

Актуальність теми. Задачі теоретичного дослідження динаміки підкріплених оболонкових конструкцій на пружній основі під дією нестационарних навантажень виникають в багатьох галузях техніки, наприклад, різні резервуари і трубопроводи, які закладені в ґрутове середовище, колони нафтових і газових свердловин, пускові шахти, тунелі метро та інші конструкції спеціального призначення. Діючі на ці конструкції імпульсні навантаження можуть бути генеровані полями тиску сейсмічних хвиль, гірських ударів, стрибками тиску в трубних магістралях, ефектами детонації, вибухами природного газу, ударними хвилями технологічних вибухів та ін.

При дії нестационарних навантажень на підкріплені оболонки обертання, які мають контакт з навколошнім пружним середовищем, в останніх виникають складні поля напружень і деформацій, структура яких залежить від способу врахування розміщення ребер жорсткості, фізико-механічних властивостей пружної основи, характеру взаємодії оболонка – середовище та інших чинників.

Більша частина відомих досліджень по вказаній проблемі виконана на основі співвідношень теорії стержнів і оболонок Кірхгофа–Лява при дії статичних навантажень, а пружне середовище моделюється основою Вінклера. Існує ряд робіт по вивченю динамічної поведінки балок, пластин та оболонок обертання на однота двопараметричній пружній основі. В цих роботах здебільшого використовується технічна теорія оболонок і лише в окремих роботах – уточнені теорії оболонок. Започатковані, як експериментальні, так і теоретичні дослідження по визначеню коефіцієнтів пружного середовища.

Оскільки, вказані оболонкові елементи конструкцій досить широко зустрічаються в техніці, можна зробити висновок, що задачі теоретичного дослідження на базі лінійної уточненої теорії стержнів і оболонок динаміки дискретно підкріплених оболонок обертання, які контактиують з ґрутовим середовищем, яке моделюється трикомпонентним нелінійним ґрутом, є актуальними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, що проведені в дисертаційній роботі, виконано у відповідності з науковими темами Інституту механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України, а саме: держбюджетними темами НДР: № 347 “Стійкість пластиначато-оболонкових циліндричних систем і оболонок з локальними початковими прогинами” терміном Ікв. 2005- ІУкв. 2007р.; постанова Бюро ВМех НАН України від 11.07.2007р. протокол №4 1.3.1.367 - 08 “Стійкість та коливання конструкцій з циліндричних оболонок та пластин з врахуванням впливу зовнішнього середовища та технологічних особливостей” терміном (2008 - .2012 рр., номер державної реєстрації 0107U008618); постанова Бюро ВМех НАН України від 08.11.2011р. протокол №5 1.3.1.382 - 12 “Дослідження механічної поведінки неоднорідних анізотропних елементів сучасних конструкцій складної структури за допомогою нових підходів на основі різних моделей” терміном (2012 - 2016 рр., номер державної реєстрації 0102U000249); постанова Бюро ВМех НАН України від 26.06.2015р. протокол №5 1.3.1.402 - 16 “Динаміка складних оболонкових систем при дії розподілених та локальних нестационарних навантажень” терміном (2016 - 2019 рр., номер державної реєстрації 0115U005704); пошуковими темами НДР: № 474- П “Розробка нового підходу до чисельного

розрахунку критичних навантажень недосконалих гладких і ребристих оболонках та його експериментальне обґрунтування” терміном II кВ 2007 – II кВ. 2009р.; постанова Вченої ради Інституту механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України від 18.12.2012р. протокол № 11 1.3.2.513 П- 13 “ Коливання та стійкість гладких та дискретно підкріплених циліндричних оболонок на пружній основі при статичних та імпульсних навантаженнях” терміном I кв. 2013 р. - ІУ кв.2013 р.; тема впровадження НДР постанова Бюро ВМех НАН України від 02.10.2013р. протокол №3 1.3.1.392-14 “Коливання та стійкість гладких та дискретно підкріплених циліндричних оболонок при статичних та імпульсних навантаженнях ” (2014 - 2015 рр., номер державної реєстрації 0114U002164). Договір про наукове співробітництво № 7 від 14 квітня 2013 р. з «Конструкторським бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля»; договір з «Конструкторським бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля» «Динаміка і міцність оболонок обертання» № 151 – 2016.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є створення нової загальної методології, що дозволяє розраховувати напружено - деформівний стан (НДС) неоднорідних елементів конструкцій (дискретно – підкріплених оболонок), зв’язаних з пружними середовищами Вінклера та Пастернака, при дії динамічних силових навантажень різного вигляду (раптових, імпульсних і т.п.) та способу їх прикладання (розподілених, локальних, зосереджених). Розв’язок зв’язаних задач циліндричні оболонки – ґрутове середовище, на базі яких є можливим визначити коефіцієнт постелі Вінклера при нестационарних навантаженнях. Розглянуто зв’язані задачі нестационарної динаміки системи циліндрична оболонка – ґрутове середовище, сферична оболонка – ґрутове середовище, циліндрична оболонка – ґрутове середовище періодичної структури при дії імпульсного навантаження. Розв’язок даних задач дає можливість визначення коефіцієнта Вінклера в залежності від геометрії та фізико – механічних властивостей ґрутового середовища. В подальшому отримані залежності використовуються при розв’язку динамічних неоднорідних задач на пружній основі.

До задач слід віднести: постановку початково – крайових задач до розрахунку НДС пружних, дискретно – підкріплених елементів конструкцій зв’язаних з без інерційними середовищами Вінклера та Пастернака при динамічних навантаженнях. Постановку та розв’язок зв’язаних задач пружна оболонка – ґрутове середовище. Розробку методів розв’язку для підкріплених оболонок на пружній основі виходячи з параметрів розв’язку зв’язаних задач. Чисельний розв’язок та аналіз залежності параметрів коливань від граничних умов, геометричних та фізико - механічних параметрів оболонки та підкріплюючих ребер, величини та виду навантаження, характеристик та моделей пружних середовищ.

Об’єктом дослідження є хвильові процеси в неоднорідних оболонкових структурах з врахуванням параметрів напружено – деформованого стану (НДС) дискретно – підкріплених оболонок та ґрутових середовищ.

