

ЗАТВЕРДЖУЮ



Директор Інституту механіки

НАН України

(посада)

академік НАН України

О.М.Гузь

(підпис)

АНОТОВАНИЙ ЗВІТ

про виконану роботу у 2021 році в рамках реалізації проекту
із виконання наукових досліджень і розробок

Дифракційні процеси і радіаційні сили в обмежених гідропружних системах
(назва Проекту)

Назва конкурсу: « Підтримка досліджень провідних та молодих учених »

Реєстраційний номер Проекту: 2020.02/0112

Підстава для реалізації Проекту з виконання наукових досліджень і розробок

2020.02/0112 Дифракційні процеси і радіаційні сили в обмежених гідропружних системах
(реєстраційний номер та назва Проекту)

Рішення наукової ради Національного фонду досліджень України щодо визначення переможця конкурсу « Підтримка досліджень провідних та молодих учених »

(назва конкурсу)

протокол від «16 – 17» вересня 2020 року № 21

1. ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО ПРОЄКТ

Загальна тривалість виконання проекту 2020 рік – 2022 рік

Тривалість виконання Проекту у 2021 році

Початок – 30 квітня 2021 р.
(дата укладання Договору про виконання наукового дослідження і розробки)

Закінчення – 15 грудня 2021 року

Загальна вартість Проекту, грн. 7 770 590 грн.

Вартість Проекту по роках, грн.:

1-й рік 340 590 грн.

2-й рік 3715 000 грн.

3-й рік 3715 000 грн.

2. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ВИКОНАВЦІВ ПРОЄКТУ

до виконання Проєкту залучено 6 виконавців, з них:

Головний виконавець (керівник Проєкту):

доктор наук 1;

Субвиконавці:

доктори наук 2;

кандидати наук 2;

доктор філософії 1.

3. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ГРАНТООТРИМУВАЧА ТА ОРГАНІЗАЦІЮ(Ї) СУБВИКОНАВЦЯ(ІВ) ПРОЄКТУ

Грантоотримувач – Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка Національної академії наук України.

Кубенко Веніамін Дмитрович – завідувач відділу Інституту механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України, академік НАН України, професор, доктор фізико-математичних наук – керівник Проєкту і головний виконавець

Організація-субвиконавець: Київський національний університет імені Тараса Шевченка (КНУ) Підпорядкованість МОН України; ЄДРПОУ 02070944; Код КВЕД 85.42; 74.90

Жук Ярослав Олександрович – завідувач кафедри механіко-математичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка, доктор фізико-математичних наук, професор – відповідальний виконавець

Клімчук Тарас Володимирович – інженер-математик I категорії НДС Механіки спряжених хвильових полів механіко-математичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка (рік народження 1990), кандидат фізико-математичних наук – виконавець

Остос Олександр Хосейович – доктор філософії, провідний математик, механіко-математичний факультет Київського національного університету імені Тараса Шевченка (рік народження 1994) – виконавець

Організація-субвиконавець: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (КПІ) Підпорядкованість МОН України; ЄДРПОУ 02070921; Код КВЕД 85.42; 74.90

Янчевський Ігор Владиславович – професор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», доктор фізико-математичних наук, професор – відповідальний виконавець

Ліскін В'ячеслав Олегович – старший викладач Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», кандидат технічних наук – виконавець.

Автори проєкту мають значний досвід дослідження динаміки твердих і деформівних тіл і їх систем. Керівник проєкту академік НАН України В.Д. Кубенко має багаторічний досвід досліджень динамічних процесів в пружних елементах конструкцій при їх взаємодії з рідиною або пружним середовищем. В сферу його наукової спеціалізації входить розробка підходів і методів розв'язування динамічних задач деформування елементів конструкцій при взаємодії з рідиною і пружним середовищем, в тому числі: теорія нестационарної гідро-пружності тонкостінних оболо-

нок; теорія нелінійних коливання пружних оболонок, що спирається на багатомодові представлення переміщень; ударна взаємодія конструктивних елементів з поверхнею шаруватої рідини і пружного тіла; дифракційні задачі акустики і теорії пружності. З тематики проекту В. Кубенко опублікував ряд робіт, які містять розв'язок і аналіз ряду задач хвильової динаміки для систем неоднотипних тіл в стисливій рідині. Частина цих досліджень покладена в основу даного Проєкту.

