Динамічна взаємодія твердих і деформівних тіл з рідиною

Наукова робота на здобуття Державної премії України в галузі науки і техніки 2021 року, висунута **Інститутом механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України**

Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України

Інститут гідромеханіки НАН України

Інститут математики НАН України

Інститут геотехнічної механіки ім. М.С.Полякова НАН України

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І.Сікорського»

Колектив авторів

БАГНО Олександр Михайлович – доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник, ***Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України***

БОРИСЮК Андрій Олександрович – доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник, ***Інститут гідромеханіки НАН України***

ЖУК Олександр Петрович – доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, вчений секретар інституту, ***Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України***

СЕМЕНЕНКО Євген Володимирович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу, ***Інститут геотехнічної механіки ім. М.С.Полякова НАН України***

ТРОЦЕНКО Юрій Володимирович – доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник, ***Інститут математики НАН України***

ЯНЧЕВСЬКИЙ Ігор Владиславович – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри, ***Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»***

Мета роботи – розробка теорії та проведення фундаментальних досліджень широкого кола наукових і науково-технічних проблем, що стосуються сучасних питань динамічної взаємодії твердих і деформівних тіл з рідиною.

Зміст роботи

1. Тривимірні задачі гідропружності для тіл з початковими напруженнями і в'язкою стисливою рідиною
2. Дослідження течій у каналах з нерегулярностями геометрії і акустичних полів
3. Динаміка нелінійних рухів твердих частинок у рідині під дією акустичних хвиль
4. Дослідження нестаціонарних течій двофазних середовищ та методи розрахунку параметрів у в'язкій гетерогенній рідині
5. Варіаційні методи розв'язуванням задач гідропружності
6. Прямі та обернені задачі динаміки гідроелектропружних систем

Публікації

Кількість публікацій за роботою – **423**, у т.ч.

- 5 монографій
- 72 статті у високорейтингових закордонних журналах

h-індекс роботи –

- *Web of Science*: **h=12** (274 посилань)
- *Scopus*: **h=12** (308 посилань)
- *Google Scholar*: **h=18** (709 посилань)

Основні наукові результати

- Побудовано теорію розповсюдження квазілембових хвиль вздовж поверхні розділу пружного тіла з початковими (залишковими) напруженнями та в'язкої стисливої рідини, виконано аналіз відповідних динамічних процесів
- Побудовано теорію генерації шуму обмеженою областю турбулентності у каналі довільної форми поперечного перерізу. Розроблено метод визначення гемодинамічної значущості патологічної звитості коронарних артерій
- Побудована динаміка нелінійних рухів твердих частинок у в'язкій стисливій рідині під дією акустичних хвиль з урахуванням взаємодії частинок, розглянуто низку характерних випадків
- Розроблено моделі напірних нестаціонарних течій двофазного середовища та методи розрахунку параметрів процесів у в'язкій стисливій гетерогенній рідині
- Розроблені аналітичні методи розв'язання задач гідропружності, що описують коливання довільних тонкостінних оболонок обертання, які частково заповнені ідеальною рідиною, та пружних конструкцій з підвісними резервуарами
- Створено теорію перехідних процесів деформування електропружних конструктивних елементів з врахуванням їх взаємодії з акустичним середовищем і електричними ланцюгами

Впровадження у виробництво

- система моніторингу гідротранспортних комплексів для обґрунтування раціональної технології розробки титан-цирконієвих розсипів, запобігання кавітаційним та критичним режимам роботи
- удосконалена технологія, яка дозволила зменшити споживання електроенергії та оборотної води, суттєво продовжити термін експлуатації гідротранспортних комплексів
- методика визначення параметрів та режимів роботи систем гідротранспорту та гідротранспортних установок для вдосконалення технології гідромеханізації гірничих робіт й режимів трубопровідних систем

і отримано економічний ефект в:

- Вільногірський гірничо-металургійний комбінат
- ВАТ «НДІГМ ім. М.М. Федорова»
- УкрНДІВуглезбагачення
- Державний інститут з проектування підприємств гірничорудної промисловості «КРИВБАСПРОЕКТ»
- ВАТ «УКРГІПРОРУДА»
- ВАТ «МЕХАНОБРЧОРМЕТ»

Впровадження у виробництво

Рис.1. Вдосконалено технологічний процес для гідротранспортних комплексів гірничо-металургійних комбінатів

Впровадження у виробництво

Рис.2. Розроблено гідромеханічні основи екологічно безпечних та ресурсо- і енергозберігаючих технологій транспортування сировини