Предметом дослідження є параметри коливань та НДС в гладких та підкріплених елементах конструкцій зв’язаних з пружним середовищем при різних видах динамічних навантажень.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі використано основні співвідношення динамічної теорії оболонок та криволінійних стержнів на основі

уточненої теорії Тимошенка та теорії руху ґрутових середовищ згідно рівнянь Ейлера. З використанням розв'язків зв'язаних задач теорії оболонка – ґрутове середовище отримано інженерні формули коефіцієнтів Вінклера в залежності від виду геометрії (циліндрична, сферична оболонки) та фізико – механічних параметрів ґрутового середовища. Отримані результати дозволяють розв'язувати більш складні задачі динамічної поведінки дискретно – підкріплених оболонок на пружній основі, з використанням отриманих результатів. Розв'язок зв'язаних одновимірних та двовимірних динамічних задач базується на використанні скінченно – різницевих схем Мак – Кормака. Розв'язок більш складних задач динамічної поведінки дискретно – підкріплених оболонок на пружній основі базується на використанні інтегро – інтерполяційного методу побудови скінченно – різницевих схем по просторовим координатам та явній різницевій апроксимації по часовій координаті.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що дана уточнена постановка задач та вивід рівнянь осесиметричних та неосесиметричних коливань дискретно підкріплених оболонок обертання, що контактують з ґрутовим середовищем. Покладалося, що напружено–деформований стан неоднорідної пружної структури визначається в рамках геометрично лінійної теорії стержнів і оболонок типу Тимошенка. Для отримання рівнянь коливань використовується варіаційний принцип Гамільтона–Остроградського, який дає можливість отримати рівняння коливань підкріплених оболонок обертання з врахуванням дії ґрутового середовища, записати природні граничні та початкові умови для дискретно підкріплених оболонок. Також, проводиться постановка та чисельний розв'язок зв'язаних задач: циліндрична оболонка – нескінченне одношарове ґрутове середовище, сферична оболонка - нескінченне одношарове ґрутове середовище, циліндрична оболонка – двошарове ґрутове середовище, циліндрична оболонка – ґрутове середовище періодичної структури. На основі розв'язку задач про вимушенні коливання оболонка – ґрутове середовище, є можливість визначити коефіцієнт Вінклера в залежності від геометричних (некінченний циліндр, замкнена сфера) та фізико – механічних параметрів ґрутового середовища. Знайдені залежності в подальшому використовуються при розв'язані більш складних задач вимушених коливань теорії оболонок на пружній основі.

Розроблені чисельні алгоритми розв'язування динамічних задач неоднорідних оболонкових структур на пружній основі з врахуванням коефіцієнта Вінклера, знайденого з розв'язку зв'язаних задач оболонка – ґрутове–середовище.

Для розв'язування зв'язаних динамічних задач оболонка – ґрутове середовище побудовані відповідні скінченно–різницеві схеми Мак – Кормака.

В роботі створена нова науково–обґрутована загальна методика математичного дослідження НДС неоднорідних елементів конструкцій на основі пружних середовищ Вінклера та Пастернака, розв'язані зв'язні задачі теорії оболонка – ґрутове середовище в рамках механіки суцільних середовищ.

Отримані розв'язки задач осесиметричних та неосесиметричних коливань дискретно підкріплених оболонок обертання на пружному середовищі при нестационарних навантаженнях в залежності від геометрії об'єкту та фізико – механічних параметрів ґрутового середовища.

Теоретична і практична цінність отриманих у роботі результатів.

Теоретична цінність отриманих у роботі результатів полягає в тому, що математична модель та алгоритм можуть бути узагальнені для широкого класу оболонок; використання розроблених алгоритмів дозволяє проводити розрахунки з оцінки меж міцності елементів конструкцій, оцінки меж застосування більш простих теорій, а також створити працездатні оболонкові конструкції з оптимальними параметрами при врахуванні конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів і виключити необхідність у проведенні дорогих пошукових експериментальних досліджень.

Практичне значення отриманих у роботі результатів. полягає в тому, що розв'язки нових задач динаміки дискретно підкріплених оболонок обертання на пружній основі при імпульсних навантаженнях, які одержані в роботі, можуть бути застосовані для дослідження прикладних задач, які виникають при прогнозуванні динамічної поведінки колекторів нафтових та газових свердловин при застосуванні імпульсних технологій інтенсифікації видобутку вуглеводнів, складанні проектів проведення вибухово–прострільних робіт в копальнях, оцінці аварійних ризиків в пускових шахтах та захисних оболонкових структурах атомних електростанцій, визначені ефективності підкріплень при модернізації підземних трубопроводів. Практичне значення мають також розроблені в роботі теоретичні методики визначення коефіцієнтів пружної основи для водонасичених ґрунтів.

Теоретичні та практичні результати, які викладені в дисертації, знайшли практичне застосування в «Конструкторському бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля», зокрема, при дослідженні розділення ступенів ракет носіїв і космічного обладнання з допомогою пірозамків розташованих у відповідних оболонках – адаптерах, які підлягають локальним імпульсним навантаженням великої інтенсивності.

Акт впровадження результатів прикладається.

Достовірність результатів забезпечується:

- строгостю та коректністю постановок вихідних задач;
- перевіркою практичної збіжності обчислювального процесу;
- використанням умови стійкості, яка гарантує стійкий розрахунок;
- застосуванням апробованого чисельного методу;
- тестуванням розробленої методики на ряді задач даного класу.

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно. Матеріали, опубліковані у співавторстві, та використані в дисертації, отримані здобувачем особисто, включаючи постановку задач, та безпосереднє виконання всіх етапів робіт. В роботах написаних із науковим консультантом йому належить загальний задум проведення досліджень. В роботах написаних із співавторами їм належить участь в аналізі та інтерпретації результатів досліджень.

