

В роботі приведено перевірка чисельного моделювання, а саме тестованої моделі, на основі спостереження за поведінкою рішення при поступовому зменшенні комірок сітки (збіжність по сітках) і зіставленню отриманих чисельних даних з загальновідомими результатами для модельної задачі. При виборі даної моделі турбулентності було проаналізовано результати розрахунку тестової задачі із порівнянням з уже відомими даними: DNS [2] та експериментальними з подібними граничними умовами і розрахунковими областями [3].

Всі перераховані результати знаходяться в повній відповідності з відомими даними, що підтверджує точність і достовірність наближеного рішення, покладеного в основу чисельного моделювання.

Список літератури

1. Мочалін Є.В. Аналіз руху твердих завислих часток у ротаційному фільтрі очищення рідин з накопичувальним бункером. Є. В. Мочалін, В. М. Браженко, О. Є. Мочалін // Промислова гідравліка і пневматика. – 2015. – № 1. – С.3-9.
2. Мочалін Є.В. Вплив конструкції бункера у повнопотоковому гідродинамічному фільтрі на рух частинок домішок / Є. В. Мочалін, В. М. Браженко // Промислова гідравліка і пневматика. – 2015. – № 4 – С. 15– 20.
3. Мочалин Е.В. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил [Текст] / Е.В. Мочалин, А.А. Халатов.– Киев: Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 2010.– Т.8: Гидродинамика закрученного потока в ротационных фильтрах.– 428 с.
4. Dong S. Direct numerical simulation of turbulent Taylor-Couette flow [Текст] / S. Dong // J. Fluid Mech.– 2007.– Vol. 587.– pp. 373–393.
5. Mochalin Ye., An experimental research of the efficiency of a fluid mechanical cleaning by a rotary filter/ Ye. Mochalin, V. Brazhenko, O. Yashchuk // Transport Engineering and Management. Vilnius: Technika, 2017. p. 43-46.

УДК 630*377.4:531.6

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 «КПІ ім. І. Сікорського», Київ, Україна

ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПІДХІД ДО РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ПРОБЛЕМ НЕІДЕАЛІЗОВАНОЇ МЕХАНІЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ МОБІЛЬНИХ МАШИН ІЗ ОТОЧУЮЧИМ СЕРЕДОВИЩЕМ

Анотація. Для дослідження механічної поведінки неідеалізованих структурно-неоднорідних механічних та гідромеханічних об'єктів пропонується енергетичний підхід, який полягає у структуризації енергії на ексергію та анергію, а також використання математичного апарату варіаційних нерівностей. Викладено фундаментальні засади цього підходу, його використання проілюстровано розв'язуванням задач динаміки та стійкості шаруватих елементів конструкцій із міжфазною пошкодженням та задач міцності й надійності експлуатації мобільної техніки.

Ключові слова: енергія, ексергія, анергія, варіаційні нерівності, розширення, міцність елементів конструкцій.

Енергія є визначальною характеристикою механічної поведінки будь-якого матеріального тіла в цілому, або у безконечно малому його об'ємі [1]. Усі інші параметри стану такого тіла є похідними, вони можуть бути визначеними із енергії, а їх сукупність визначає деяку індивідуалізовану точку у багатовимірному просторі станів. Тому для досліджування механічної поведінки матеріального тіла, яка супроводжується складними неідеалізованими структурними трансформаціями доцільно застосовувати енергетичний підхід, який пов'язується із аналізом складових енергетичного ресурсу на етапах будівництва фізичної та математичної моделі, формулювання методів розв'язування відповідних задач та аналізування отриманих таким чином числових результатів.

Найбільш прийнятним для такого підходу вбачається структуризація енергетичного ресурсу на ексергію Ex та анергію An [2]. Остання є визначальним фактором незворотності механічних процесів у досліджуваних об'єктах.

Синергетичне поєднання такої структуризації із фундаментальними постулатами – першим та другим законами термодинаміки, застосованим зокрема до віртуальних (кінематично можливих) процесів, призводять до формулювання базової варіаційної нерівності [3]:

$$\delta(Ex - An) \leq 0, \quad (1)$$

яка може використовуватись для дослідження доволі широкого класу проблем прикладної механіки та гідромеханіки, математичної фізики, що охоплюють неідеалізовану поведінку об'єктів, супроводжувану їх структурними змінами і трансформаціями. Зокрема за використання нерівності (1) отримано розв'язки ряду практично важливих задач, зокрема – розмивання русла річковим потоком, зношення та стирання елементів технологічного обладнання тощо [4,5]. Поряд із цим повномасштабне застосування розвинутого таким чином енергетичного підходу до розглядуваного класу проблем механіки потребує всестороннього та послідовного обґрунтування.