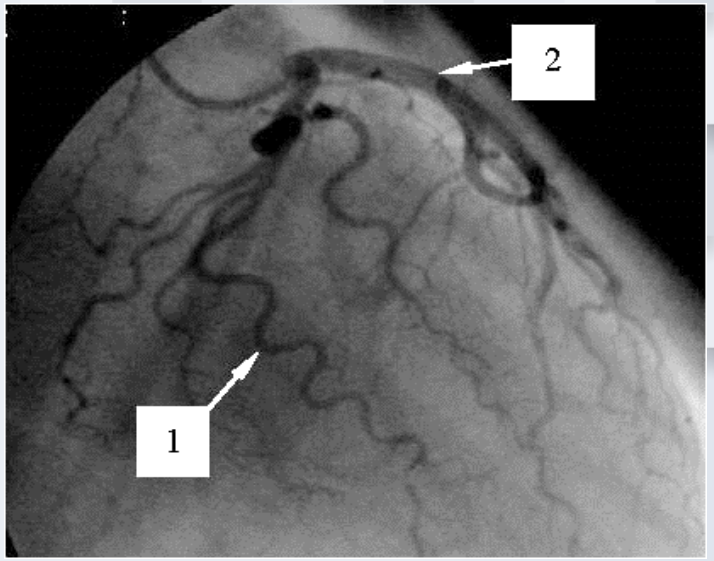
Рис.3. Вдосконалена система моніторингу для запобігання критичних режимів роботи гідротранспортних комплексів

Рис.4. Розроблено унікальний спосіб приготування водовугільної суспензії

Впровадження у медичну практику

- метод визначення гемодинамічної значущості патологічної звитості великих коронарних артерій.

  Метод захищений патентами і успішно застосовується у кардіологічній практиці



Патенти, свідоцтва

- 3 патенти України
- свідоцтво про реєстрацію авторського права

Використання у навчальному процесі

в Україні:

- Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
- Національний університет «Львівська політехніка»
- Дніпровський національний університет ім. О.Гончара
- Донецький національний технічний університет
- Національний університет водного господарства та природокористування
- Криворізький національний університет

за кордоном:

- Інженерний департамент Кембріджського університету (м.Кембрідж, Англія)
- Інститут дослідження звуку і коливань Саутгемптонського університету (м.Саутгемптон, Англія)
- Департамент індустріальної інженерії університету Неаполя (м.Неаполь, Італія)
- Департамент інженерної механіки Шербрукського університету (м.Шербрук, м.Квебек, Канада)
- Клініка серцево-судинної хірургії Шаріте (м.Берлін, Німеччина)

Розширена інформація по результатам

- Розроблено методи та досліджено процеси поширення хвиль в гідропружних системах з циліндричними поверхнями розділу пружних і рідких середовищ. Із залученням загальних рівнянь лінеаризованої теорії пружності скінченних деформацій для пружного тіла та лінеаризованих рівнянь Нав'є-Стокса для в'язкої стисливої рідини побудована тривимірна математична модель динамічних процесів у гідропружних хвилеводах.
- Розроблені чисельні алгоритми розв'язування задач даного класу, створене програмне забезпечення. Вивчено вплив скінченних початкових деформацій і в'язкої стисливої рідини на дисперсійні властивості узагальнених мод Лемба в широкому частотному діапазоні, встановлені їх локалізаційні властивості, виявлені нові механічні ефекти. Досліджено явище поверхневої нестійкості гідропружної системи, а також визначено величину параметра критичного укорочення при якому воно виникає.
- Виявлено закономірності поширення нормальних хвиль у ортотропній циліндричній оболонці, заповненій в'язкою стисливою рідиною. Досліджено вплив параметрів і властивостей оболонки (інерції обертання, деформації зсуву, ортотропії, коефіцієнта Пуассона) і рідини (в'язкості, стисливості, густини), а також типів симетрії рухів (крутильні, осесиметричні, неосесиметричні) на закономірності поширення поздовжніх хвиль (дисперсію, фазові швидкості, коефіцієнти згасання).
- Розв'язано низку задач про коливання та випромінювання звуку пружними елементами конструкцій, що збуджуються турбулентними течіями. Проведено порівняльний аналіз існуючих моделей пульсацій тиску на стінці, з'ясовано роль різних компонент цього тиску в згенерованих ним коливальних і акустичних полях досліджуваних елементів, а також продемонстровано різницю між відповідними полями, котра зумовлена різницею між зазначеними моделями. Показано відмінності між характеристиками шуму, який, за інших однакових умов, генерується при взаємодії течій з геометрично однаковими жорсткими і пружними елементами, виділено області значень відповідних параметрів, в яких ця різниця є максимальною або мінімальною.