Апробація результатів дисертації. Дисертаційна робота пройшла достатньо повну апробацію. Матеріали дисертації були представлені на Міжнародних конференціях: «Людина і космос» (III 2001р, IV 2002 р., Дніпропетровськ); «Обчислювальна та прикладна математика» (Київ, 2002 р.); "Dynamical system modeling and stability investigation" (м. Київ, 2003 р.), IX Міжнародна конференція ім. акад. М. Кравчука (м. Київ, 2002 р.), кримській Міжнародній математичній школі

"Метод функцій Ляпунова і його додатки" (м. Алушта, 2008 р., 2010 р.), Міжнародних конференціях "Математичні проблеми технічної механіки" (м. Дніпродзержинськ, 2005 р., 2006р., 2007 р., 2009 р., 2011 р., 2012 р., 2013 р., 2014 р., 2016 р.); Восьмая Крымская Международная Математическая школа МФЛ (Крым, Алушта, 2006 г.); XVII Міжнародному симпозіумі «Динамические и технологические проблемы механики конструкций» им. А.Г. Горшкова (Москва, 2011 г.); «Актуальные проблемы инженерной механики» (Миколаїв, 2011 р., 2012 р.); "Актуальні проблеми прикладної механіки й міцності конструкцій" (м. Ялта, 2011 р.; м. Запоріжжя, 2012 р.), VII Всероссийской конференции (МГТУ им. Баумана, Москва, 2013 г.); III Международной научно – практической конференции «Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса» (Гомель, 2013 г.); VII Международная конференция «Актуальные проблемы механики деформируемого твердого тела» (Донецк – Мелекино, 2013 г.); «Теория оболочек и мембран в механике и биологии: от макро- до наноразмерных структур» (Минск, Беларусь, 2013 г.); «Сучасні проблеми механіки деформівного твердого тіла, диференціальних та інтегральних рівнянь» (Одеса, 2013 р.); «Математика в сучасному технічному університеті» (ІІ Міжнародна науково – практична конференція, Київ, 2013 р.); «Актуальные проблемы инженерной механики» (Одесса, 2015 г., 2016 г.); на Всеукраїнських наукових конференціях: «Математичні проблеми технічної механіки» (ІІ, 2002 р., ІІІ 2003 р., ІV 2004 р., м. Дніпродзержинськ); «Механика деформируемого твердого тела - 2008» (конференция молодых ученых, посвященная 90-й годовщине НАН Украины и Института механики им. С.П. Тимошенко НАН Украины, 2009 г.); «Сучасні проблеми природничих наук та підготовки фахівців у цій галузі» (XII Всеукраїнська науково – методична конференція, м. Миколаїв, 2009 р.); «Сучасні науково – методичні проблеми у вищій школі» (Всеукраїнська науково – методична конференція, м. Київ, 2013 р.); «Сучасні проблеми фізико – математичних наук та підготовка фахівців у цій галузі» (XIV Всеукраїнська науково – методична конференція присвячена 100 – річчю з дня заснування МНУ ім.. В.О. Сухомлинського, м. Миколаїв, 2013 р.) на українсько-російському семінарі "Нестаціонарні процеси деформування елементів конструкцій, обумовлені дією полів різної фізичної природи" (м. Львів, 2012 р.); «Математичне моделювання та математична фізика» (Всеукраїнська наукова конференція присвячена 165 – річчю від дня народження С.В. Ковалевської, м. Кременчук, 2015 р.). Окремі положення дисертації періодично доповідалися на наукових семінарах відділу будівельної механіки тонкостінних конструкцій (Київ, 2013–2016 р.).

В повному обсязі дисертація доповідалася і обговорювалася на науковому семінарі відділу будівельної механіки тонкостінних конструкцій Інституту механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України (Київ, 2016 р.); на семінарі секції за напрямком „Механіка оболонкових систем” Інституту механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України (Київ, 2016 р.); на засіданні загальноінститутського наукового семінару з механіки Інституту механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України (Київ, 2016); на семінарах кафедри вищої математики та кафедри теоретичної та прикладної механіки Національного транспортного університету (Київ, 2016).

Публікації. За результатами дисертації опубліковано 71 роботу, в тому числі

10 публікацій у індексованих Google Scholar наукових виданнях, 17 статей у фахових журналах і збірниках України, 44 роботи у збірниках матеріалів і праць міжнародних наукових конференцій. Зазначені наукові роботи були опубліковані після захисту (2001 р.) кандидатської дисертації автора, а їх матеріали не включалися до кандидатської дисертації.

Структура і обсяг роботи. Робота складається із вступу, шести розділів, висновків та списку використаної літератури (295 найменувань на 28 сторінках) та додатку. Загальний обсяг роботи становить 299 сторінок тексту, 95 рисунків та графіків, 5 таблиць, додаток на 1 сторінці.

Автор виражає глибоку вдячність науковому консультанту д.т.н., професору П.З. Луговому за постійну увагу до роботи та консультації при її виконанні.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми роботи, сформульовано мету і задачі досліджень, розкрито наукову новизну одержаних результатів, наведено відомості щодо їх практичного застосування, дані про публікації та апробацію результатів дисертації, відзначено особистий внесок здобувача та описано структуру роботи.

В першому розділі розглянуто сучасний стан питання динамічної поведінки неоднорідних елементів конструкцій на пружній основі.

Питанням динамічної поведінки неоднорідних елементів конструкцій на пружній основі присвячена значна кількість робіт. Проведено умовну класифікацію робіт по темі: 1) оболонки на пружній основі; 2) зв'язані задачі взаємодії оболонок із зовнішнім середовищем; 3) динамічні задачі неоднорідних оболонок.

Основні результати в області динаміки оболонок на пружній основі отримані відомими вченими в роботах, зокрема: В.З. Власова, А.С. Вольміра, О.М. Гузя, Я.М. Григоренка, В.Д. Кубенка, О.А. Бабаєва, В.А. Баженова, В.І. Гуляєва, В.В. Гайдайчука, В.Г. Карнаухова, М.А. Ільгамова, В.Г. Піскунова, В.І. Пожуєва, О.О. Рассказова, М.О. Шульги, Є.Г. Янютіна, Marconi F, Shi X.P., Rose T.A., Turmen H.S.

Задачі взаємодії оболонок з навколоишнім середовищем розглянуті в роботах: Н.А. Алумяе, В.Г. Баженова, Н.Д. Векслера, А.В. Вестяка, А.С. Вольміра, Ш.У. Галієва, А.Г. Горшкова, Е.І. Григорюка, О.М. Гузя, А.В. Кочеткова, В.Д. Кубенка, М.І. Михайлової, А.К. Перцева, Д.В. Тарлаковського, Berger B.S., Geers T.L., Huang H, Wang Y.E.

