієї до трьох прокладок 10... 20 мм кожна. Прокладки утворюють кільця жорсткості, що не допускає пом'яття

кожуха в місцях опори. Підбором товщини регульованих прокладок можна досягнути суміщення центрів барабана і бандажа [30, 52, 103].

Виникає потреба в підборі такої товщини шару бандажу, яка, з одного боку, відповідає певним міцністним характеристикам, необхідним для уникнення руйнування шару бандажу, а з іншого – матеріалу бандажа, який би дозволив компенсувати відповідні термічні напруження, що виникають у матеріалі труби в зонах значних температурних градієнтів.

Розглянемо трубу сушильного агрегату з внутрішнім радіусом $R_B = a$, і зовнішнім радіусом $R_3 = b_1$, яка працює в умовах змішаних температурних режимів для компенсації температурних деформаційних ефектів у процесі використання бандажування зони значних температурних перепадів. На внутрішню трубу накладаємо бандаж деякої товщини – і одержуємо зовнішню трубу, якою моделюється шар бандажу. Нехай внутрішній радіус цієї зовнішньої труби $R_B = a_2$, а зовнішній – b_2 відповідно. Виникає питання підбору такої товщини шару бандажу, який відповідатиме певним міцністним характеристикам зовнішньої та внутрішньої сторони сушильного агрегату, що є необхідними для уникнення руйнування шару бандажу. А також вибору матеріалу бандажу, який дав би змогу компенсувати відповідні термічні напруження, що виникають у матеріалі труби в зонах значних температурних градієнтів. Для розв'язання вказаної задачі, яка є актуальною для діючих агрегатів, на цукрових заводах використовують підхід, описаний в класичній монографії [84], під час розгляду напружено-деформованого стану складеної труби (коли на трубу зовнішнім радіусом b_1 насаджується з використанням, наприклад, попереднього підігріву труба з внутрішнім радіусом a_2 , причому $b_1 > a_2$ [30]). У такому випадку утворюється система із суттєвими внутрішніми напруженнями.

Для опису напружень в такій складеній трубі розглядаємо дві труби (зовнішню та внутрішню) окремо, а їх взаємний вплив описуємо дією деякого фіктивного тиску \mathcal{P} . Крім цього для обох труб використовуємо результати розв'язання класичної задачі Ламе.

Зокрема, у стінці внутрішньої труби $R_1 = a_1; R_2 = b_1; P_a = 0; P_{b_1} = \mathcal{P}$, і для кільцевих напружень виправдана формула

$$P_{\theta\theta} = -\mathcal{P} \frac{b_1^2}{b_1^2 - a_1^2} \left(1 + \frac{a_1^2}{r^2} \right), \quad (2.25)$$

а для стінки зовнішньої трубки $P_{a_2} = \mathcal{P}; P_{b_2} = 0$ формула (2.24) набуває вигляду

$$P_{\theta\theta} = -\mathcal{P} \frac{a_2^2}{b_2^2 - a_2^2} \left(1 + \frac{b_2^2}{r^2} \right). \quad (2.26)$$

Для визначення величини фіктивного тиску P прирівнюємо зовнішній радіус першої труби (елементи конструкції сушильного агрегату) та внутрішній радіус другої труби (шару бандажу) після деформації внаслідок дії температурного перепаду. Отримаємо відповідну рівність:

$$b_1 + w_1(b_1) = a_2 + w_2(a_2). \quad (2.27)$$

Розглянемо випадок, коли вказаний об'єкт (сама труба та шар бандажу) зроблено з різного матеріалу. З рівності (2.27) одержуємо рівняння для знаходження величини фіктивного тиску P :

$$\begin{aligned} b_1 + \frac{-b_1^3 \mathcal{P}}{2(\lambda + \mu)(b_1^2 - a_1^2)} - \frac{\mathcal{P} a_1^2 b_1^2}{2\mu(b_1^2 - 4a_1^2)b_1} = \\ = a_2 + \frac{a_2^3 \mathcal{P}}{2(\lambda_1 + \mu_1)(b_2^2 - a_2^2)} - \frac{\mathcal{P} a_2^2 b_2^2}{2\mu_1(b_2^2 - a_2^2)a_2} \end{aligned} \quad (2.28)$$

Де $\lambda, \mu, \lambda_1, \mu_1$, -параметри Ламе для матеріалу труби та матеріалу бандажу (без індекса) та для матеріалу бандажу (індекс "1"). Із залежності (2.28) одержуємо

$$\mathcal{P} = \frac{b_1 - a_2}{\left[\frac{b_1^2}{2(b_1^2 - a_1^2)} \left(\frac{b_1^2}{\lambda + \mu} + \frac{a_1^2}{\mu} \right) + \frac{a_2^2}{2(b_2^2 - a_2^2)} \left(\frac{a_2^2}{\lambda_1 + \mu_1} + \frac{b_2^2}{\mu_1} \right) \right]} \quad (2.29)$$

Зрозуміло, що $b_1 > a_2$ величина P є додатньою.

При різних значеннях α і α_1 ($\alpha > \alpha_1$) внутрішні напруження виникають навіть за умови $b_1^0 = a_1^0$, тобто коли зовнішній радіус труби та внутрішній радіус бандажу збігаються.

Після знаходження величини тиску P з урахуванням (2.30) компоненти напружень, що виникають на частинах труби під дією фіктивного тиску P обчислюються за формулою:

$$P_{\theta\theta_T} = -\frac{b_1^2 P}{b_1^2 - a_1^2} \left(1 + \frac{a_1^2}{r^2}\right) \quad (2.31)$$

Тобто за наявності бандажу додаткові напруження $P_{\theta\theta_T}$ є від'ємними, і наявність бандажу зумовлює послаблення напруженого стану основної труби внаслідок дії температурного градієнту, причому температурний перепад входить у (2.31) із урахуванням (2.30). Для визначення відповідного рівня товщини бандажу використовуємо такий підхід: згідно з (2.29), (2.30) кільцеві напруження $P_{\theta\theta_B}$ оцінюємо згідно [32] за формулою:

$$P_{\theta\theta_B} = \frac{a_2^2 P}{b_2^2 - a_2^2} \left(1 + \frac{b_2^2}{r^2}\right) \quad (2.32)$$

де a_2 та b_2 – відповідно внутрішній та зовнішній радіус шару бандажу. Враховуючи те що $P_{\theta\theta_B}$ мало змінюється за радіусом r . Проведемо осереднення $P_{\theta\theta_B}$ по товщині стінки шару бандажу, використовуючи формулу з [84]:

$$f_c = \frac{1}{b-a} \int_a^b f(r) dr \quad (2.33)$$

де f_c - інтегроване середнє функції f по відрізьку $[a; b]$. Підставляючи залежність (2.32) у (2.33), одержуємо:

$$P_{\theta\theta}^c = \frac{1}{b_2 - a_2} \cdot \frac{a_2^2 P}{b_2^2 - a_2^2} \int_{a_2}^{b_2} \left(1 + \frac{b_2^2}{r^2}\right) dr \quad (2.34)$$

Проводячи інтегрування (2.34), одержуємо :

$$\begin{aligned} P_{\theta\theta}^c &= \frac{a_2^2 P}{b_2^2 - a_2^2} + \frac{a_2^2 P}{b_2^2 - a_2^2} \cdot \frac{b_2}{a_2} = \\ &= \frac{a_2^2 P}{b_2^2 - a_2^2} \cdot \left(1 + \frac{b_2}{a_2}\right) = \frac{a_2 P}{b_2 - a_2} \end{aligned} \quad (2.35)$$

Таким чином, можемо сказати, що найбільш небезпечні кільцеві напруження, які можуть зумовити розрив або тріщини в бандажі, оцінюємо за формулою:

$$P_{\theta\theta}^c = \frac{a_2 \mathcal{P}}{b_2 - a_2} \quad (2.36)$$

Величину P обчислюємо за (2.29) із урахуванням R_M температурних перепадів (2.30), термічних напружень та властивостей матеріалів труби та шару бандажу. Всі ці параметри явно або неявно входять до (2.29) і (2.30). Залежність (2.36) за своєю структурою аналогічна до котельної формули [6] для розрахунку кільцевих напружень матеріалу труби діаметром D , із товщиною стінки δ під дією тиску P

$$\sigma_{\text{кц}} = \frac{DP}{2\delta}, \quad (2.37)$$

яка широко використовується в нормативних документах зі спорудження, проектування та контролю технічного стану магістральних трубопроводів [32]. Записуючи формулу (2.36) у вигляді

$$b_2 - a_2 = \delta = \frac{a_2 \mathcal{P}}{P_{\theta\theta}^c} \quad (2.38)$$

можна визначити товщину шару бандажа, яка запобігає його розтріскуванню або руйнуванню.

Отже, для визначення товщини шару бандажа, що дозволить уникати руйнівних елементів потрібно знати:

- зовнішній радіус труби, на яку наносять бандаж;
- величину P , обчислену за (2.29), (2.30), яка залежить від механічних характеристик матеріалу труби та бандажу $\lambda, \mu, \lambda_1, \mu_1$; лінійних розмірів труби та шару бандажа a_1, b_1, a_2, b_2 , а також температурний перепад ΔT і коефіцієнт лінійного теплового розширення труби та бандажу α і α_1 - критичні значення механічних напружень, якими характеризується матеріал бандажу (наприклад, його межа пружності $P_{\text{пр}}$ або межа текучості P_T [29]). Результати дослідження об'єднаємо і отримаємо можливості:

-оцінити напружений стан роботи сушильного агрегату труби та відповідного шару бандажу за відомими формулами, а саме [32], в яких використовується визначене значення фіктивного тиску P ;

-оцінити характеристики (матеріал і товщина) шару бандажу, закріпленого на трубі, необхідний для його надійного сушильного агрегату.

Для проведення розрахунків на реальних об'єктах необхідно мати інформацію про такі параметри:

-геометричні характеристики елементів конструкції технологічного устаткування в цукровій промисловості;

-геометричні характеристики шару бандажу;

-фізико-механічні властивості матеріалу робочого обладнання та матеріалу, з якого виготовлено бандаж (параметри Ламе, коефіцієнти лінійного температурного розширення, межі текучості або перервності матеріалів);

-температурні режими експлуатації обладнання (характерні температури та їх перепади).

2.3 Математичне моделювання процесу деформування та напруженого стану ПОО складної геометричної конфігурації з урахуванням теплових навантажень

Переглянуті об'єкти на підприємствах цукрової промисловості – це технологічні об'єкти, які з геометричної точки зору є комбінаціями конічних, прямолінійних циліндричних і тороподібних елементів. Схема такого об'єкта може бути представлена на рис .2.2

Характерними особливостями функціонування такого об'єкта, який назвемо технологічним об'єктом цукрової промисловості (ТОЦП), є такі фактори:

- дія високих температур;
- широкий діапазон тисків;
- вібрація діючого обладнання;
- спряження з іншими технологічними об'єктами.

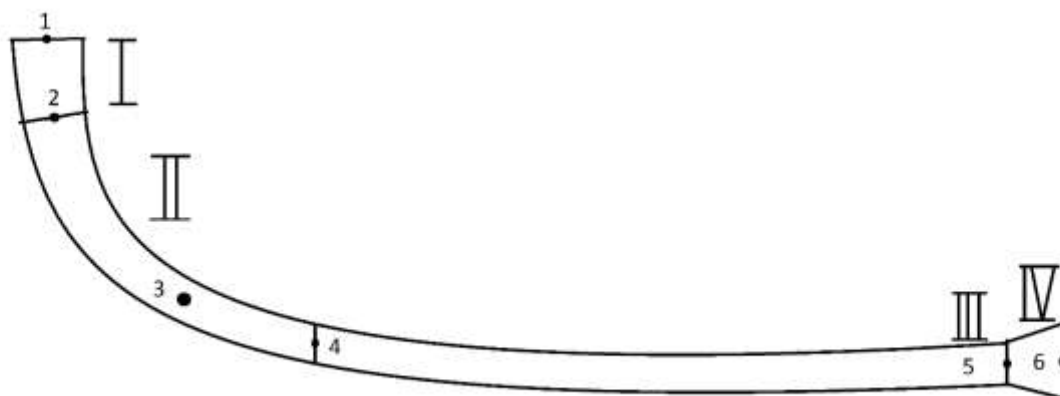


Рисунок 2.2 – Геометрична конфігурація технологічного об'єкта цукрової промисловості.

Математичним апаратом для опису зміни напруженого стану вказаного об'єкта виберемо підхід, який базується на результатах [66] побудови моделі напруженого деформування стану (НДС) об'єкта на основі даних про його просторову конфігурацію в початковий та контрольований моменту часу. За початкове положення обирається геометрична конфігурація ТОЦП, відома з практичних документів: довжини кожного з секторів (на рис. 2.2: I та III – прямолінійні, циліндричні, II- тороподібний; IV- конічний елемент). За контрольоване положення приймемо математичну параметризацію об'єкта, одержану на основі оцінки його переміщень експериментальними методами в точках, зображених на рис. 2.2. Вказане подання є більш загальним і складним, ніж задача, вирішена в п. 2.1

У початковий момент геометрію об'єкта описуємо так.

- Для прямолінійних ділянок I та III:

$$\begin{cases} x = s & s \in [s_0^i; s_1^i], i = 1,3 \\ y = r * \cos\varphi & \varphi \in [0; 2\pi] \\ y = r * \sin\varphi & r \in [R_0^i; R_1^i] \end{cases} \quad (2.39)$$

Тут $[s_0^i; s_1^i]$ характеризують довжину ділянок I і III; $[R_0^i; R_1^i]$ внутрішній і зовнішній радіуси цих ділянок.

- Для тороподібного фрагменту II використовуємо тороїдальну систему координат:

$$\begin{cases} x = (R_0^k + r \cos \varphi) \cos \theta & \varphi \in (0; 2\pi] \\ y = (R_0^k + r \cos \varphi) \sin \theta & r \in [R_0; R_1] \\ z = r \sin \varphi & \theta \in [\varphi_1; \varphi_2] \end{cases}, \quad (2.40)$$

де R_0^k – початковий радіус кривини тороподібної ділянки; $\varphi_1; \varphi_2$ – кути, які визначають початкову та кінцеву точки тороподібного фрагменту ($\varphi_1=0; \varphi_2 = \frac{\pi}{2}$); $R_0; R_1$ – внутрішній та зовнішній радіуси труби.

- Конічну ділянку описуємо так.

$$\begin{cases} x = s & s \in [s_0^1; s_1^1] \\ y = \rho(s; r) \cos \varphi & \varphi \in [0; 2\pi] \\ z = \rho(s; r) \sin \varphi & r \in [R_B^k; R_3^k] \end{cases}, \quad (2.41)$$

Де $[s_0^1; s_1^1]$ – виражає довжину осі конічної ділянки;

$[R_B^k; R_3^k]$ – внутрішній та зовнішній радіуси конічної ділянки:

$$\rho(s; r) = \frac{R_B^1 - R_m^1}{s_1^1 - s_0^1} s + \frac{s_m^1 s_1^1 - R_m^1 s_0^1}{s_1^1 - s_0^1} + r \quad (2.42)$$

де $r \in [0; \delta]$, δ – товщина стінки; $R_B^1; R_m^1$ – внутрішній радіус початкової та кінцевої точки конічного фрагменту трубопроводу. Формули (2.39)-(2.42) повністю визначають поверхню ТОЦП в початковий момент часу.

Параметризацію точок проводимо на основі вимірювань в точках 1-6 переміщень за таким алгоритмом.

Спершу за координатами точок 2 і 3 та 4 - $(x_2, y_2); (x_3, y_3); (x_4, y_4)$ визначаємо новий радіус кривини та значеннями кутів $\varphi_1; \varphi_2$ для деформованої тороїдальної ділянки з системи:

$$\begin{cases} (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 = R^2 \\ (x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2 = R^2 \\ (x_4 - x_0)^2 + (y_4 - y_0)^2 = R^2 \end{cases} \quad (2.43)$$

Звідки:

$$\Delta x_0 = \begin{vmatrix} y_3^2 - y_2^2 + x_3^2 - x_2^2 & -2(y_2 - y_3) \\ y_4^2 - y_3^2 + x_4^2 - x_3^2 & -2(y_3 - y_4) \end{vmatrix}$$

$$\Delta y_0 = \begin{vmatrix} 2(x_2 - x_3) & y_3^2 - y_2^2 + x_3^2 - x_2^2 \\ -2(x_3 - x_4) & y_4^2 - y_3^2 + x_4^2 - x_3^2 \end{vmatrix}$$

$$\text{і } \Delta = \begin{vmatrix} -2(x_2 - x_3) & -2(y_2 - y_3) \\ -2(x_3 - x_4) & -2(y_3 - y_4) \end{vmatrix}$$

Тоді:

$$x_0 = \frac{\Delta x_0}{\Delta} \quad (2.44)$$

$$y_0 = \frac{\Delta y_0}{\Delta} \dots \quad (2.45)$$

Радіус кривини визначаємо з рівняння:

$$R^2 = (x_i - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 \quad (2.46)$$

де x_0, y_0 визначені за (2.44), (2.45), а $(x_i; y_i)$ - будь-яка з точок 2; 3 або 4. Нове значення $\varphi'_1; \varphi'_2$ визначаємо наступним чином: φ'_1 вважається рівним 0, а φ'_2 визначаємо як кут між векторами $\overrightarrow{x_4 x_0}$ та $\overrightarrow{x_2 x_0}$:

$$\cos \varphi'_2 = \frac{(x_4 - x_0)(x_2 - x_0) + (y_4 - y_0)(y_2 - y_0)}{\sqrt{(x_4 - x_0)^2 + (y_4 - y_0)^2} \sqrt{(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2}}. \quad (2.47)$$

Деформовану вісь ділянки I визначаємо як многочлен Ерміта, побудований за умовами:

$$\begin{cases} H_1(x_1) = y_1 \\ H_1(x_2) = y_2 \end{cases} \quad H_1^1(x_2) = \frac{x_0 - x_2}{\sqrt{R^2 - (x_2 - x_0)^2}}; \quad (2.48)$$

а деформовану вісь ділянок III і IV визначаємо як многочлен Ерміта - $H_2(x)$ побудований за умовами:

$$\begin{cases} H_2(x_4) = y_4 \\ H_2(x_4) = \frac{x_0 - x_4}{\sqrt{R^2(x_4 - x_0)^2}} \end{cases} \quad H_2(x_6) = y_6. \quad (2.49)$$

Техніка побудови многочлена Ерміта є відомою [27]. Отже в контрольний момент часу залежності (2.39)-(2.41) набувають такого вигляду:

- для прямолінійних ділянок:

$$\bar{r}_i = \begin{cases} x = S + (\alpha_n(s)\sin\varphi + \alpha_b(s)\cos\varphi)\rho(s; q; r) \\ y = H_i(s) + (\beta_n(s)\cos\varphi + \beta_b(s)\sin\varphi)\rho(s; \varphi; r) , \\ z = (\gamma_n(s)\sin\varphi + \gamma_b(s)\cos\varphi)\rho(s; \varphi; r) \end{cases} \quad (2.50)$$

де $i=1,3$ – номери прямолінійних ділянок; $\vec{r}=(s; H(s); 0)$ - параметризація деформованої $(\alpha_4, \beta_4, \gamma_4)$; $(\alpha_6, \beta_6, \gamma_6)$ - компоненти векторів нормалі та бінормалі до деформованої осі. Якщо $\vec{r}=(s; H(s); 0)$, де $H_i(s)$ - побудований за умови (2.48), а (2.49) – многочлени Ерміта, то $\alpha_n, \beta_n, \gamma_n$ – одиничні вектори, що відповідають вектору з координатами:

$$\vec{n} = \left\{ -\frac{H_i''(s)H_i'(s)}{(1+H_i'(s)^2)^2}; \frac{H_i''(s)}{(1+H_i'(s)^2)^2}; 0 \right\}, \quad (2.51)$$

а $\alpha_6; \beta_6; \gamma_6$ – одиничні вектори, що відповідають вектору з координатами:

$$B = \left\{ 0; 0; \frac{H_i''}{(1+H_i'^2(s))^{3/2}} \right\}, \quad (2.52)$$

якщо не враховуються деформації перерізів ТОЦП, то $\rho=(s, \varphi, r)=v$ для прямолінійних ділянок;

-для тороподібних ділянок:

$$\bar{r} = \begin{cases} x = (R + r\cos\alpha)\cos\theta & \varphi \in (0; 2\pi] \\ y = (R + r\cos\alpha)\sin\theta & r \in [R_1^g; R_2^g] , \\ z = r\sin\varphi & \varphi \in (\varphi'_1; \varphi'_2) \end{cases} \quad (2.52)$$

де R визначається з (2.46), $\varphi'_1; \varphi'_2$ з (2.47); $R_1^g; R_2^g$ -внутрішній і зовнішній радіус деформованої труби. Якщо ці радіуси не змінюються, то вони приймаються такими ж, як і в (2.40);

- для конічної ділянки:

$$\bar{r} = \begin{cases} x = s + (x_n(s)\sin\varphi + \alpha_b(s)\cos\varphi)\rho(s; r) \\ y = H_2(s) + (\beta_n(s)\sin\varphi + \beta_b(s)\cos\varphi)\rho(s; r) \\ z = (\gamma_n(s)\sin\varphi + \gamma_b(s)\cos\varphi)\rho(s; r) \end{cases} \quad (2.53)$$

де $\rho(s; r)$ визначається з урахуванням деформації перерізу. Якщо такі деформації не враховувати, то $\rho(s; r)$ визначаємо за (2.42).

Із урахуванням (2.50) і (2.51) формула (2.53) набуває вигляду:

$$\bar{r} = \begin{cases} x = s + \alpha_4(s)\sin\varphi \rho(s; r) \\ y = H_2(s) + \beta_n(s)\sin\varphi \rho(s; r) \\ z = \gamma_b(s)\cos\varphi \beta(s; r) \end{cases} \quad (2.54)$$

а (2.49) набуває вигляду:

$$\bar{r}_1 = \begin{cases} x = s + \alpha_n(s)\sin\varphi r \\ y = H_1(s) + \beta_4(s)\sin\varphi r \\ z = \gamma_b(s)\cos\varphi r \end{cases} \quad (2.55)$$

Задання залежностей (2.39)-(2.55) дозволяє визначити зміну НДС ТОЦП за такою послідовністю [66, 74, 84].

1. Визначаються локальні базиси в кожній із точок у початковий момент часу:

$$\overline{\Xi}_1^0 = \frac{\partial \overline{r}_0}{\partial x_1}; \quad x_1 = s; \quad x_2 = \varphi; \quad x_3 = r, \quad (2.56)$$

\overline{V}_0 -для відповідних конфігурацій визначаються за (2.39); (2.40); (2.41) шляхом прямого диференціювання відповідно.

В контрольний момент часу

$$\overline{\Xi}_1^k = \frac{\partial \overline{r}}{\partial x_1}; \quad x_1 = s; \quad x_2 = \varphi; \quad x_3 = r; \quad (2.57)$$

де $\vec{\Gamma}$ для відповідних конфігурацій ділянок визначаємо за формулами (2.40) (або (2.55)); (2.52) і (2.53) (або (2.54)). Важливо лише дотримуватись відповідності між видами ділянок: прямолінійні; тороподібні та конічні в початковий та контрольний моменти.

За знайденими $\vec{\Xi}_1^0, \vec{\Xi}_1^k$ для кожного з типів ділянок визначаються компоненти метричних тензорів, тензорів деформацій та зміна компонент тензора напружень за схемою (2.18) – (2.24)

Слід зазначити, що можна провести уточнений розрахунок компонент тензора напружень, який дає змогу взяти до уваги особливості деформованого об'єкта при різних температурах середовища. Зокрема, якщо тіло деформувалось за сталої температури T_0 (а різні температурні режими характерні для функціонування ТОЦП), то поява деформацій зумовлює зміну (хоча і незначну) температури:

$$T - T_0 = - \frac{(3\lambda + 2\mu)\alpha T_0}{\rho c} I_1(\varepsilon_{ij}) , \quad (2.58)$$

де λ, μ -коєфіцієнти Ламе, α - коєфіцієнт лінійного теплового розширення, $I_1(\varepsilon_{ij})$ - визначений за (2.24) перший інваріант тензора деформацій; T_0 –початкова температура тіла, ρ -густина матеріалу; c -питома теплоємність матеріалу при сталих деформаціях. Такий підхід є вмотивований у тих випадках, коли тіло не зазнає в процесі деформування значних температурних перепадів. При цьому для обчислення компонент тензора напружень замість залежностей (2.24) використовуємо аналогічну за структурою:

$$\sigma_{ij} = \left[\lambda + \frac{((3\lambda + 2\mu)\alpha T_0)}{\rho c} \right] I_1(\varepsilon) g_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} . \quad (2.59)$$

Формула (2.59) є більш загальною для використанні для оцінювання напружень, що виникають в умовах неізотермічних процесів і характерні для експлуатації ТОЦП. Проведені модельні розрахунки показують, що найбільш небезпечними з погляду виникнення критичних деформацій та напружень є зони спряження конічної та прямолінійної ділянки.

Наводимо результати розрахунку для реального технологічного об'єкта цукрової промисловості за переміщеннями, визначеними експериментально для шести точок, представлені на рис. 2.2

$$S_{x1}=12,48466\text{мкм}; \quad S_{y1}=22,06360\text{мкм}; \quad S_{z1}=2,96580\text{мкм};$$

$$S_{x2}=8,76840\text{мкм}; \quad S_{y2}=15,63601\text{мкм}; \quad S_{z2}=1,65890\text{мкм};$$

$$S_{x3}=5,97056\text{мкм}; \quad S_{y3}=11,61958\text{мкм}; \quad S_{z3}=0,35253\text{мкм};$$

$$S_{x4}=6,34565\text{мкм}; \quad S_{y4}=5,68640\text{мкм}; \quad S_{z4}=4,32160\text{мкм};$$

$$S_{x5}=6,77088\text{мкм}; \quad S_{y5}=1,70909\text{мкм}; \quad S_{z5}=7,73550\text{мкм};$$

$$S_{x6}=3,72130\text{мкм}; \quad S_{y6}=5,91470\text{мкм}; \quad S_{z6}=7,22318\text{мкм};$$

Напружено-деформований стан досліджуваного тіла за результатами розрахунків за наведеним алгоритмом характеризуємо наступними компонентами:

1) прямолінійна ділянка I

$$\varepsilon_{11} = 5.11 \cdot 10^{-4}; \quad \sigma_{11} = 145.53 \text{МПа};$$

$$\varepsilon_{12} = 2.55 \cdot 10^{-4}; \quad \sigma_{22} = 62.31 \text{МПа};$$

$$\varepsilon_{13} = 8.5 \cdot 10^{-6}; \quad \sigma_{33} = 0.276 \text{МПа};$$

$$\sigma_{12} = 41.57 \text{МПа};$$

$$\sigma_{13} = 1.387 \text{МПа};$$

2) тороподібна ділянка II

$$\varepsilon_{11} = 1.19 \cdot 10^{-3}; \quad \sigma_{11} = 36.98 \text{МПа};$$

$$\varepsilon_{12} = 6.65 \cdot 10^{-4}; \quad \sigma_{22} = 44.11 \text{МПа};$$

$$\varepsilon_{13} = 1.99 \cdot 10^{-5}; \quad \sigma_{33} = 0.519 \text{МПа};$$

$$\sigma_{12} = 107.36 \text{МПа};$$

$$\sigma_{13} = 3.217 \text{МПа};$$

3) прямолінійна ділянка III

$$\varepsilon_{11} = 2.167 \cdot 10^{-6}; \quad \sigma_{11} = 70.612 \text{МПа};$$

$$\sigma_{22} = 6.786 \text{МПа};$$

$$\sigma_{33} = 40.043 \text{МПа};$$

4) конічна ділянка IV

$$\varepsilon_{11} = 8.2 \cdot 10^{-4}; \quad \sigma_{11} = 231.77 \text{МПа};$$

$$\varepsilon_{12} = 4.09 \cdot 10^{-4}; \quad \sigma_{22} = 99.17 \text{МПа};$$

$$\varepsilon_{13} = 1.63 \cdot 10^{-5}; \quad \sigma_{33} = 0.627 \text{МПа};$$

$$\sigma_{12} = 65.94 \text{МПа};$$

$$\sigma_{13} = 2.631 \text{МПа};$$

Отже, найвищі значення напружень відстежуємо на ділянках I – повздовжні компоненти, II – суттєвий рівень зсувних напружень, ділянки III і IV мають підвищений рівень повздовжніх та зсувних напружень.

