

УДК 631.3.01

Юрій Капаціла, к.т.н., доц.; Віталій Сенчишин

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

**ОЦІНКА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СТІЧКИ ГНУЧКОГО
ГВИНТОВОГО КОНВЕЄРА МЕТОДОМ КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

Yurii Kapatsila, Ph.D., Assoc. Prof.; Vitalii Senchyshyn

**ASSESSMENT OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A FLEXIBLE SCREW
CONVEYOR FLIGHT USING THE FINITE ELEMENT METHOD**

Анотація. Розглянуто питання дослідження напружено-деформованого стану стрічки гвинтового конвеєра з урахуванням впливу випадкових експлуатаційних факторів.

Ключові слова: гвинтовий конвеєр, напружено-деформований стан, метод кінцевих елементів, факторний експеримент, оптимізація параметрів, довговічність.

Abstract. The paper studies the stress-strain state of a screw conveyor flight under the influence of random operating factors.

Keywords: screw conveyor, stress-strain state, finite element method, factorial experiment, parameter optimization, durability.

У процесі експлуатації вузли та елементи гнучких гвинтових конвеєрів зазнають дії випадкових навантажень, інтенсивність яких визначається сукупністю взаємопов'язаних факторів, зокрема моментом опору, кліматичними умовами, а також особливостями режимів керування (швидкістю ввімкнення муфти зчеплення, характером кривої наростання моменту опору тощо). У загальному випадку зазначені фактори формують інтегральні експлуатаційні показники машини.

За умови апріорного визначення цих показників стає можливим застосування методів планування експерименту для встановлення закономірностей впливу керованих факторів на параметри оптимізації. Найбільш достовірні результати можуть бути отримані шляхом натурних випробувань, однак їх реалізація потребує значних ресурсів і є обмеженою з практичної точки зору. У зв'язку з цим доцільним є використання комбінованого підходу, що передбачає поєднання повнофакторного експерименту з комп'ютерним моделюванням, що дозволяє комплексно оцінити як індивідуальний, так і сумарний вплив факторів, а також визначити їх раціональні значення.

Стохастичний характер процесів, що відбуваються під час функціонування гвинтових конвеєрів, обумовлює необхідність застосування математичного апарату при дослідженні, проектуванні та конструюванні відповідних систем.

У загальному випадку математична модель напружено-деформованого стану гвинтової стрічки має вигляд:

$$Y_i = F_i(X, Q),$$

де Y – вектор вихідних параметрів; X – вектор внутрішніх параметрів, що характеризують конструктивні особливості елементів конвеєра; Q – вектор зовнішніх параметрів, що визначаються умовами експлуатації; i – номер вихідного параметра.

До внутрішніх параметрів віднесено товщину гвинтової стрічки та частоту обертання робочого органу. Зовнішні параметри включають коефіцієнт тертя транспортованого матеріалу та його густину.

Також математична модель може бути використана для вирішення оптимізаційних задач. Вибір параметрів оптимізації базується на визначенні найбільш ефективних напрямів підвищення якості технологічного процесу. У загальному випадку оптимізація може здійснюватися за будь-яким параметром, що допускає

адекватний математичний опис.

В якості вихідних параметрів (параметрів оптимізації) були використані напруження в найбільш навантажених точках та експлуатаційні характеристики конвеєра.

Відповідно до прийнятої математичної моделі, що описується системою диференціальних рівнянь, до основних варійованих факторів віднесено: частоту обертання шнека (20-50 рад/с), густину технологічного матеріалу ($600-2000 \text{ кг/м}^3$), кут підйому ($10-30^\circ$), радіус кривизни траси (1-10 м) та товщину стрічки (0,04-0,06 м).

Формування вихідних даних здійснювалося з урахуванням реальних режимів експлуатації. Для визначення статистичних оцінок коефіцієнтів регресії використано метод повнофакторного експерименту для чотирьох факторів. Чисельне моделювання реалізовано із застосуванням спеціалізованої програми розрахунку регресійних моделей.

На попередньому етапі дослідження проведено аналіз впливу факторів на такі інтегральні показники, як осьове зусилля, крутний момент та об'ємна продуктивність. У результаті встановлено, що визначальний вплив мають густина матеріалу ($760-2000 \text{ кг/м}^3$), частота обертання (20–50 рад/с), товщина стрічки (4–6 мм) та радіус кривизни траси (1–5 м).

Кожному розрахунку передувала побудова сітки тривимірних елементів. Їх кількість для кожного випадку визначалася як добуток кількості витків (3), витків закріплення (1), елементів за шириною стрічки (4) та елементів за кутом кожного витка (10). Отже, повна кількість елементів становить 120, що достатньо для розрахунків із необхідною точністю. Кількість витків (3 одиниці) обрана на основі попередніх розрахунків, які показали, що цієї величини достатньо для опису детальної топології напружень.