- Розроблено теорію генерації шуму обмеженою областю збуреної течії у прямому каналі, яка враховує наявність диполів на його стінці та нерівномірний характер розподілу квадрупольних і дипольних джерел звуку. На її основі розроблено метод розв’язування зв’язаних задач акустичного випромінювання течій у каналах зі звуженнями.
- Розроблено методи побудови функцій Гріна конвективного хвильового рівняння та конвективного рівняння Гельмгольца для прямого каналу довільної форми та площі поперечного перерізу з різними типами стінок.
- Розроблено методи дослідження течій у каналах з n звуженнями та/або розширеннями у змінних швидкість-тиск і функція течії-завихореність-тиск.
- Розроблено метод визначення гемодинамічної значущості патологічної звитості великих коронарних артерій. Він дає можливість лише за даними коронарографії визначати зміни у витратних характеристиках течії крові у коронарних артеріях, які виникають внаслідок появи патологічної звитості останніх, а також встановлювати гемодинамічну значущість цих змін. Метод є неінвазивним і дозволяє визначати шукані параметри течії крові у будь-який момент після проведення коронарографії. Він пройшов успішну експериментальну перевірку, був захищений відповідними патентами і застосовується у клінічній практиці.
- Побудована динаміка нелінійних рухів твердих частинок в в’язкій стисливій рідині під дією акустичних хвиль з врахуванням взаємодії частинок, розглянуто ряд характерних випадків.
- Дослідження стосуються взаємодії акустичних хвиль з твердими і еластичними частинками в рідині, проблеми, яка визначається радіаційними силами. В потужному звуковому полі тиск звукового випромінювання (радіаційний тиск) обумовлює значну дію на середовище, в якому поширюється хвиля, на інородні включення в ньому. Дослідження радіаційного тиску мають важливе значення як для теоретичного так і для практичного використання цього явища: визначення інтенсивності звукового поля, використання коагуляції аерозольних частинок для очищення газу, застосування акустичної левітації – дії радіаційних сил на об’єкт без фізичного контакту – в процесах безтигельного варіння скла, вирощування кристалів, в космічних технологіях при невагомості. Результати досліджень тиску звукового випромінювання в податливих (еластичних) трубах можуть бути використані в медицині при дослідженнях дії пульсових хвиль в артеріях.

- Досліджено випадки поширення звукових хвиль в необмежених і обмежених середовищах: стисливих в'язкій і ідеальній рідинах, в яких знаходиться тверда сферична частинка або крапля іншої рідини. Для кожного випадку була сформульована математична модель, що визначала досліджуване явище. Одержані результати можуть мати велике значення при розробці технологічних процесів, в яких використовуються акустичні хвилі.
- Розроблено методичне забезпечення розрахунків гідродинамічних та технологічних параметрів процесів гідромеханізації для видобутку та переробки поліметалічних корисних копалин при використанні струменевих, бункерних, ежекторних та всмоктувальних технологій.
- Розроблено методи розрахунків гідравлічного уклону та критичної швидкості гідротранспортування полідисперсних сипких матеріалів, які враховують гранулометричний склад твердої фази, витрату та концентрацію гідросуміші, наявність у фракціях твердої фази частинок різної густини, зміну гранулометричного складу та густини твердих частинок при насиченні та дезінтеграції пористих агломератів, що транспортуються.
- Для забезпечення надійності роботи систем гідротранспорту на гірничих підприємствах розроблено методи розрахунку витратно-напірної характеристики магістралі при гідротранспортуванні титан-цирконієвих розсипів у режимі усталених пульсацій тиску й витрати гідросуміші. Визначено діапазон значень параметрів коливань витрат і тиску гідросуміші, в якому їх вплив на гідравлічний опір трубопроводу є максимальним. На основі встановлених залежностей величини додаткового гідравлічного ухилу від частоти, амплітуди коливань тиску та витрати пульпи вперше розроблено методику оцінки інтервалів зміни параметрів процесу гідротранспорту сипких полідисперсних матеріалів в пульсуючих режимах, що дозволяє оцінити відхилення від стаціонарних значень подачі й напору насосів, а також імовірність виникнення критичного режиму.
- Для підвищення ефективності технологій гідромеханізації гірничих робіт шляхом зменшення питомих витрат води та електричної енергії розроблено методи розрахунків продуктивності гідротранспортної установки, що перекачує гідросуміші високої концентрації, з урахуванням ефективної в’язкості та початкового дотичного напруження, властивостей трубопроводу, а також параметрів витратно-напірної характеристики насосного обладнання, які передбачають зміну реологічних показників гідросуміші при повторних запусках.