Проф. Я.О.Жук має досвід у вивченні дії радіаційної сили в звуковому полі на тверду або рідку сферичну частинку, розташовану в околі вільної поверхні рідини. Зокрема він брав участь у розробці методу для дослідження дії радіаційної сили в акустичному полі на таку сферичну частинку, яка знаходиться в околі вільної поверхні ідеальної рідини при падінні перпендикулярно до поверхні рідини акустичної хвилі. Ним одержано формули для обчислення величини і напрямку дії радіаційної сили. На їх основі досліджено дію радіаційної сили на сферичну тверду частинку і краплю ідеальної рідини в околі вільної межі рідини.

Проф. І.В. Янчевський кілька років тому захистив дисертацію на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук з розробки ефективних чисельно-аналітичних та чисельних підходів до дослідження стаціонарного та нестаціонарного деформування пружних та електропружних елементів конструкцій різноманітної топології з врахуванням їх взаємодії з рідиною. У Проєкті, будуть залучені окремі, в т.ч. фундаментальні, результати дисертаційної роботи. Зокрема, методи побудови стійкого до обчислювальних погрішностей та похибок у вхідних даних розв'язку нескінченних систем лінійних алгебраїчних рівнянь, до яких можуть бути зведені задачі дослідження дифракційних процесів у безмежних та обмежених гідропружних системах та обчислення радіаційної сили. Зазначені методи розроблені на основі сучасних процедур обчислення спеціальних функцій та спеціалізованих регуляризованих алгоритмів, які використовуються при розв'язанні некоректних задач математичної фізики.

Молоді вчені – учасники Проєкту мають досвід дослідницької роботи і з ентузіазмом готові спільно з провідними вченими виконувати заплановані роботи.

4. ОПИС ПРОЄКТУ

4.1. Мета Проєкту (до 200 знаків)

Розробка аналітичного підходу і на його основі визначення особливостей гідродинамічних полів і радіаційних сил в заповнюючій порожнину стисливій рідині, що містить тверді, рідинні, газові або інкапсульовані включення.

4.2. Основні завдання Проєкту (до 400 знаків)

Побудова розв'язку граничних задач гідропружності для твердих, рідких, газових чи інкапсульованих частинок в обмеженому об'ємі стислої рідини (нескінченна або напівнескінченна циліндрична порожнина, вузька труба) під дією акустичних збурень. Визначення аномальних особливостей гідродинамічного тиску і діючих на включення радіаційних сил. Створення рекомендацій щодо можливостей використання встановлених аномалій з метою інтенсифікації процесів організації руху занурених в рідину частинок.

4.3. Детальний зміст Проєкту:

- Сучасний стан проблеми (до 400 знаків)

Аналіз наявних досягнень в дослідженнях радіаційних сил свідчить, що вони проводились виключно для частинок в *необмеженій* рідині або (зрідка) в *півпросторі* рідини. В той

же час для певних практичних застосувань актуальною є розробка методів дослідження і на їх основі визначення динамічних характеристик поведінки частинки в рідині, що заповнює жорстку або деформівну порожнину. Пріоритет досліджень в цьому напрямку належить авторам проекту.

Новизна Проекту (до 400 знаків)

Планується, спираючись на встановлений авторами факт наявності в заповнених рідиною порожнинах з включеннями аномальних особливостей, провести системне дослідження особливостей дифракційних процесів і радіаційних сил в обмежених гідропружних системах. Планується розглянути як жорстку судину, що містить рідину, так і судину з податливими стінками, нескінченну або напівнескінченну. Будуть розглянуті різні типи занурених тіл (тверде, рідке, інкапсульоване) і системи тіл.

Методологія дослідження (до 400 знаків)

Підхід має містити математичну постановку відповідних задач, знаходження їх точного розв'язку на основі аналітичних методів математичної фізики і механіки і створення обчислювальних програм в системі комп'ютерної алгебри. Це дасть змогу виконати чисельний експеримент на широкій базі вхідних даних з метою відтворення характеристик дифракційних процесів і радіаційних сил в залежності від частоти (довжини хвилі) діючого навантаження і фізико-механічних властивостей систем, що розглядаються.