Практично в усіх випадках (з урахуванням моменту згину і без нього) точка найбільшого навантаження була ідентичною – місце переходу «вал – стрічка». Спроби розрахунків при одночасному навантаженні моментом згину, крутним моментом та осьовою силою дали незадовільні результати через надмірно високі напруження. Це свідчить про необхідність корекції схеми навантаження, оскільки в реальності жолоб обмежує деформації. Проте введення таких обмежень суперечило одночасному навантаженню від згинального та крутного моментів. Тому було вирішено проводити розрахунки від дії моменту згину окремо від моменту навантаження та осьового зусилля. Це дозволило уникнути помилок при імітації наявності жолоба та скоригувати отримані дані. Побудова загальної моделі «стрічка – маса – жолоб» ускладнена специфічними властивостями технологічної маси та конструкцією жолоба.

Під час розрахунків від моменту згину встановлено, при малих радіусах кривизни (близько 1 м) виникають значні згинальні напруження, які можуть призводити до передчасного руйнування конструкції навіть за відсутності технологічного навантаження. Характер зміни напружень при повному оберті вала близький до симетричного циклу, що є найбільш небезпечним режимом.

На наступному етапі проведено розрахунок сумарного впливу крутного моменту та осьового зусилля. При аналізі результатів прийнято припущення: дисперсія параметра оптимізації постійна, фактори лінійно незалежні, а значення параметрів оптимізації – автономні. Похибка моделі з урахуванням взаємодії факторів становить 15,8%, що є допустимим для розрахунків на міцність.

Таким чином, проведені розрахунки з фіксацією положення на кутах 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315 градусів показали, що характер зміни напружень близький до симетричного циклу, що є найбільш важким і небезпечним.

Наступним етапом було проведення розрахунку від сумарного впливу крутного

моменту і осьового зусилля.

При аналізі результатів експерименту прийняті такі припущення: умовна дисперсія параметра оптимізації постійна у сфері визначення факторів; фактори лінійно незалежні між собою; значення параметрів оптимізації незалежні.

При проведенні дослідів усі фактори вважались умовно лінійними і постійними на протязі всього їх проведення на заданому рівні. Для об'єктивної оцінки отриманих результатів і значень факторів завжди розраховувались значення помилок моделей. В даному випадку похибка моделі із врахуванням парної взаємодії факторів становить 15,8%, що цілком допустимо при розрахунках на міцність.

Основним завданням було виявлення комплексу заходів з вдосконалення виробу і пошуку раціонального поєднання факторів. При пошуку оптимального поєднання факторів був використаний метод прямого пошуку в деякому чотиримірному гіперпросторі. В результаті був проведений блок розрахунків із вищевказаними факторами. Аналізуючи отримані результати, слід особливо відмітити ступінь важливості кожного фактора у формуванні напруженого стану стрічки, а саме: частота обертання вала; питома вага матеріалу; коефіцієнт тертя; товщина стрічки. Наведені дані справедливі для простору, який визначається діапазоном зміни вказаних факторів.

Було встановлено, що максимальне напруження при виконанні технологічного процесу близьке до значення величини, визначеної навантаженням згину. Сумарно ці діючі напруження можуть привести до короткочасного перевантаження і виходу стрічки з ладу навіть за критерієм міцності.

Отримані результати дозволяють зробити такі висновки.

1. Розроблено узагальнену методику та алгоритмічне забезпечення розрахунку силових та кінематичних параметрів руху потоку вантажу в гнучких гвинтових конвеєрах. На прикладі реальної конструкції робочого органу проведені комплексні теоретичні дослідження різних варіантів виконання з урахуванням оцінки якості виконання технологічного процесу і завантаженості основних елементів конструкції, які дозволяють на основі аналізу руху технологічної маси розробляти і коригувати параметри виробу.

2. Обґрунтовано застосування методу кінцевих елементів у поєднанні з плануванням експерименту.

3. Оцінку стану ділянок стрічки запропоновано проводити поетапно: спочатку від згину траси, потім від спільної дії крутного моменту та осьового зусилля. Найвагоміші фактори: кривизна траси, частота обертання, питома маса вантажу та коефіцієнт тертя.

4. Поєднання моделювальних алгоритмів та методу кінцевих елементів з плануванням повнофакторного експерименту дозволило оцінити вплив конструктивних змін на рівень напружень у точці закріплення стрічки на валу.

5. Встановлено, що для підвищення довговічності необхідно оптимізувати частоту обертання залежно від типу матеріалу та знижувати коефіцієнт тертя (наприклад, шляхом вібрації). Частоту обертання робочого для стрічки завтовшки 4 мм рекомендується задавати питомій масі 760 кг/м^3 до 38 с^{-1} , при 1000 кг/м^3 – 32 с^{-1} , при 1500 кг/м^3 – 26 с^{-1} . При питомій масі 2000 кг/м^3 і вище експлуатація не рекомендується.

6. Доведено, що напружено-деформований стан залежить від кута нахилу твірної спіралі. При зміні кута з 90° до 85° жорсткість спіралі зростає на 15-30%, а рівень напружень у критичній точці знижується на 40-60%.

Запропонована методика є універсальною і може бути використана для проєктування обладнання в інших галузях техніки. Подальші дослідження будуть спрямовані на встановлення характеристик втомної міцності при натурних випробуваннях та вдосконалення кріплення стрічки до вала.