- Розроблено варіаційні методи розв’язування задач гідропружності, пов’язаних з вивченням збуреного руху тіл, частково заповнених рідиною. Спектральні задачі, що описують вільні коливання тонкостінних оболонок, відносяться до числа сингулярно збурених задач, розв’язки яких мають великі градієнти у вузьких примежових зонах, що викликає істотні труднощі при апроксимації таких розв’язків. Розроблено варіаційний метод розв’язування задачі про коливання довільних тонкостінних оболонок обертання. Використовуючи елементи аналітичної теорії диференціальних рівнянь з малим параметром при старшій похідній і рівнянь з регулярною особливою точкою, встановлена формальна структура загального розв’язку вихідної системи рівнянь. На цій основі побудовані системи базисних функцій в методі Рітца, які враховують наявність в розв’язках примежових функцій та асимптотичну поведінку регулярних розв’язків в околі полюса куполоподібних оболонок. Запропонований метод відноситься до числа рівномірних за параметром.
- На практиці часто зустрічаються граничні задачі для рівнянь з розривними коефіцієнтами, граничними умовами та навантаженнями Наближені розв’язки таких задач можуть бути побудовані шляхом розбиття області визначення шуканих функцій на окремі підобласті, вводячи на їх суміжній границі відповідні умови спряження. Запропоновано застосування методу Рітца до побудови наближених розв’язків спектральних задач з умовами спряження. Знаходження розв’язків цих задач базується на побудові узагальненого функціоналу, для якого умови спряження є природними граничними умовами. На цій основі розроблено варіаційний метод розв’язування спектральної задачі, що описує поперечні коливання вертикально розташованого стержня з приєднаним у деякому перерізі резервуаром.
- Розроблено метод розв’язування задачі про коливання довільних оболонок обертання, які частково заповнені ідеальною рідиною. Розв’язок задачі гідропружності базується на застосуванні метода декомпозиції області інтегрування рівнянь теорії оболонок і на побудові оберненого оператора для гідродинамічної частини задачі.

- Розроблено аналітико-чисельний підхід до дослідження хвильових процесів в акустичному шарі, що містить випромінюючу оболонку обертання з п’єзоактивного матеріалу. Методологія досліджень основана на трансляційних теоремах додавання для циліндричних або сферичних функцій уявного аргументу, методу «уявних джерел», методу поділу змінних, розвиненні шуканих функцій в ряди, інтегральному перетворенні Лапласа за часовою змінною, методі суперпозиції, з використанням яких задачі можуть бути зведені до інтегральних рівнянь Вольтерри типу згортки та їх систем.
- На основі співвідношень лінійної теорії електропружності та акустичного наближення здійснені постановки й одержані точні аналітичні розв’язки початково-крайових задач про радіальні коливання порожнистих циліндра та кулі, які занурені в рідке середовище і підключені до джерела електричних імпульсів через електричний ланцюг. Розроблені підходи до дослідження нестаціонарного деформування електропружних конструктивних елементів дозволяють обчислювати їх напружено-деформований стан при досить загальних варіантах граничних умов як механічної групи, так і електричної.
- Методами теорій некоректних задач обчислювальної математики розвинуті підходи до розв'язання задач про керування нестаціонарними коливаннями електропружних елементів, зокрема з метою формування в оточуючому п’єзоперетворювач рідкому середовищі акустичних імпульсів з тиском заданого профілю.
- Для п’єзовипромінювачів складної геометрії, для яких реалізація аналітичних прийомів до розв'язання прикладних задач механіки пов'язана з принциповими математичними складнощами, дослідження закономірностей їх нестаціонарного деформування реалізовано за допомогою співвідношень методу скінченних елементів.

ВИСНОВКИ

Одержано нові фундаментальні результати, які є пріоритетними і не мають аналогів у світовій літературі. Монографії, статті, патенти містять важливі результати в науковому обґрунтуванні підходів та методів дослідження динаміки взаємодії твердих і пружних тіл з рідиною та їх застосування в широкому колі науково-технічних проблем сучасності.

Авторами здійснено постановку нових нетрадиційних задач динамічної поведінки твердих і деформівних тіл при їх взаємодії з рідиною.

Вагомий доробок у галузі динаміки гідропружних систем належить українським вченим, що працюють в контакті з провідними колегами інших країн. Узагальненню результатів досліджень фундаментального і прикладного характеру з питань сучасної динамічної гідропружності, включаючи удосконалення технологічних процесів з впровадженням їх у виробництво, одержаними в

- *Інституті механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України*,
- *Інституті математики НАН України*,
- *Інституті гідромеханіки НАН України*,
- *Інституті геотехнічної механіки ім. М.С.Полякова НАН України*
- *Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» МОН України*

присвячена унікальна в своїй області наукова робота «Динамічна взаємодія твердих і деформівних тіл з рідиною», що висувається на здобуття Державної премії України в галузі науки і техніки 2021 року.