5. ОТРИМАНІ НАУКОВІ АБО НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ (до 2 сторінок) в поточному році/ в рамках реалізації Проекту, зокрема:

5.1. Опис наукових або науково-технічних результатів, отриманих в рамках виконання Проекту (із зазначенням їх якісних та кількісних (технічних) характеристик)

Згідно технічного завдання в 2021 році в процесі виконання першого етапу договору створена комп'ютерна програма розрахунку дифракційних полів і радіаційних сил в напівнескінченній порожнині, що містить тверде сферичне тіло (частинку). На її основі виконані розрахунки гідродинамічних полів в заповненій рідиною напівнескінченній циліндричній порожнині, що містить тверде циліндричне тіло, під дією стаціонарної плоскої хвилі, яка рухається вздовж осі порожнини. У якості вхідних даних для розробленої у рамках даного етапу програми розрахунку виступили отримані на попередньому етапі у 2020 році результати, зокрема нескінченна система алгебраїчних рівнянь відносно коефіцієнтів розвинення шуканих функцій, до якої зведена розглянута задача.

Для різних геометричних конфігурацій механічної системи проведені чисельні експерименти, на основі яких проаналізовані особливості поля тиску в околі твердого сферичного тіла і значення діючої на нього радіаційної сили. Зокрема встановлено, що наявність торцевої стінки в циліндричній порожнині обумовлює суттєве зростання максимальних значень тиску при відносно малих розмірах сферичного тіла. Області з максимальним тиском можуть знаходитися в околі сферичного тіла, в центрі торцевої стінки або в околі стінки циліндричної порожнини. Найчастіше вони мають місце на осі циліндру. У випадку, коли циліндрична порожнина є нескінченною, характер розподілу тиску в ній наближається до симетричного відносно центрального поперечного перерізу сфери. За наявності торцевої стінки симетрія втрачається. У випадку збільшення розмірів сферичного тіла або наближення тіла до торцевої стінки тиск в точках порожнини суттєво збільшується.

Дана постановка нової задачі для рівняння Гельмгольца, яке описує акустичний тиск і радіаційну силу для сферичної частинки у вузькій, заповненій рідиною пружній трубі, і одержано загальний розв'язок для акустичного потенціалу в цій задачі. Із застосуванням запропонованого на попередньому етапі алгоритму, дана задача зведена до нескінченної системи алгебраїчних рівнянь для визначення коефіцієнтів розвинення потенціалу по системі спеціальних функцій. Зазначена система рівнянь також належить до систем нормального (квазірегулярного) типу, і тому її розв'язання можна виконати методом усичення.

У звіті за другий етап розвинуто підхід до розв'язку стаціонарних задач дифракції акустичних хвиль на системі геометрично неоднотипних тіл виду «заповнена рідиною порожнина з зануреним рідким пухирцем». Одержано точні аналітичні розв'язки задач про дифракцію плоскої гармонічної хвилі на рідкому пухирці в нескінченній і напівнескінченній порожнині з рідиною. Підхід спирається на метод розділення змінних і співвідношення, що реалізують представлення циліндричних хвильових функцій через сферичні і навпаки. Застосовується метод «уявних джерел» для реалізації умови на торці. Розв'язок одержано у вигляді узагальненого ряду Фур'є, коефіцієнти якого обчислюються з нескінченної системи алгебраїчних рівнянь.

Визначені гідродинамічні характеристики і радіаційні сили процесу взаємодії плоскої хвилі з включенням. Враховані такі особливості гідропружних процесів, як вплив пружності нескінченної вузької трубки на процес взаємодії та гідродинаміка рідкого пухирця в нескінченній та напівнескінченній порожнині з рідиною. Показано, що гідропружна система має спектр частот збурення, при збудженні яких гідродинамічний тиск в порожнині багатократно збільшується. Вказаний спектр частот для напівнескінченної порожнини відрізняється від аналогічних частот, властивих нескінченній порожнині.

Встановлено, що акустична радіаційна сила, яка діє на тверду сферичну частинку, розташовану у заповненій рідиною жорсткій посудині або вузькій податливій трубці, не є монотонною функцією частоти первинної хвилі. Виявлені «аномальні» частотипервинної хвилі, при яких в системі трубка(порожнина)–рідина–тіло(пухирець) спостерігаються резонансоподібні явища, що зумовлюють значне зростання величини радіаційної сили. При цьому радіаційна сила може змінювати не тільки величину, а й напрям дії. Характеристики акустичної радіаційної сили в досліджених випадках залежать від багатьох факторів: частоти первинної хвилі, радіусу твердої сферичної частинки, радіусу циліндричної порожнини чи податливої трубки, властивостей рідини-носія і рідини пухирця, товщини стінки та пружних властивостей матеріалу трубки.