2.4 Висновки по другому розділу

Для вирішення другої задачі дослідження формалізовано клас задач технічної діагностики та контролю, некоректних із точки зору математики, які розв'язуються з

допомогою побудованого регуляризуючого алгоритму. Наведено розв'язання задачі щодо оцінювання зміни напружено-деформованого стану модельного об'єкта з реальною геометричною конфігурацією за даними про переміщення точок поверхні. Побудовано розв'язання задачі про НДС технологічної труби, яка в процесі експлуатації підлягає бандажуванню на основі розв'язання задачі Ламе для двошарової труби. Досліджено зміну напружено-деформованого стану в реальному технологічному об'єкті цукрової промисловості, що в процесі експлуатації зазнає значних технологічних впливів та має складну просторову конфігурацію осі. Вивчено особливості зміни шести компонентів тензору напружень за переміщеннями шести точок поверхні досліджуваного ТОЦП.

Результати досліджень, виконаних у цьому розділі даної дисертації, представлено у працях, що відповідають таким номерам [27, 29, 25, 30, 31, 111].

РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ ВПЛИВІВ НА ЕЛЕМЕНТИ КОНСТРУКЦІЇ ПОО

3.1. Модель обтікання елементів конструкції ПОО – лопатей вентиляторів.

Аналізуючи роботу технологічного обладнання для виробництва цукру, висвітлену у джерелах [52, 103], встановлено, що конструктивна схема двобарабанної сушильно-охолоджувальної установки містить два технологічних вентилятори і сушильний та охолоджувальний барабани, елементами конструкції яких є лопаті та лопатки – об'єкти, що в процесі експлуатації зазнають дії значних аеродинамічних навантажень нестационарного характеру. Це спричинює зміни геометричної конфігурації вказаних об'єктів, а, відтак, і до зміни технологічних показників обладнання – ефективності вентиляторів, кількості поданої в барабани сировини, якості кінцевого продукту. Зміну конфігурації лопатей вентиляторів і лопаток барабанів фіксують під час регулярних технічних оглядів, проте питання оцінки зміни геометрії на ефективність функціонування обладнання залишається недостатньо вивченим. Крім того, практично не застосовують методи прямого аеродинамічного розрахунку профілів [102], серед яких відомими є методи дискретних вихорів [12] і інтегральних рівнянь [94], хоча вони дають змогу не тільки розрахувати компоненти швидкості, але й всі існуючі аеродинамічні характеристики профілів лопатей і лопаток. Зазначені методи широко застосовують у процесі проектування та визначення ресурсу авіаційної техніки, нагромаджено значний досвід у створенні та реалізації моделей різних типів обтікання. У пропонованій роботі представлено математичну модель процесу обтікання та розрахунковий алгоритм контролю аеродинамічних характеристик лопатей і лопаток конструктивних елементів двобарабанної сушильно-охолоджувальної установки з урахуванням зміни геометрії в процесі експлуатації, що зумовлено зношенням матеріалу, нестационарним характером технологічних процесів тощо. Задачу оцінки аеродинамічних характеристик елементів конструкції двобарабанної сушильно-охолоджувальної установки вирішуємо так.

1. Вибір системи координат

З профілем лопаті пов'язуємо криволінійну систему координат, у якій параметричне подання профілю лопаті задається шляхом введення функції його геометрії і [32] зображено на рисунку 3.1:

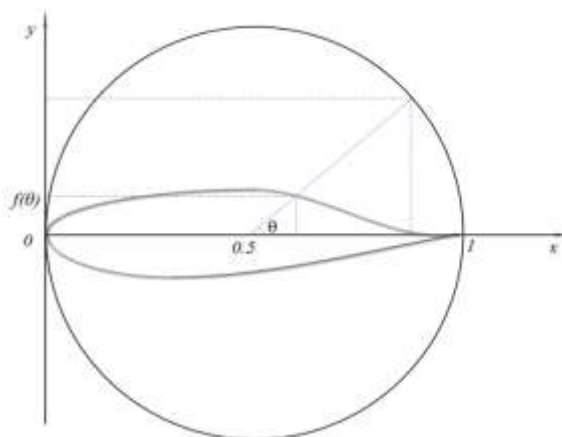


Рисунок 3.1 –Профіль лопаті в системі координат.

$$\begin{cases} x = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \theta = \cos^2 \frac{\theta}{2} \\ y = f(\theta) \end{cases}, \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi. \quad (3.1)$$

Функція $f(\theta)$ задає геометричну конфігурацію профілю лопаті, вона може бути задана як аналітично (еліпс, фрагменти кола, параболи тощо), так із використанням певних інтерполяційних процедур у тому випадку, коли профіль лопаті задано координатами певного набору точок на поверхні лопаті. (θ_i, y_i)

Вказана функція повинна враховувати такі властивості профілів лопатей та лопаток:

- можливість встановлення взаємно однозначного співвідношення між точкою на профілі та кутом θ ;
- мала товщина профілю порівняно з його довжиною;
- наявність гострих кромek на задній межі профілю.

Далі розглядаємо лише еліптичні профілі, що відповідає конструкції лопатей ПОО.

Вважаємо, що профіль лопаті має еліптичну конфігурацію:

$$\begin{cases} x = \cos^2 \frac{\theta}{2} \\ y = \varepsilon_1 \sin(\theta) \end{cases}, \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi, \quad (3.1a)$$

проте в процесі свого функціонування верхня або нижня частина лопаті зношується, модельно можна розглянути наступний випадок:

$$\begin{cases} x = \cos^2 \frac{\theta}{2} \\ y = \varepsilon_1 \sin(\theta), \quad 0 \leq \theta \leq \pi \\ y = \varepsilon_2 \sin(\theta), \quad \pi \leq \theta \leq 2\pi. \end{cases} \quad (3.1b)$$

Вибір системи координат у вигляді (3.1) дає змогу отримати однозначне відображення між кутом θ і точками на поверхні лопаті, що є важливим моментом при чисельному розв'язку задачі для випадків, коли профіль не має викривлення вздовж осі – еліптичні, кругові профілі, профілі з двох еліптичних поверхонь різного ексцентриситету тощо.

2. Інтегральне рівняння Фредгольма II роду для обчислення дотичної компоненти швидкості газового потоку на поверхні профілю.

При виведенні інтегрального рівняння використовуємо відому з курсу математичного аналізу формулу Гріна [45]:

$$\iiint_G (u\Delta v - v\Delta u) d\tau = \iint_{\Sigma} \left(u \frac{\partial v}{\partial n} - v \frac{\partial u}{\partial n} \right) d\Sigma, \quad (3.2)$$

де u, v – деякі двічі неперервно диференційовані функції; G і Σ – відповідно тривимірна область та поверхня, що її обмежує; Δv – оператор Лапласа в обраній системі координат; $\frac{\partial u}{\partial n}$ – нормальна похідна відповідної функції, яку визначаємо так:

$$\frac{\partial f}{\partial n} = \nabla f \cdot \vec{n}, \quad (3.3)$$

де ∇f – оператор градієнта функції f ; \vec{n} – нормаль до відповідної поверхні

Інтегральне рівняння Фредгольма II роду встановлюється з використанням формули (3.2). При цьому функції u та v вибираються так:

а) $u = \varphi$, де φ – потенціал потоку [84], функція, що володіє властивістю:

$$\vec{V} = \nabla \varphi, \quad (3.4)$$

де \vec{V} - вектор швидкості, ∇ - оператор градієнта.

В декартовій системі координат залежність (3.4) надається у вигляді:

$$\vec{V} = (u, v, w) = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}; \frac{\partial \varphi}{\partial y}; \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right). \quad (3.5)$$

$$б), v = \frac{1}{|\vec{r}|},$$

де $|\vec{r}| = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}$ - відстань між двома точками, а $|\vec{r}|$ - вектор переміщення від точки $M(x; y; z)$ до точки $M_0(x_0; y_0; z_0)$.

З курсу гідромеханіки [84] відомо, що φ - гармонічна функція, для якої за означенням виконується рівняння Лапласа:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0, \quad (3.6)$$

Застосовуючи формулу Гріна (3.2) до функцій φ і $\frac{1}{|\vec{r}|}$ та проводячи перехід до контурних інтегралів із урахуванням співвідношень (3.6) для вказаних функцій, можна одержати інтегральне рівняння Фредгольма II роду відносно дотичної до поверхні профілю лопаті компоненти швидкості газового потоку [12, 102]:

$$V_\theta(\theta_0) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} V_\theta(\theta) K(\theta; \theta_0) d\theta + 2 \frac{\partial \varphi}{\partial \theta}(\theta_0), \quad (3.7)$$

$V_\theta = \frac{\partial \varphi}{\partial \theta}$; $K(\theta; \theta_0)$ - ядро інтегрального рівняння, яке записуємо у вигляді:

$$K(\theta, \theta_0) = \frac{[y(\theta) - y(\theta_0)]x'(\theta_0) - [x(\theta) - x(\theta_0)]y'(\theta_0)}{(x(\theta) - x(\theta_0))^2 + (y(\theta) - y(\theta_0))^2}, \quad (3.8)$$

де $x(\theta), x(\theta_0), y(\theta), y(\theta_0)$ - обчислені у відповідних точках за формулами (3.1)

компоненти ;

$$\phi(\theta_0) = V_\infty (x(\theta_0) \cos \alpha + y(\theta_0) \sin \alpha) \quad (3.9)$$

де V_∞ - швидкість газового або рідинного потоку, що обтікає лопать, у зоні незбуреного потоку на достатньо великій відстані від неї; α - кут атаки профілю (кут між віссю профілю та напрямком газового потоку).

Важливим моментом, який дозволяє одержати зручну для практичних розрахунків методику оцінювання аеродинамічних характеристик, є обґрунтований перехід від тривимірної задачі (3.2) до одновимірної (3.7). Під час розв'язання практичних задач у допущенні про стаціонарність газового потоку приймаємо умову виконання постулату Чаплигіна-Жуковського: $V_\theta(0) = V_\theta(2\pi) = 0$, величина V_∞ приймається рівною 1. Тобто, всі одержані числові результати масштабовані за швидкістю потоку, спрямованого на лопать. Визначення шляхом розв'язання рівняння (3.7) дотичної компоненти V_θ достатнє для оцінки всіх аеродинамічних характеристик, оскільки компонента V_θ повністю визначає вектор швидкості \vec{V} через ту обставину, що нормальна до поверхні лопаті компонента газового потоку дорівнює нулю (умова непротікання рідини через поверхню профілю). Після визначення V_θ обчислюємо фізичну компоненту швидкості [102]:

$$U_\theta = \frac{V_\theta}{\sqrt{x'(\theta)^2 + y'(\theta)^2}}, \quad (3.10)$$

Після того обчислюємо наступні аеродинамічні характеристики:

- коефіцієнт тиску $C_p(\theta)$

$$C_p(\theta) = 1 - \frac{V_\theta(\theta)^2}{x'(\theta)^2 + y'(\theta)^2} = 1 - U_\theta^2; \quad (3.11)$$

- коефіцієнт підйимальної сили:

$$C_y = \int_0^{2\pi} C_p(\theta) x'(\theta) d\theta; \quad (3.12)$$

- коефіцієнт індуктивного опору:

$$C_x = - \int_0^{2\pi} C_p(\theta) y'(\theta) d\theta; \quad (3.13)$$

- коефіцієнт моменту відносно попередньої кромки профілю:

$$C_{m_z} = \int_0^{2\pi} C_p(\theta)x(\theta)x'(\theta)d\theta + \int_0^{2\pi} C_p(\theta)y(\theta)y'(\theta)d\theta; \quad (3.14)$$

Отже, модель для визначення всіх аеродинамічних характеристик побудовано.

3.2. Чисельний метод розв'язання задачі визначення аеродинамічних характеристик елементів конструкції ПОО

З метою чисельного розв'язання задачі до інтегрального рівняння (3.7) застосуємо формулу трапецій [45] для чисельного розрахунку інтегралу на розбитті за координатою:

$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{2N}; \theta_i = \Delta\theta(i - 1), i = 1, 2, \dots, 2N + 1.$$

З урахуванням виконання постулату Чаплигіна-Жуковського

$$V_\theta(\theta_1) = V_\theta(\theta_{2N+1}) = 0$$

одержуємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь[94]:

$$V_\theta(\theta_j) = \frac{1}{N} \sum_{i=2}^{2N} V_\theta(\theta_i) K(\theta_i, \theta_j) + 2 \frac{\partial\phi}{\partial\theta}(\theta_i) \quad j=2, 3, \dots, 2N \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial\phi}{\partial\theta} = V_\infty(x'(\theta)\cos\alpha + y'(\theta)\sin\alpha). \quad (3.16)$$

Ядра інтегральних рівнянь розраховуються за формулами:

$$K(\theta_i, \theta_j) = K_{ij} = \frac{(y_i - y_j)x'_j - (x_i - x_j)y'_j}{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}, i \neq j \quad (3.17)$$

$$K(\theta_i, \theta_i) = K_{ii} = \frac{1}{2} \frac{x'_i y''_i - y'_i x''_i}{(x'_i)^2 + (y'_i)^2}, i = j. \quad (3.18)$$

Слід зазначити, що формулу (3.18) одержуємо з формули (3.17) застосуванням до останньої правила Лопітала за умови $\theta_i = \theta_j$. Окрім того, існування єдиного розв'язку системи (3.15) контролюється перевіркою умови нерівності, яка має дорівнювати нулю визначника матриці цієї системи. І це дозволяє використати при побудові компонентів матриці системи (3.15) саме формули (3.17)-(3.18) (на відміну від підходу, прийнятого в [45], згідно з яким встановлюються додаткові умови на ядра інтегрального рівняння (3.7), пов'язані з існуванням та єдиністю розв'язку). Оскільки

система (3.15) за достатньо малих кроків розбиття під час переходу від (3.7) до (3.15) як завгодно точно наближає значення інтегралу в (3.7), то існування нетривіального розв'язку гарантує виконання умови нерівності нулю визначника системи (3.15). Розрахункові формули (3.10) - (3.14) записуємо з використанням формул чисельного розрахунку інтегралів і встановлених раніше співвідношень (3.1), які задають геометрію профілю:

$$C_p(\theta_i) = 1 - \frac{V_\theta(\theta_i)^2}{x'(\theta_i)^2 + y'(\theta_i)^2}, \quad (3.19)$$

$$C_x = -\sum_{i=1}^{2N} C_p(\theta_i) y'(\theta_i) \frac{\pi}{N}, \quad (3.20)$$

$$C_y = -\sum_{i=1}^{2N} C_p(\theta_i) \frac{1}{2} \sin \theta_i \frac{\pi}{N}, \quad (3.21)$$

$$C_{mz} = \sum_{i=1}^{2N} C_p(\theta_i) x(\theta_i) x'(\theta_i) \frac{\pi}{N} + \sum_{i=1}^{2N} C_p(\theta_i) y(\theta_i) y'(\theta_i) \frac{\pi}{N} \quad (3.22)$$

Для розрахунків значення числа $\pi = 3,14159265358$.

З метою практичної реалізації наведеної математичної моделі проведено тестові розрахунки для еліптичних профілів з різним ексцентриситетом. Розроблено алгоритм розв'язання інтегрального рівняння, який базується на використанні для розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь методу Гауса з вибором головного елемента по стовпчиках для $N = 23$ і $N = 47$ розрахункових точок по лопаті. При цьому подання (3.1) записується у вигляді:

$$\begin{cases} x = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \theta \\ y = \varepsilon_1 \sin \theta \\ y = \varepsilon_2 \sin \theta \end{cases} \quad (3.23)$$

У поданні (3.23) припускаємо, що форма профілю лопаті може бути різною на верхній та нижній поверхнях лопаті, тому значення ε_1 приймаємо для значень $0 \leq \theta \leq \pi$, тоді як значення ε_2 - при $\pi \leq \theta \leq 2\pi$. Якщо розглядається еліптичний профіль, то $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$. Результати розрахунків для значень $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,08 \div 0,2$, $N = 23$, $N = 47$, які відповідають тонким профілям лопатей і лопаток, показали практично точне співпадання з результатами розрахунків за методом дискретних вихорів [43] і

методом комфортного відображення [46] при різних значеннях кута атаки: $\alpha = 0 \div 10$. Це підтверджуємо графіками, наведеними на рис.3.2, на якому криві розподілу швидкості, одержані з використанням розробленої методики розрахунку і вказаних вище двох методів, співпадають.

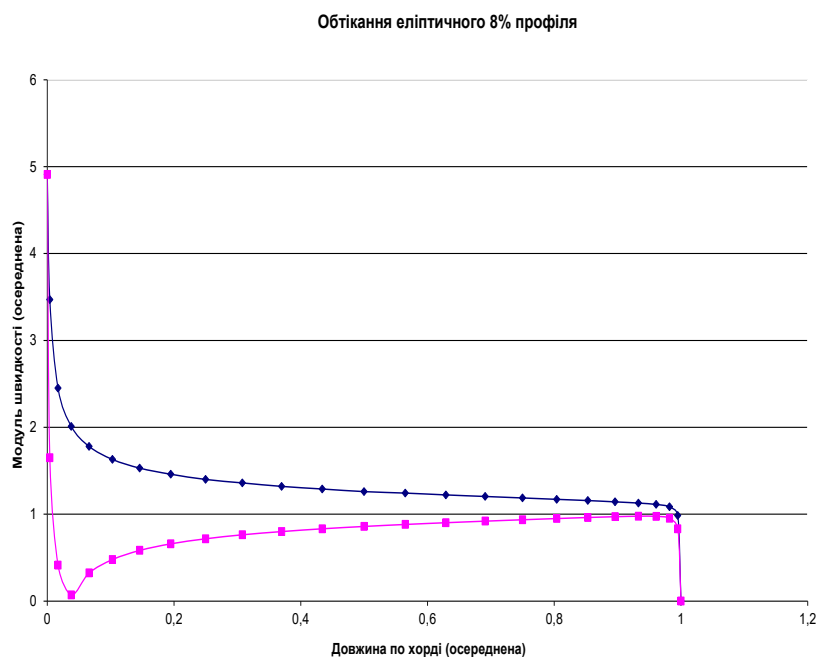


Рисунок.3.2. – Розподіл швидкості поверхнею еліптичного профілю.

Крім того, для значення кута атаки $\alpha = 0$ одержано відомий теоретичний результат: $C_y = C_{mc} = 0$ для еліптичного профілю ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2$). Таким чином, доведено коректність обчислювальної процедури та можливість використання відповідного програмного забезпечення для розрахунку аеродинамічних характеристик лопатей технологічного обладнання для осушення цукру, яке тривалий час перебуває в експлуатації.

Обчислення здійснювались для фіксованого кута атаки $\alpha = 10$ та $\varepsilon_1 = 0.05$ за різних значень ε_2 , що моделює зміну аеродинамічних характеристик лопатей через зношення матеріалу. Результати обчислень наведені в таблиці 3. 1 [32].

Результати розрахунків показують, що значення аеродинамічних характеристик залежать від початкової форми профілю та характеру зносу. Крім того, досліджено залежність аеродинамічних характеристик залежно від

ексцентриситету еліпса при значенні кута атаки $\alpha = 10$, підтверджено наявність критичних точок обтікання та характер зміни параметрів течії [102].

Таблиця 3.1 –Зміна аеродинамічних характеристик в процесі зносу лопатей

ε_2	C_x	C_y	C_{mz}
0,048	-0,22803	1,255	0,36
0,044	-0,25816	1,3977	0,425
0,040	-0,30050	1,56443	0,5028
0,036	-0,35728	1,765	0,5938
0,032	-0,4346	2,0154	0,7063
0,028	-0,54488	2,3378	0,7736
0,024	-0,70997	2,77105	1,0433
0,02	-0,97416	3,3903	1,31699
0,016	-1,45381	4,38301	1,75319
0,012	-2,65	6,47	3,75

Результати наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2. – Залежність аеродинамічних параметрів лопаті при різних значеннях малої напівосі лопаті

$\varepsilon_1 = \varepsilon_2$	C_x	C_y	C_{mz}
0,05	-0,20813	1,191	0,3352
0,044	-0,21581	1,209	0,3367
0,04	-0,2305	1,253	0,35754
0,036	-0,2704	1,39	0,42115
0,030	-0,82016	2,96	1,139
0,029	-1,7227	1,78	1,932
0,028	-16,828	16,901	7,55
0,026	-0,1017	-2,83	-1,54
0,02	-0,07319	-0,426	-0,58
0,01	-0,00897	0,0052	0,0029

За результатами розрахунків можна зробити такі висновки: розроблений чисельний алгоритм дозволяє враховувати та моделювати обтікання при критичних значеннях кута атаки (ріст значень характеристик в даному випадку при ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,028$), а також зникнення підйимальної сили, обертового моменту та опору при малих товщинах еліпса (фактично, йдеться про обтікання відрізка нульової товщини).

Вказані розрахунки можна проводити при різних значеннях кута α , а також малих півосей [32].

Достовірність одержаних результатів підтверджуємо проведенням порівняльних розрахунків за різними відомими моделями. Крім того, проведено розрахунки еліптичних профілів за умови нульового кута атаки, – у результаті чого одержано відомі співвідношення: $C_x = C_y = C_{mc} = 0$. Усі одержані результати стосуються випадків, коли профіль лопаті задається аналітично у вигляді (3.23). Проте в реальному випадку координати профілю лопаті задаються у вигляді таблично заданої функції (x_i, y_i) $i = 1, 2, \dots, N$, де N - кількість контрольних точок за профілем лопаті. Необхідно встановити відповідність між вказаними координатами та кутом θ . Координати x_i дає змогу однозначно відтворити залежність $x = x(\theta)$ і визначити координати θ_i відповідних точок:

$$x_i = \cos^2 \frac{\theta_i}{2} \Rightarrow \theta_i = 2 \arccos \sqrt{x_i}, \quad (3.24)$$

Водночас, буде витримано відповідний масштаб. Залежність $y(\theta)$ відновлюється або з використанням апарату інтерполяції (інтерполяційного кубічного згладжуючого сплайну [41], або шляхом моделювання профілю лопаті еліптичною конфігурацією за методом найменших квадратів з використанням координат точок, визначених експериментально (x_i, y_i) :

$$Ax^2 + By^2 = 1, \quad (3.25)$$

$$\text{де } A = \frac{1}{a^2}; B = \frac{1}{b^2},$$

$$A = \frac{\sum y_i^4 \sum x_i^2 - \sum y_i^2 \sum x_i^2 y_i^2}{\sum x_i^4 \sum y_i^4 - (\sum x_i^2 y_i^2)^2}, \quad (3.26)$$

$$B = \frac{\sum x_i^4 \sum y_i^2 - \sum x_i^2 y_i^2 \sum x_i^2}{\sum x_i^4 \sum y_i^4 - (\sum x_i^2 y_i^2)^2}. \quad (3.27)$$

Варто зазначити, що використання підходу (3.25) – (3.27) дозволяє вирішити проблему регуляризації значень першої та другої похідної, які входять у (3.17) – (3.18) (друга похідна виникає після застосування правила Лопітала у випадку $\theta = \theta_0$), оскільки використання інтерполяційних кубічних сплайнів без згладжування для

даних, визначених з певною похибкою, призводить до суттєвих похибок саме при визначенні значень першої та другої похідної [81]. Проблемою під час використання (3.25) – (3.27) є оцінювання похибки при наближенні функції, яка задається таблично (x_i, y_i) залежністю (3.24). Для ефективного використання наведених методів розрахунку параметрів обтікання профілю лопаті необхідно вирішити проблему встановлення координат (x_i, y_i) апаратними засобами, оскільки при використанні інтегральних рівнянь Фредгольма 2-го роду геометричні характеристики профілю є основними вхідними даними задачі. Крім цього, важливого значення набуває точність визначення вказаних координат, оскільки елементи конструкції технологічного обладнання для виробництва цукру мають невеликі лінійні розміри. В цьому випадку необхідно забезпечувати достатню гладкість функцій $x(\theta)y(\theta)$ які моделюють конфігурацію досліджуваних профілів.

3.3 Дослідження аеродинамічних характеристик лопаток елементів конструкцій ПОО та оцінка точності методу

Проведено розрахунки дотичної компоненти швидкості до профілю лопатки, який виявив повний збіг з результатами, одержаними за методом дискретних вихорів [12, 13] і за методом конформного відображення [45], що підтверджує доцільність використання методу інтегрального рівняння Фредгольма II роду для проведення практичних розрахунків.

Проведено розрахунок з метою вивчення впливу зміни геометрії лопатки на аеродинамічні характеристики. Досліджено вплив зміни геометрії нижньої частини лопатки на аеродинамічні характеристики профілю (рис. 3.3), водночас досліджено як зношення нижньої поверхні (зменшення величини малої нижньої піввісі), так і збільшення цієї піввісі, що може означати накопичення сторонніх речовин на нижній поверхні лопатки – при фіксованій верхній піввісі $\varepsilon_1 = 0,08$ величина ε_2 змінювалась в межах від 0,03 до 0,13 [67].

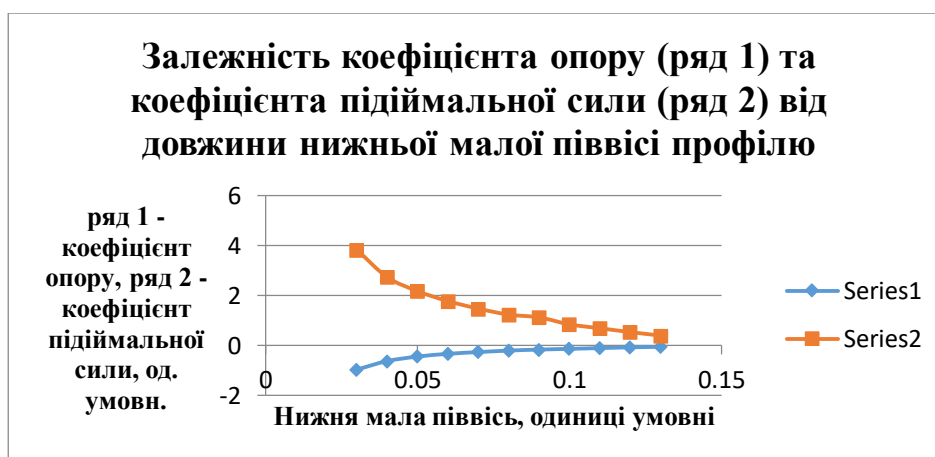


Рисунок. 3.3 – Залежність коефіцієнтів опору та підйимальної сили від нижньої малої піввісі профілю, верхня мала піввісь -0.08 , кут атаки 10 град

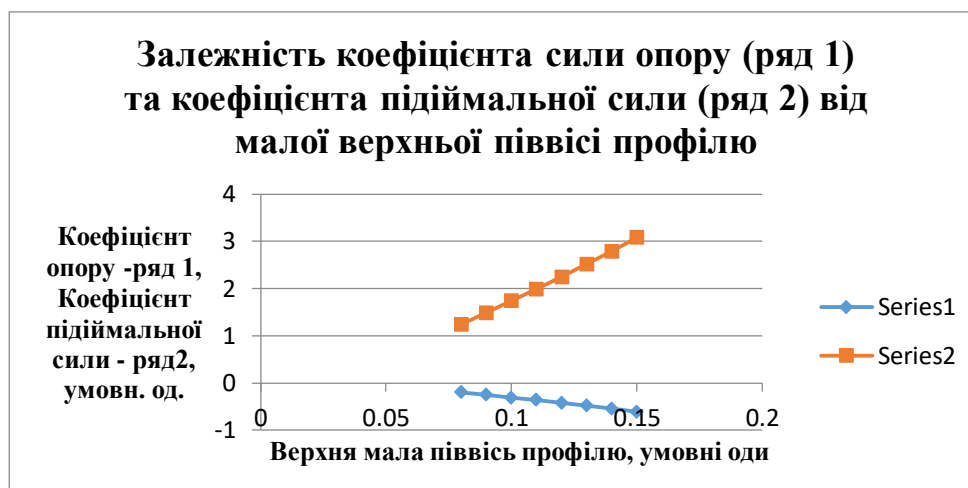


Рисунок 3.4 – Залежність коефіцієнтів опору та підйимальної сили від верхньої малої піввісі профілю, нижня мала піввісь -0.08 , кут атаки 10 град [67]

Аналогічно вивчено залежність аеродинамічних характеристик від збільшення верхньої піввісі лопатки (нагромадження сторонніх речовин на верхній поверхні лопатки). Цю залежність зображено на рисунку 3.4 [67].