В загальному випадку розглядається структурно-неоднорідне тіло, яке складається із об'єднання в'язкопружнопластичних твердих тіл $V_k, k = \overline{1, N}$, де k - кількість складових, та із потоків реальних рідин, які у деякий момент часу займають об'єми $\Omega_r, r = \overline{1, M}$ де M - кількість окремих плинних компонент. Механічний контакт між окремими твердими компонентами, між окремими плинними компонентами та між твердими та плинними компонентами може бути ідеальним та неідеальним – містити області розриву суцільності – розшарування різних типів.

Кожне із пружних тіл системи $V_k, k = \overline{1, N}$ характеризується певним рівнем енергетичного ресурсу, який є сумою механічної енергії $E_{k,i \dot{a}\delta}$, внутрішньої енергії $E_{k,U}$ та поверхневої енергії $E_{k,\Sigma}$. Окремо зазначимо, що поверхнева енергія $E_{k,\Sigma}$ може накопичуватись як зовнішніми поверхнями кожного із тіл, так і контактними площадками - граничними поверхнями розділу фаз.

У випадку ідеально пружних складових $V_k, k = \overline{1, N}$, для рівноважних та зворотних процесів, суттєвим для такої постановки задачі енергетичним ресурсом є тотожна до ексергії механічна енергія $E_{k,i \dot{a}\delta}$ з відповідними питомими складниками – питомою потенційною енергією деформації $e_{k,\varepsilon}$; питомою потенційною енергією додаткової деформації $e_{k,K}$, зумовленою роботою напружень на додаткових деформаціях понад відношення Коші; питомою щодо об'єму потенційною енергією $e_{k,F}$, сформованою дією об'ємних зовнішніх сил \vec{F}_k на точки тіла V_k ; питомою щодо поверхні потенційною енергією $e_{k,f}$ - від дії відповідних поверхневих сил \vec{f}_k на точки поверхні $\Sigma_{k,f}$; питомою щодо поверхні $\Sigma_{k,u}$ потенційною енергією деформації $e_{k,u}$, спричиненою роботою невідомих контактних напружень $p_{k,i}^K$, що виникають унаслідок закріплення поверхні $\Sigma_{k,u}$ на додаткових переміщеннях її точок понад задані граничними умовами значення $\vec{u}_k^0(u_{k,i}^0)$, $i = x, y, z$; а також питомою щодо контактної поверхні Σ_{kq} , $k, q = \overline{1, N}, q \neq k$ потенційною енергією деформації $e_{kq,\Sigma}$ від дії на цю поверхню

наперед невідомих контактних напружень $p_{k,i}^K$, $k, q = \overline{1, N}, k \neq q, i = x, y, z$. Внаслідок адитивності енергії, загальний енергетичний ресурс E_V системи тіл $V_k, k = \overline{1, N}$ є арифметичною сумою енергетичних ресурсів усіх складників цієї системи.

Щодо плинних компонент розглядуваної структури, аналогічно до попереднього, кожен із потоків $\Omega_r, r = \overline{1, M}$ загального потоку Ω , характеризується певним рівнем енергетичного ресурсу E_Ω , який є сумою механічної енергії $E_{r,i \text{ ад}}$, внутрішньої енергії $E_{r,U}$ та поверхневої енергії $E_{r,\Theta}$. Окремо зазначимо, що поверхнева енергія $E_{r,\Theta}$ може накопичуватись на зовнішніх поверхнях кожного із потоків, на контактних поверхнях із сусідніми потоками – внаслідок розвитку областей неідеальної взаємодії на границях розділу фаз, а також і всередині об'єму потоку – внаслідок явищ кавітації та пароутворення.

У виразі ексергії розглядуваної структури, слід обмежитися енергетичним ресурсом, який визначає величину накопиченої механічної енергії, придатної до подальшої передачі іншим тілам. Для рідинного тіла ексергія співпадає із сумою кінетичної енергії та потенційної енергії деформування ідеальної стисливої рідини.

Вираз сумарної ексергії розглядуваного структурно неоднорідного тіла, яке складається із твердих та рідинних компонент, є підставою для формулювання варіаційного принципу.

Варіаційний принцип. У випадку ідеалізованих реологічних властивостей окремих компонент та ідеальної механічної взаємодії складових, які контактують між собою, є справедливим наступне твердження: розв'язок варіаційного рівняння

$$\delta(E_V + E_\Omega) = 0 \quad (2)$$

еквівалентний до розв'язку задачі механіки для структуризованого тіла $\bigcup_{k=1}^N V_k \bigcup_{r=1}^M \Omega_r$ у

ідеалізованій постановці.