Динамічні задачі неоднорідних оболонок, зокрема підкріплених оболонок, розглянуто в роботах: С.О. Амбарцумяна, І.Я. Аміро, Н.В. Андріанова, А.Є. Богдановича, В.В. Гайдайчука, О.Я Григоренка, Ю.П. Жигалко, В.О. Заруцького, О.І. Лихоєда, П.З. Лугового, О.О. Малиніна, Л.І. Маневича, Л.П. Хорошуна, Huang Y.Y., Soldatos P.K., Suzuki K.

Значний вклад в становленні, розвитку та застосуванні кінетичної теорії проблемі міцності матеріалів та неоднорідних по товщині оболонкових конструкцій внесли М.К. Кучер, А.П. Дзюба.

Практично відсутні роботи по динамічній поведінці неоднорідних елементів оболонок на пружній основі. Виходячи з цього, визначається актуальність, ціль та новизна роботи.

В другому розділі приводиться постановка динамічних задач теорії підкріплених оболонок на пружній основі, а також постановка зв'язаних задач циліндрична (сферична оболонка) – грунтове середовище. Приведено постановки неосесиметричних задач коливань дискретно–підкріплених оболонок обертання при імпульсних (нестаціонарних) навантаженнях. Покладається, що НДС складеної оболонки базується на рівняннях коливань моделі оболонок та стержнів типу Тимошенка. Виходячи із варіаційного принципу Гамільтона – Остроградського отримані рівняння коливань дискретно – підкріплених оболонок на пружній основі. Розглядається варіант безінерційного пружного середовища. Приведені природні граничні та початкові умови.

В другій частині даного розділу приведено постановки одновимірних задач циліндр (сфера) – грунтове середовище при дії внутрішнього імпульсного навантаження. Грунтове середовище розглядається в рамках моделі грунтів В.М. Ляхова. Також розглядається задача нестаціонарних коливань циліндрична оболонка – пружне середовище періодичної структури (двовимірна задача в ейлерових координатах – одновимірна задача оболонок в рамках моделі Тимошенка).

2.1. Постановка динамічних задач теорії підкріплених оболонок на пружній основі. В рамках моделі Тимошенка покладається:

$$\bar{U} = (u_1, u_2, u_3, \varphi_1, \varphi_2), \quad \bar{U}_i = (u_{1i}, u_{2i}, u_{3i}, \varphi_{1i}, \varphi_{2i}), \quad \bar{U}_j = (u_{1j}, u_{2j}, u_{3j}, \varphi_{1j}, \varphi_{2j}),$$

де \bar{U} , \bar{U}_i , \bar{U}_j - узагальнені вектори переміщень середньої поверхні обшивки, ліній центра ваги поперечного перерізу i -го та j -го ребер.

Згідно варіаційного принципу Гамільтона – Остроградського маємо

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (\Pi - K + A) dt = 0, \quad (2.1)$$

де Π , K - повна потенціальна та кінетична енергії системи, A - робота зовнішніх сил.

Вирази для зміни величин Π , K мають вигляд

$$\delta K = \delta K_0 + \delta \sum_i K_i + \delta \sum_j K_j, \quad \delta \Pi = \delta \Pi_0 + \delta \sum_i \Pi_i + \delta \sum_j \Pi_j + \delta \Pi_{\text{інш}}.$$

Після стандартних перетворень в (2.1) отримаємо три групи рівнянь коливань:
– для гладкої області оболонки:

$$L_k(\bar{U}) = \rho h \frac{\partial^2 u_k}{\partial t^2}; \quad M_k(\bar{U}) = \frac{\rho h^3}{12} \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial t^2}, \quad k = 1, 2; \quad (2.2)$$

$$\frac{1}{A_1 A_2} \left[C_2 \frac{\partial}{\partial \alpha_1} \left(\frac{A_2}{A_1} \frac{\partial u_3}{\partial \alpha_1} \right) + C_2 \frac{\partial}{\partial \alpha_2} \left(\frac{A_1}{A_2} \frac{\partial u_3}{\partial \alpha_2} \right) \right] - C_1 u_3 + L_3(\bar{U}) + P_3 = \rho h \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2};$$

– для i -го підкріплюючого ребра вздовж осі α_1 :

$$[S]_i + L_{1i}(\bar{U}_i) = \rho_i F_i \frac{\partial^2 u_{1i}}{\partial t^2}, \quad [T_{22}]_i + L_{2i}(\bar{U}_i) = \rho_i F_i \frac{\partial^2 u_{2i}}{\partial t^2}, \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} [T_{23}]_i + L_{3i}(\bar{U}_i) &= \rho_i F_i \frac{\partial^2 u_{3i}}{\partial t^2}, \\ [H]_i + L_{4i}(\bar{U}_i) &= \rho_i I_{li} \frac{\partial^2 \varphi_{li}}{\partial t^2}, \quad [M_{22}]_i + L_{5i}(\bar{U}_i) = \rho_i I_{kpi} \frac{\partial^2 \varphi_{2i}}{\partial t^2}. \end{aligned}$$

Аналогічні рівняння записуються для j -го підкріплюючого ребра вздовж осі α_2 .

В рівняннях (2.2) C_1, C_2 - коефіцієнти Вінклера і Пастернака пружної основи. Зв'язок компонент векторів \bar{U}_i, \bar{U}_j з компонентами вектора \bar{U} виражаються згідно умов жорсткого з'єднання оболонка підкріплюючий елемент.

Граничні умови мають вигляд при $\alpha_1 = \alpha_{10}$, або $\alpha_1 = \alpha_{1N}$:

- для жорстко защемленого краю $u_1 = u_2 = u_3 = \varphi_1 = \varphi_2 = 0$;
- для випадку вільного краю - $T_{11} = S = T_{13} = M_{11} = H = 0$.