Вивчаючи обтікання симетричного еліптичного профілю встановлено, що аеродинамічні коефіцієнти, симетричні для симетричних кутів $(-\alpha; +\alpha)$. Для коефіцієнту опору – це осьова симетрія, а для коефіцієнту підйимальної сили – центральна. Цю залежність можна побачити на рисунку (3.5.) Крім того, проведені

розрахунки засвідчили, що за умови $\alpha = 0$ усі аеродинамічні характеристики рівні нулю, що добре узгоджується з відомими теоретичними положеннями.

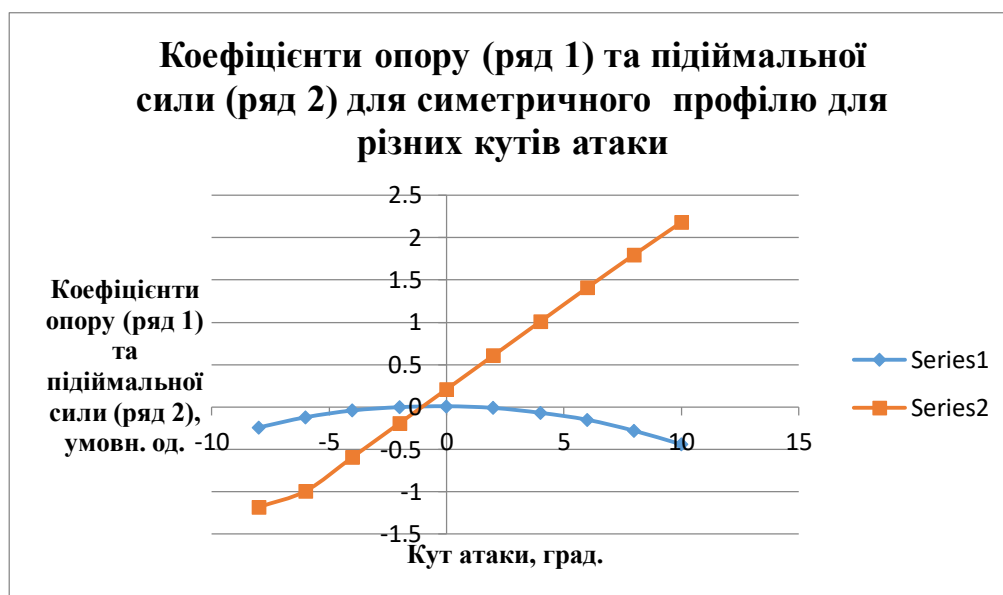


Рисунок 3.5 – Залежність коефіцієнтів опору та підіймальної сили від кута атаки для симетричного профілю – еліпса з малою піввіссю 0.08 [67]

Вказана симетрія втрачається при несиметричних профілях. На рисунку 3.6 наведено аеродинамічні характеристики для несиметричного профілю ($\varepsilon_1 = 0,08$, $\varepsilon_2 = 0,05$) при різних кутах атаки з діапазону (-10; 10).

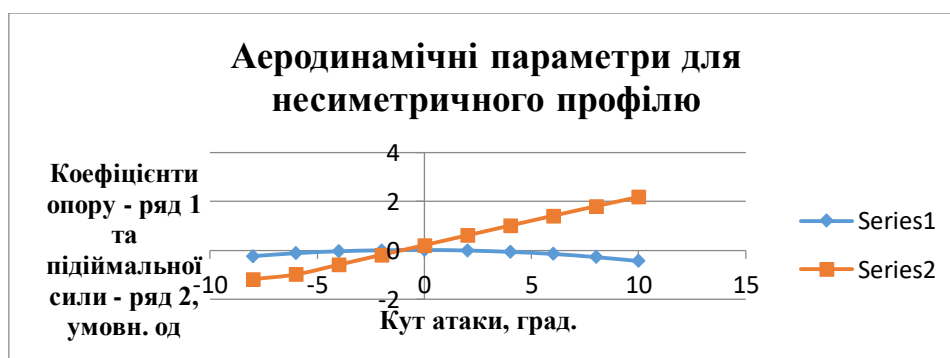


Рисунок 3.6 – Залежність коефіцієнтів опору та підіймальної сили від кута атаки для профілю з верхньою малою піввіссю 0,08 і нижньою малою піввіссю 0,05

При несиметричних профілях з параметрами $\varepsilon_1 = 0,08$; $\varepsilon_2 = 0,02$. (сильно зношена нижня частина) вказані характеристики ще більш несиметричні. І цю залежність показано на рисунку 3.7.

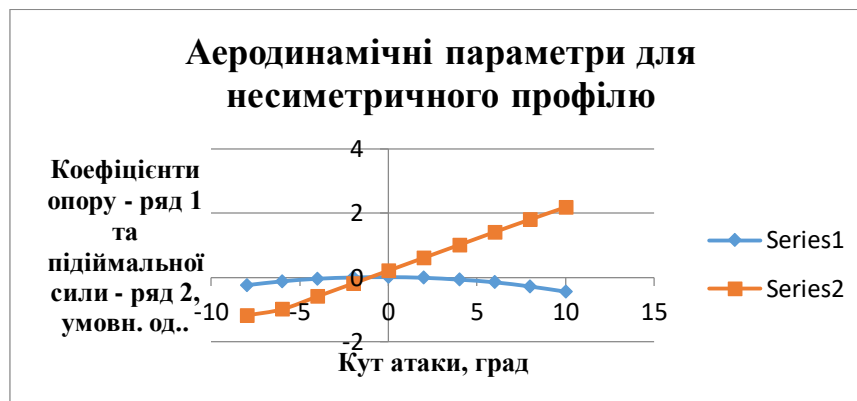


Рисунок 3.7 – Залежність коефіцієнтів опору та підйімальної сили від кута атаки для профілю з верхньою малою піввіссю 0,08 та нижньою малою піввіссю 0,02

На основі проведених розрахунків можна зауважити, що за відомих доль ушкодження (втрата симетричної еліптичності) σ_i розроблена методика може бути використана для оцінювання реальної зміни технологічних параметрів систем із лопатковим апаратом. Для цього всі лопатки поділяють на діапазони втрати симетрії, і загальні характеристики можуть бути обчислені за формулою [67]:

$$C_k = \sum_{i=1}^M \sigma_i C_k^i, \quad (3.28)$$

де M – кількість діапазонів, C_k^i - k -тий показник аеродинамічної ефективності на i -тому діапазоні, σ_i - доля лопаток в i -тому діапазоні $0 \leq \sigma \leq 1$, $\sum \sigma = 1$.

Слід зауважити, що використання залежностей (3.1а), (3.1б) дозволяє моделювати процес обтікання профілів не тільки для розглянутого типу лопатей лопаткового агрегату, але і для обтікання товстих профілів, наприклад, профілів перерізів трубопроводів [67].

Зазначені підходи можуть бути застосовані для нееліптичних конфігурацій лопатей елементів конструкції ПОО, а також для вивчення аеродинамічної інтерференції лопаток – як правило лопатки кріпляться до осі пакетом, причому кожна з лопаток чинить певний вплив на всі інші.

Отже, при оцінюванні технічного стану об'єктів, що характеризуються наявністю лопаткових агрегатів (технологічні вентилятори цукрової промисловості, газоперекачувальні агрегати, авіаційні двигуни тощо), важливим є питання оцінки реального технічного стану цих лопаткових комплексів, зокрема, впливу зміни просторової конфігурації лопатей на виробничі показники відповідних технічних систем. Вирішенню таких питань присвячено багато літературних джерел [66, 5, 49], в яких з різним ступенем деталізації даються відповіді на вказані питання. За даними досліджень, що проводиться у компаніях, які займаються експлуатацією вказаних систем [103], лопатковий апарат обладнання, як правило, зношується нерівномірно. Тому залишається актуальним питання оцінювання інтегрального впливу зазначених ушкоджень на технологічні параметри систем.

3.4. Висновки по третьому розділу

Запропоновано систему оцінювання аеродинамічних характеристик лопаткового агрегату складних технічних систем – вентиляторів різного призначення в цукровій промисловості, газоперекачувальних агрегатів, авіаційних двигунів тощо [67]. Проведено вибір системи координат для еліптичних профілів з різними величинами малих півосей, створено математичну модель процесу обтікання з використанням інтегрального рівняння Фредгольма II роду для визначення дотичної компоненти швидкості потоку. Запропоновано метод його чисельного розв'язку шляхом використання формули трапецій для наближеного інтегрування визначених інтегралів [67], створено відповідне програмне забезпечення. Розглянуто випадки для різних значень півосей та кількості контрольних точок $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,08 \div 0,2$, $N = 23$, $N = 47$. Проведено тестові розрахунки для модельних еліптичних профілів під різними кутами атаки та з різною величиною малих півосей верхньої та нижньої поверхонь, виявлено добре узгодження з даними про розрахунки за іншими моделями. За допомогою розроблених підходів виконано моделювання зміни геометрії профілю шляхом відкладання на поверхні профілю компонентів газорідних сумішей [67] та у процесі зношення лопаткового агрегату під час

експлуатації внаслідок дії абразивних компонент. Досліджено зміну двох основних характеристик – коефіцієнту аеродинамічного опору та коефіцієнту підйімальної сили. Методику узагальнено для системи лопатей з урахуванням кількості ушкоджених профілів і ступеня ушкодження. Вказано сфери подальшого використання методики.

За результатами досліджень, представленими в розділі 3, опубліковано роботи, зазначені в переліку використаних джерел під номерами [32, 67].

РОЗДІЛ 4. ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ОЦІНКА ЇХ ЕФЕКТИВНОСТІ У ПРОЦЕСІ ВИВЧЕННЯ РЕАЛЬНОГО СТАНУ ПОО

4.1 Автоматичне керування барабанною сушильною установкою для висушування цукру із забезпеченням регулювання вологості вихідної сировини і її температури

Процес сушіння широко застосовується у всіх галузях харчової промисловості: в борошномельній галузі висушують зерно, в хлібопекарському виробництві - макаронні вироби та сухарі, в кондитерському виробництві - мармеладно-пастильно вироби; в цукробуряковому виробництві - цукор, жом; у крохмало-паточному виробництві - крохмаль і відходи виробництва та т. д. Процес сушіння забезпечує збереження вихідних властивостей харчових продуктів.

Відходи виробництва, які використовуються кормом для худоби, також необхідно піддавати сушці для того, щоб зробити їх транспортабельними (у відходах виробництва міститься іноді до 90% води) і запобігти втратам поживних речовин. Зазвичай відходи виробництва, що містять значну кількість води, піддають спершу механічному зневодненню, а потім сушці для економії палива.

У харчовій промисловості сушінню піддаються різні матеріали, тому застосовуються сушарки різних конструкцій: барабанні, розпилювальні, шахтні, камерні, сублимаційні, з киплячим шаром і т. д. Сушарки класифікуються також за такими основними ознаками: режимом роботи (безперервної та періодичної дії), способом підведення тепла (конвективні, контактні, з інфрачервоним нагріванням і ін.), характером сушильного агента (повітря із застосуванням топкових газів), тиском у сушильній камері (вакуумні, що працюють при атмосферному тиску), за видом циркуляції сушильного агента (природна, примусова) .

Зазвичай, при сушінні продуктів харчування сушильним агентом є гаряче повітря, а при сушінні відходів виробництва використовується газоповітряна суміш (топкові димові газів).

Процес сушіння характеризується рядом параметрів: якістю та кількістю сировини і готового продукту, температурою та відносною вологістю середовища, часом перебування продукту в сушарці й ін.

Основним параметром, що визначає процес сушіння, є кінцева вологість продукту. Однак в даний час промислових вологомірів, що працюють в потоці, мало, тому для правильного ведення процесу сушіння в якості регульованих використовуються непрямі параметри: температура сушильного агента, що виходить з сушарки; температура висушеного продукту. Регулюючим впливом є кількість підведеного тепла [80].

Ефективність процесу варіння утфелю характеризується величиною та рівномірністю кристалів, процентним вмістом їх в утфелі, тривалістю варіння, масою звареного утфелю. Ці показники залежать від багатьох вхідних і проміжних величин, таких як хімічний склад і зміст домішок у сиропі, розрідження, температура пари, перенасичення цукрового розчину на різних стадіях процесу. Найкращі умови протікання кристалізації створюються шляхом стабілізації розрідження в апараті, підтримки заданого рівня сиропу при уварюванні його до заведення кристалів, дозування сиропу, що підкачується по програмі. Це забезпечує найбільшу швидкість росту кондиційних кристалів за рахунок підтримки заданого перенасичення розчину [44].

Автоматизація технологічних процесів є одним із вирішальних факторів підвищення продуктивності та покращення умов праці. Всі існуючі промислові об'єкти та ті, що будуються, тією чи іншою мірою оснащуються засобами автоматизації.

Автоматизація процесів суттєво змінює зміст виробничого процесу як щодо режимів виконання, так і щодо впливу на виріб. Фізична суть технологічного процесу або операції, принципи управління ними й оптимальні режими досліджуються, в основному, в лабораторних умовах. У цех переносять тільки відпрацьовані процеси [80].

Встановлення найвигіднішого рівня автоматизації визначається техніко-економічним розрахунком за відомим показниками.

Автоматизація виробничого та технологічного процесів повинні розглядатися як з точки зору вдосконалення устаткування, технологічного оснащення й якості процесу, так і з точки зору забезпечення техніко-економічної ефективності.

Автоматизація цукрової промисловості забезпечує якісну, ефективну роботу всіх технологічних ділянок цукрового заводу тільки за допомогою комплексного підходу до рішення даної задачі [80].

Первинні перетворювачі та прилади з високими експлуатаційними характеристиками, використовувані в автоматичній системі управління технологічних процесів (АСУ ТП), дають можливість мати достовірні значення контрольованих параметрів технологічного процесу, роблять системи автоматизації функціонально завершеними та високонадійними.

Технологічний комплекс підприємства цукрової промисловості складається з ділянок приймання, зберігання, підготовки сировини до переробки, відділень отримання соку, очищення дифузійного соку, ділянок отримання готового продукту, допоміжного виробництва, зберігання, переробки цукру-сирцю [44]. І на кожній з цих ділянок контроль витрат або рівня є одним з найважливіших завдань.

Так, наприклад, в дифузійній установці необхідно контролювати рівень суміші «стружка + гаряча вода» в чотирьох зонах похилого дифузійного апарату; рівень буряків в завантажувальному бункері; рівень в ємності дифузійного соку; витрата гарячої води в дифузійному апараті.

На станції дефекосатурації необхідний контроль витрати соку на випарку; витрати та щільності вапняного молока; витрати дифузійного соку і вапняного молока в бригель Мюллера; рівень дифузійного соку в холодному і гарячому дефекаторах.

Контроль цих параметрів також важливий на випарній станції, вакуум-апараті й інших ділянках.

Впровадження систем автоматизації технологічних процесів цукрових заводів на основі витратомірів і рівнемірів різних типів дозволить істотно скоротити енергоспоживання, зменшити втрати цукру і покращити якість продукту, що випускається.

Розглянемо запропоновану нами структурну схему системи осушування утфелі.

Утфель містить зволожені кристали. Видалення вологи відбувається шляхом випаровування. Волога в газоподібному виді відводиться в повітря. Відведення вологого повітря здійснюється примусовим обдуванням. Для інтенсифікації процесу випаровування повітряний потік має вищу температуру за сировину. При контакті повітря з сировиною частина енергії передається сировині. З нагрітої сировини волога випаровується інтенсивніше. В нагріте повітря піднімається більша частка вологи, ніж в холодне. Однак нагріта сировина гірше зберігається.

Кількість випаруваної вологи залежить від інтенсивності виділення вологи на поверхні кристалів сировини, адсорбуючої властивості оточуючого повітря і часу взаємодії вологи на поверхні з осушуючим повітряним потоком.

Виділення вологи залежить від температури (яка впливає на в'язкість вологи), глибини і розміру пор (розміру каналів, якими волога піднімається на поверхню), кристалів та площі вологовідведення (розміру кристалів).

Адсорбуюча властивість повітря залежить від його вологості і температури.

При сушінні кристалів інтенсифікують виділення вологи нагрівом, перемішуванням, подрібненням. Адсорбуючу властивість інтенсифікують нагрівом, обдуванням.

Є декілька параметрів, які впливають на кінцеву кількість питомої вологи в сировині. Такими параметрами, за незмінної питомої вологи сировини, є час сушіння, температура нагрівника, об'єм повітря обдування, його вологість, конструкція системи обдування.

Оскільки нагрівання сировини здійснюється потоком осушуючого повітря, то температура повітря впливає одразу на два параметри: інтенсивність виділення вологи з міжкристалічного простору й адсорбуючої властивості повітря. При незмінній конструкції сушильної системи з фіксованою масою осушуваної сировини змінними параметрами залишаються час сушіння, температура повітря, вологість повітря до взаємодії з сировиною, об'єм повітря.

Сушіння великих об'ємів утфелі здійснюється за допомогою барабанної сушильної установки. Її конструкція передбачає нагрівання сировини поданим ззовні теплим повітрям, а також перемішування сировини в процесі сушіння для збільшення площі взаємодії кристалів із теплим сухим повітрям.

Тепле сухе повітря здійснює нагрівання сировини, що інтенсифікує процес поглинання вологи. Крім того, потік повітря після обтікання сировини та поглинання вологи виносить її на зовні. Кількість повітря, яке надходить у сушильний барабан прямо впливає на інтенсивність висушування.

Час сушіння залежить від здатності повітря поглинути і відвести вологу, а також часу взаємодії сировини з теплим сухим повітрям. При обертанні барабану сушильної установки сировина переміщається нею зі швидкістю, яка залежить від своєї текучості, і під дією сил тяжіння. Текучість залежить від багатьох факторів, тому її змінювати складно. Змінювати швидкість просування сировини вздовж барабану можна, змінюючи взаємодію сировини із силою тяжіння, шляхом зміни кута нахилу осі сушильного барабану установки.

Отже, при достатній адсорбуючій здатності теплого сухого повітря і досягненні заданої вологості вихідної сировини може бути змінений час перебування цієї сировини в сушильному барабані. Зменшення часу перебування сировини в барабані зменшить витрату енергії на проведення сушіння.

Нагріта й осушена сировина має охолотитися перед зберіганням. Охолодження відбувається потоком холодного сухого повітря до заданої температури. Таким чином, для роботи системи використовується три контури керування.

1. Підтримання заданої вологості вихідної сировини шляхом керування питомим часом перебування сировини в барабані.
2. Підтримання заданої вологості вихідної сировини шляхом керування інтенсивністю потоку нагрітого повітря.
3. Підтримання заданої температури висушеного середовища на виході барабану шляхом керування інтенсивністю охолоджуючого повітря.

Вологість сировини на виході з барабана залежить від часу взаємодії із осушуючим повітрям та інтенсивністю обдування ним. Структурна схема системи підтримання заданої вологості сировини наведена на рис. 4.1.

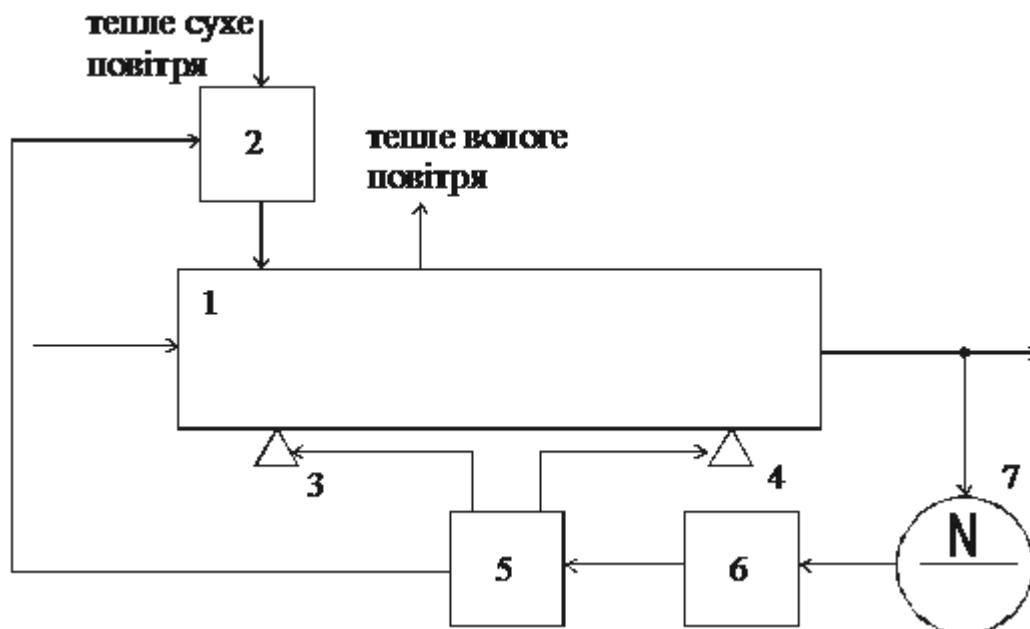


Рисунок 4.1 – Структурна схема регулювання вологості сировини на виході сушильної установки

Значення вологості вимірюється на виході барабана 1 за допомогою датчика вологості 7. Сигнал із виходу датчика 7 надходить на блок нормування сигналу 6. Опрацьований і нормований сигнал поступає на контролер 5. Контролер 5 здійснює управління нахилом труби 1 за допомогою зміни висоти опор 3 і 4. Зміна кута нахилу осі обертання барабана призводить до зміни рухливості осушуваної сировини в барабані і, як наслідок, на питомий час знаходження сировини в барабані. Також контролер 5 здійснює управління потоком осушуючого повітря за допомогою повітрорудки 2.

Вимірювання вологості цукру на виході сушильного барабана здійснюється мікрохвильовим датчиком. Мікрохвильовий датчик монтується на виході сушильної установки. Конструктивно він має бути занурений в досліджуване середовище. Тоді покази датчика вологості будуть відповідати вологості цього середовища. Однак унаслідок нерівномірності потоку цукру покази вологості будуть коливатися не

залежно від вологості, а залежно від степені зануреності датчика в досліджуване середовище. Причому швидкість зміни такого сигналу буде значно більшою за корисний сигнал вологості.

Зміна сигналу на вході системи керування може призвести до нестійкості керування і невикористаними змінами в параметрах потоку теплого повітря чи кута нахилу барабану.

Покращити стабільність системи керування можна, застосовуючи знакочутливу низькочастотну фільтрацію вхідних сигналів. Для зменшення впливу нерівномірності проходження досліджуваного середовища повз датчик вологості було розроблено дискретний авторегресійний фільтр із різним впливом на сигнал залежно від напрямку його зміни. Аналітично такий фільтр описується залежністю:

$$y_i = \begin{cases} (1 - \alpha_1) \cdot x_i + \alpha_1 \cdot y_{i-1} & \text{для } y_{i-1} > x_i \\ (1 - \alpha_2) \cdot x_i + \alpha_2 \cdot y_{i-1} & \end{cases}, \quad (1)$$

де α_1 - коефіцієнт згладжування на спадаючій ділянці сигналу, α_2 - коефіцієнт згладжування на наростаючій ділянці сигналу.

Приклад застосування такого фільтра до тестового змінного сигналу синусоїдальної форми представлено на рис. 4.2

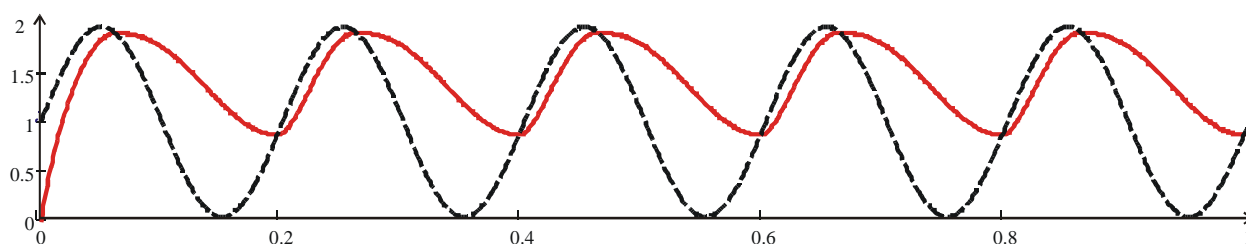


Рисунок 4.2– Результат застосування знакочутливого авто регресійного фільтра

Застосування розробленого фільтра дозволило зменшити вплив нерівномірності потоку цукру на роботу системи керування.

Регулювання вологості здійснюється двома виконавчими механізмами при одному вхідному параметрі. При цьому для керування кожним із виконавчих механізмів використовується пропорційно-інтегральний закон регулювання, окремо

для зміни потоку теплого повітря та зміни кута барабану. Структурна схема такої схеми керування наведена на рис.4.3

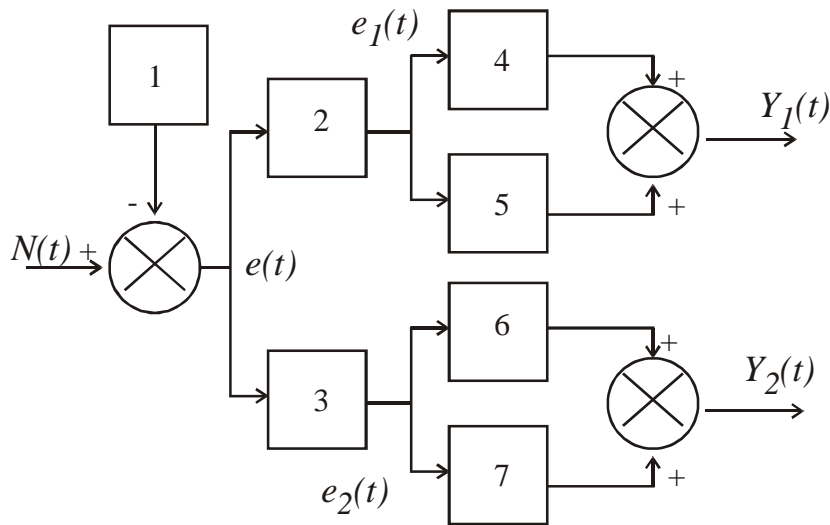


Рисунок 4.3 – Спрощена структурна схема керування потоком теплого повітря і кутом нахилу осі сушильного барабану

На схемі вхідний сигнал від блока нормування сигналу $N(t)$ надходить на вхід суматора, де віднімається від константи 1, заданої для підтримання системою керування. Різницевий сигнал $e(t)$ надходить на блоки формування помилки 2 і 3, які окремо нормують сигнал помилки для розділення керуючої дії теплого повітря $e_1(t)$ і кута нахилу барабанної установки $e_2(t)$. Далі сигнали помилки поступають на блоки – пропорційні 4 і 6 та інтегруючі 5, 7. Вихідні сигнали описаних блоків надходять на відповідні суматори, які формують сигнали впливу на потік теплого повітря $Y_1(t)$ та кут нахилу барабанної установки $Y_2(t)$

Блоки формування помилки 2 і 3 мають нелінійний вплив на сигнал помилки $e(t)$. На вході блоку сигнал помилки $e(t)$ нормується згідно формули

$$e_N(t) = \frac{e(t)}{e_{MAX}}, \quad (4.2)$$

де e_{MAX} - максимально допустиме значення помилки. Нормоване значення помилки є аргументом нелінійних функції, які визначають поведінку відповідного виконавчого механізму: інтенсивності осушуючого потоку $e_{1N}(t)$ чи кута нахилу

барабану сушильної установки $e_{2N}(t)$. Після цього, опрацьовані нормовані сигнали відновлюються до сигналу помилки за допомогою формул

$$e_1(t) = e_{1N}(t) \cdot e_{MAX}, \quad e_2(t) = e_{2N}(t) \cdot e_{MAX}$$

Графічний вигляд нелінійних функцій $e_{1N} = f_1(e_N, q)$ і $e_{2N} = f_2(e_N, q)$ наведено на рис.4.4. Коефіцієнт q визначає крутизну характеристики.