Варіаційне рівняння (2) є базовим для будування числових та аналітичних методів розв'язування окреслених вище задач механіки та гідромеханіки.

Дослідження механічної поведінки описаного вище структурно неоднорідного тіла в неідеалізованій постановці, потребує вивчення його енергії, тобто частини енергетичного ресурсу, який не може спричинитись до подальших енергетичних трансформацій, однак є мірою дисипативності поведінки розглядуваних структур. Для твердих компонент енергія матиме наступний вигляд:

$$An^S = An_{Vg} + An_{V\dot{\epsilon}} + An_{V\Sigma} + An_\Sigma + An_{\Sigma\tau s} + An_{\tau K} + An_{\Sigma n} + An_{\Sigma f}, \quad (3)$$

де An_{Vg} - енергія об'ємних в'язкісних процесів у твердих тілах, $An_{V\dot{\epsilon}}$ - енергія об'ємного пластичного течіння, $An_{V\Sigma}$ - енергія об'ємного мікро розтріскування, An_Σ - енергія макророзтріскування, $An_{\Sigma\tau s}$ - енергія зсувного адгезійного розшарування типу пластичного проковзування, $An_{\tau K}$ - енергія зсувного розшарування із взаємодією берегів по типу сухого тертя Кулона, $An_{\Sigma n}$ - енергія пластичного міжфазного розшарування, $An_{\Sigma f}$ - енергія новоутворених розшарувань.

Енергія структурно неоднорідного потоку рідини матиме наступний вигляд:

$$An^f = An_\mu + An_{\gamma f} + An_{rs} \quad (4)$$

де An_{μ} - енергія потоку реальної рідини, яка викликається її об'ємною в'язкістю, $An_{\gamma f}$ - енергія незворотних фазових перетворень (пароутворення), $An_{\gamma s}$ - енергія, викликана силами міжмолекулярної взаємодії під час проковзування різних потоків рідин.

Вирази енергії (3) та (4) використовуються у варіаційній нерівності (1) для визначення механічної поведінки реальних об'єктів із неідеалізованими реологічними властивостями та із неідеалізованою взаємодією окремих компонент. Представлені результати мають найзагальніший вигляд, тому вони дозволяють без жодних обмежень аналізувати будь – які класи задач для реальних механічних та гідромеханічних систем, зокрема й задачі неідеалізованої взаємодії мобільних машин з оточуючим середовищем та предметом праці, що вигідно вирізняє пропонований підхід від інших підходів. Ще однією перевагою отриманих результатів є можливість будування аналітичних методів та методів наближених обчислень для розв'язування поставлених задач.

Практичне застосування викладеного вище підходу продемонстровано під час розрахунку елементів конструкцій із композиційних матеріалів шаруватої оболонкової структури із урахуванням їх неklasичних реологічних характеристик та беручи до уваги наявність різного роду міжфазних дефектів – розшарувань, непроклеїв, тощо. Для таких об'єктів вирази ексергії та енергії (2), (3), (4) є відповідними інтегральними формами по об'єму тіл та по їх поверхнях, зокрема – поверхнях розділу компонент, конструктивних та міцнісних характеристик. З метою спрощення застосовуваного математичного апарату, ці інтегральні форми апроксимуються рядами по поліномах Лежандра по поперечній координаті. Отримані після інтегрування вирази слугують основою будування варіаційного методу визначення характеристик напружено – деформованого стану шляхом апроксимації розв'язків по відповідних змінних в класі задалегідь вибраних характеристичних функцій.

За використання збудованого таким чином варіаційного методу отримано розв'язки ряду практично важливих проблем щодо аналізу міцності та жорсткості шаруватих елементів конструкцій із міжфазними дефектами, що розвиваються в процесі навантаження, проблем динаміки і стійкості шаруватих конструкцій із міжфазною пошкодженістю. Визначено залежності фазово-частотних характеристик від рівня міжшарової пошкодженості у задачах демпфування композиційних структур із низькою зсувною жорсткістю.

Апроксимація енергетичних виразів (1) та (2) для розрахунків методами інженерної механіки елементів конструкцій мобільної техніки, що експлуатується в складних умовах, зокрема – в умовах бездоріжжя, територіях із ухилом, за асиметричного відносно осі машини навантаження рушіїв, дозволяє отримувати розв'язки практично важливих задач. Зокрема – визначення характеристик міцності елементів конструкцій в умовах комбінованого напружено-деформованого стану – депланації кручення статично невизначених конструктивних елементів. Запропонований підхід застосовано також до задач визначення умов стійкості механізму під час його роботи на території з ухилом за умови асиметричного навантаження від дії асиметрично розташованого начіпного технологічного обладнання. Отримано розв'язки й інших класів практично важливих задач.

