

Мачуга¹ О.С. к. ф. -м. н., доц., Яхно² О.М. д. т. н., проф.

1 - Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, Україна

2 - Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЗАСТОСУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПІДХОДУ У ЗАДАЧАХ НЕІДЕАЛЬНОЇ ВЗАЄМОДІЇ РІДИН ТА ТВЕРДИХ ТІЛ

Взаємодія рідинних та твердих тіл в реальних незворотних процесах є неідеальною: вона супроводжується зміною структурних особливостей цих тіл. Зокрема в потоках рідини можуть змінюватись режими руху та кінетичні стани, виявляться явища тепломасоперенесення, формуватись процеси вихроутворення та кавітації, змінюватись характеристики примежових шарів тощо. Тверді тіла в таких взаємодіях можуть зазнавати деструктивних процесів, пов'язаних із знесенням матеріалу, абразивним стиранням, розтріскуванням, термомеханічними ефектами тощо. Тому слід вдосконалювати методи прогнозування поведінки таких об'єктів з метою зменшення інтенсивності деструктивних процесів, уникнення передчасного виходу з ладу експлуатованих гідромеханічних систем: машин, механізмів, гідротехнічних споруд, інструментів.

Найбільш розвинутим у вирішенні такої проблеми є підхід, що опирається на формуванні математичної моделі взаємодії рідини і твердого тіла, подальше будовання систем диференціальних рівнянь з відповідними крайовими, контактними та початковими умовами. Однак такий підхід пов'язується із певними методологічними та технічними труднощами, оскільки прогресуючі деструктивні процеси під час неідеальної взаємодії компонент у розглядуваних об'єктах, потребують використання громіздкого математичного апарату, не завжди адекватного до реального процесу.

Пропонується використовувати енергетичний підхід для аналізу поведінки гідромеханічних систем із врахуванням неідеальності контактної взаємодії їх складових у реальних процесах з подальшим визначенням лиш окремих характеристик таких процесів.

Підхід базується на вивченні енергетичного ресурсу досліджуваного об'єкту, ґрунтуючись на постулатах про визначальне значення енергії, як характеристики стану досліджуваного об'єкту [1], з якої випливають всі інші параметри цього стану – напруження, деформації, переміщення та швидкості точок. Дійсний процес (або стан), в якому перебуває ідеалізована гідромеханічна система, характеризується стаціонарним (мінімальним) значенням сумарного енергетичного ресурсу об'єкту – функціоналу енергії. Таким чином вирішення проблеми взаємодії зводиться до варіаційної задачі, із розв'язку якої знаходяться параметри характеристик деструктивних процесів.

Для дослідження реальних незворотних процесів, що відбуваються із інтенсивною дисипацією енергії, застосування енергетичного підходу можливе за наступних двох умов.

По – перше слід структурувати енергію, як суму ексергії та анергії [2]. Ексергія відіграє роль енергетичного базису, рушія процесу взаємодії. Ексергія є акумульованою тілом частиною енергії, яка без жодних обмежень може передаватись іншому тілу: це характерно для енергії деформації ідеально пружного твердого чи рідинного тіла. Анергія ж визначає інтенсивність деструкцій, дисипаційних процесів та фоновий рівень енергії оточуючого середовища.

По – друге необхідно в явному вигляді використовувати друге начало термодинаміки, яке в термінах ексергії та анергії формулюється наступним чином: *«Анергія тіла у реальному незворотному процесі зростає»*.

Застосування енергетичного підходу до аналізу гідромеханічних структур із врахуванням неідеальної взаємодії складових у дисипативних та деструктивних процесах, призводить до формулювання варіаційної задачі у вигляді наступної нерівності:

$$\delta(E_x - A_n) \leq 0, \quad (1)$$

де E_x - ексергія, A_n - анергія розглядуваної системи у процесі взаємодії її складових.

Варіаційна нерівність (1) є визначальною для областей стабільності параметрів та граничних станів щодо деструктивних змін. Умови виконання строгої нерівності (1) визначають область стабільного стану розглядуваної структури, або механічних процесів, що у ній відбуваються. Досягнення в (1) рівності визначає граничний стан, тобто стан, у якому можуть стрибкоподібно змінитись параметри так, що після такої зміни у новій конфігурації складових знову виконується строга нерівність (1).

За використання енергетичного підходу із варіаційної нерівності (1) збудовано ілюстративні розв'язки окремих класів задач.

Природні руслові потоки води характеризуються розмиванням русла за певних режимів течіння рідини. Допускається, що ексергія процесу взаємодії за умови незмінності швидкості потоку співпадає із питомою енергією потоку згідно із інтегралом Бернуллі, а анергія є сумою гідравлічних втрат напору і питомої поверхневої енергії новоутворених поверхонь матеріалу русла. Отримано наступні аналітичні залежності щодо характеру та швидкості розмивання берегової лінії в залежності від фізико-механічних характеристик матеріалу русла та швидкості течії:

$$V_{\dot{Q}} \geq V_B \cdot \frac{\rho}{\chi} \left(1 - \lambda \frac{l}{d}\right) \cdot v^2, \quad V_{\dot{Q}} \geq S \cdot \frac{\rho}{\chi} \left(1 - \lambda \frac{l}{d}\right) \cdot t \cdot v^3, \quad (2)$$

де V_B - об'єм води, що протікає руслом за час t із швидкістю v та призводить до розмивання об'єму $V_{\dot{Q}}$ матеріалу русла, S - площа живого перерізу потоку, χ - питома об'ємна енергія, необхідна для змивання одиниці об'єму матеріалу русла, ρ - густина рідини в потоці, λ - коефіцієнт гідравлічного тертя, d - приведений діаметр русла, l - довжина ділянки русла, з якої змивається об'єм $V_{\dot{Q}}$. Відзначимо кубічну залежність об'єму зносу від швидкості потоку та лінійну її залежність від часу. Зв'язок $V_{\dot{Q}}$ із V_B дозволяє прогнозувати густину водно-глиняної пульпи, що протікає руслом в процесі деструкції русла, зокрема під час повеней. Нерівності (2) визначають межі для $V_{\dot{Q}}$ у випадку кінематично можливого збільшення швидкості потоку (розгін). У випадку гальмування руслового потоку, знак нерівності в (2) змінюється на протилежний.