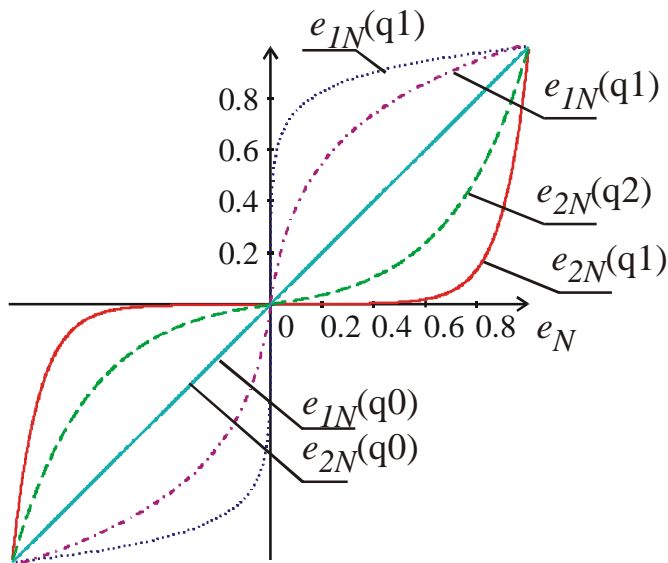


Рисунок 4.4–Залежність нормованої до діапазону зміни помилки від вхідного нормованого значення для двох законів керування

Змінюючи цей коефіцієнт q , можна змінювати нелінійність функцій. При нульовому коефіцієнті вихідні функції є лінійними. Зі зростанням коефіцієнта крутизни функції f_1 , f_2 стають все більше нелійними. Використання блоків формування помилки 2 і 3 дозволяє змінити ступінь використання контурів. При нульовому коефіцієнті q два контури реагують на похибку одночасно. При збільшенні коефіцієнта q похибка на вході контуру регулювання теплого повітря буде зростати швидше, ніж похибка на вході контуру регулювання кута нахилу сушильного барабану. Механізм переміщення осі нахилу барабану більш інертний. Тому такий метод формування помилки дозволяє компенсувати відмінності в швидкості виконавчих механізмів сушильної установки.

Інше завдання, яке виконується системою керування, є охолодження сировини до заданої температури. Охолодження сировини після осушування здійснюється за допомогою іншого контуру керування. Спрощена структурна схема системи підтримання температури сировини на виході сушильного барабану наведена на рис.4.5

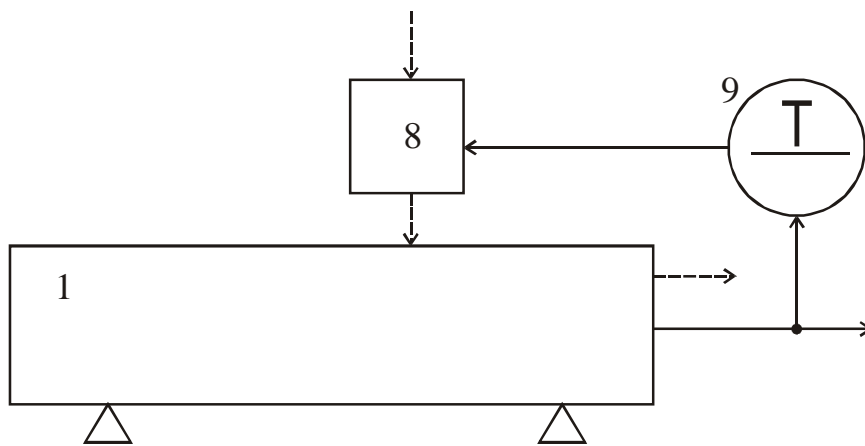


Рисунок 4.5– Структурна схема системи охолодження сировини на виході сушильної установки

Задана температура сировини на виході сушильної установки вимірюється температурним датчиком 9. Сигнал пропорційний температурі сировини на виході надходить на контролер 8. Контролер 8 керує інтенсивність потоку повітря, яке надходить у сушильний барабан для охолодження, оскільки від кількості холодного повітря залежить температури висушеного цукру на виході сушильного барабану.

Розроблена система автоматичного керування барабанною сушильною установкою для висушування цукру із забезпеченням регулювання вологості вихідної сировини і її температури. Задана вологість досягається зміною кількості теплого сухого повітря і зміною часу сушіння шляхом зміни кута нахилу осі сушильного барабану. Задана температура вихідної сировини досягається зміною кількості холодного сухого повітря.

Для зменшення впливу нерівномірності потоку вихідної сировини на датчик вологості, розроблено авторегресійний фільтр із коефіцієнтом згладжування, залежним від напрямку зміни вхідного сигналу.

Розділення двох виконавчих механізмів, які впливають на вологість вихідної сировини здійснюється за допомогою нелінійних функціональних залежностей, які формують різні сигнали помилки системи керування. Це дозволило компенсувати відмінності в швидкості роботи виконавчих механізмів і підвищити стабільність роботи системи автоматичного керування вологістю вихідної сировини

Розроблена система автоматичного керування процесом сушіння утфелі в барабанній сушильній установці дозволяє зменшити витрати енергії на сушіння шляхом оптимального підбору часу перебування сировини в сушильному барабані шляхом керування положенням осі обертання цього барабана.

4.2 Розроблення методики та програмного забезпечення процесу зміцнення поверхонь зношених деталей ПОО шляхом обробки іскровими зарядами

Як показано в розділі 1, під час експлуатації ПОО зазнають змін поверхневі характеристики лопаток, що суттєво впливає на аеродинамічні характеристики і, як наслідок, на продуктивність об'єктів з лопатковим апаратом. Для підвищення якості поверхневих шарів лопаткового апарату ПОО під дією статичних і динамічних навантажень в умовах агресивних середовищ, що містять абразивні частинки, застосовують імпульсні технології зміцнення. Найбільшого поширення серед таких технологій у машинобудуванні отримали лазерна, електроіскрова та віброелектроіскрова обробка, мікродугове оксидування, а також електроімпульсні нанотехнології [33].

Під час лазерної обробки на невеликі об'єми металу діють з великими швидкостями, висококонцентровані потоки енергії, які сприяють локальному нагріванню верхнього шару деталі та швидкому його охолодженню. Обробка на всієї поверхні здійснюється переміщенням променя відносно деталі або навпаки – переміщенням деталі відносно променя.

У процесі електроіскрової обробки, крім теплової дії електричних розрядів, на поверхню деталі також переноситься матеріал електрода, що здійснює відносно деталі осцилювальний рух. У цьому випадку зона оброблення поступово охоплює всю поверхню завдяки переміщенню електрода відносно деталі або навпаки [33]. На відміну від електроіскрової обробки під час віброелектроіскрові обробки розповсюдження розрядів на поверхні має випадковий (імовірнісний) характер, враховуючи, що процес обробки виконується в середовищі вібрувальних гранул-електродів. Аналогічний характер розповсюдження розрядів поверхнею деталі спостерігається під час мікродугового окисдування алюмінію та алюмінієвих покриттів або інших металів вентильної групи за високих напруг в електроліті. В цьому випадку в каналі розряду відбувається окислення металу основи компонентами електроліту і завдяки цьому на поверхні деталі формується покриття із високотемпературних фаз оксидів, які мають високу твердість, зносостійкість, корозійну стійкість і міцність зчеплення з металевою основою.

Останніми роками також інтенсивно розвиваються нанотехнології, які застосовують в різних технологічних процесах машинобудування. Наприклад, вплив наносекундними електромагнітними імпульсами на розплави кольорових металів [33].

Під час розроблення технологічних процесів зміцнення поверхні деталей машин шляхом обробкою іскровими розрядами та оптимізації технологічних параметрів необхідно мати ймовірнісні характеристики цих процесів.

Особливо важливим є знання законів розподілу іскрових розрядів, які виникають на необробленій поверхні та часу, необхідного для покриття розрядами всієї поверхні деталі, що підлягає зміцненню, принаймні одним шаром розрядів [26, 14, 83, 56].

Визначимо математичне сподівання площі обробленої поверхні певною кількістю імпульсів. Це дає змогу встановити залежність між площею поверхні деталі, що зміцнюється, площею поверхні, яка зміцнюється одиничним іскровим розрядом, та кількістю тих одиничних імпульсів розряду, які діють на поверхню [33].

Кожен імпульс обробляє частину поверхні σ . Нехай k імпульсів обробили поверхню площею S_k , $k+1$ – й імпульс обробляє частину ще не обробленої поверхні площею ξ_{k+1} . Випадкова величина ξ_{k+1} розподілена на відрізку $[0; \sigma]$.

Розглянемо тільки такий випадок, коли σ – досить мале, таке, що ξ_k має розподіл виду:

Таблиця 4.1 – Розподіл іскрових розрядів.

x_i	0	σ
p_i	$\frac{S_k}{s}$	$1 - \frac{S_k}{s}$

Знайдемо розподіл $S_k = \sum_{i=1}^k \xi_i$. Для цього знайдемо характеристичну функцію.

Використано геометричне означення ймовірності і той факт, що одним імпульсом можна обробити ще не оброблену поверхню площею 0 або σ . Розглянемо події:

$H_j^{(l)} = \{S_l = j\sigma\}, j = \overline{1, l}$ – повна група подій при фіксованому l , де $l \in \mathbb{N}$.

Визначаємо ймовірність $P(H_j^{(l)}) = P_{lj}$. За формулою повної ймовірності

$$P_{lj} = \left(1 - \frac{S_{l-1}}{s}\right) P_{l-1, j}, \quad (4.1)$$

Причому $P_{l0} = P_{l, l+1} = 0$.

Далі обчислимо характеристичну функцію:

$$\begin{aligned} \varphi_l(t) &= M\left(M\left(\frac{e^{itS_l}}{S_{l-1}}\right)\right) = \\ &= M\sum_{j=1}^l e^{itj\sigma} \cdot P_{lj} = M\sum_{j=1}^l e^{itj\sigma} \left(\left(1 - \frac{S_{l-1}}{s}\right) P_{l-1, j-1} + \frac{S_{l-1}}{s} P_{l-1, j}\right) = \\ &= M\left(\left(1 - \frac{S_{l-1}}{s}\right) \sum_{j=1}^l e^{itj\sigma} \cdot P_{l-1, j-1} + \frac{S_{l-1}}{s} \sum_{j=1}^l e^{itj\sigma} \cdot P_{l-1, j}\right) = \\ &= M\left(\left(1 - \frac{S_{l-1}}{s}\right) e^{it\sigma} \sum_{j=1}^l e^{it(j-1)\sigma} \cdot P_{l-1, j-1} + \frac{S_{l-1}}{s} \sum_{j=1}^l e^{itj\sigma} \cdot P_{l-1, j}\right) = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= M \left(\left(1 - \frac{S_{l-1}}{S}\right) e^{it\sigma} \varphi_{l-1}(t) + \frac{S_{l-1}}{S} \varphi_{l-1}(t) \right) = \\
&= e^{it\sigma} \varphi_{l-1}(t) \left(1 - \frac{1}{S} MS_{l-1}\right) + \varphi_{l-1}(t) \frac{1}{S} MS_{l-1} = \\
&= e^{it\sigma} \varphi_{l-1}(t) + (1 - e^{it\sigma}) \frac{1}{S} \varphi_{l-1}(t) MS_{l-1}. \tag{4.2}
\end{aligned}$$

Отже справедливий висновок, що характеристична функція має вигляд

$$\begin{aligned}
\varphi(t) &= e^{it\sigma} \varphi_{l-1}(t) + (1 - e^{it\sigma}) \frac{MS_{l-1}}{S} \varphi_{l-1}(t) \\
&= \left(e^{it\sigma} + (1 - e^{it\sigma}) \frac{MS_{l-1}}{S} \right) \varphi_{l-1}(t) = \\
&= \left(e^{it\sigma} + (1 - e^{it\sigma}) \frac{\varphi'_{l-1}(0)}{iS} \right) \varphi_{l-1}(t). \tag{4.3}
\end{aligned}$$

Знаходимо $\varphi'_l(t)$ і $\varphi'_l(0)$. Для цього спершу визначимо $\varphi_1(t)$ і $\varphi'_1(0)$.

$$\varphi_1(t) = e^{it\sigma}, \varphi'_1(0) = i\sigma. \tag{4.4}$$

Підставляючи ці значення у характеристичну функцію (4.3) одержуємо.

$$\varphi'_l(t) = \left(i\sigma e^{it\sigma} \frac{\varphi'_{l-1}(0)}{iS} \right) \varphi_{l-1}(t) + \left(e^{it\sigma} + (1 - e^{it\sigma}) \frac{\varphi'_{l-1}(0)}{iS} \right) \varphi'_{l-1}(t), \tag{4.5}$$

$$\varphi'_l(0) = i\sigma \left(1 - \frac{\varphi'_{l-1}(0)}{iS} \right) + \varphi'_{l-1}(0) = i\sigma - \frac{\sigma}{S} \varphi'_{l-1}(0) = i\sigma + (1 - \frac{\sigma}{S}) \varphi'_{l-1}(0) \tag{4.6}$$

Звідси визначаємо математичне сподівання (середнє значення) площі обробленої поверхні деталі після дії l-того імпульсу іскрового розряду.

$$MS_l = \frac{1}{i} (\varphi'_l(t))_{t=0} \tag{4.7}$$

$$MS_l = \sigma + (1 - \frac{\sigma}{S}) MS_{l-1} \tag{4.8}$$

Нехай $\frac{\sigma}{S} = \alpha$, тоді

$$MS_l = \sigma S + (1 - \alpha) MS_{l-1} \tag{4.9}$$

Бачимо, що математичне сподівання площі обробленої поверхні на кожному кроці ділить відрізок значень між таким математичним сподіванням на попередньому кроці та повною площею поверхні у відношенні α до $1-\alpha$.

Звідси:

$$MS_1 = \sigma \quad (4.10)$$

$$MS_2 = \sigma + (1 - \alpha)\sigma, \quad (4.11)$$

$$MS_3 = \sigma + (1 - \alpha)(\sigma + (1 - \alpha)\sigma) = \sigma + (1 - \alpha)\sigma + (1 - \alpha)^2\sigma, \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned} MS_l &= \sigma + (1 - \alpha)\sigma + (1 - \alpha)^2\sigma + \dots + (1 - \alpha)^{l-1}\sigma = \\ &= \sigma(1 + (1 - \alpha) + (1 - \alpha)^2 + \dots + (1 - \alpha)^{l-1}) = \sigma \frac{1(1 - (1 - \alpha)^l)}{1 - (1 - \alpha)} = \\ &= \sigma \frac{1 - (1 - \alpha)^l}{\alpha}. \end{aligned} \quad (4.13)$$

Повертаючись до заміни, маємо:

$$MS_1 = S(1 - (1 - \frac{\sigma}{S})^l). \quad (4.14)$$

Середньою кількістю n імпульсів іскрового розряду, необхідних для обробки β -тої частки поверхні деталі, назвемо таку їх найменшу кількість, за якої

$$MS_1 \geq \beta S.$$

Знаходимо:

$$\beta S \leq S(1 - (1 - \alpha)^l). \quad (4.15)$$

$$\text{Звідси } (1 - \alpha)^l \leq 1 - \beta.$$

Прологарифмувавши обидві частини цієї нерівності, отримаємо:

$$l \geq \frac{\ln(1 - \beta)}{\ln(1 - \alpha)}. \quad (4.16)$$

Тому середня кількість n імпульсів іскрового розряду, необхідних для обробки β -тої частки поверхні деталі, дорівнює:

$$n = \left[\frac{\ln(1 - \beta)}{\ln(1 - \alpha)} \right] + 1, \quad (4.17)$$

де символом $[\cdot]$ позначено цілу частину числа.

Граничний розподіл площі обробленої поверхні визначаємо так. Спершу спрощуємо характеристичну функцію:

$$\varphi'_{l-1}(t) = (e^{it\sigma} + (1 - e^{it\sigma}) \frac{\varphi'_{l-1}(0)}{iS}) \varphi_{l-1}(t) \quad (4.18)$$

$$\varphi'_{l-1}(0) = iMS_{l-1} = iS(1 - (1 - \alpha)^{l-1}), \quad (4.19)$$

Бачимо, що

$$\varphi_l(t) = (e^{it\sigma} + (1 - e^{it\sigma}) (1 - (1 - \alpha)^{l-1})) \varphi_{l-1}(t) =$$

$$\begin{aligned}
&= (e^{it\sigma} + 1 - e^{it\sigma} - (1 - e^{it\sigma})(1 - \alpha)^{l-1})\varphi_{l-1}(t) = \\
&= (1 - (1 - e^{it\sigma})(1 - \alpha)^{l-1})\varphi_{l-1}(t),
\end{aligned}
\tag{4.20}$$

де $\frac{\sigma}{s} = \alpha, 0 < \alpha < 1$.

Звідси випливає, що

$$\varphi_1(t) = e^{it\sigma} \tag{4.21}$$

$$\varphi_3(t) = \left(1 - (1 - e^{it\sigma})(1 - \alpha)\right) e^{it\sigma},$$

$$\varphi_3(t) = (1 - (1 - e^{it\sigma})(1 - \alpha)^2) \left(1 - (1 - e^{it\sigma})(1 - \alpha)\right) e^{it\sigma}, \tag{4.22}$$

Нехай $1 - e^{it\sigma} = \alpha$.

$$\varphi_4(t) = (1 - \alpha(1 - \alpha)^3(1 - \alpha(1 - \alpha)^2))(1 - \alpha(1 - \alpha))e^{it\sigma}, \tag{4.23}$$

...

$$\begin{aligned}
&\varphi_l(t) = (1 - \alpha(1 - \alpha)^{l-1})(1 - \alpha(1 - \alpha)^{l-2}) \dots (1 - \alpha(1 - \alpha))e^{it\sigma} = \\
&= \prod_{k=1}^{l-1} (1 - (1 - e^{it\sigma})(1 - \alpha)^k) e^{it\sigma} = \prod_{k=1}^{l-1} (1 - (1 - e^{it\sigma})(1 - \alpha)^k) \tag{4.24}
\end{aligned}$$

Отже,

$$S_l = \sum_{k=0}^{l-1} T_k, \tag{4.25}$$

де T_k - набір незалежних випадкових величин. Характеристичною функцією

$$T_k \in \psi_k(t) = 1 - (1 - e^{its})(1 - \alpha)^2.$$

Тепер використовуємо той факт, що при великих l

$$P\left(\frac{S_l - MS_l}{\sqrt{DS_l}} < x\right) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{y^2}{2}} dy. \tag{4.26}$$

Отже, S_l має приблизно (при великих l) нормальний розподіл з параметрами MS_l та DS_l .

$$P(|S_l - MS_l| < \epsilon) \approx 2 \left(\frac{\epsilon}{\sqrt{DS_l}}\right) - 1 = \gamma, (*) \tag{4.27}$$

Звідси при заданому γ можна знайти S . Залишиться знайти MS_l та DS_l .

Із властивостей математичного сподівання та дисперсії випливає, що

$$M\left(\sum_{k=0}^{l-1} T_k\right) = \sum_{k=0}^{l-1} M_{T_k}, \tag{4.28}$$

$$D\left(\sum_{k=0}^{l-1} T_k\right) = \sum_{k=0}^{l-1} D_{T_k}, \tag{4.29}$$

Відомо, що $M_{T_k} = \frac{1}{i} \varphi'_{T_k}(t)|_{t=0}$, тому

$$M_{T_k} = \frac{1}{i} is(1 - \alpha)^k = s(1 - \alpha)^k \quad (4.30)$$

Для знаходження D_{T_k} використовуємо формулу:

$$D_{T_k} = M_{T_k}^2 - (M_{T_k})^2. \quad (4.31)$$

$$\frac{d^2 \psi_k(t)}{dt^2} \Big|_{t=0} = -M_{T_k}^2. \quad (4.32)$$

Звідси випливає, що

$$M_{T_k}^2 = \frac{1}{i^2} ((1 - \alpha)^k (i\sigma)^2 e^{it\sigma})|_{t=0} = (1 - \alpha)^k \sigma^2, \quad (4.33)$$

$$D_{T_k} = (1 - \alpha)^{2k} \sigma^2 - (1 - \alpha)^{2k} \sigma^2 = \sigma^2 (1 - \alpha)^k (1 - (1 - \alpha)^k), \quad (4.34)$$

$$\sqrt{D_{T_k}} = \sigma \sqrt{(1 - \alpha)^k (1 - (1 - \alpha)^k)}. \quad (4.35)$$

Отже,

$$S_l \sim (\sum_{k=0}^{l-1} \sigma (1 - \alpha)^k; \sum_{k=0}^{l-1} \sigma^2 (1 - \alpha)^k (1 - (1 - \alpha)^k)). \quad (4.36)$$

З (4.36) випливає:

$$2 \left(\frac{\varepsilon}{\sqrt{DS_l}} \right) - 1 = \gamma \quad (4.37)$$

$$\left(\frac{\varepsilon}{\sqrt{DS_l}} \right) = \frac{\gamma+1}{2}. \quad (4.38)$$

Звідси $\frac{\varepsilon}{\sqrt{DS_l}} = u_{\frac{\gamma+1}{2}}$ – квантиль порядку $\frac{\gamma+1}{2}$ розподілу $N(0;1)$. Тому $\varepsilon = u_{\frac{\gamma+1}{2}} \sqrt{DS_l}$.

Отаточню з ймовірністю γ

$$S_l \in (MS_l - u_{\frac{\gamma+1}{2}} \sqrt{DS_l}; MS_l + u_{\frac{\gamma+1}{2}} \sqrt{DS_l}) \quad (4.39)$$

Якщо потрібно обробити не менше $\delta \cdot 100\%$ поверхні з надійністю γ , то потрібно не менше, ніж l_0 імпульсів, де

$$l_0 = \min\{l \in N: P(S_l \geq \delta S) = \gamma\}. \quad (4.40)$$

Звідси

$$l_0 = \min\left\{l \in N: \delta S \leq MS_l - u_{\frac{\gamma+1}{2}} \sqrt{DS_l}\right\}. \quad (4.41)$$

Можна зауважити, що

$$\lim MS_l = \frac{1}{1-1+\alpha} \sigma = \frac{1}{\alpha} \sigma = S, \quad (4.42)$$

Оскільки $\frac{\sigma}{S} = \alpha$.

$$\begin{aligned} \lim_{l \rightarrow \infty} DS_l &= \frac{1}{1-1+\alpha} \sigma^2 - \frac{1}{1-(1+\alpha)^2} \sigma^2 = \frac{\sigma^2}{\alpha} \left(1 - \frac{1}{2-\alpha}\right) = \\ &= \sigma S \frac{1-\alpha}{2-\alpha} < \frac{\sigma S}{2-\alpha} \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) < \frac{\sigma S}{2} \end{aligned} \quad (4.44)$$

Водночас, послідовність DS_l монотонно зростає. Звідси частка покриття поверхні має дисперсію, яка не перевищує $\frac{\alpha}{2}$.

Розглядаємо задачу моделювання процесу зміцнення поверхонь у загальній постановці, а саме: нехай кожен імпульс обробляє нову частину поверхні площею, розподіленою на відрізку $[0: \sigma]$. Очевидно, що її розподіл залежить від номера кроку, на якому був здійснений цей імпульс.

Вибираємо деяке $h > 0$ і побудуємо сітку S з квадратними вічками та відстанню між суміжними вузлами, рівною h . Нехай h достатньо мале і форми оброблюваної поверхні, та слід, який залишає на цій поверхні імпульс, такі, що їх площі опорційні (з одним і тим же коефіцієнтом) кількості вузлів сітки, які потрапили на поверхню площі чи сліду. За таких умов можна розглянути прямокутну декартову систему координат на площині з цілочисельною сіткою \hat{S} . Кожен вузол такої сітки взаємно однозначно відповідає деякому вузлу сітки S . Нехай \hat{S} – множина вузлів сітки \hat{S} , які відповідають поверхні, яка обробляється, а $\hat{\sigma}$ – множина вузлів сітки \hat{S} , які відповідають сліду імпульсу на цій поверхні. Позначаємо $\alpha = \frac{|\hat{\sigma}|}{|\hat{S}|}$, де $|\hat{\sigma}|$ означає кількість вузлів сітки, які відповідають тій чи іншій частині поверхні. Очевидно, що α є відношенням площі сліду кожного імпульсу до площі всієї поверхні. Отже, відношення кількості вузлів сітки \hat{S} , які потрапили в слід хоча б одного імпульсу, до загальної кількості вузлів сітки \hat{S} , що відповідають даній поверхні, дорівнює частці поверхні, обробленій усіма попередніми імпульсами.