Отже застосування енергетичного підходу до проблем неідеалізованої механічної взаємодії мобільних машин із оточуючим середовищем дозволяє отримувати розв'язки відповідних задач із урахуванням неідеалізованих особливостей механічних і гідромеханічних об'єктів, що дозволяє визначати реальні характеристики поведінки елементів конструкцій, зокрема – мобільної техніки, під час експлуатаційних навантажень. Отримання таких результатів за використання інших підходів було б доволі складним.

Список літератури

1. Седов, Л. И. *Виды энергии и их трансформации* / Л. И. Седов // Прикладная математика и механика. - 1981. - Вып. 6, т. 45. - С. 964 – 984.
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.
3. Яхно, О. М. *Варіаційне формулювання задач для структурно неоднорідних гідромеханічних систем* / О. М. Яхно, О. С. Мачуга // Промислова гідраліка і пневматика. - 2017. – № 2(56). – С. 26 – 33.
4. Яхно, О. М. *Ексергійний аналіз та метод варіаційних нерівностей в деяких задачах гідромеханіки* / О. М. Яхно, О. С. Мачуга // Вісник НТУУ «КПІ». Сер. «Машинобудування». – 2016. - №3(78). – С. 19 – 25.
5. Мачуга, О. С. *Застосування енергетичного підходу у задачах неідеальної взаємодії рідин та твердих тіл* / О. С. Мачуга, О. М. Яхно // Міжнародна науково – технічна конференція «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці»: матеріали конференції, (Черкаський ін.-т. пож. безпеки, Черкаси - Київ, Україна, 23 – 26 травня 2016). – Київ: НТУУ «КПІ», 2016. – С. 60 – 62.

УДК 621.121

Коробко І.В., д.т.н., проф., Драчук О.О., аспірант
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЛАДОВОГО КОМПЛЕКСУ РЕЄСТРАЦІЇ ОБ'ЄМУ ТА ОБ'ЄМНОЇ ВИТРАТИ ГАЗУ

Точне вимірювання витрати природного газу під час його видобування та транспортування є нагальною проблемою сьогодення. Підвищення точності та надійності вимірювання можна досягнути різними методами, здебільшого їх можна розділити на три групи: конструктивно-технологічні методи, направлені на покращення якості окремих елементів приладу, а також полегшення режимів роботи; методи технічної діагностики пов'язані з використанням систем автоматичного чи напівавтоматичного контролю справності приладів в процесі їх експлуатації; структурні методи, за допомогою яких може бути обрана найбільш раціональна структура приладу чи комплексу, по можливості зменшуючи вплив окремих елементів на похибку вихідного сигналу приладу. Запропоновано підвищити точність та метрологічну надійність шляхом побудови вимірювального комплексу із декількома витратомірами різного принципу дії. В доповіді наведені результати досліджень роботи комплексу вимірювання витрати і кількості природного газу та оцінювання ступені обопільного впливу параметрів конструкції на метрологічні характеристики комплексу в цілому.

Знаходження оптимальної геометричної просторової форми вузла вимірювання при комплексному застосуванні перетворювачів витрати, що базуються на різних фізичних методах вимірювання, забезпечить високу точність і надійність вимірювань в широкому діапазоні при мінімізації втрати тиску і вартості приладів.

Ключові слова: вимірювання, витрата, профіль швидкості, газ.

При створенні сучасних систем реєстрації витрати та кількості рідин і газів постає задача побудови вимірювальних перетворювачів витрати (ВПВ), а також визначення локального їх розміщення по протяжності технологічної мережі. Це постає головною метою забезпечення вимірювань з високою точністю, повторюваністю та надійністю. Окрім того, останнім часом виникає гостра необхідність у реєстрації паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) за різної динаміки їх протікання – від сталих до швидкозмінних потоків як у часі, так і за величиною. Це окреслює нагальну необхідність створення нових та вдосконалення існуючих приладів і систем визначення витрати ПЕР з високими метрологічними та експлуатаційними характеристиками. Актуальною є задача визначення локального місця розміщення ВПВ на вимірювальній ділянці з метою забезпечення мінімального обопільного впливу вимірюваного потоку та приладу.

Важливою і актуальною задачею при обліку природного газу є розширення діапазону вимірювання витрати при одночасному забезпеченні надійності та високої точності витратомірів та лічильників[1].

Для розв'язання наведених вище проблем розроблено приладовий комплекс реєстрації об'єму та об'ємної витрати газу на підґрунті різних фізичних методів вимірювання. Такий комплекс побудовано із застосуванням ВПВ турбінного (ТР) та