Визначені особливості створюють можливість для конкретної конфігурації і механічних властивостей гідропружної системи шляхом підбору необхідної частотипервинної хвилі управляти рухом частинки (пухирця) в бажаному напрямку з потрібною інтенсивністю.

На відміну від досліджень попередників, які розглядали динаміку частинки(пухирця рідини) в безмежному просторі або півпросторі, автори звіту вперше врахували її дифракційну взаємодію з граничною поверхнею циліндричної посудини з рідиною-носієм. При цьому вперше взято до уваги вплив таких факторів, як пружні властивості посудини у вигляді тонкої трубки, взаємодія дифракційних хвиль з торцевим перетином посудини, особливості динаміки пухирця рідини в нескінченній і напівнескінченній циліндричній порожнині. Одержані точні аналітичні розв'язки відповідних граничних задач динамічної гідропружності дали можливість встановити наявність в системі, що розглядається, аномальних частот збудження, при яких гідродинамічний тиск на частинку суттєво зростає, а радіаційна сила радикально змінюється.

Викладені в звіті наукові результатають фундаментальний характер і одержані вперше.

Результатидосліджень відображені в підготовлених рукописах статей, що подані для публікації у провідних наукових журналів з механіки суцільного середовищ:

1. Zhuk O.P., Kubenko V.D., Zhuk Y.A. On the Acoustic Radiation Force Calculation for Rigid Spherical Particle Located in the Fluid-Filled Cylindrical Tube with Rigid or Elastic Walls // International Journal of Fluid Mechanics Research (с.18, рис.3)
2. Жук О.П., Кубенко В.Д., Жук Я.О., Янчевський І.В. Тиск звукового випромінювання на тверду сферу в заповненій рідиною податливій циліндричній трубці // Прикладна механіка(затверджена в №1, 2022 -- с.16, рис. 7)
3. Жук О.П., Жук Я.О. Визначення акустичної радіаційної сили, що діє на тверду сферичну частинку в пружній трубці з рідиною // Вісник Київського нац. ун-ту імені Тараса Шевченка. Серія: фізико-математичні науки. -- 2021. – Вип. 3. – С. 38–41.
4. В.Д.Кубенко, І.В.Янчевський, Я.О.Жук, В.О. Ліскін Гідродинамічні характеристики взаємодії плоскої хвилі зі сферичним тілом в заповненій стисливою рідиною напівнескінченній циліндричній порожнині // Прикладна механіка (с.17, рис.11)

5. В.Д.Кубенко, І.В.Янчевський Дифракційне поле і радіаційна сила для пухирця рідини в нескінченній циліндричній посудині // Прикладна механіка (с.12, рис.6)
Частина результатів доповідалась на науковій конференції:
6. Жук О.П., Жук Я.О. Визначення акустичної радіаційної сили, що діє на тверду сферичну частинку в пружній трубі з рідиною // VI Міжнародна наукова конференція «Сучасні проблеми механіки» (Київ, 30 – 31 серпня 2021 р.). Матеріали конф. – Київ, 2021. – С. 23.

Крім публікацій в періодичних виданнях готується до реєстрації патент України на корисну модель.

5.2. За наявності науково-технічної продукції обґрунтування її переваг у порівнянні з існуючими аналогами

Не планувалось.

5.3. Практична цінність отриманих результатів реалізації Проєкту для економіки та суспільства (стосується проєктів, що передбачають проведення прикладних наукових досліджень і науково-технічних розробок)

Не планувалось.

5.4. Опис шляхів та способів подальшого використання результатів виконання Проєкту в суспільній практиці.

Виконання договору створює передумови для подальшого розвитку досліджень згідно Технічного завдання з метою систематичного дослідження сформульованої проблеми

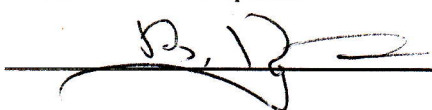
Примітка: Анотований звіт не містить відомостей, заборонених до відкритого опублікування

Науковий керівник Проєкту

завідувач відділу Інституту механіки НАН України

(посада)

академік НАН України

 (підпис)

Веніамін Кубенко
(Власне ім'я та ПІРІЗВИЩЕ)