Моделювання імпульсів здійснюється в такий спосіб. Беремо поверхню, для якої сітка \hat{S} – прямокутної форми (задається користувачем). Вузли такої сітки можна задати квадратною матрицею D з елементами, рівними 0. Нехай слід імпульсу має

форму круга. Двічі генеруючи цілі випадкові числа з вказаного інтервалу, одержимо випадкові координати вузла сітки \hat{C} , куди потрапляє центр сліду чергового імпульсу. Якщо вузол з координатами $(i; j)$ накривається слідом імпульсу, то значення елемента d_{ij} матриці D змінюється на 1. Після певної кількості імпульсів одержуємо матрицю D , заповнену іскровими зарядами відповідних розмірів. Частина заповненої поверхні, обробленої цими імпульсами, зображена на рис. 4.7. Програма, яка реалізує на мові Java описану процедуру, може виглядати так. Авторське право на твір «Моделювання процесу мікродугового оксидування алюмінію та його сплавів» - комп'ютерна програма – зареєстровано у відповідних інстанціях.

```

package sample;

import java.net.URL;
import java.util.ResourceBundle;
import java.util.concurrent.ThreadLocalRandom;

import javafx.fxml.FXML;
import javafx.scene.Scene;
import javafx.scene.canvas.Canvas;
import javafx.scene.canvas.GraphicsContext;
import javafx.scene.control.Button;
import javafx.scene.control.TextField;
import javafx.scene.image.PixelReader;
import javafx.scene.layout.AnchorPane;
import javafx.scene.paint.Color;
import javafx.stage.Stage;

public class Controller {

    @FXML
    private ResourceBundle resources;

    @FXML
    private URL location;

    @FXML
    private Button btnCalculate;

    @FXML
    private TextField tfImpulseCount;

    @FXML
    private TextField tfFillRate;

    @FXML
    private TextField tfImpulseRadius;

    @FXML

```

```

private TextField tfPanWidth;

@FXML
private TextField tfPanHeight;

@FXML
private Canvas canPane;

@FXML
void initialize() {
    //clearPane(canPane);

    btnCalculate.setOnAction(event -> {
        //отримуються вхідні параметри з графічного інтерфейсу
        int impulseCount = getImpulseCount(); //кількість імпульсів
        int fillRate = Integer.parseInt(tfFillRate.getText()); //відсоток заповненості
        int impulseRadius = Integer.parseInt(tfImpulseRadius.getText()); //радіус імпульсу
        int paneWidth = Integer.parseInt(tfPanWidth.getText()); //ширина поверхні
        int paneHeight = Integer.parseInt(tfPanHeight.getText()); //довжина поверхні
        //створюється поверхня з заданими параметрами
        final Canvas pane = new Canvas(paneWidth, paneHeight);
        //очищується поверхня
        clearPane(pane);
        //якщо кількість імпульсів не вказана або рівна 0 то заповнюється поверхня до досягнення вказаного
рівня заповненості
        //інакше відображається на поверхні задана кількість імпульсів
        if (impulseCount == 0) {
            tfImpulseCount.setText(putImpulsesUntilPaneIsNotFullyFilled(pane, impulseRadius,
fillRate).toString());
        } else {
            putImpulses(pane, impulseCount, impulseRadius);
        }

        showResult(pane);
    });
}

private int getImpulseCount() {
    return tfImpulseCount.getText().length() == 0 || tfImpulseCount.getText().equals("0") ?
        0 : Integer.parseInt(tfImpulseCount.getText());
}

/**
 * Показує заповнену поверхню
 * @param canvas поверхня
 */
private void showResult(final Canvas canvas) {
    final AnchorPane anchorPane = new AnchorPane();
    anchorPane.getChildren().add(canvas);
    final Stage stage = new Stage();
    stage.setTitle("Результат");
    stage.setScene(new Scene(anchorPane, canvas.getWidth(), canvas.getHeight()));
    stage.show();
}

```



```

/**
 * Очищає поверхню
 * @param canvas поверхня
 */
private void clearPane(final Canvas canvas) {
    canvas.getGraphicsContext2D().setFill(Color.WHITE);
    canvas.getGraphicsContext2D().fillRect(0, 0, canvas.getWidth(), canvas.getHeight());
}

/**
 * Відображає імпульс на поверхні
 * @param canvas поверхня
 * @param radius радіус імпульсу
 */
private void putImpulseToPan(final Canvas canvas, int radius) {
    final GraphicsContext gc = canvas.getGraphicsContext2D();
    gc.setFill(Color.BLACK);

    //отримуємо випадкові координати для центру імпульсу
    double x = ThreadLocalRandom.current().nextInt(0, Double.valueOf(canvas.getWidth()).intValue());
    double y = ThreadLocalRandom.current().nextInt(0, Double.valueOf(canvas.getHeight()).intValue());

    //відображає імпульс з заданими параметрами на поверхні
    gc.fillOval(x, y, radius, radius);
}

/**
 * Повертає відсоток заповненості поверхні
 *
 * Початково всі пікселі на поверхні білого кольору, поверхня на яку попадає імпульс
 * зафарбовується чорним кольором. Знаючи кількість чорних пікселів і загальну кількість
 * пікселів на поверхні вираховуємо відсоток заповненості.
 *
 * @param canvas поверхня на якій потрібно перевірити заповненість
 */
private Double getFillPercentage(final Canvas canvas) {
    final PixelReader reader = canvas.snapshot(null, null).getPixelReader();
    int countOfFilledPixels = 0; //лічильник чорних пікселів
    //перебираємо всі пікселі на поверхні
    for (int i = 0; i < canvas.getHeight(); i++) {
        for (int j = 0; j < canvas.getWidth(); j++) {
            //якщо знайдено чорний піксель накопичуємо лічильник
            if (reader.getColor(j, i).equals(Color.BLACK)) {
                countOfFilledPixels++;
            }
        }
    }

    //вираховується відсоток покриття
    return (100 * countOfFilledPixels) / (canvas.getHeight() * canvas.getWidth());
}

/**
 * Покриває поверхню імпульсами поки не досягне заданого відсотку заповненості
 * @param canvas поверхня
 * @param impulseRadius радіус імпульсу

```

```

* @param fillRate відсоток заповненості
* @return вертає кількість імпульсів зроблених для досягнення заданого рівня заповненості
*/
private Integer putImpulsesUntilPanelsNotFullyFilled(final Canvas canvas, int impulseRadius, int fillRate) {
    Integer count = 0;
    while (getFillPercentage(canvas) <= fillRate) {
        putImpulseToPan(canvas, impulseRadius);

        count++;
    }

    return count;
}

/**
* Відображає задану кількість імпульсів на поверхні
* @param canvas поверхня
* @param impulseCount кількість імпульсів
* @param impulseRadius радіус імпульса
*/
private void putImpulses(final Canvas canvas, int impulseCount, int impulseRadius) {
    for (int i = 0; i < impulseCount; i++) {
        putImpulseToPan(canvas, impulseRadius);
    }
}
}

```

Програма дозволяє моделювати процес мікродугового окисдування алюмінію та його сплавів. Математична модель, побудована на основі теорії ймовірності, дає змогу визначити кількість розрядів, необхідних для зміцнення поверхні, та виводити результати розрахунку у вигляді растрових зображень.

Для роботи з програмою потрібно запустити програму файлом “PEO-Andromeda.jar”* (якщо JAR-файл не відкривається, то потрібно встановити Java за допомогою файлу “Java-install”(на диску)). Для написання програми потрібно з клавіатури комп’ютера у відповідні текстові поля на формі вікна програми (рис.4.1) ввести такі величини:

- кількість імпульсів – кількість імпульсів іскрових розрядів;
- відсоток заповнення – відсоток обробленої площі поверхні деталі;
- радіус імпульсу – радіус імпульсу іскрового заряду;
- довжину пластини;
- ширину пластини.

Розміри поверхні і радіус імпульсу мають бути вказані цілими числами.

Програма може здійснювати розрахунок двома способами.

1. Пошуком кількості імпульсів для проведення зміцнення певної частини площі пластини. У цьому випадку потрібно поле «Кількість імпульсів» залишити незаповненим (рис. 4.1).

2. Знаходженням відсотка обробленої поверхні за допомогою введеної кількості імпульсів. У цьому випадку потрібно заповнити поле «Кількість імпульсів».

Після введення вхідних даних для здійснення розрахунку потрібно натиснути кнопку «Розрахувати».

У результаті розрахунку першим способом буде отримано кількість імпульсів іскрових розрядів для заповнення (оброблення) певної частки площі пластини. З цими імпульсами будемо растрові зображення заповненості пластини (Рис.4.6-4.7)

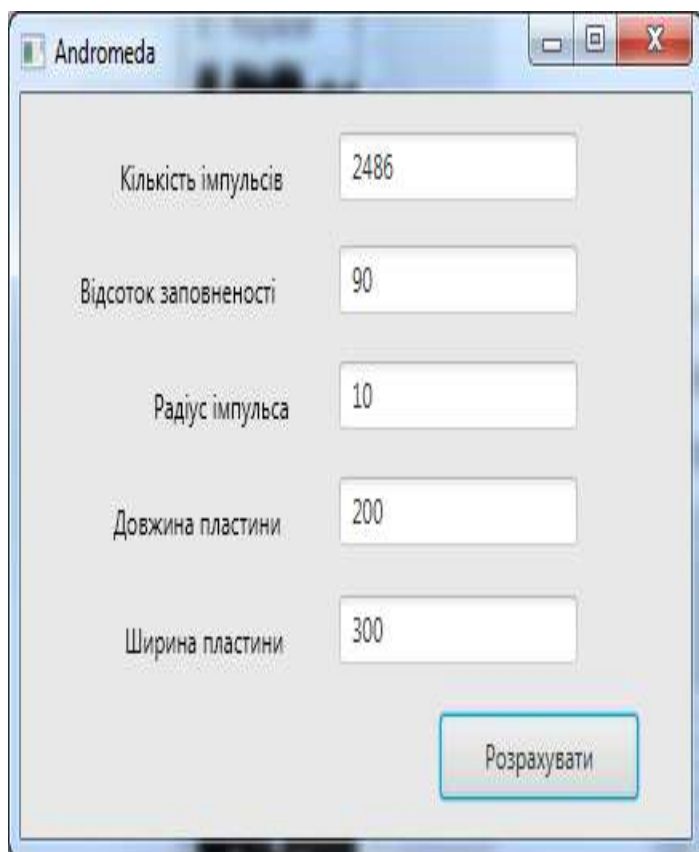


Рисунок 4.6 – Вікно програми після виконання розрахунку.



Рисунок 4.7 – Схема заповненості пластини.

У результаті розрахунку за другим напрямком буде отримано частку площі пластини, яка буде заповнена певною кількістю імпульсів іскрових розрядів (рис. 4.8) та побудовано растрові зображення заповненості (оброблення) пластини (рис. 4.9).

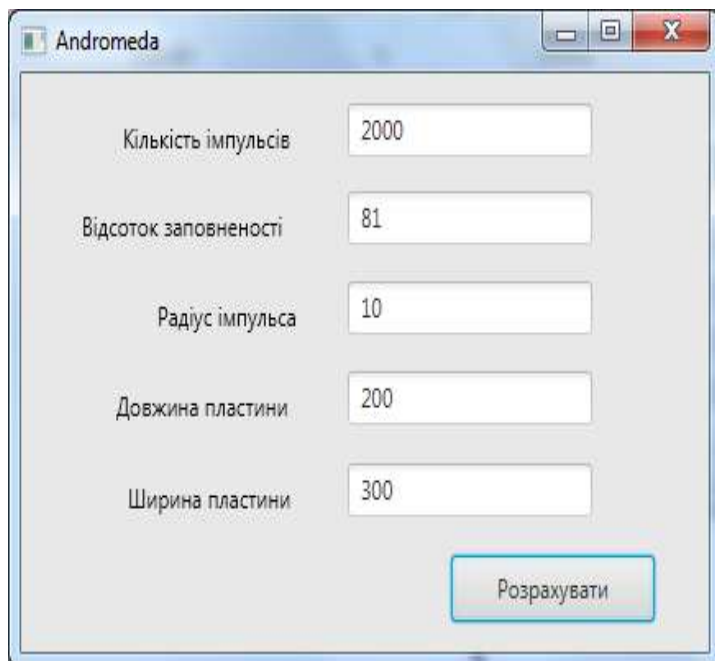


Рисунок 4.8 – Вікно програми після виконання розрахунку



Рисунок 4.9 – Схема заповненості пластини

Шляхом комплексного дослідження обробки пластини імпульсами різних радіусів одержуємо модель процесу мікродугового оксидування.

	Назва	Пластина	Заповненість	Кількість імп.	Радіус імп.	Кількість мат.
<input checked="" type="checkbox"/>	Дослід №1	200x200	90.47	304	10	3040
<input checked="" type="checkbox"/>	Дослід №2	200x200	90.2375	151	15	2265
<input checked="" type="checkbox"/>	Дослід №3	200x200	91.59	80	20	1600
<input checked="" type="checkbox"/>	Дослід №4	200x200	91.4675	30	30	900

Рисунок 4.10 – Вікно програми після задання відповідних параметрів.

У результаті розрахунку програми за відповідними даними параметрів (радіусом імпульсу, відсотком заповненості пластини за певними розмірами (200x200)) отримано кількість імпульсів іскрових розрядів для заповнення (оброблення) певної частки площі пластини (Рис. 4.11 – 4.12, на яких зображено растрові зображення заповнення пластини). Згідно з даними дослідів ми представили залежність відсотка обробленої поверхні, зображеної на рис. 4.13, від кількості імпульсів при різних значеннях α .



Рисунок 4.11 – Дослід №1 - Схема заповнення пластини



Рисунок 4.12. – Дослід №2 - Схема заповнення пластини



Рисунок 4.13 – Дослід №3 - Схема заповнення пластини



Рисунок 4.14 – Дослід №4 - Схема заповнення пластини

У результаті проведених дослідів отримано графік обробленої поверхні пластини іскровими зарядами залежно від радіуса імпульсу.

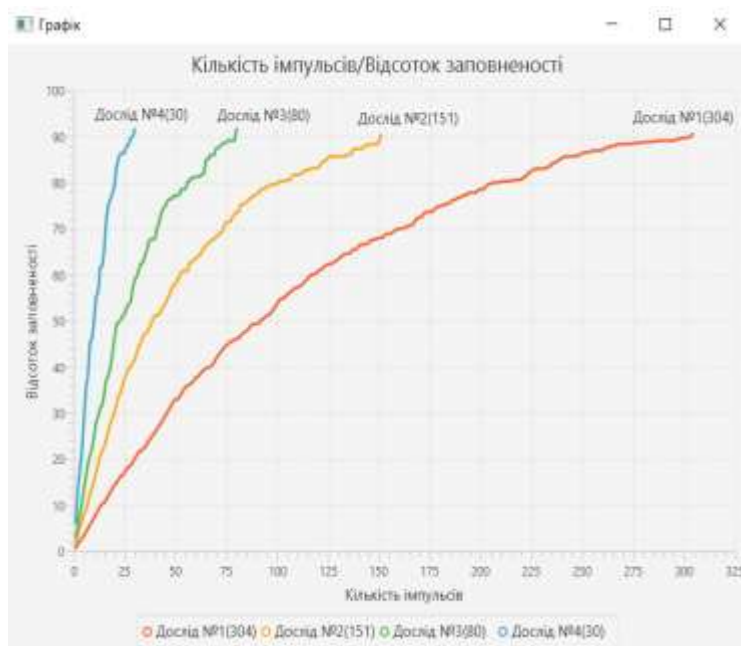


Рисунок 4.15 – Залежність відсотка обробленої поверхні від кількості імпульсів при різних значеннях α

У результаті виконаної роботи видно, що варто шукати залежність обробленої поверхні у вигляді формули:

$$S_n = 100(1 - e^{-kn}),$$

де S_n – відсоток площі обробленої n числом імпульсів.

Така залежність одержана у спрощеній моделі, описаній у роботі [22], де використано, що $k = \ln(1 - \alpha)$.

Основним результатом досліджень є побудова стохастичної моделі, яка дозволяє оцінити частку чи відсоток площі поверхні, обробленої заданою кількістю імпульсів. Форма сліду кожного імпульсу вважається круговою та незмінною. Зі збільшенням кількості імпульсів відсоток площі обробленої поверхні експоненціально наближається до максимуму. Параметр цієї експоненціальної залежності прямо пропорційний відношенню площі, яка покривається одним імпульсом, до площі всієї поверхні (принаймні в інтервалі значень цього відношення від 0.0001 до 0.001). Точність цієї моделі є не гіршою 1% принаймні з імовірністю 0.95. Модель побудована методом статистичного аналізу комп'ютерно змодельованого процесу.

Крім того, досліджено спрощену модель, описану в деяких спеціальних публікаціях, де було встановлено тільки середнє значення площі обробленої поверхні. Визначено не тільки її дисперсію, а й граничний розподіл, що є нормальним розподілом. Вдалося оцінити стандартну похибку відсотка покриття. Порівнюючи обидві моделі, встановили, що вони еквівалентні при малих значеннях відношення площі, яка покривається одним імпульсом, до площі всієї поверхні.

4.3. Оцінка довговічності технологічних обертових об'єктів за даними про переміщення точок їх поверхні

Під час оцінювання реального технічного стану робочих магістральних і технологічних трубопроводів, циліндрично-обертових об'єктів виникає питання оцінки технічного ресурсу з урахуванням термінів експлуатації об'єктів, режимів впливу дії на них силових факторів різної природи, які зумовлюють зміну несучої здатності об'єктів. Питання такого роду [68] вивчало багато науковців [20, 22, 56]. Як правило, задача оцінки терміну експлуатації об'єкта з математичної точки зору є некоректною через достатньо наближений характер задання початкових умов, тому необхідно робити додаткові припущення про характер робочих навантажень на об'єкт, брати до уваги особливості геометричної конфігурації, періодичність дії часових впливів. Водночас необхідно використовувати статистичні підходи [54], що дозволяє отримати додаткову інформацію про способи навантаження досліджуваного об'єкта, а також навантажень, які мають періодичний характер.

Розглянемо випадок, коли відомим є процес зміни напружень в часі, змодельований згідно з розробленими моделями, описаними в [66]. Для цього використаємо найбільш поширений метод розроблений Болотіним В.В. і відображений в роботі [14, 83]. Випадковий процес зміни напружень підпорядковується нормальному закону розподілу, формула очікуваного терміну служби має такий вигляд:

$$t_n = \frac{N_1 t_1 x_0^m}{F}, \quad (4.45)$$

де

$$F = \sum_{n=0}^m C_m^n (\psi x_1)^n \psi (m - n + 2) P[(x_0 - \psi x_1)^2, m - n + 2], \quad (4.46)$$

C_m^n – число комбінацій з m елементів по n ,

t_1 – ефективний період пульсацій напружень,

$$x_1 = \frac{\langle S \rangle}{S_\sigma}; \quad x_0 = \frac{\sigma_2}{S_\sigma}; \quad \psi(n) - \text{масштабний множник: } \psi(n) = 2^{\frac{n-2}{2}} \cdot \Gamma\left(\frac{n}{2}\right); \Gamma(\alpha) -$$

гамма функція [3]:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} dx \quad (4.47)$$

Крім того, якщо α – непарне ціле число, то $\psi(\alpha) = (\alpha - 2)!! \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}}$, якщо α -

парне, то $\psi(\alpha) = 2^{\frac{\alpha-2}{2}} \cdot \left(\frac{\alpha-2}{2}\right)!$ [2];

$P_{\chi^2}(x_0, m_1 + 2)$ - функція χ^2 - розподілу Пірсона; N_1, m_1, σ_2 і ψ – відомі характеристики матеріалу; S_σ – інтенсивність пульсацій напружень.

Для функції

$P_{\chi^2}(x_0, v)$ відома форма подання [52]:

$$P_{\chi^2}(x_0, v) = k \cdot e^{-\frac{x_0}{2}} x_0^{\frac{v}{2}-1}, \quad x_0 \geq 0, \quad (4.48)$$

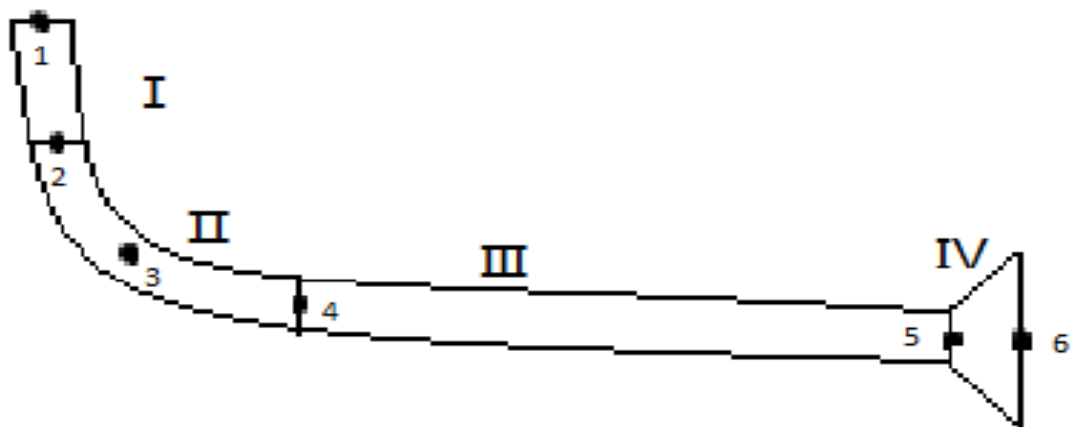
де k – нормований множник, який забезпечує виконання рівності:

$$\int_{-\infty}^{\infty} P_{\chi^2}(x_0; v) dx_0 = 1 \quad (4.49)$$

Табличні значення квантилі можна знайти, наприклад, у роботі [26]. Зокрема, за даними досліджень труб, які використовують в магістральних трубопроводах, приймається $S_\sigma = 12 \div 14$ МПа, $\langle \sigma \rangle = 180-190$ МПа; $t_1 = 1 \div 2$ с; $N_1 = 10^7$; $m = 6$, $\psi = 0,17$ і $\sigma_2 = 140$ МПа, при цьому $t_1 \approx 10^6$ год. Проведені розрахунки мають модельний характер, проте з (4.45) можна зробити висновок, що тривалість роботи об'єкта лінійно залежить від N_1 та t_1 , обернено пропорційна комплексу F та поводитья як степенева функція відносно x_0 з показником m . Підходи, використані у [66], дозволяють на основі інформації про переміщення певної множини точок поверхні досліджуваного тіла встановити закон руху кожної точки досліджуваного трубопроводу у вигляді:

$$\vec{r}(s, \varphi, r, t) = \vec{r}_l(s, \varphi, r, t) - R \vec{n}_l + \rho(s, \varphi, r, t) [\cos \omega(s, \varphi, r, t) \cdot \vec{b}_1 + \sin \omega(s, \varphi, r, t) \vec{n}_l] + \psi(s, \varphi, r, t) \vec{L}_l \quad (4.50)$$

де, як і раніше, $\rho(s, \varphi, r, t)$, $\omega(s, \varphi, r, t)$, $\psi(s, \varphi, r, t)$ - функції, які характеризують переміщення точок досліджуваного тіла в радіальному, поперечному та поздовжньому напрямках за умови різного компанування досліджуваної ділянки трубопроводу (рис.4.16) – ділянки I та III – прямолінійні, II – тороподібна, IV - конічна; змінні s, φ, r - пов'язані з криволінійно-циліндричною системою координат[68]: s - координата вздовж осі тіла, $0 \leq s \leq L$; φ -координата по полярному куту, $0 \leq \varphi \leq 2\pi$; і r -координата по радіусу трубопроводу, $R_{\text{вн}} \leq r \leq R_3$. $R_{\text{вн}}$ - внутрішній; R_3 - зовнішній радіус труби, $\vec{n}_l, \vec{b}_1, \vec{L}_l$ – компоненти нормалі, бінормалі та дотичної в досліджуваній точці тіла.



+

Рисунок 4.16 – Комплексне компанування ділянки технологічного трубопроводу ПОО

Подання (4.16) є справедливим для квазіпрямолінійної, тороподібної та конічної ділянки об'єктів. На рис. 4.16 показано схему розміщення точок, в яких необхідно проводити вимірювання напружень з метою оцінювання параметрів довговічності. У роботах [25, 26] приводяться вказані подання для конічних та тороподібних ділянок трубопроводів, які використовують у різних промислових

системах. Подання виду (4.50) дозволяє провести розрахунок зміни напружено-деформованого стану досліджуваних об'єктів в рамках моделі крупно-деформованого ізотропного або анізотропного тіла за формулами [47]:

-для компонент тензора деформацій:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(\nabla_i w_j + \nabla_j w_i), \quad (4.51)$$

де w_i - компоненти вектора переміщень, пораховані за (4.50) ; ∇_i -оператор коваріантного диференціювання у відповідній системі координат (декартовій, циліндричній, конічній, тороподібній) [84];

-для компонент тензора напружень (ізотропна модель):

$$\sigma^{ij} = \lambda I_1(\varepsilon_{ij})g^{ij} + 2\mu\varepsilon^{ij} \quad (4.51a)$$

де $\sigma^{ij}, \varepsilon^{ij}$ -контраваріанти компоненти тензора деформацій та напружень; s, φ, r -псевдополярні координати.

$I_1(\varepsilon_{ij})$ -перший інваріант тензора деформації:

$$I_1(\varepsilon_{ij}) = \sum_{ij=1}^3 \varepsilon_{ij}g^{ij}, \quad (4.52)$$

g^{ij} - контраваріантні компоненти метричного тензора відповідної криволінійної системи координат; λ і μ - параметри Ламе матеріалу, з якого виготовлено досліджуване тіло, вони зв'язані з модулем Юнга E та коефіцієнтом Пуассона матеріалу σ залежностями:

$$\mu = \frac{E}{2(\sigma+1)} \text{ і } \lambda = \frac{E\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}; \quad (4.53)$$

для компонент тензора напружень (анізотропна модель):

$$\sigma_{ij} = \sum_{k,l=1}^3 C_{ijkl}\varepsilon_{kl} \quad (4.54)$$

де C_{ijkl} -компоненти тензора пружних модулів. Між коваріантними та контраваріантними компонентами тензора існує взаємозв'язок:

$$\varepsilon^{kl} = \sum_{i,j=1}^3 \varepsilon_{ij} g^{ik} g^{jl}. \quad (4.55)$$

Отже, компоненти, які характеризують зміну напружень деформованого стану, визначаються за (4.50) - (4.55). Для застосування запропонованої методики (4.45)-(4.50) з метою визначення довговічності конструкцій необхідно з'ясувати, чи підпорядковується закон зміни напружень нормальному закону розподілу. Для цього

вибираємо ті сектори на технологічному трубопроводі, які зазнають зміни напруги максимально. Потенційно можливо контролювати процес зміни напружень в кожній точці розрахункової сітки, але тоді виникає необхідність здійснення значних обсягів обчислень. Коли ж конструкція зазнає дії вібронавантажень, закон (4.16) будують за максимальною амплітудою вібрації, визначеною експериментально. Тому в контрольних точках визначають значення напружень, одержують вибірку значень напружень $\sigma_{ij}^3(A_k)$ в точках A_k , яку групують за інтервалами.

Таблиця 4.2 – Вибірка значень напружень $\sigma_{ij}^3(A_k)$ в точках A_k і групування за інтервалами

Інтервал	Частота	Теоретична частота
$[\sigma_{ij}^0; \sigma_{ij}^1]$	n_1	n_1^T
$[\sigma_{ij}^1; \sigma_{ij}^2]$	n_2	n_2^T
$[\sigma_{ij}^2; \sigma_{ij}^{31}]$	n_3	n_3^T
...
$[\sigma_{ij}^{k-2}; \sigma_{ij}^{k-1}]$	n_{k-1}	n_{k-1}^T
$[\sigma_{ij}^{k-1}; \sigma_{ij}^k]$	n_k	n_k^T

Перевірку гіпотези про те, що вказана вибірка підлягає нормальному закону розподілу, проводять за критерієм χ^2 у такий спосіб.

1. Визначають середину відрізків інтервалів:

$$x_\alpha = \frac{1}{2} [\sigma_{ij}^{\alpha-1} + \sigma_{ij}^\alpha], \quad (4.56)$$

$\alpha=1, \dots, k$, k - кількість інтервалів розбиття.

2. Обчислюють вибіркове середнє та дисперсію:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{\alpha=1}^k x_\alpha n_\alpha \quad (4.57)$$

$$n = \sum_{\alpha=1}^k n_\alpha \quad (4.58)$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{\alpha=1}^k (x_\alpha - \bar{x})^2 \quad (4.59)$$

Теоретичні частоти Π_α^T визначають так:

- спершу визначають межі інтегрування

$$\beta = \frac{\sigma_{ij}^{\alpha-1} - x_{\alpha}}{s}; \quad \gamma = \frac{\sigma_{ij}^{\alpha} - x_{\alpha}}{s} \quad (4.60)$$

- далі знаходять теоретичну ймовірність:

$$P_{\alpha} = \int_{\beta}^{\gamma} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (4.61)$$

- за таблицями інтеграла Ейлера [4].