Початкові умови при $t = 0$:

$$u_1 = u_2 = u_3 = \varphi_1 = \varphi_2 = 0, \quad \frac{\partial u_1}{\partial t} = \frac{\partial u_2}{\partial t} = \frac{\partial u_3}{\partial t} = \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = 0.$$

В рівняннях (2.2) оператори $L_1(\bar{U}), L_2(\bar{U}), L_3(\bar{U}), M_1(\bar{U}), M_2(\bar{U})$ мають наступний вигляд:

$$L_1(\bar{U}) = \frac{1}{A_1 A_2} \left\{ \frac{\partial}{\partial \alpha_1} (A_2 T_{11}) + \frac{\partial}{\partial \alpha_2} (A_1 S) \right\}, \quad (2.4)$$

$$L_2(\bar{U}) = \frac{1}{A_1 A_2} \left\{ \frac{\partial}{\partial \alpha_1} [A_2 (S + k_2 H)] + \frac{\partial}{\partial \alpha_2} (A_1 T_{22}) \right\} + k_2 T_{23},$$

$$L_3(\bar{U}) = \frac{1}{A_1 A_2} \left[\frac{\partial}{\partial \alpha_1} (A_2 T_{13}) + \frac{\partial}{\partial \alpha_2} (A_1 T_{13}) \right] - k_2 T_{22},$$

$$M_1(\bar{U}) = \frac{1}{A_1 A_2} \left[\frac{\partial}{\partial \alpha_1} (A_2 M_{11}) + \frac{\partial}{\partial \alpha_2} (A_1 H) \right] - T_{13},$$

$$M_2(\bar{U}) = \frac{1}{A_1 A_2} \left[\frac{\partial}{\partial \alpha_1} (A_2 H) + \frac{\partial}{\partial \alpha_2} (A_1 M_{22}) \right] - T_{23};$$

В співвідношеннях (2.4) вирази для зусиль – моментів гладкої частини оболонки мають вигляд:

$$\begin{aligned} T_{11} &= B_{11} \varepsilon_{11} + B_{12} \varepsilon_{22}, & T_{22} &= B_{21} \varepsilon_{11} + B_{22} \varepsilon_{22}, \\ T_{13} &= B_{13} \varepsilon_{13}, & T_{23} &= B_{23} \varepsilon_{23}, \\ S &= B_s \varepsilon_{12}, & M_{11} &= D_{11} \kappa_{11} + D_{12} \kappa_{22}, \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$\mathbf{M}_{22} = \mathbf{D}_{21}\kappa_{11} + \mathbf{D}_{22}\kappa_{22}, \quad \mathbf{H} = \mathbf{D}_s\kappa_{12},$$

де

$$\begin{aligned} B_{11} &= \frac{E_1 h}{1 - \nu_{12} \nu_{21}}, & B_{12} &= \frac{E_1 \nu_{21} h}{1 - \nu_{12} \nu_{21}}, & B_{12} &= B_{21}, & B_{22} &= \frac{E_2 h}{1 - \nu_{12} \nu_{21}}, \\ B_{13} &= G_{13} h k^2, & B_{23} &= G_{23} h k^2, & B_s &= G_{12} h, \\ D_{11} &= \frac{E_1 h^3}{12(1 - \nu_{12} \nu_{21})}, & D_{12} &= \frac{E_1 \nu_{21} h^3}{12(1 - \nu_{12} \nu_{21})}, & D_{21} &= D_{12}, \\ D_{22} &= \frac{E_2 h^3}{12(1 - \nu_{12} \nu_{21})}, & D_s &= G_{12} \frac{h^3}{12}, \end{aligned}$$

де E_1 , E_2 , G_{12} , G_{13} , G_{23} , ν_{12} , ν_{21} – фізико-механічні характеристики матеріалу оболонки.

Вирази для компонент деформацій гладкої частини оболонки мають вигляд

$$\varepsilon_{11} = \frac{\partial u_1}{\partial s_1}, \quad \varepsilon_{22} = \frac{\partial u_2}{\partial s_2} + k_2 u_3, \quad \omega = \omega_1 + \omega_2, \quad \omega_1 = \frac{\partial u_2}{\partial s_1}, \quad \omega_2 = \frac{\partial u_1}{\partial s_2}, \quad (2.6)$$

$$\varepsilon_{12} = \omega, \quad \varepsilon_{13} = \varphi_1 + \theta_1, \quad \varepsilon_{23} = \varphi_2 + \theta_2,$$

$$\theta_1 = \frac{\partial u_3}{\partial s_1}, \quad \theta_2 = \frac{\partial u_3}{\partial s_2} - k_2 u_2,$$

$$\kappa_{11} = \frac{\partial \varphi_1}{\partial s_1}, \quad \kappa_{22} = \frac{\partial \varphi_2}{\partial s_2}, \quad \kappa_{12} = \tau_1 + \tau_2 + \hat{e}_1 \omega_1 + \hat{e}_2 \omega_2,$$

$$\tau_1 = \frac{\partial \varphi_2}{\partial s_1}, \quad \tau_2 = \frac{\partial \varphi_1}{\partial s_2}.$$

2.2. Постановка зв'язаних задач оболонка – ґрунтове середовище.

Постановка одновимірних задач

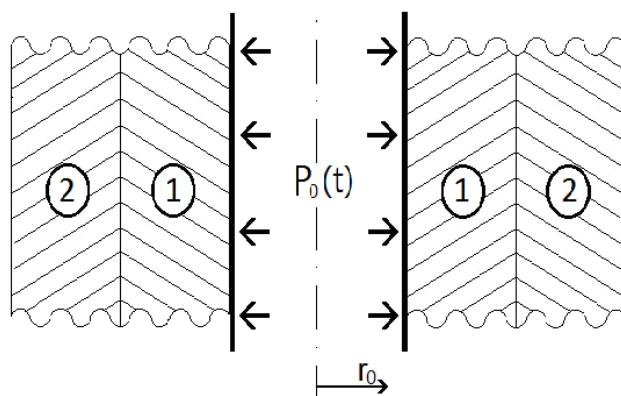


Рис. 2.1 Схематичне зображення взаємодії циліндричної оболонки з двошаровим ґрунтовим середовищем

Рівняння руху двошарового ґрутового середовища мають вигляд

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U) + \frac{1}{r^m} \frac{\partial}{\partial r} [r^m (\rho U^2 + P)] - \frac{m}{r} P = 0, \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r^m} \frac{\partial}{\partial r} [r^m (\rho U)] = 0,$$

де r - просторова координата, t - часова координата, U - швидкість, ρ - густина, P - тиск; $m = 1$ для випадку циліндричної симетрії, $m = 2$ - для сферичної симетрії.