Швидкість стирання ущільнень в рухомих з'єднаннях гідроприводів машин проаналізована на основі енергетичного аналізу. Зменшення ексергії виділеної порції гідрорідини внаслідок «просідання» поршня в гідроциліндрі співставляється із анергією такого процесу – приростом теплової енергії за рахунок в'язкісних втрат в сумі із приростом поверхневої енергії матеріалу ущільнення внаслідок його стирання. В результаті отримано наступне відношення.

$$V_{\dot{Q}} \leq \frac{16\mu}{\pi D^3 \rho l} \left(p \frac{\pi D^2}{4} \left(1 + \frac{p}{2E}\right) \Delta t + K \right), \quad (3)$$

де $V_{\dot{Q}}$ - об'єм знесеного матеріалу ущільнення, μ - динамічна в'язкість, D - діаметр гідроциліндра, ρ - густина гідравлічної рідини, p - тиск рідини, l - товщина поршня, E - модуль пружності, Δt - час зносу, K - модуль зносу. Відношення (3) вказує на обмеження зверху об'єму знесеного матеріалу, яке залежить від реологічних властивостей рідини гідроприводу, що свідчить про часткове поглинання розсіяної ексергії у процесах подолання в'язкого тертя; лише частина анергії витрачається на знос матеріалу ущільнення. Отриманий результат можна використовувати для прогнозування терміну використання ущільнень.

Пилоутворення в технологічних процесах оброблення поверхонь супроводжується перетворенням механічної енергії приводу інструменту в поверхневу енергію новоутворених поверхонь та полідисперсних частинок пилу. Застосовуючи енергетичний підхід до такого

об'єкту, можливо визначити залежність розміру часточки пилю d від параметрів оброблювального інструменту та чистоти оброблення поверхні:

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{6\Delta}{\xi \cdot \varphi \cdot \pi}} = \theta, \quad (4)$$

де φ - концентрація пошкоджень на одиниці площі оброблюваної поверхні, Δ - товщина пропилю (знятого під час оброблення шару), ξ - коефіцієнт чистоти обробки, що характеризує, яка частинка об'єму напівсферичної пилинки видалена із плоскої поверхні пропилю, θ - граничне значення розміру пилової частинки для заданої чистоти оброблення поверхні. Значення θ може бути визначене експериментальними методами, виходячи із замірів мікропошкоджень поверхні, що оброблюється, або виявленні максимального розміру часточок пилю, що утворюються під час процесу. Відмітимо, що для оцінки пошкоженості φ можна використовувати наступне відношення

$$\varphi \geq \frac{6\Delta}{\xi \cdot \pi \cdot d_*^3}. \quad (5)$$

де d_* - розмір основної кількості пилових частинок.

Процес колісутворювання під час руху транспортного засобу перезволоженою ґрунтовою поверхнею руху розглядається у рамках варіаційно-енергетичного підходу. Для такої задачі ексергія співпадає із енергією пружної деформації опорної поверхні та рушії. Анергія визначається в'язкопластичними процесами в ґрунтових масах та дисипацією енергії в колісному рушії. Підхід придатний для визначення збільшення глибини колії в часі із врахуванням ефекту зміцнення ґрунтової основи.

Ковзання розплавлених полімерних мас по пружній основі супроводжується енергообмінними процесами, що описуються нерівністю (1). Пояснення переривчатого характеру руху розплаву ґрунтується на досягненні енергетичними величинами у цій нерівності граничної рівності, що спонукає до початку стрибкового проковзування, аж до положення, в якому знову виконується строга нерівність (1).

Узагальнену постановку задачі для гідромеханічних систем із врахуванням неідеальності механічної взаємодії складових, також представлено в даній роботі. Така постановка необхідна для всестороннього обґрунтування застосовності підходу для широкого класу задач; вона базується на будіванні енергетичних функціоналів багатокомпонентних ідеально пружних тіл, різнотипних рідинних середовищ, врахуванні в цих виразах наявності областей розриву характеристик та неідеального контакту складових. Енергетичні функціонали просумовуються для гідромеханічної системи в цілому. Для отриманого інтегрального енергетичного ресурсу системи доводиться варіаційна теорема щодо еквівалентності розв'язку варіаційного рівняння до розв'язку узагальненої задачі гідропружності розглядуваного об'єкту із врахуванням умов контакту фаз та граничних умов.

Уся інформація щодо дисипативних процесів у розглядуваній гідромеханічній структурі зосереджена у інтегральному виразі анергії, у якому враховуються в'язкопластичні властивості матеріалів фаз, дисипація енергії на поверхнях розділу та енерговитрати під час мікро та макророзтріскування.

Описана постановка обґрунтовує використання підходу у задачах даного типу.

Список літератури

1. Седов Л. И. *Механика сплошной среды*. Т.1 / Л. И. Седов. – М.: Наука, 1976. – 535 с.
2. Баер Г. *Энергия, эксергия, анергия* / Г. Баер // Энергия и эксергия: перевод с немецкого под ред. В. М. Бродянского. - М.: Мир, 1968. – С. 12 – 27.