Тоді

$$\Pi_{\alpha}^T = nP_{\alpha} \quad (4.62)$$

Якість результатів, одержаних за критерієм Пірсона, вважають прийнятною, якщо $n \geq 5$. За потреби, деякі інтервали об'єднують (як правило, кратні). Обчислюють значення

$$\chi_{\beta}^2 = \sum_{\alpha=1}^k \frac{(n_{\alpha} - nP_{\alpha})^2}{nP_{\alpha}} \quad (4.63)$$

та χ_{T}^2 , яке визначають з таблиць χ^2 для параметрів: квантиль 0.95; кількість ступенів свободи $m = k - l - 1$, де l - кількість параметрів нормального закону; $l = r$; k - кількість інтервалів після об'єднання нетиформативних; $\chi_{0.95}^2(m)$ - визначають з таблиць χ^2 [30]. Якщо

$$\chi_{\beta}^2 < \chi_{T}^2(m), \quad (4.64)$$

то гіпотеза про нормальний закон генеральної сукупності напружень узгоджується з емпіричними даними вибірки з ймовірністю 0,95. З такою ж ймовірністю буде достовірним значення t_n в (1). Якщо ж умова (4.64) не виконується, то можливі два варіанти: 1) збільшення обсягу вибірки n ; 2) використання одержаних результатів з урахуванням того факту, що t_n визначається з ймовірністю меншою за 0.95, при цьому весь алгоритм розрахунку можна повторити для значень квантилі, менших за 0.95. За результатами моделювання зміни напружено – деформованого стану робочих магістральних та технологічних трубопроводів, циліндрично-оберткових об'єктів, проведеного на основі результатів роботи [66] запропоновано вирішення питання оцінювання технічного ресурсу з урахуванням термінів експлуатації об'єктів, режимів дії на них силових факторів різної природи, які зумовлюють зміну несучої здатності об'єктів.

4.4. Оцінка ефективності розроблених засобів шляхом дослідження економічної моделі в задачах діагностики, технічного контролю та автоматизації

У процесі оцінювання реального технічного стану промислових об'єктів (обладнання цукрових заводів, цементних комбінатів, нафтопереробних заводів, компресорних станцій магістральних газопроводів тощо) крім суто технічних задач задля виявлення змін в технологічних параметрах та визначення оцінки залишкового ресурсу [66, 73, 93], виникають задачі іншого, економіко-соціального характеру. Тобто наскільки фінансово обґрунтованою є реалізація заходів технічної діагностики та контролю, а також управління такими заходами з огляду на забезпечення безаварійної роботи цих об'єктів. Для реалізації зазначених завдань виникає потреба у побудові відповідних математичних моделей теоретико-експериментального характеру з використанням підходів, схематизація яких проведено в роботах [77, 78].

Для реалізації задачі використовуємо апарат звичайних диференціальних рівнянь, що традиційно застосовується для аналізу систем, елементи яких є функціями однієї змінної – як правило, часу t . Найбільш простим у цьому видається використання апарату системи звичайних диференціальних рівнянь зі сталими коефіцієнтами. Проте його використання суттєво обмежує діапазон зміни власних значень [95], тому важко підібрати такі значення коефіцієнтів системи, за яких поведінка функцій, що моделюються, мала б заданий характер, оскільки розв'язками такої системи, як правило, є композиції експонент, періодичних і степеневих функцій. Такий підхід можна використовувати експериментально в задачах, коли всі функції, що моделюються, є асимптотичними сталими величинами. Для прикладу можна розглянути таку модель: нехай $x(t)$ – затрати на технічну діагностику, контроль та вдосконалення управління об'єктом; $y(t)$ – прибуток від роботи об'єкта контролю; $z(t)$ – довговічність роботи об'єкта теоретична; $u(t)$ – затрати на ліквідацію аварійних ситуацій. Зміну цих параметрів у часі можна моделювати за допомогою звичайних диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = k_1 z + k_2 y \\ \frac{dy}{dt} = -k_3 z + k_4 x \\ \frac{dz}{dt} = -k_5 z + k_6 y + k_7 x \\ \frac{du}{dt} = -k_8 x + k_9 z + k_{10} y \end{cases} \quad (4.65)$$

Ця модель у найпростішій формі описує взаємозв'язок між вказаними величинами. В такому випадку можливо побудувати модель, у якій всі вказані величини виходять на деякий інший режим, що відповідає початковим умовам:

$$\begin{cases} x(t_0) = x_0 \\ y(t_0) = y_0 \\ z(t_0) = z_0 \\ u(t_0) = u_0 \end{cases} \quad (4.66)$$

проте

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = x_1 \neq x_0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = y_1 \neq y_0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} z(t) = z_1 \neq z_0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} u(t) = u_1 \neq u_0 \end{cases} \quad (4.67)$$

Якщо водночас у системі (4.65) та в умовах (4.66) всі коефіцієнти та параметри є відомими, то виконання умови (4.67) забезпечується такими вимогами до коренів характеристичного рівняння:

$$\begin{vmatrix} -\lambda & k_2 & k_1 & 0 \\ k_4 & -\lambda & -k_3 & 0 \\ k_7 & k_6 & -k_3 - \lambda & 0 \\ -k_8 & +k_{10} & k_9 & -\lambda \end{vmatrix} = 0 \quad (4.68)$$

тобто:

$$\lambda(-\lambda^2(k_3 + \lambda) - k_4 k_6 k_1 - k_2 k_3 k_7 + k_1 k_7 \lambda + k_4 k_2(\lambda + k_3)) = 0 \quad (4.69)$$

Вибір системи (4.65) як модельної є вдалим, оскільки рівняння (4.69) гарантує, що один з його коренів рівний нулю, а для інших трьох необхідно поставити вимогу від'ємності. Крім того, підбір відповідних коефіцієнтів k може бути здійснений з використанням формули Кардано [71].

Модель (4.65) може бути прокоментована так: змінна t одиниця часу величини $x(t)$ пропорційна довговічності конструкції, $z(t)$ - внесення коштів на контрольні заходи, збільшуються зі збільшенням тривалості часу експлуатації об'єкта і є

пропорційними, $y(t)$ -рівню прибутку підприємств; прибуток $y(t)$ зростає за умови вдалого проведення контрольних заходів $x(t)$ і спадає пропорційно довговічності функціонування об'єкта; довговічність $z(t)$ спадає з часом пропорційно самій цій величині $z(t)$, проте росте пропорційно до $y(t)$: чим більшим є прибуток від роботи підприємства, тим більше коштів може бути виділено на реконструкцію обладнання, а також росте пропорційно кількості коштів, виділених на діагностику та контроль; нарешті величина коштів, необхідних на ліквідацію аварій, пропорційна довговічності об'єкта $z(t)$, прибутку підприємства $y(t)$ та обернено пропорційна (спадає) величині $x(t)$: чим ефективніший контроль, тим меншим є ризик виникнення аварійних ситуацій. Модель (4.65)-(4.66) використовують у тих випадках коли допущення про вихід розв'язків на стаціонарний режим є достатнім для побудови адекватної картини модельованої ситуації.

Допущення (4.67) про стабілізацію параметрів технічного об'єкта в ряді випадків застосовувати недоцільно: якщо очікувати на зростання прибутків за умови, зменшення величини коштів на ліквідацію наслідків аварійних ситуацій, та об'єктивного скорочення довговічності з часом. У такому випадку модель (4.65), (4.66) може бути уточнена шляхом зміни форми відповідних доданків. Утримуючись у рамках позначень, запишемо систему (4.65) в уточненому вигляді:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = k_1z + k_2y \\ \frac{dy}{dt} = -k_3z + k_4x(A_1 - x) \\ \frac{dz}{dt} = k_5z(T - z) + k_6y + k_7x \\ \frac{du}{dt} = -k_8x + k_9z + k_{10}y(A_2 - y) \end{cases} \quad (4.70)$$

з початковими умовами (4.66), зміст яких залишається незмінним. Коментарі до лінійних доданків у системі (4.65) залишаються аналогічними до коментарів системи (4.70), тому необхідно дати коментар до таких складових:

- $k_4x(A_1 - x)$ - цей доданок уточнює модель у тому класі, що виділення коштів на -реалізацію контрольних заходів для вдосконалення системи діагностики та управління об'єктами і є вмотивованими доти, поки вони не набудуть деякого значення A_1 , під час перевищення цього значення прибуток підприємства починає

зменшуватись через те, що надто багато коштів витрачається на ці заходи – постійна перевірка стану об'єктів та удосконалення системи контролю не сприяє розвитку його виробничих можливостей;

- $k_5 z(T - z)$ – за умови перевищення терміну експлуатації об'єкта деякого значення T взагалі важко говорити про його виробничі перспективи, тому його теоретична довговічність спадає;
- $k_{10} y(A_2 - y)$ - підприємство не може самостійно займатися ліквідацією наслідків аварійних ситуацій, якщо його прибуток є недостатнім. Якщо він стає більшим за деяке значення A_2 , підприємство може використовуватися для ліквідації наслідків аварій, що є позитивним моментом у роботі підприємства.

Запис системи (4.65) в уточненій формі (6) дозволяє моделювати більш широкий клас поведінки функцій $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$, $u(t)$ - $z(t)$, $u(t)$ - наприклад, їхню нестационарну поведінку. Для практичної реалізації моделі прийнятною є ситуація поведінки цих функцій, зображених на рис. 4.17, де в умовних одиницях представлено тенденції зміни $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$, $u(t)$.

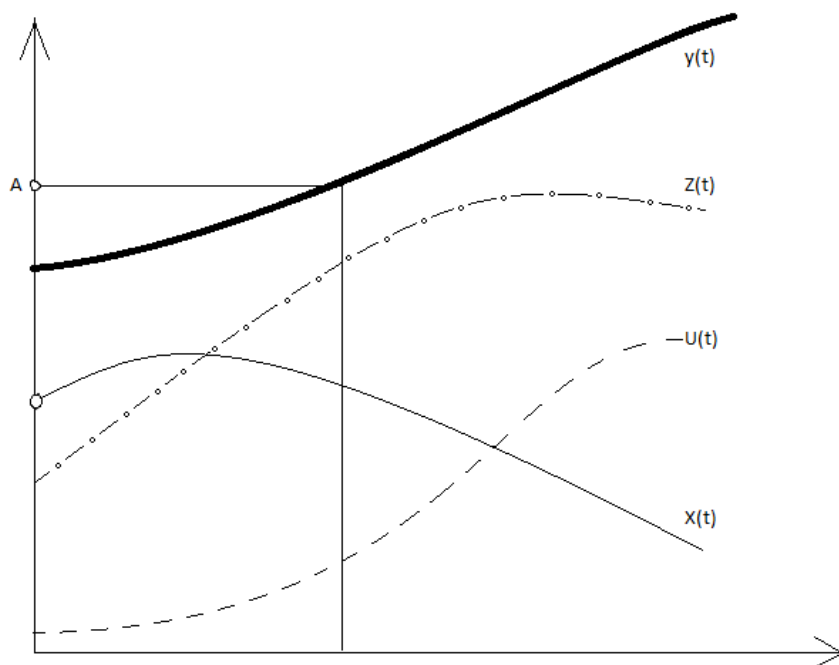


Рисунок 4.17 – Залежності $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$, $u(t)$ в умовних одиницях

Залежність між поведінкою функцій $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$, $u(t)$, згідно з графіком, можемо прокоментувати так: під час зростання змінної t функції $x(t)$ і $y(t)$ поведуть себе протилежно, тобто $x(t)$ спадає, $y(t)$ - зростає, а $z(t)$ і $u(t)$ – при зростанні змінної t набувають досить близькі значення.

Застосування методів звичайних диференціальних рівнянь для обґрунтування доцільності проведення діагностичних досліджень та розроблення засобів їх удосконалення може бути продемонстровано на такому прикладі. Нехай на робочому підприємстві (візьмемо для прикладу цукровий завод) відомою є кількість відмов обладнання в деякий початковий момент часу N_0 та кількість проведених заходів технічної перевірки та діагностування обладнання B_0 .

Необхідно запропонувати математичну модель, яка б описувала залежність між вказаними параметрами $B(t)$ та $N(t)$ в деякий контрольний момент часу. Використаємо очевидні допущення про взаємозв'язок між $B(t)$ та $N(t)$.

Вважатимемо, що за одиницю часу приріст величини $N(t)$ залежить від кількості контрольних діагностичних заходів $B(t)$ лінійно: за умови збільшення $B(t)$ величина $N(t)$ очевидно зменшується:

$$\frac{dN}{dt} = -kB \quad (4.71)$$

де k - коефіцієнт пропорційності. З іншого боку, кількість контрольних заходів пропорційна кількості відмов обладнання:

$$\frac{dB}{dt} = lN \quad (4.72)$$

де l - коефіцієнт пропорційності.

У такому випадку одержуємо систему:

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = -kB \\ \frac{dB}{dt} = lN, \end{cases} \quad (4.73)$$

З початковими умовами:

$$\begin{aligned} N(0) &= N_0 \\ B(0) &= B_0 \end{aligned} \quad (4.74)$$

Система (4.73) з граничними умовами (4.74) допускає аналітичний розв'язок:

$$\frac{dn}{dB} = -\frac{K\vec{B}}{L N} eNdN = -KBd\vec{B}eN^2 + KB^2 = C \quad (4.75)$$

З урахуванням умов (4.74) одержуємо:

$$eN^2 + KB^2 = lNo^2 + KBo^2, \quad (4.76)$$

$$\frac{N^2}{K} + \frac{B^2}{l} = \frac{No^2}{K} + \frac{Bo^2}{l},$$

Звідки, враховуючи додатні значення $B(t)$ та $N(t)$:

$$N^2 = \frac{No^2}{K} - \frac{Bo^2}{l} - \frac{B^2}{l},$$

$$N = \sqrt{\frac{No^2}{K} - \frac{Bo^2}{e} - \frac{B^2}{e}} \quad (4.77)$$

Очевидно, (4.76) - рівняння еліпса, тому залежність між $B(t)$ та $N(t)$ має еліптичний характер. У більш загальному випадку система (4.73) має вигляд, що враховує взаємозв'язок між часом та коефіцієнтами пропорційності: $K = K(t)$; $l = l(t)$ - і може враховувати режим експлуатації об'єкта, тривалість, кліматичні, сезонні й інші умови.

В такому випадку:

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = -k(t)B, \\ \frac{dB}{dt} = l(t)B. \end{cases} \quad (4.78).$$

Як правило, після постановки системи (4.78) її доповнюють умовами (4.74), проте аналітичний розв'язок важко одержати навіть у найпростіших випадках, тому, як правило, для інтегрування (4.78) з умовами (4.74) використовують числові методи [70]. Таким чином, використовуючи підходи, що базуються на використанні залежностей (4.73)-(4.78), вдається встановити, якою повинна бути інтенсивність проведення контрольних заходів на підприємствах зі складними з погляду умов експлуатації обладнання для одержання заданого рівня інтенсивності його відмов.

Розглянуто спрощену модель, для опису якої введено функції $x(t)$; $y(t)$; $z(t)$, які мають такий зміст:

$x(t)$ – затрати на впровадження нових стандартів технічної діагностики та контролю;

$y(t)$ – затрати на ліквідацію наслідків аварійних ситуацій;

$z(t)$ – ефективність роботи елемента досліджуваної промислової системи.

Під час побудови математичної моделі записуємо систему диференціальних рівнянь, що описує, як змінюються відповідні змінні за одиницю часу в допущенні про характер взаємозв'язку між величинами. У результаті одержуємо таку систему звичайних диференціальних рівнянь, що зв'язує змінні $x(t)$; $y(t)$; $z(t)$.

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = K_1x(A - x) - K_2y + K_3z \\ \frac{dy}{dt} = K_4x(A - x) + K_5(B - y)y + K_6z \\ \frac{dz}{dt} = K_7x - K_8y \end{cases} \quad (4.79)$$

з відповідними початковими умовами.

Реалізація моделі (4.79) дозволяє встановити такі значення коефіцієнтів, при яких забезпечується стійкість розв'язків із бажаними асимптотичними значеннями показників та динамікою їх зміни в часі, що показано на рис. 4.18.

$$t(0) = 0 \quad t(1) = 13$$

Given

$$\frac{d}{dt}x(t) = 0.2x(t) \cdot (10 - x(t)) - 0.3y(t) + 0.4z(t) \quad x(t_0) = 2$$

$$\frac{d}{dt}y(t) = 0.2(10 - x(t)) \cdot x(t) + 0.3y(t) \cdot (5 - y(t)) + 0.3z(t) \quad x(t_0) = 4$$

$$\frac{d}{dt}z(t) = 0.4x(t) - 0.3y(t) \quad z(t_0) = 3$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \text{Odesolve} \left[\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}, t, t_1 \right]$$

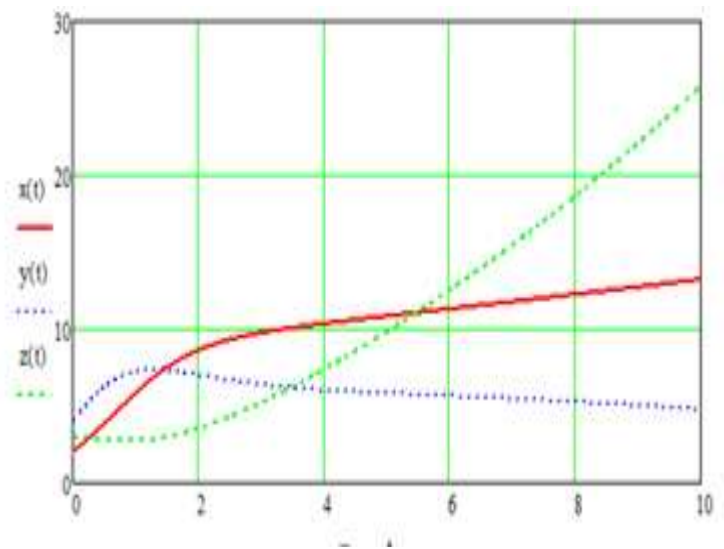


Рисунок 4.18 - Динаміка зміни показників затрат на впровадження нових стандартів технічної діагностики на ліквідацію наслідків аварійних ситуацій та ефективності роботи елемента газотранспортної системи

Під час проведення контролю діагностичних заходів на технічних об'єктах з метою підвищення ефективності управління необхідно застосовувати ефективні методи, які б дозволяли одержувати відчутний результат при відносно невеликих затратах. Водночас, важливо, щоб під час модернізації системи технічного діагностування та управління підприємством успішність залежить від таких критеріїв:

- кількість початкової інформації;
- важливим є одержання достовірної інформації про технічний стан об'єкта з використанням обмеженої інформації про певні фізико-механічні поля, що на нього діють, або за відсутності такої (що зумовлює зміну параметрів, які сили та навантаження);
- достовірність пропонованих моделей;
- рекомендації щодо змін в конструкції або в режимах експлуатації об'єктів;
- методика підбору коефіцієнтів моделі, від якої залежить достовірність не тільки моделі, але і одержаної з її допомогою діагностичної інформації.

4.5. Висновки до четвертого роздіу

Розроблена система автоматичного керування процесом сушіння утфелі в барабанній сушильній установці дозволяє зменшити витрати енергії на сушіння за рахунок оптимального підбору часу перебування сировини в сушильному барабані шляхом керування положенням осі обертання цього барабана, що забезпечує вищий рівень надійності та ритмічності процесом автоматизованого керування.

Розглянуто питання розроблення методики та програмного забезпечення для системи відновлення початкової конфігурації лопаткового апарату елементів конструкції шляхом напилення відновлювального шару за допомогою мікродугового оксидування алюмінію та його сплавів. Основним результатом досліджень є побудова стохастичної моделі, яка дає змогу оцінити частку чи відсоток площі поверхні, обробленої заданою кількістю імпульсів. Форма сліду кожного імпульсу вважається круговою та незмінною. Зі зростанням кількості імпульсів відсоток площі обробленої поверхні експоненціально наближається до максимуму. Параметр цієї експоненціальної залежності прямо пропорційний відношенню площі, яка покривається одним імпульсом до площі всієї поверхні (принаймні в інтервалі значень цього відношення від 0.0001 до 0.001). Точність цієї моделі є не гіршою 1%, принаймні з імовірністю 0.95. Модель побудована методом статистичного аналізу комп'ютерно змодельованого процесу.

Для оцінювання реального технічного стану робочих магістральних та технологічних трубопроводів, циліндрично-оберткових об'єктів вивчено питання оцінки технічного ресурсу з урахуванням термінів експлуатації об'єктів, режимів впливу на них силових факторів різної природи, які обумовлюють зміну несучої здатності об'єктів. Крім того, використано статистичні підходи, які передбачають надання додаткової інформації про способи навантаження досліджуваного об'єкта, наявність навантажень, що мають періодичний характер.

Для цього вивчено компоненти, які характеризують зміну напружень деформованого стану. Для визначення довговічності конструкцій необхідно визначити, чи підпорядковується закон зміни напружень нормальному закону

розподілу, задля чого вибирають ті сектори на циліндричному об'єкті, на яких зміна напружень є максимальними. Потенційно можливо контролювати процес зміни напружень у кожній точці розрахункової сітки, але в такому випадку виникає необхідність здійснення значних обсягів обчислень. Запропоновано розрахункову схему для оцінювання довговічності технологічних обертових об'єктів з використанням статистичного критерію, а також спосіб визначення зміни напружено-деформованого стану вказаних об'єктів. Реалізовано методику перевірки гіпотези про нормальний закон розподілу випадкової величини – зміни напруженого стану об'єкта дослідження. Встановлено напрямки подальших досліджень.

Розглянуто задачу економіко-соціального характеру, тобто наскільки фінансово обґрунтованою є реалізація заходів технічної діагностики та контролю, а також удосконалення управління цими заходами з погляду забезпечення безаварійної роботи об'єктів. Для вирішення цих питань виникає потреба побудови відповідних математичних моделей теоретико-експериментального характеру. Задля цього використано апарат звичайних диференціальних рівнянь. Такий підхід можна використовувати експериментально в задачах, коли всі функції, що моделюються, є асимптотичними сталими величинами. Під час проведення контролю діагностичних заходів на технічних об'єктах з метою підвищення ефективності управління ними необхідно застосовувати ефективні методи, які б давали змогу одержувати відчутний результат при відносно невеликих затратах. За результатами досліджень, приведеними в даному розділі, опубліковано роботи [26, 70, 115, 68, 112].

5. ВИСНОВКИ

В дисертаційному дослідженні на основі поставлених задач, одержано такі результати:

1. Проведено аналіз ПОО як об'єктів контролю, вивчено особливості їхньої конструкцій, проаналізовано існуючі методи експериментальних досліджень ПОО з вказівкою існуючих проблем; здійснено аналіз використовуваних математичних моделей для оцінювання параметрів напруженого стану досліджуваних об'єктів з відзначенням невирішених задач моделювання, намічено задачі, що можуть бути вирішені в процесі реалізації дисертаційного дослідження.

2. Для вирішення другої задачі дослідження формалізовано клас задач технічної діагностики та контролю, некоректних з погляду математики, для яких будується регуляризуючий алгоритм. Наведено розв'язання задачі оцінювання зміни напружено-деформованого стану модельного об'єкта з реальною геометричною конфігурацією за даними про переміщення точок поверхні. Побудовано розв'язання задачі про НДС технологічної труби, яка в процесі експлуатації підлягає бандажуванню на основі розв'язання задачі Ламе для двошарової труби. Досліджено зміну напружено-деформованого стану в реальному технологічному об'єкті цукрової промисловості, що в процесі експлуатації зазнає значних технологічних впливів та має складну просторову конфігурацію осі. Вивчено особливості зміни шести компонент тензору напружень за переміщеннями шести точок поверхні досліджуваного ТОЦП.

3. Удосконалено методи оцінювання аеродинамічних впливів на технологічне обладнання (вентилятори сушки) в умовах використання, як об'єктів керування вентиляторів і сушок цукрової промисловості, що на відміну від існуючих АСК, дозволяє, з урахуванням вказаних впливів, забезпечити вищий рівень надійності та ритмічності автоматизованим керуванням. Проведено вибір системи координат для еліптичних профілів з різними величинами малих півосей, створено математичну модель процесу обтікання з використанням інтегрального рівняння Фредгольма II роду для визначення дотичної компоненти швидкості потоку, запропоновано метод

його чисельного розв'язку шляхом використання формули трапецій для наближеного інтегрування визначених інтегралів, створено відповідне програмне забезпечення. Точність методу моделювання визначено шляхом розбиття відрізка інтегрування у формулі трапецій. Розглянуто випадки для різних значень півосей та кількості контрольних точок $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,08 \div 0,2, N=23, N=47$. Проведено тестові розрахунки для модельних еліптичних профілів під різними кутами атаки та з різною величиною малих півосей верхньої та нижньої поверхонь, виявлено добре узгодження з даними про розрахунки за іншими моделями. За допомогою розроблених підходів виконано моделювання зміни геометрії профілю завдяки відкладанню на поверхні профілю компонентів газорідних сумішей та за умови зношення лопатевого агрегату в процесі експлуатації внаслідок дії абразивних компонент. Досліджено зміну двох основних характеристик – коефіцієнту аеродинамічного опору та коефіцієнту підйимальної сили. Методику узагальнено на випадок системи лопатей з урахуванням кількості ушкоджених профілів та ступеня ушкодження. Вказано межі подальшого використання методики.

4. Розглянуто питання розроблення методики та програмного забезпечення для системи відновлення початкової конфігурації лопаткового апарату елементів конструкції напиленням відновлювального шару шляхом мікродугового оксидування алюмінію та його сплавів. Основним результатом досліджень є побудова стохастичної моделі, яка дає змогу оцінити частку чи відсоток площі поверхні, яка обробляється заданою кількістю імпульсів. Форма сліду кожного імпульсу вважається круговою та незмінною. З ростом кількості імпульсів відсоток площі обробленої поверхні експоненціально наближається до максимуму. Параметр цієї експоненціальної залежності прямо пропорційний відношенню площі, яка покривається одним імпульсом до площі всієї поверхні (принаймні в інтервалі значень цього відношення від 0.0001 до 0.001). Точність цієї моделі не є гіршою 1%, принаймні з ймовірністю 0.95. Модель побудована методом статистичного аналізу комп'ютерно змодельованого процесу.

5. Розроблена система автоматичного керування барабанною сушильною установкою для висушування цукру із забезпеченням регулювання вологості вихідної

сировини і її температури. Задана вологість досягається зміною кількості теплого сухого повітря зі зміною часу сушіння шляхом коректуванням кута нахилу осі сушильного барабану. Задана температура вихідної сировини досягається керуванням кількості холодного сухого повітря.

Для зменшення впливу нерівномірності потоку вихідної сировини на датчик вологості, розроблено авторегресійний фільтр із коефіцієнтом згладжування, залежним від напрямку зміни вхідного сигналу.

Розроблена система автоматичного керування процесом сушіння утфелі в барабанній сушильній установці, дозволяє зменшити витрати енергії на сушіння за рахунок оптимального підбору часу перебування сировини в сушильному барабані шляхом керування положенням осі обертання цього барабана, що дозволяє забезпечити ідентифікацію і більш точний контроль параметрів об'єкту в процесі керування ним АСК.