Рівняння стану ґрутового середовища приймається згідно моделі нелінійного рідкого трикомпонентного середовища

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \sum_{i=1}^3 \alpha_i \left[\frac{\gamma_i (P - P_0)}{\rho_{i0} c_{i0}^2} + 1 \right]^{-\gamma_i},$$

$$\rho_0 = \frac{1}{V_0} = \sum_{i=1}^3 \alpha_i \rho_{i0}, \quad \sum_{i=1}^3 \alpha_i = 1.$$

Рівняння коливань тонкої циліндричної оболонки радіусом R і товщиною h

$$\rho_{sh} h \ddot{u}_3 = -\frac{T_{22}}{R} + P_3(t) - P_r(t), \quad T_{22} = \frac{Eh}{1-\nu^2} \frac{u_3}{R^2}. \quad (2.8)$$

Рівняння коливань для сферичної оболонки

$$\rho_{sh} h \ddot{u}_3 = -\frac{T_{11}}{R} - \frac{T_{22}}{R} + P_3(t) - P_r(t), \quad (2.9)$$

$$T_{11} = \frac{Eh \nu}{1-\nu^2} \frac{u_3}{R^2}, \quad T_{22} = \frac{Eh}{1-\nu^2} \frac{u_3}{R^2}.$$

Умови непроникнення на деформовану поверхню оболонки контакту оболонка – ґрутове середовище приймаються у вигляді

$$\dot{u}_3 = U_r, \quad (2.10)$$

де U_r - швидкість границі ґрутового середовища на контакту.

Постановка двовимірних задач (циліндрична симетрія)

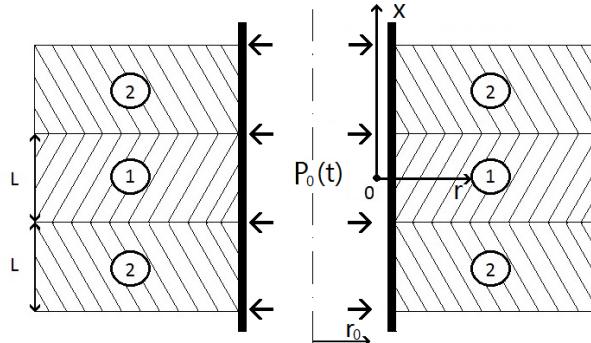


Рис. 2.2 Схематичне зображення взаємодії циліндричної оболонки з ґрутовим середовищем періодичної структури

Рівняння руху ґрутового середовища для даного випадку мають вигляд

$$\frac{\partial \bar{F}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{A}}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{B}) + \frac{\bar{C}_0}{r} = 0, \quad (2.11)$$

$$\bar{F} = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho v \\ \rho \end{pmatrix}; \quad \bar{A} = \begin{pmatrix} \rho u^2 + P \\ \rho uv \\ \rho u \end{pmatrix}; \quad \bar{B} = \begin{pmatrix} \rho uv \\ \rho v^2 + P \\ \rho v \end{pmatrix}; \quad \bar{C}_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ -P \\ 0 \end{pmatrix},$$

де $u(x, r)$, $v(x, r)$ - швидкості частинок ґрунту в просторовій системі x, r ; ρ - густина ґрутового середовища; t - часова координата.

Рівняння коливань циліндричної оболонки мають вигляд

$$\frac{\partial T_{11}}{\partial x} = \rho h \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2}, \quad \frac{\partial M_{11}}{\partial x} - T_{13} = \rho \frac{h^3}{12} \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial t^2}, \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial T_{13}}{\partial x} - \frac{T_{22}}{R} + P_3(x, t) - P_r(x, r_0, t) = \rho h \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2}.$$

Рівняння (2.11), (2.12) доповнюються відповідними умовами контакту ґрутове середовище – оболонка та відповідними початковими і граничними умовами.

В третьому розділі приведені чисельні алгоритми розв'язку вихідних задач. Спочатку розглядаються зв'язані задачі нестационарного деформування циліндричних та сферичних оболонок при дії внутрішніх імпульсних навантажень. Виходячи із розв'язку зв'язаних задач, наближено визначається коефіцієнт Вінклера для циліндричної та сферичної симетрії (одновимірні та двовимірні задачі).

3.1. Чисельний алгоритм розв'язку задач неоднорідних оболонкових структур на пружній основі. Побудову чисельного алгоритму для дискретно підкріплених оболонок на пружній основі розглянемо на прикладі повздовжньо – поперечно підкріплених циліндричних оболонок на пружній основі.

Розглядається область $D = \{0 \leq x \leq L, 0 \leq y \leq 2\pi, 0 \leq t \leq T\}$.

Вводиться різницева сітка $\Omega = \Omega_{\Delta x \Delta y} \cdot \Omega_\tau$,

де

$$\Omega_{\Delta x \Delta y} = \{(x_k, y_i) = (k \Delta x, l \Delta y), \Delta x = L/K, \Delta y = 2\pi R/M; k = \overline{0, K}; l = \overline{0, M}\},$$

$$\Omega_\tau = \{t_n = n\tau, \tau = T/N, n = \overline{0, N}\}.$$

Також вводяться допоміжні різницеві сітки в дискретних точках $(x_{k \pm 1/2}, y_i)$, $(x_k, y_{l \pm 1/2})$, $(x_{k \pm 1/2}, y_{l \pm 1/2})$, де $x_{k \pm 1/2} = (k \pm 1/2) \Delta x$, $y_{l \pm 1/2} = (l \pm 1/2) \Delta y$.