6. Для оцінювання реального технічного стану діючих циліндрично-обертових об'єктів вивчено питання оцінки технічного ресурсу з урахуванням термінів експлуатації об'єктів, режимів дії на них силових факторів різної природи, які зумовлюють зміну несучої здатності об'єктів. Задля цього використано статистичні підходи, які передбачають надання додаткової інформації про способи навантаження об'єкта, що досліджується, наявність навантажень, що мають періодичний характер, вивчено компоненти, які характеризують зміну напружень деформованого стану. Для з'ясування довговічності конструкцій необхідно визначити, чи підпорядковується закон зміни напружень нормальному закону розподілу. Водночас вибрано ті сектори на циліндричному об'єкті, на яких зміна напружень є максимальною. Потенційно можливо контролювати процес зміни напружень у кожній точці розрахункової сітки, але в такому випадку виникає необхідність мати справу зі значними обсягами обчислень. Запропоновано розрахункову схему для оцінювання довговічності технологічних обертових об'єктів з використанням статистичного критерію, а також спосіб визначення зміни напружено-деформованого стану вказаних об'єктів. Реалізовано методику перевірки гіпотези про нормальний закон розподілу випадкової величини – зміни напруженого стану об'єкта дослідження.

7. Розглянуто задачу економіко-соціального характеру, тобто наскільки фінансово обґрунтованими є реалізація заходів технічної діагностики та контролю, а також удосконалення управління ними з погляду забезпечення безаварійної роботи цих об'єктів. Для вирішення цих питань побудовано відповідні математичні моделі теоретико-експериментального характеру. Задля цього використано апарат звичайних диференціальних рівнянь. Такий підхід можна доцільно використовувати в тих задачах, коли всі функції, що моделюються, є асимптотичними сталими величинами. Під час проведення контролю діагностичних заходів на технічних об'єктах з метою підвищення ефективності управління ними, необхідно застосовувати ефективні методи, які б дозволяли одержувати відчутний результат при відносно невеликих затратах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абен Х. К. Интегральная фотоупругость. Таллин: Вагрус, 1975. 218 с.
2. Акустическая эмиссия. Термины, определения и обозначения: ГОСТ 27655-88. М.: Изд. стандартов, 1988. 11 с.
3. Алберг Дж., Нильсон Э., Уолш Дж. Теория сплайнов и её приложения. М.: Мир, 1972. 316 с.
4. Александров А. Я., Ахметзянов М. Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. М.: Наука, 1973. 576 с.
5. Алфутов Н. А. Основы расчета на устойчивость упругих систем. М.: Машиностроение. 1991. 336 с.
6. Баш В. Я. Исследование напряжений и деформаций термоэлектрическим методом. К.: Наукова думка, 1984. 100 с.
7. Бондарь А. Г. Математическое моделирование в химической технологии. К.: Вища школа, 1973. 280 с.
8. Булавацький В. М., Кривонос Ю. Г., Скопецький В. В. Некласичні математичні моделі процесів тепло- та масопереносу. К.: Наукова думка, 2005. 284 с.
9. Бутковский А. Г. Методы управления системами с распределёнными параметрами. М.: Наука, 1975. 568 с.
10. Бутковский А. Г. Структурная теория распределенных систем. М.: Наука, 1977. 320 с.
11. Бутковский А. Г. Характеристика систем с распределенными параметрами. М.: Наука, 1979. 224 с.
12. Белоцерковский С. М., Котовский В. Н., Ништ М. И., Федоров Р. М. Математическое моделирование плоскопараллельного отрывного обтекания тел. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 232 с.
13. Белоцерковский С. М., Ништ М. И. Отрывное и безотрывное обтекание тонких крыльев идеальной жидкостью. М.: Наука, 1978. 352 с.
14. Болотин В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М.: Машиностроение, 1984. 321 с.

15. Борщевский А. А., Ильин А. С. Механическое оборудование для производства строительных материалов и изделий. М., 1987. 368 с.
16. Бидерман В. Л. Механика тонкостенных конструкций. М.: Машиностроение, 1977. 488 с.
17. Булгаков К. В., Кодолов В. У., Липанов А. П. Моделирование горения полимерных материалов. М.: Химия, 1990. 240 с.
18. Вабищевич П. Н. Численное моделирование. М.: Изд-во МГУ, 1993. 152 с.
19. Вершинин В. В., Завьялов Ю. С., Павлов Н. Н. Экстремальные свойства сплайнов и задача сглаживания / В. В. Вершинин, Новосибирск: Наука, 1988. 102 с.
20. Вигак В. М. Управление температурными напряжениями и перемещениями. К.: Наукова думка, 312 с.
21. Вологжанинов Ю. И. Приближенные методы разделения напряжений в экспериментальной механике. К.: Наукова думка. 1993. 157 с.
22. Гаврись А. П., Шевчук П. Р. Математическое моделирование процессов при высокотемпературном напылении покрытий. Матем. методы и физ.-мех. поля. 1991. № 33. С. 13–18.
23. Гребенников А. И. Метод сплайнов и решение некорректных задач теории приближений. М.: Из-во МГУ, 1983. 208 с.
24. Григоренко Я. М. Некоторые подходы к численному решению линейных и нелинейных задач теории оболочек в классической и уточненной постановках. Прикладная механика. 1996. Т. 2 (42). №6. С. 3–39.
25. Григорчук Г. В., Григорчук Л. І., Олійник А. П., Рис В. В. Моделювання деформування об'єктів, що працюють в умовах температурних впливів. Прикарпатський вісник наукового товариства ім. Шевченка. Число. Івано Франківськ, 2019. №1 (53). С. 38–44.
26. Григорчук Г. В., Григорчук Л. І., Роп'як Л. Я. Комп'ютерна програма для моделювання процесу плазмово-електролітичного оксидування алюмінію. Інтелектуальний продукт вчених і винахідників Прикарпаття 2016 р. Івано-Франківськ, 2016. С. 39–41.

27. Григорчук Г. В., Григорчук В. Л., Григорчук Л. І. Аналіз процесів експлуатації обертових об'єктів складної просторової конфігурації та методів контролю їх технічного стану. Методи та прилади контролю якості. Івано-Франківськ, 2017. №1 (38).С. 103–111.
28. Григорчук Г. В., Григорчук Л. І. Міжнародна наукова конференція “Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій до 100-річчя з дня заснування НАН України та на вшанування пам'яті Івана Пулюя”, 2018, ТНТУ ім. І. Пулюя, Тернопіль.
29. Григорчук Г. В. Математичне моделювання процесів деформації обертових об'єктів складної просторової конфігурації. Методи та прилади контролю якості. Івано-Франківськ, 2017. №2 (39). С.102–107.
30. Григорчук Г. В., Олійник А. П., Григорчук Л. І. Визначення напруженого стану барабанної труби та бандажу при роботі сушильних агрегатів. Методи та прилади контролю якості. Івано-Франківськ, 2018. №1 (40). С. 132–136.
31. Григорчук Г. В., Григорчук Л. І. Дослідження напруженого стану барабанної труби та бандажу при роботі сушильних агрегатів. World Science. Multidisciplinary Scientific Edition. 2018. №6 (34). С. 64–67. DOI: 10.31435/rsglobal_ws/12062018/5822.
32. Григорчук Г. В., Олійник А. П. Розробка системи оцінки аеродинамічних характеристик лопатей сушильного агрегату та його технологічних вентиляторів. Методи та прилади контролю якості. Івано-Франківськ, 2018. №2 (41). С.82–90.
33. Григорчук Л, Кустов В., Осипчук М., Роп'як Л. Дослідження процесу зміцнення поверхонь деталей машин обробкою іскровими розрядами Науковий журнал Вісник ТНТУ. – 2011. – Т.16, №3. – С. 116-122.
34. Грубов В. И. Математическое моделирование непрерывных технологических процессов. К.: Изд-во Киев. ун-та, 1971. 174 с.(20 Гузь А. Н. Основы трехмерной теории устойчивости деформируемых тел. К.: Вища школа, 1986. 511 с.
35. Горбовец М. Н. Современные машины и оборудование для конвейерного производства изделий крупнопанельного домостроения. М.: ЦНИИТЭстроймаш, 1987. 44 с.

36. Горбовец М. Н. Состояние и перспективы развития оборудования для сборного железобетона. М.: ЦНИИТЭстроймаш, 1984. 47 с.
37. Голінко І. М., Остапенко Ю. О. Моделивання динамічного режиму підзони випалювання. Автоматизація виробничих процесів. 1999. № 1/2. С. 40–44.
38. Гущин С. Н., Лисиенко В. Г., Кутин В. Б. Моделирование и управление тепловой работой стекловаренных печей. Екатеринбург: УГТУ, 1997. 398 с.
39. Гусаров, А. А. (2002) Автобалансирующие устройства прямого действия. Москва : Наука. 119 с.
40. Днепренко В. Н., Ларииков Л. Н., Щирица А. И. Усреднение упругих констант и модуля Юнга поликристаллов с кубической решеткой при наличии аксиальной текстуры. Металлофизика. К.: Наукова думка, 1986. – Т. 8. № 3. С. 87–90.
41. Дуда В. Т. Цемент. М.: Стройиздат, 1981. 464 с.
42. Днепренко В. Н., Ларииков Л. Н., Щирица А. И. Усреднение упругих констант и модуля Юнга поликристаллов с кубической решеткой при наличии аксиальной текстуры. Металлофизика. К.: Наукова думка, 1986. – Т. 8. № 3. С. 87–90.
43. Ельперін І.В., Пупена О.М., Сідлецький В.М., Швед С.М.. Автоматизація виробничих процесів: підручник. К.: Видавництво Ліра-К, 2015.С.378
44. Зігунов О.М., Стеценко Д.О. Система автоматизації вакуум-апаратів І продукту. Матеріали V Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами», 22 листопада 2018. [Електронний ресурс] – К: НУХТ, 2018 – 360 с. (с.40-41) — Режим доступу: <http://nuft.edu.ua/page/view/konferentsii>
45. Зорич В. А. Математический анализ. Т.1. М.: Наука,1981. 544с.
46. Зорин Е. Е., Ланчанов Г. А., Степаненко А. Н., Шибнев А. В. Работоспособность трубопроводов. 3 ч. М.: Сопротивляемость разрушений. 350 с.
47. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981. 413 с.
48. Карзов Г. П., Леонов В. П., Тимофеев Б. Т. Сварные сосуды высокого давления. Л.: Машиностроение, 1982. 287 с.

49. Ковалюк Д. О., Москвіна С. М. Моделювання теплотехнічних об'єктів з розподіленими параметрами: монографія. Вінниця: ВНТУ, 2010. 182 с.
50. Корендій, В. М., Кузьо, І. В. (2013) Математична модель аеродинамічної системи вітроустановки. Вібрації в техніці та технологіях. № 2 (70). С. 27–32
51. Лехницький С. Г. Теория упругости анизотропного тела. М.: Наука, 1977. 415 с.
52. Лебедев П.Д. Расчет и проектирование сушильных установок./М.–Л.: Госэнергоиздат, 1962.–320.
53. Ленюк М.П., Петрик М.Р. Методи інтегральних перетворень Фур'є-Бесселя в задачах математичного моделювання масопереносу в неоднорідних середовищах. Київ: Наукова думка. 2000. 372 с.
54. Лемешко Б. Ю., Лемешко С. Б. Сравнительный анализ критериев проверки отклонения распределения от нормального закона. Метрология. 2005. № 2. С. 3–23.
55. Литвин О. М. Інтерлінація функцій та деякі їх застосування. Х.: Основа, 2002. 544с.
56. Лазерні технології та комп'ютерне моделювання. Під ред. С. О.Лук'яненка. К.: Вістка, 2009. 296 с.
57. Максименко В. П. К определению напряженного состояния составной конструкции при статическом нагружении. Прикл. механика. 2001. Т. 37. № 12. С. 98–104.
58. Математическое моделирование / под ред. Дж. Эндрюса, Э. Мак-Лоуна. М.: Мир, 1979. 278 с.
59. Малкин А. Я., Чалых А. Е. Диффузия и вязкость полимеров. М.: Химия, 1979. 302с.
60. Методи математичного моделювання та ідентифікації складних процесів і систем на основі високопродуктивних обчислень (нейро- та нанопористі кібер-фізичні системи із зворотніми зв'язками, моделі з даними розрідженої структури, паралельні обчислення): монографія / О.М. Хіміч, та ін.; за ред. наукової ради Національної академії наук України. Київ : Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова, 2019. 176 с. ISBN: 978-966-02- 9188-1, <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/30745>.

61. Методичні вказівки для виконання курсового проекту з дисципліни «Оптичний, тепловий та радіохвильовий контроль». — Івано-Франківськ: ІФДТУНГ, 1997.
62. Нестеренко А.Н., Попов О.В., Рудич О.В. Розв'язування систем нелінійних рівнянь на комп'ютерах з паралельною організацією обчислень. Математичне та комп'ютерне моделювання. Фізико-математичні науки: зб. наук. праць 2019. Вип. 19. С. 85–91.
63. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочное пособие [Под редакцией В. В. Клюева]. М.: Машиностроение, 2003. 654 с.
64. Носенко Н. Е. Механизация и автоматизация производства арматурных работ. М.: Стройиздат, 1982. 312 с.
65. Олийник А. П. Моделирование напряженно-деформированного состояния торообразных участков трубопроводов по данным о перемещении точек их поверхности. Методы и средства технической диагностики: Сборник научных статей. Йошкар-Ола: Мар.гос.ун-т., 2008. С.161–166.
66. Олійник А. П. Математичні моделі процесу квазістаціонарного деформування трубопровідних та промислових систем при зміні їх просторової конфігурації: монографія. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2010. 320 с.
67. Олійник А. П., Фешанич Л. І., Григорчук Г. В. Розроблення системи оцінювання аеродинамічних характеристик лопаткового агрегату складних технічних систем. Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування ім. Адмірала Макарова. Миколаїв, № 1(475), 2019. С. 103–108.
68. Олійник А. П., Григорчук Г. В., Клапоущак О. І., Фешанич Л. І. Оцінка довговічності об'єктів за даними про переміщення точок їх поверхні. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. Хмельницький, 2020. С.158–162.
69. Олійник А. П., Заміховський Л. М. Математичний апарат для контролю НДС трубопроводів при зміні їх просторового положення. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2008. 306

70. Олійник А.П., Григорчук Г.В., Говдяк Р.М. Застосування методів математичного моделювання для оцінки технічного стану трубопроводів та стану довкілля. Методи та прилади контролю якості. Івано-Франківськ, 2019. №1(42). С.97–104.
71. Пак В. В., Носенко Ю. Л. Высшая математика. Днепропетровск.: Сталкер, 1997. 432 с.
72. Перетворення Фур'є, Лапласа: узагальнення та застосування: навч.-метод. посіб. [для студентів та аспірантів мех.-мат. і природн. спец. ВНЗ] / Г. П. Лопушанська, А. О. Лопушанський, О. М. М'яус ; М-во освіти і науки України, Львів. нац. ун-т ім. І. Франка. Львів: ЛНУ, 2014. 152 с
73. Петрик М.Р., Хіміч О.М., Бойко І.В., Петрик О.Ю. Високопродуктивні обчислювальні методи і технології моделювання нанопористих систем зі зворотніми зв'язками для адсорбційного очищення газів. Вісник національного ун-ту водного госп-ва та природокористування. Технічні науки. Вип. 3(87), 2019. С. 66-83.
74. Писаренко Г. С., Яковлев А. Л., Матвеев В. В. Справочник по сопротивлению материалов. К.: Наукова думка, 1975. 704 с.
75. Побезря Б. Е. Лекции по тензорному анализу. М.: Из-во Московского университета, 1986. 264 с.
76. Поляк В. В., Саркисов П. Д., Солинов В. Ф., Царицын М. А. Технология строительного и технического стекла и ситаллов. М.: Стройиздат, 1983. 432 с.
77. Рапопорт Э. Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами. М.: Высшая школа, 2003. 298 с.
78. Рапопорт Э. Я. Анализ и синтез систем автоматического управления с распределенными параметрами. М.: Высш. шк., 2005. 292 с.
79. Рей У. Методы управления технологическими процессами. М.: Мир, 1983. 367 с.
80. Роговой М. М. Технология искусственных пористых заполнителей и керамики. М.: Стройиздат, 1979. 319 с.
81. Розробка автоматичного управління процесу сушіння полідисперсних матеріалів під виважено-закрученому шарі. Промисловість, виробництво. <http://www.8ref.com/19/referat/196168.html>.

82. Самарский А. А., Михайлов П. П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 520 с.
83. Самарский А. А., Гулин А. В. Численные методы. М.: Наука, 1989. 432 с. (42
84. Свердан П. П. Вища математика (Математичний аналіз і теорія ймовірностей). К.: Знання, 2008. 450 с.
85. Седов Л. И. Механика сплошных сред. М. Наука. 1984. 572 с.
86. Сивко В. Й. Механічне обладнання підприємств будівельних виробів. К.: Вища шк., 1994. 364 с.
87. Силенок С. Г., Гризак Ю. С., Лямин В. Н. и др. Печные агрегаты цементной промышленности. М.: Машиностроение, 1984. 166 с.
88. Справочник по инженерной геодезии [П. И. Баран, С. П. Войтенко, Ю. В. Полищук и др.]. К.: Вища школа, 1978. 376 с.
89. Стасюк І.Д., Матіко Г.Ф., Крих Г.Б. Автоматизоване керування випарною установкою за критерієм мінімізації енергетичних затрат. Матеріали V Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами», 22 листопада 2018. [Електронний ресурс] – К: НУХТ, 2018 – 360 с. С.97-98. Режим доступу: <http://nuft.edu.ua/page/view/konferentsii>
90. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 285 с
91. Тимошенко С. П. Теория упругости. М.: Наука, 1975. 576 с.
92. Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю [Електронний ресурс]: підручник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Комп'ютерноінтегровані технології та системи неруйнівного контролю і діагностики» спеціальності «Автоматизація та комп'ютерноінтегровані технології» / Р. М. Галаган; КПІ ім. Ігоря Сікорського. –Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 263 с.
93. Туренко А. В. Расчет глиноперерабатывающего оборудования и прессов пластического формования для производства керамических строительных изделий. М.: РИО МИСИ им.В. В. Куйбышева, 1985. 86 с.

94. Федоренко Д. П. Приближенные решения задач оптимального управления. М.: Наука. 1978. 478 с.
95. Флетчер К. Численные методы на основе метода Галеркина. М.: Мир, 1988 352 с.
96. Хайрер Э., Нёрсетт С., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. М.: Мир, 1990. 512 с.
97. Харионовский В. В. Повышение прочности газопроводов в сложных условиях. Л.: Надра, 1990. 180 с.
98. Цапенко В.К., Куц Ю.В. Основы ультразвукового неруйнівного контролю: Підручник. Київ: НТУУ “КПІ”.- 2009. - 431 с.
99. Чекурін В. Ф., Олійник А. П. Некоректна задача відновлення напружено-деформованого стану криволінійних циліндричних тіл за відомими переміщеннями певної множини точок поверхні. Крайові задачі термомеханіки : зб. наук. пр. К.: Інститут математики НАН України, 1996. Ч. II. С. 160–165.
100. Шевяков А. А., Яковлева Р. В. Управление тепловыми объектами с распределенными параметрами. М.: Энергоатомиздат, 1986. 206 с.
101. Ширяев Е. Е. Картографическое отображение, преобразование и анализ геоинформации. М.: Недра, 1984. 248 с.
102. Шулькин Ю. Б. Теория упругих стержневых конструкций. М.: Наука, 1984. 272с.
103. Шкадов В. Я., Зайцев А. А., Комаров А. М. и др. Применение численных методов к расчету аэродинамики элементов летательных аппаратов. Отчет механико-математического факультета МГУ. 1983. №3. 87 с.
104. Штангеев К. О. Сушка цукру та жому в бурякоцукровій галузі. Київ: ЮНІДО, 2015. 44 с.
105. Яцун, В. В. (2009) Математична модель зрівноваження кульовими автобалансирами крильчатки осьового вентилятора. Вісник гірничого університету. № 9. С. 11–18.
106. Ahmed T. H., M. Kinney. Advanced Reservoir Engineering. Boston, MA: Gulf Proff. Publishing, 2005. 422 p.
107. Allen A. I., Hutchings M. T., Sayers C. M., Allen D. R., Smith R. I. Use of neutron diffraction texture measurements to establish a model for calculation of ultrasonic velocities

in highly oriented austenitic weld material. *Journal of Applied Physics*. 54 (2), 1983. P. 555–560.

108. Bai Y. *Pipelines and Risers* (Elsevier Ocean Engineering Book Series; vol.3). Oxford, UK: Elsevier Science Ltd., 2001. 526 p.

109. Bejan A., Kraus A. *Heat Transfer Handbook*. Hoboken, NJ: John Wiley @Sons, Inc. 471 p.

110. Cline A. K. Scalar and Planar Valued Curve Fitting Using Splines Under Tension. *Communications of the ACM*. V.17. № 4. P. 218–228.

111. Dolan I. T. Take-or-pay and natural gas regulatory problems. *Pipeline Ind.* 1998. V. 68. № 5. P. 27–29.

112. Grygorchuk G., Oliynyk A., Grygorchuk L., Tyrlych V., Rys V. Estimation of the durability of technological rotating objects by data on the displacement of their surface points. 2020 10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Deggendorf, Germany, 16-18 Sept. 2020. P. 265–268. DOI: 10.1109/ACIT49673.2020.9209013. ISBN:978-1-7281-6759-6.

113. Grygorchuk G. V., Oliynyk A. P., Grygorchuk L. I. The research of the model deformation process of rotating objects. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І Вернадського. Серія: технічні науки*. 2019. Том 30 (69). №3. Частина I. Київ, С.86–90.

114. Ledbetter H. M., Frederick N. V., Austin M. W. Elastic-constant variability in stainless-steel. *Journal of Applied Physics*. 1980. № 51. 10 January. P. 305–309.

115. Oliynyk A. P., Grygorchuk G. V., Nezamay B. S., Feshanych L. I. Usage of the apparatus of ordinary differential equations in modelling of economic and environmental systems. *Математичне моделювання в економіці*. 2019. Київ, № 3 (16). С. 57–66. DOI: 10.35350/2409-8876-2019-16-3-57-66.

Додатки

Додаток А

ЗАТВЕРДЖУЮ



Кириаченко В. В.

2020 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційного дослідження
асистента кафедри прикладної математики Івано-Франківського
Національного технічного університету нафти і газу
Григорчук Галини Василівни.

Комісія у складі:

Директор ПрАТ «Теопільський цукровий завод»- Кириаченко Василь
Володимирович.

Головний механік ПрАТ «Теопільський цукровий завод»-Гранкін
Олексій Анатолієвич.

Головний інженер ПрАТ «Теопільський цукровий завод»-Мартинюк
Володимир Анатолієвич.

цим актом засвідчує, що результати дисертаційного дослідження асистента
кафедри прикладної математики Григорчук Г.В. та її керівника завідувача каф.
прикладної математики д.т.н.професора Олійника Андрія Петровича на тему:
«Моделі та засоби підвищення ефективності автоматизованого контролю
технологічних процесів на протяглих квазіциліндричних обертових об'єктах»
за спеціальністю 151 – автоматизація та комп'ютерно- інтегровані технології на
здобуття доктора філософії використані теоретичні доробки на заводі цукрової
промисловості.

Григорчук Г.В. був розроблений патент на корисну модель який
відноситься до апаратів з обертним барабаном і може бути використаний у
хімічній і гірничорудній промисловості, а також в промисловості будівельних
матеріалів(для випалу вапна) як для оберткової печі, так і для оберткових об'єктів
сушки цукру, жому, кристалізатора, тощо.

Введення у конструкцію опорних пристроїв кареток, на яких розміщені з
можливістю обертання опорні ролики, дозволяє змінювати міжцентрові
відстані в кожній парі опорних роликів і тим самим змінювати висотне

положення барабана у вертикальних площинах, що проходять через опорні пристрої.

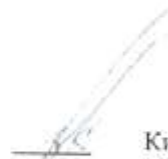




Оснащення опорних пристроїв напрямними надає можливість поступального переміщення кареткам з опорними роликами у горизонтальній площині.

Григорчук Г.В. запропонувала і розробила патент на програму для удосконалення довготи тривалості роботи лопаток сушильного барабана. Розробка проведена для узагальненої моделі обробки деталей поверхні іскровими розрядами із урахуванням часткових накладань іскрових розрядів, які зміцнюють дану поверхню.

Комплекс розроблених моделей передано для використання при рішенні прикладних задач, обґрунтування конструктивно-технологічних рішень і параметрів конструкцій ряду технологічних машин для операції сушіння цукру і жому.

Наукові і практичні результати, одержані Григорчук Г.В. в процесі роботи над дисертацією, мають наукову і практичну цінність і можуть бути рекомендовані для впровадження на інших підприємствах цукрової промисловості.

Члени комісії :

Директор		
ПрАТ «Теофіпольський цукровий завод»-		Кириаченко В.В.
Головний інженер		
ПрАТ «Теофіпольський цукровий завод»-		Мартинюк В. А.
Головний механік		
ПрАТ «Теофіпольський цукровий завод»	- 	Гранкін О. А.
Представники ІФНТУНГ :		
завідувач каф. прикладної математики		
д.т.н.професор		Олійник А.П.
асистент каф. прикладної математики -		Григорчук Г.В.

Додаток Б

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор

ТОВ «Старокостянтинівцукор»



Олександр Співак

2020 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційного дослідження
асистента кафедри прикладної математики Івано-Франківського
Національного технічного університету нафти і газу
Григорчук Галини Василівни.

Комісія у складі:

Директор ТОВ «Старокостянтинівцукор»- Олександр Співак

Технічний директор ТОВ «Старокостянтинівцукор» - Михайло Співак

Головний інженер ТОВ «Старокостянтинівцукор» -Кирик Віталій

цим актом засвідчує, що результати дисертаційного дослідження асистента кафедри прикладної математики Григорчук Галини Василівни, та її керівника доктора технічних наук, професора Олійника Андрія Петровича, на тему: «Моделі та засоби підвищення ефективності автоматизованого контролю технологічних процесів на протяглих квазіциліндричних обертових об'єктах» за спеціальністю 151 – автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології на здобуття доктора філософії, використані теоретичні доробки на заводі цукрової промисловості.

Григорчук Г.В. був розроблений патент на корисну модель, який відноситься до апаратів з обертовим барабаном, і може бути використаний у хімічній і гірничорудній промисловості, а також в промисловості будівельних матеріалів (для випалу вапна) як для обертової печі, так і для обертових об'єктів сушки цукру, жому, кристалізатора, тощо.

Введення у конструкцію опорних пристроїв кареток, на яких розміщені з можливістю обертання опорні ролики, дозволяє змінювати міжцентрові відстані в кожній парі опорних роликів, і тим самим змінювати висотне положення барабана у вертикальних площинах, що проходять через опорні пристрої.

Оснащення опорних пристроїв напрямними надає можливість поступального переміщення кареткам з опорними роликками у горизонтальній площині.

Для оцінки реального технічного стану промислових об'єктів цукрових заводів, крім суцільно технічних задач виявлення змін в технологічних параметрах та визначення оцінки залишкового ресурсу виникають задачі іншого, економіко-соціального характеру. Для вирішення цих питань розроблено математичну модель теоретико-експериментального характеру з використання підходів схематизації, яка вивчена в дисертаційній роботі Григорчук Г.В.

Григорчук Г.В. запропонувала математичну модель процесу деформування та напруженого стану протяглих обертових об'єктів складної геометричної конфігурації. Обрано клас моделі як некоректної задачі рівнянь математичної фізики. Запропоновано модель процесу деформування прямолінійної тороподібної та конічної ділянок. Запропоновано модель напруженого стану цукрових промислових об'єктів.

Наукові і практичні результати, одержані Григорчук Г.В. в процесі роботи над дисертацією, мають наукову і практичну цінність і можуть бути рекомендовані для впровадження на інших підприємствах цукрової промисловості.