Для побудови чисельного алгоритму використовується інтегро – інтерполяційний метод побудови різницевих рівнянь в областях

$$\Omega_1 = \{x_{k-1/2} \leq x \leq x_{k+1/2}, y_{l-1/2} \leq y \leq y_{l+1/2}\} \text{ при } t_{n-1/2} \leq t \leq t_{n+1/2};$$

$$\Omega_2 = \{x_{k-1} \leq x \leq x_k, y_{l-1/2} \leq y \leq y_{l+1/2}\} \text{ та}$$

$$\Omega_3 = \{x_{k-1/2} \leq x \leq x_{k+1/2}, y_{l-1} \leq y \leq y_l\} \quad \text{при} \quad t_{n-1/2} \leq t \leq t_{n+1/2}.$$

Різницеві співвідношення в гладкій області мають вигляд

$$\frac{T_{11k+1/2,1} - T_{11k-1/2,1}}{\Delta x} + \frac{S_{k,1+1/2} - S_{k,1-1/2}}{\Delta y} + P_{1k,1}^n = \rho h(u_{1k,1}^n)_{\bar{t}t}; \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{S_{k+1/2,1} - S_{k-1/2,1}}{\Delta x} + \frac{T_{22k,l+1/2} - T_{22k,l-1/2}}{\Delta y} + \\ & + \frac{\bar{T}_{23k,l+1/2} + \bar{T}_{23k,l-1/2}}{2R} + P_{2k,1}^n = \rho h(u_{2k,1}^n)_{\bar{t}t}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\bar{T}_{13k+1/2,1} - \bar{T}_{13k-1/2,1}}{\Delta x} + \frac{\bar{T}_{23k,l+1/2} - \bar{T}_{23k,l-1/2}}{\Delta y} - \\ & - \frac{T_{22k,l+1/2} + T_{22k,l-1/2}}{2R} + P_{3k,1}^n = \rho h(u_{3k,1}^n)_{\bar{t}t}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{M_{11k+1/2,1} - M_{11k-1/2,1}}{\Delta x} + \frac{H_{k,1+1/2} - H_{k,1-1/2}}{\Delta y} - \\ & - \frac{T_{13k+1/2,1} + T_{13k-1/2,1}}{2} + m_{1k,1}^n = \rho \frac{h^3}{12} (\Phi_{1k,1}^n)_{\bar{t}t}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{H_{k+1/2,1} - H_{k-1/2,1}}{\Delta x} + \frac{M_{22k,l+1/2} - M_{22k,l-1/2}}{\Delta y} - \\ & + \frac{T_{23k,l+1/2} + T_{23k,l-1/2}}{2} + m_{2k,1}^n = \rho \frac{h^3}{12} (\Phi_{2k,1}^n)_{\bar{t}t}. \end{aligned}$$

Різницеві співвідношення для i-го ребра записуються у вигляді

$$\frac{T_{11ik+1/2}^n - T_{11ik-1/2}^n}{\Delta x} + [S]_i^n = \rho_i F_i \left[(u_{1k,1}^n)_{\bar{t}t} \pm h_{ci} (\varphi_{1k,1}^n)_{\bar{t}t} \right], \quad (3.2)$$

$$\frac{\bar{T}_{12ik+1/2}^n - \bar{T}_{12ik-1/2}^n}{\Delta x} + [T_{22}]_i^n = \rho_i F_i \left[(u_{2k,1}^n)_{\bar{t}t} \pm h_{ci} (\varphi_{2k,1}^n)_{\bar{t}t} \right],$$

$$\frac{\bar{T}_{13ik+1/2}^n - \bar{T}_{13ik-1/2}^n}{\Delta x} + [\bar{T}_{23}]_i^n = \rho_i F_i (u_{3k,1}^n)_{\bar{t}t},$$

$$\begin{aligned} & \frac{M_{11ik+1/2}^n - M_{11ik-1/2}^n}{\Delta x} \pm h_{ci} \frac{T_{11ik+1/2}^n - T_{11ik-1/2}^n}{\Delta x} - \frac{T_{13ik+1/2}^n - T_{13ik-1/2}^n}{\Delta x} + [S]_i^n = \\ & = \rho_i F_i \left[\pm h_{ci} (u_{1k,1}^n)_{\bar{t}t} + \left(h_{ci}^2 + \frac{I_{li}}{F_i} \right) (\varphi_{1k,1}^n)_{\bar{t}t} \right], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{M_{21ik+1/2}^n - M_{21ik-1/2}^n}{\Delta x} \pm h_{ci} \frac{\bar{T}_{12ik+1/2}^n - \bar{T}_{12ik-1/2}^n}{\Delta x} + [M_{22}]_i^n = \\ = \rho_i F_i \left[\pm h_{ci} \left(u_{2k,1}^n \right)_{tt} + \left(h_{ci}^2 + \frac{L_{kri}}{F_i} \right) \left(\phi_{2k,1}^n \right)_{tt} \right]. \end{aligned}$$

Аналогічно будуються різницеві співвідношення для j-го підкріплюючого ребра.

3.2. Чисельний алгоритм зв'язаних задач оболонка – ґрунтове середовище

3.2.1 Одновимірний випадок – рівняння (2.7). Для побудови різницевих рівнянь використовується різницева схема Мак – Кормака.

На кроці предиктор різницеві рівняння мають вигляд

$$\tilde{\rho}_k = \rho_k^n - \frac{\tau}{r_k^m} \left[\frac{(r^m \rho^n V^n)_{k+1} - (r^m \rho^n V^n)_k}{\Delta r} \right], \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} (\tilde{\rho} \tilde{V})_k = (\rho^n V^n)_k - \frac{\tau}{r_k^m} \left\{ \frac{[r^m \rho (V^2 + P)^n]_{k+1} - [r^m (\rho V^2 + P)^n]_k - m P_k^n}{\Delta r} \right\}, \\ F(\tilde{P}_k, \tilde{\rho}_k) = 0. \end{aligned}$$

На кроці коректор рівняння записуються наступним чином

$$\begin{aligned} \rho_k^{n+1} = 0,5 \left\{ \rho_k^n + \tilde{\rho}_k - \frac{\tau}{r_k^m} \left[\frac{(\tilde{\rho} \tilde{V})_k - (\tilde{\rho} \tilde{V})_{k-1}}{\Delta r} \right] \right\}, \\ (\rho V)_k^{n+1} = 0,5 \left\{ (\rho^n V^n)_k + (\tilde{\rho}^n \tilde{V}^n)_k - \frac{\tau}{r_k^m} \times \right. \\ \left. \times \left[\frac{[r^m (\tilde{\rho} \tilde{V}^2 + \tilde{P})^n]_k - [r^m (\tilde{\rho} \tilde{V}^2 + \tilde{P})^n]_{k-1} - m \tilde{P}_k^n}{\Delta r} \right] \right\}, \\ F(P_k^{n+1}, \rho_k^{n+1}) = 0. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Аналогічним чином апроксимуються рівняння коливань оболонок.