Члени комісії :

Директор

ТОВ «Старокостянтинівцукор» -

Технічний директор

ТОВ «Старокостянтинівцукор» -

Головний інженер

ТОВ «Старокостянтинівцукор» -


О.Співак


М.Співак


В.Кирик

Представники ІФНТУНГ:

завідувач каф .прикладної математики

д.т.н.професор ІФНТУНГ -

асистент кафедри прикладної

математики ІФНТУНГ


А.Олійник


Г.Григорчук

Додаток В

УКРАЇНА



СВІДОЦТВО
про реєстрацію авторського права на твір

№ 92700

Комп'ютерна програма "Моделювання процесу мікродугового окиснення алюмінію та його сплавів" ("PEO-Andromeda (Plasma electrolytic oxidation)")
(вид, назва твору)

Автор(и) Григорчук Галина Василівна, Олійник Андрій Петрович, Григорчук Любомир Іванович, Витвицький Василь Степанович, Роп'як Любомир Ярославович, Пригоровська Тетяна Олексіївна, Величкович Андрій Семенович, Корнута Олена Володимирівна
(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації 08.10.2019



Заступник Міністра розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України Д. О. Романович



118 - Ukraine - Dec 19 2011 20:11:11



**МІНІСТЕРСТВО РОЗВИТКУ ЕКОНОМІКИ, ТОРГІВЛІ
ТА СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА УКРАЇНИ
(Мінекономіки)**

вул. М. Грушевського, 12/2, м. Київ, 01008, Тел. (044) 200-47-53, факс (044)253-63-71
E-mail: mecconomy@me.gov.ua, <http://www.me.gov.ua>, код ЄДРПОУ 37508596

Р І Ш Е Н Н Я

ПРО РЕЄСТРАЦІЮ АВТОРСЬКОГО ПРАВА НА ТВІР

Міністерство розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України
розглянуло заяву

Григорчук Галина Василівна, вул. Карпатська, 31, кв. 3, м. Івано-Франківськ, 76019
(повне ім'я автора, адреса)

заявка від 13.08.2019 № 94015

про реєстрацію авторського права на твір і прийняло рішення зареєструвати авторське право на твір Комп'ютерна програма "Моделювання процесу мікродугового окиснення алюмінію та його сплавів" ("PEO-Andromeda (Plasma electrolytic oxidation)"); Григорчук Галина Василівна, Олійник Андрій Петрович, Григорчук Любомир Іванович, Витвицький Василь Степанович, Роп'як Любомир Ярославович, Пригоровська Тетяна Олексіївна, Величкович Андрій Семенович, Корнута Олена Володимирівна

(вид, повна, скорочена (за наявності) назва твору, повне ім'я, псевдонім (за наявності) автора (ів))

Внесення відомостей до Державного реєстру свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір та видача свідоцтва будуть здійснені за умови сплати збору за оформлення і видачу свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір відповідно до п.3 постанови Кабінету Міністрів України від 27 грудня 2001 року № 1756 "Про державну реєстрацію авторського права і договорів, які стосуються права автора на твір".

Якщо протягом трьох місяців від дати одержання заявником рішення про реєстрацію авторського права на твір Управління державних реєстрацій Департаменту інтелектуальної власності Міністерства розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України не одержало документ про сплату збору за оформлення і видачу свідоцтва у розмірі та порядку, визначених законодавством, або копію документа, що підтверджує право на звільнення від сплати зазначеного збору, заявка вважається відхиленою і реєстрація авторського права та публікація відомостей про реєстрацію Управління державних реєстрацій Департаменту інтелектуальної власності Міністерства розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України не проводиться.

Заступник Міністра
розвитку економіки, торгівлі
та сільського господарства України



Д. О. Романович



**МІНІСТЕРСТВО РОЗВИТКУ ЕКОНОМІКИ, ТОРГІВЛІ
ТА СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА УКРАЇНИ
(Мінекономіки)**

вул. М. Грушевського 12/2, м. Київ, 01008 Тел. (044) 200-47-53, факс (044) 253-63-71
E-mail: mecconomy@me.gov.ua, <http://www.me.gov.ua>, код ЄДРПОУ 37508596

№ _____

На № _____ від _____

Григорчук Г.В.

**вул. Карпатська, 31, кв. 3,
м. Івано-Франківськ,
76019**

Мінекономіки направляє рішення за заявкою № 94015 від 13.08.2019 та
Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 92700 від 08.10.2019.

Додаток: зазначене на 2 арк.

**Директор департаменту
інтелектуальної власності**

Валерій ЖАЛДАК

Ізотова І.О. 596 67 58 *37 26#



ДОКУМЕНТ СЕД Мінекономіки АСКОД
Сертифікат 20B4E4ED0D30998C040000001912000CFE76A00
Підписувач Жалдак Валерій Олександрович
Дійсний з 12.11.2018 17:07:37 по 12.11.2020 17:07:37



Мінекономіки
2311-12/44441-09 від 28.10.2019



(11) **108341**

(19) **UA** (51) **МПК (2015.01)**
F16J 1/00
F16J 9/00
F16J 15/16 (2006.01)

(21) Номер заявки:	а 2014 08647	(72) Винахідники:	Григорчук Галина Василівна, UA, Григорчук Любомир Іванович, UA, Роп'як Любомир Ярославович, UA, Бурда Мирослав Йосипович, UA
(22) Дата подання заявки:	30.07.2014	(73) Власники:	Григорчук Галина Василівна, вул. Карпатська, 31, кв. 3, м. Івано-Франківськ, 76019, UA, Григорчук Любомир Іванович, вул. Карпатська, 31, кв. 3, м. Івано-Франківськ, 76019, UA, Роп'як Любомир Ярославович, вул. Федьковича, 7, кв. 45, м. Івано-Франківськ, 76008, UA, Бурда Мирослав Йосипович, вул. За'якова, 11, м. Івано-Франківськ, 76019, UA
(24) Дата, з якої є чинними права на винахід:	10.04.2015		
(41) Дата публікації відомостей про заявку та номер бюлетеня:	12.01.2015, Бюл. № 1		
(46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня:	10.04.2015, Бюл. № 7		

(54) Назва винаходу
ЦИЛІНДРО-ПОРШНЕВИЙ ВУЗОЛ НАСОСА

(57) Формула винаходу
 Циліндро-поршневий вузол насоса, що містить циліндр, розміщений у ньому нерухомо закріплений на штоку поршень, який складається з металевого сердечника, встановленого на ньому манжету, металевий конічний шайба, яка з'єднує металевий сердечник із манжетою та забезпечує герметичність конічної шайби, як щонайменше тем шайби, в периферію внутрішньої конічної отвір, який крім того, вузол є виконаний на нерої

(11) **108341**

Додаток Е

Пронумеровано, прошито металевими лоперсами та скріплено печаткою
 2 арк.
 10.04.2015

Уповноважена особа



(підпис)



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **108341** (13) **C2**

(51) МПК (2015.01)

F16J 1/00**F16J 9/00****F16J 15/16** (2006.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД

<p>(21) Номер заявки: а 2014 08647</p> <p>(22) Дата подання заявки: 30.07.2014</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на винахід: 10.04.2015</p> <p>(41) Публікація відомостей про заявку: 12.01.2015, Бюл.№ 1</p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 10.04.2015, Бюл.№ 7</p>	<p>(72) Винахідник(и): Григорчук Галина Василівна (UA), Григорчук Любомир Іванович (UA), Роп'як Любомир Ярославович (UA), Бурда Мирослав Йосипович (UA)</p> <p>(73) Власник(и): Григорчук Галина Василівна, вул. Карпатська, 31, кв. 3, м. Івано- Франківськ, 76019 (UA), Григорчук Любомир Іванович, вул. Карпатська, 31, кв. 3, м. Івано- Франківськ, 76019 (UA), Роп'як Любомир Ярославович, вул. Федьковича, 7, кв. 45, м. Івано- Франківськ, 76008 (UA), Бурда Мирослав Йосипович, вул. Зв'язкова, 11, м. Івано-Франківськ, 76019 (UA)</p> <p>(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою: SU 396501 A1, 29.08.1973 SU 657208 A1, 15.04.1979 SU 815388 A1, 23.03.1981 CN 102168760 A, 31.08.2011 CN 102797843 A, 28.11.2012 GB 115281 A, 09.05.1918 RU 2213238 C2, 27.09.2003 SU 1173116 A1, 15.08.1985 UA 17728 A, 31.10.1997 US 2003/0010202 A1, 16.01.2003</p>
---	---

UA 108341 C2

(54) ЦИЛІНДРО-ПОРШНЕВИЙ ВУЗОЛ НАСОСА**(57) Реферат:**

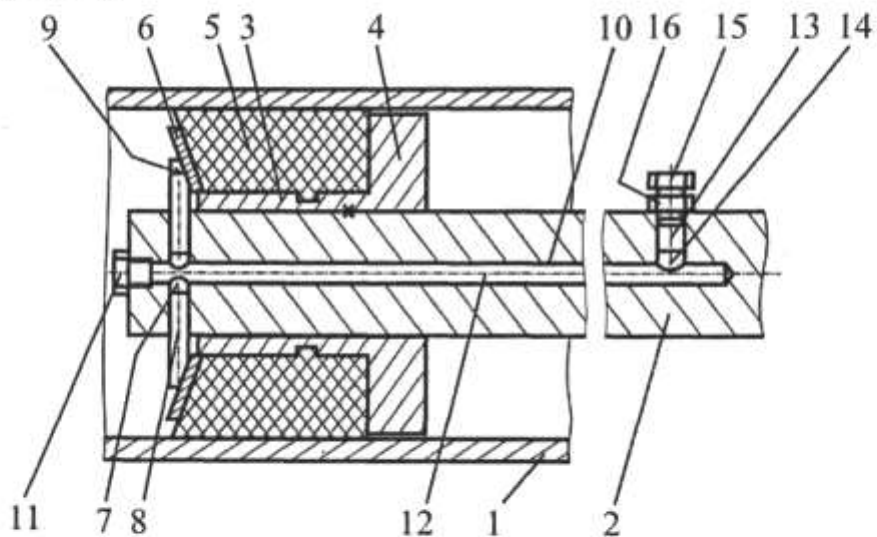
Винахід належить до насособудування, зокрема до поршневих бурових насосів з підвищеними вимогами до герметичності та довговічності, і може бути застосований в нафтогазовій, гірничо-збагачувальній, металургійній, хімічній та інших галузях промисловості, де здійснюється перекачування рідин з підвищеним вмістом абразивних частинок.

Циліндро-поршневий вузол насоса містить циліндр, розміщений у ньому нерухомо закріплений на штоку поршень, який складається з металевого сердечника, встановленого на ньому манжети, натискної конічної шайби, яка зовнішньою конічною поверхнею взаємодіє із манжетною, та засіб для підтискання натискної конічної шайби. Згідно з винаходом, засіб для підтискання натискної конічної шайби додатково містить три або більше плунжери, розміщені у радіальних отворах, виконаних у штоку навпроти натискної конічної шайби, а периферійні кінці плунжерів виконані із скосами зі сторони поршня з можливістю взаємодії із внутрішньою конічною поверхнею натискної шайби, в штоку також виконаний осьовий, заглушений з обох

UA 108341 C2

кінців отвір, який сполучений із радіальними отворами, осьовий та радіальні отвори заповнені гідропластом, крім того, вузол оснащений системою для створення тиску на гідропласт, яка сполучена із основним отвором і виконана на неробочій частині штока зі сторони механічної частини поршневого насоса.

Застосування заявленого вузла дозволяє здійснювати компенсацію зносу еластичної манжети поршня, запобігає виникненню місцевого промивання деталей циліндро-поршневого вузла насоса струменем рідини з частинками абразиву і забезпечує підвищення довговічності роботи змінних деталей гідравлічної частини поршневих насосів та зниження витрат на їх технічне обслуговування.



радіальними отворами 7. Отвір 10 виконаний заглушеним з обох кінців: з правої сторони виконаний глухим, а з лівої - заглушений болтом 11. Порожнина осового отвору 10 та радіальних отворів 7 заповнені гідропластом 12.

На неробочій частині штока 2 зі сторони механічної частини насоса виконана система для створення тиску на гідроласт 12, яка складається із плунжера 13, встановленого у радіальний отвір 14. Тиск створюється болтом 15, який взаємодіє із торцевою поверхнею плунжера 13 і фіксується контргайкою 16 при досягненні необхідного тиску в порожнині штока 2. Система контролю тиску на кресленні не показана.

Заявлений циліндро-поршневий вузол насоса працює наступним чином. Поршень, який отримує рух від штока 2, здійснює зворотно-поступальне переміщення відносно циліндра 1. Еластична манжета, яка встановлена на циліндричну частину 3 металевого сердечника поршня, стискається між опорним фланцем 4 металевого сердечника та кінцевою натисковою шайбою 6. Завдяки цьому створюється відповідний натяг і герметичність у парі тертя циліндр 1-еластична манжета 5. При русі поршня вліво, на щіль нагнітання (стискання), робоча рідина подається у гідрравлічну систему насоса (на кресленні не показана).

Під час роботи вузла, через наявність у перекачуваній рідині абразивних частинок (наприклад, при перекачуванні бурового розчину, який містить у своєму складі частинки гірської породи), відбувається інтенсивний знос робочих поверхонь: внутрішньої поверхні циліндра 1 і зовнішньої поверхні еластичної манжети 5. Натяг між взаємодіючими робочими поверхнями зменшується, починається переткання перекачуваної рідини, внаслідок чого зменшується продуктивність і ефективність роботи насоса в цілому.

Для відновлення відповідного натягу в парі тертя циліндр-манжета створюється додатковий тиск на гідроласт 12, яким заповнена система отворів 10 і 7 у штоку 2. Тиск створюється шляхом переміщення плунжера 13, який розміщений у радіальному отворі 14, і взаємодіє із болтом 15 при його загвинчуванні.

Оскільки осовий отвір 10 з одного кінця штока виконаний глухим, а з другого - заглушений болтом 11, то зростання тиску гідроласта 12 призведе до переміщення плунжера 8 у радіальному напрямку від осі штока 2. Під час переміщення плунжера 8 через клинову пару: периферійний скошений кінець 9 плунжера 8-внутрішня кінцева поверхня металевий натискової шайби 6, передається зусилля на еластичну манжету 5. Ця еластична манжета стискається в осовому та радіальному напрямках кінцевою натисковою шайбою 6, збільшується її зовнішній діаметр і за рахунок цього натяг між циліндром 1 і еластичною манжеткою 5 поршня відновлюється. При досягненні необхідного рівня тиску в гідроласті 12 болт 15 нерухомо фіксується за допомогою контргайки 16. Відновлення герметичності досягається без розбирання насоса і може здійснюватись під час його технічного обслуговування.

Система створення тиску на гідроласт 12 може мати також і інше конструктивне виконання. Наприклад, тиск від додаткового насоса (на кресленні не показаний) передається на гідроласт 12 через отвір 14 у штоку 2 гнучим шлангом (на кресленні не показаний).

Застосування заявленого вузла дозволяє здійснювати компенсацію зносу еластичної манжети поршня, запобігати виникненню місцевого проміявання деталей циліндро-поршневого вузла насоса струменем рідини з частинками абразиву і забезпечує підвищення довговічності роботи змінних деталей гідрравлічної частини поршневих насосів та зменшення витрат на їх технічне обслуговування.

Джерела інформації:

1 А. с. 398501 СССР, МКИ F 16 J 1/02. Поршень насоса / Д.Б. Колибрин (СССР). - № 1661102/25-8; заявл. 26.05.71; опубл. 29.08.73, Бюл. № 38.

2 А. с. 815388 СССР, МКИ F 16 J 15/32. Уплотнение манжетного типа для возвратно-поступательно движущихся деталей / [В.П. Белутин, И.Н. Клейменов, М.М. Розин и Р.Д. Семенов (СССР)]; заявитель и патентообладатель Всесоюзный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт нефтяного машиностроения. - № 2466434/25-8; заявл. 25.03.77; опубл. 23.03.81, Бюл. № 11.

3 А. с. 657208 СССР, МКИ F 16 J 1/02. Поршень насоса / Ю.М. Авликин (СССР). - № 2558999/25-08; заявл. 23.12.77; опубл. 15.04.79, Бюл. № 14.

ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

Циліндро-поршневий вузол насоса, що містить циліндр, розміщений у ньому нерухомо закріплений на штоку поршень, який складається з металевого сердечника, встановленого на ньому манжети, натискової кінцевої шайби, яка зовнішньою кінцевою поверхнею взаємодіє із манжеткою, та засіб для підтискання натискової кінцевої шайби, який відрізняється тим, що засіб

вінахід належить до області насособудування, зокрема до поршневих бурових насосів з підвищеними вимогами до герметичності та довговічності і може знайти застосування в нафтогазовій, гірничо-збагачувальній, металургійній, хімічній та інших галузях промисловості, де здійснюється перекачування рідин з підвищеним вмістом абразивних частинок.

Відомий поршень, який входить у циліндро-поршневий вузол насоса [1], який містить ущільнюючий елемент - манжету, розміщений на сердечнику між двома шайбами: опорною і натисковою. Поршень оснащений засобом для підтискання натискової шайби у міру зносу манжети. В результаті цього забезпечується натяг між манжеткою та циліндром (контрдеталлю) для створення необхідної герметичності. Засіб для підтискання манжети виконаний у вигляді самогальмівного клина, який встановлений у радіальному наскрізному пазу, виконаному у сердечнику таким чином, що торцева його сторона, яка знаходиться навпроти шайби і манжети, має нахил, а друга сторона знаходиться під натисковою шайбою. Клин являє собою брусок, який має скос однієї грані з нахилом, рівним нахилу торцевої сторони паза. При монтажі поршня, клин вставляється у паз сердечника так, що скошеною гранню взаємодіє із скошеною торцевою стороною паза і рівною своєю гранню впирається у натискову шайбу.

При роботі циліндро-поршневої групи насоса еластичний елемент-манжета, зношується: повільно зменшується деякий зазор між манжеткою і циліндром. При такій нагнітання поршневого насоса тиск рідини відтискає шайбу в сторону манжети і в утворений зазор опускається клин під власною вагою, який ковзає своїм скосом по скосу паза. Клин опускається доти, поки не прийде у дотик із шайбою. Опущений клин не дає можливості натисковій шайбі на такій всмоктування насосом повернутися у вихідне положення під дією пружних сил еластичної манжети. Таким чином ущільнюючий елемент-манжета отримує необхідний натяг для забезпечення герметичності поршня з циліндром. При подальшому зносу робочої поверхні поршня, клин опускається у циліндровий паз, весь час стискає еластичний елемент, створюючи необхідний натяг у спряженні.

Недоліком відомого пристрою є низька експлуатаційна надійність, яка зумовлена можливістю саморозбирання поршня при його повороті, або внаслідок дії вібраційних навантажень, які супроводжують роботу важконавантажених поршневих насосів.

Відоме також ущільнення манжетного типу циліндро-поршневого вузла насоса [2], яке містить металевий сердечник, еластичну манжету та натискову шайбу. Натискова шайба у відомому ущільненні має кінцеву форму, що забезпечує створення напруженого стану в еластичній манжеті із сприятливим розподілом натягу по довжині манжети. Це покращує ущільнюючу здатність манжети поршня.

Недоліком відомого ущільнення є відсутність засобу для компенсації зносу манжети, що зменшує його довговічність.

Відомий циліндро-поршневий вузол насоса, вибраний як прототип даного винаходу [3], що містить циліндр, розміщений у ньому, та закріплений нерухомо на штоку поршень. Цей поршень складається із металевого сердечника, встановленого на ньому манжети, натискової шайби та засобу для підтискання еластичної манжети у міру її зносу. Засіб для підтискання еластичної манжети виконаний у вигляді щілиновидного радіального паза в сердечнику; у паз встановлений клин, який своєю рівною гранню взаємодіє із натисковою шайбою, і натискова планка. Ухил на торці натискової планки взаємодіє із відповідною похилою гранню клина. Клин та планка підпружинені у поздовжньому напрямку. На взаємодіючих поверхнях клина та натискової планки виконані зубці відповідного асиметричного профілю, що забезпечує взаємне переміщення клина і натискової планки тільки до осі сердечника при виникненні зазору між шайбою і еластичною манжеткою.

При роботі циліндро-поршневого вузла, робоча поверхня еластичної манжети зношується і повільно зменшується певний зазор між ущільнюючим еластичним елементом і циліндром (контрдеталлю). Тиск рідини при такій нагнітання відтискає шайбу у сторону ущільнюючого елемента. Клин і натискова планка під дією пружини переміщуються до осі поршня, при цьому зубці на скошених поверхнях взаємно переміщуються і впадають у западини між цими зубцями. При русі поршня у зворотному напрямку ущільнюючий елемент - манжета намагається відновити свої початкові розміри і тисне на шайбу, яка в свою чергу створює тиск на клин та натискову планку. Наявність зубців на скошених взаємодіючих поверхнях клина і натискової шайби не дозволяє їм розійтись від центру до периферії і за рахунок цього здійснюється компенсація зносу манжети поршня у циліндро-поршневому вузлі насоса.

До недоліків відомого пристрою можна віднести наступне.

Зубці на скошених взаємодіючих поверхнях клина і натискової планки мають певний крок і висоту, що призводить до дискретної (періодичної) зміни висоти компенсуючих елементів (клин-натискова планка). Це погіршує забезпечення герметичності у парі тертя поршень-циліндр.

UA 108341 C2

UA 108341 C2

Зменшення висоти зубців підвищить герметизуючу здатність, але зменшує міцність зубців, що при значних механічних навантаженнях може призвести до їх змицнення та виходу із ладу вузла у цілому.

Інший недолік автоматичної компенсації зносу поршня пов'язаний із нерівномірністю зносу робочої поверхні циліндра по довжині ходу поршня. Це може призвести до того, що у місці найбільшого зносу циліндра відбудеться спрацювання засобу підтиснення та створення відповідного робочого нагніту. При подальшому переміщенні поршня в містку, де знос циліндра є меншим, нагніт у парі тертя поршень-циліндр буде більшим від робочого, що викличе інтенсивний знос поршня та додаткові енергетичні затрати на привід насоса.

Крім того, існує клас поршневих насосів, наприклад бурові, які перекачують рідини, що містять тверді частинки гірної породи. Попадання таких частинок у контактну зону зубців може призвести до заклинювання і втрати працездатності відомого вузла.

В основу винаходу поставлена задача удосконалення циліндро-поршневого вузла насоса, в якому шляхом модифікації конструкції засобу для підтиснення натисної кінчної шайби забезпечується плавне регулювання нагніту в зворотньо-поступовій парі тертя еластична манжета-циліндр, в отже, і герметичність спряження поршень-циліндр, без розбирання самого насоса. За рахунок цього збільшується довговічність вузла та економічність експлуатації насоса.

Поставлена задача вирішується тим, що в циліндро-поршковому вузлі насоса, який містить циліндр, розміщений у ньому нерухомо закріплений на штоку поршень, який складається з металевого сердечника, встановленого на ньому манжети, натисної кінчної шайби, яка зовнішньою кінчною поверхнею взаємодіє із манжетою, та засіб для підтиснення натисної кінчної шайби, згідно з винаходом засіб для підтиснення натисної кінчної шайби додатково містить три або більше плунжерів, розміщених у радіальних отворах, виконаних у штоку навпроти натисної кінчної шайби, а периферійні кінці плунжерів виконані із скосами зі сторони поршня з можливістю взаємодії із внутрішньою кінчною поверхнею натисної шайби, в штоку також виконаний осьовий, заглушений з обох кінців отвір, який сполучений із радіальними отворами, осьовий та радіальні отвори заповнені гідропластом, крім того, вузол оснащений системою для створення тиску на гідропласт, яка сполучена із основним отвором і виконана на неробочій частині штока зі сторони механічної частини поршневого насоса.

Введення плунжерів у конструкцію циліндро-поршневого вузла насоса, встановлених у радіальних отворах, виконаних у штоку, забезпечує створення зусилля, необхідного для стиснення манжети і компенсації її зносу в радіальному напрямку. Вибрана кількість плунжерів три і більше - забезпечує рівномірність розподілу тиску натисної шайби на еластичну манжету.

Виконання радіальних отворів у штоку, в яких встановлюються плунжери, навпроти натисної кінчної шайби, забезпечує можливість взаємодії плунжерів із внутрішньою кінчною поверхнею натисної шайби і створення за рахунок цієї взаємодії осьового та радіального зусилля на манжету.

Виконання периферійних кінців плунжерів із скосами, при взаємодії цих скошених поверхонь із внутрішньою кінчною поверхнею натисної шайби, створює своєрідний ковзний механізм, який переворює радіальне переміщення плунжерів у відповідний осьовий рух натисної шайби. Крім того, змінюючи кут осей і конусність внутрішньої кінчної поверхні натисної шайби забезпечують необхідну величину осьового зусилля для відповідного деформування (стиснення) еластичної манжети поршня.

Виконання осьового, заглушеного з обох кінців, отвору у штоку і його сполучення із радіальними отворами формує герметичну систему, яка після заповнення гідропластом дозволяє створити необхідний тиск для забезпечення радіального переміщення плунжерів.

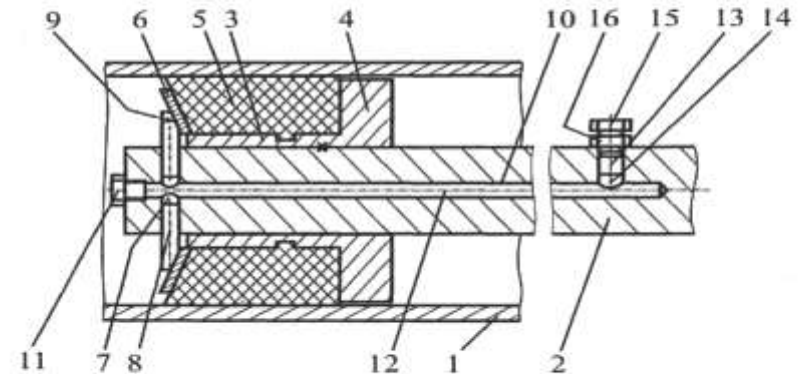
Тиск на гідропласт створюється системою створення тиску, яка сполучена із осьовим отвором, виконаним у штоку. Виконання системи створення тиску на неробочій частині штока зі сторони механічної частини поршневого насоса дозволяє регулювати тиск на гідропласт і, як наслідок, - нагніт у парі тертя циліндр-манжета, без розбирання насоса.

Суть запропонованого винаходу пояснюється кресленням, на якому зображена схема циліндро-поршневого вузла насоса.

Вузол містить циліндр 1, розміщений у ньому і нерухомо закріплений на штоку 2 поршень, який складається із металевого сердечника, що містить циліндричну частину 3 і опорний фланець 4, та встановленого на металевому сердечнику еластичної (найчастіше - гумової) манжети 5. Зі сторони напівзатягнутої частини насоса еластична манжета 5 притискається кінчною натисною шайбою 6.

У штоку 2 виконані радіальні отвори 7 (як мінімум три), в які вставлені плунжери 8. Периферійні кінці 9 плунжерів 8 виконані скошеними з можливістю взаємодії з кінчною натисною шайбою 6. По центру штока 2 виконано осьовий отвір 10, який сполучається із

для підтиснення натисної кінчної шайби додатково містить щонайменше три плунжери, розміщені у радіальних отворах, виконаних у штоку навпроти натисної кінчної шайби, а периферійні кінці плунжерів виконані із скосами зі сторони поршня з можливістю взаємодії із внутрішньою кінчною поверхнею натисної шайби, в штоку також виконаний осьовий, заглушений з обох кінців отвір, який сполучений із радіальними отворами, осьовий та радіальні отвори заповнені гідропластом, крім того, вузол оснащений системою для створення тиску на гідропласт, яка сполучена із основним отвором і виконана на неробочій частині штока зі сторони механічної частини поршневого насоса.



Комп'ютерна верстка Д. Шверун

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Василя Липківського, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ - 42, 01601