Умова різницової стійкості схеми Мак – Кормака має вигляд

$$(|V| + c)\tau / \Delta r < 1,$$

де величина c відповідає локальній швидкості звуку в ґрунтовому середовищі.

3.2.2 Двовимірні задачі (випадок циліндричної симетрії). Розглядаються рівняння руху – (2.11). Різницева схема Мак – Кормака має вигляд

- на кроці предиктор

$$\tilde{\bar{F}}_k = \bar{F}_{k,1}^n - \Delta t \left[\frac{\bar{A}_{k,1} - \bar{A}_{k,1-1}}{\Delta x} + \frac{\bar{B}_{k,1} - \bar{B}_{k,1-1}}{\Delta r} + \bar{C}_{k,1} \right]^n, \quad \Phi(\tilde{P}_k, \tilde{\rho}_k) = 0; \quad (3.5)$$

- на кроці коректор

$$\begin{aligned} \bar{F}_{k,1}^{n+1} &= 0,5 \left\{ \bar{F}_{k,1}^n - \tilde{\bar{F}}_{k,1} - \Delta t \left[\frac{\tilde{A}_{k,1+1} - \tilde{A}_{k,1}}{\Delta x} + \frac{\tilde{B}_{k+1,1} - \tilde{B}_{k,1}}{\Delta r} + \tilde{C}_{k,1} \right] \right\}, \\ \Phi(P_k^{n+1}, \rho_k^{n+1}) &= 0. \end{aligned}$$

Умова стійкості різницевої схеми має вигляд

$$\max((|u|+c)\tau/\Delta x, (|v|+c)\tau/\Delta r) < 1,$$

де c - локальна швидкість розповсюдження звуку в ґрунтовому середовищі.

В четвертому розділі розглянуто розв'язок задач про взаємодію циліндричних та сферичних оболонок (одновимірний випадок) з ґрунтовим середовищем. Виходячи з розв'язку цих задач, отримано коефіцієнти Вінклера для представлених динамічних задач. Розглянуто чисельні розв'язки задач про взаємодію циліндричної оболонки з двошаровим середовищем (одновимірна задача – циліндрична симетрія). Також розглянуто задачу про взаємодію нескінченої циліндричної оболонки з ґрунтовим середовищем періодичної структури (двовимірна задача – циліндрична симетрія).

4.1 Циліндрична оболонка – ґрунтове середовище (рис. 2.1).

Рівняння руху - (2.7), (2.8), $m=1$ (циліндрична симетрія), одношаровий ґрунт. Різницеві співвідношення (3.3), (3.4).

Характеристики ґрунту: 1) повітря – $\rho_1 = 1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$; $c_1 = 330 \text{ м}/\text{с}$; $\gamma_1 = 1,4$;

2) вода – $\rho_2 = 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$; $c_2 = 1500 \text{ м}/\text{с}$; $\gamma_2 = 7$;

3) твердий компонент – $\rho_3 = 2650 \text{ кг}/\text{м}^3$; $c_3 = 4500 \text{ м}/\text{с}$; $\gamma_3 = 4$.

Нестаціонарне навантаження приймається у вигляді

$$P_3(t) = A \sin \frac{\pi t}{T} [\eta(t) - \eta(t-T)], \quad (4.1)$$

де A - амплітуда навантаження, T - тривалість імпульсного навантаження.

На рис. 4.1 наведено залежність величини хвилі тиску P по просторовій координаті r в різні моменти часу. Покладалися наступні величини компонент ґрунту: $\alpha_1 = 0$; $\alpha_2 = 0,4$; $\alpha_3 = 0,6$. Крива 1 відповідає часу $t_1 = 0,35 \cdot 10^{-4} \text{ с}$; крива 2 – $t_2 = 0,125 \cdot 10^{-3} \text{ с}$; крива 3 – $t_3 = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ с}$.

Розглядалася нескінчена циліндрична оболонка на пружній основі Вінклера при дії імпульсного внутрішнього навантаження $P_3(t)$.

Рівняння коливань приймалися у вигляді

$$-\frac{T_{22}}{R} - c_w u_3 + P_3(t) = \rho h \ddot{u}_3, \quad (4.2)$$

де c_w - коефіцієнт Вінклера.

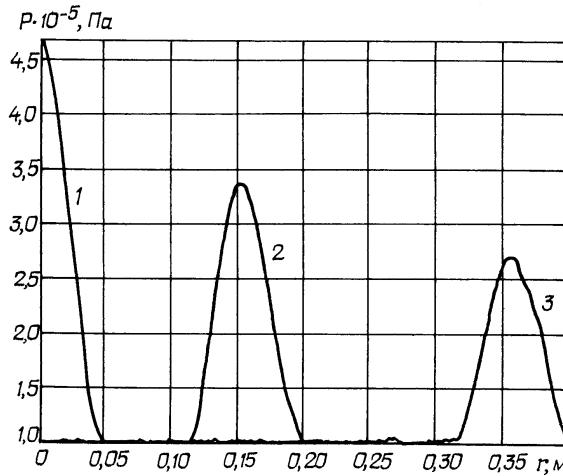


Рис. 4.1 Залежність хвилі тиску Р від просторової координати r

Виходячи з подібності рівнянь (2.8) та (4.2) запропонована формула для визначення коефіцієнту Вінклера c_w

$$c_w = \frac{\max P_0}{u_3(t^*)}, \quad (4.3)$$

де P_0 - тиск на границі контакту оболонка – ґрутове середовище, $u_3(t^*)$ - прогин оболонки в момент досягнення максимального значення тиску P_0 .

В формулі (4.3) коефіцієнт Вінклера визначається ітераційним шляхом, виходячи з максимальної рівності величин u_3 при розв'язку задач (2.8) та (4.2).

Формула (4.3) дає можливість визначення коефіцієнта Вінклера для випадку кожного конкретного варіанту коливань системи оболонка – ґрутове середовище в залежності від геометрії (циліндрична оболонка – ґрутове середовище, сферична оболонка – ґрутове середовище) та фізико – механічних параметрів ґрутового середовища.

4.2 Сферична оболонка – ґрутове середовище. Рівняння руху покладалися згідно формул (2.7), (2.9), $m = 2$ (сферична симетрія). Різницеві співвідношення покладалися згідно формул (3.3), (3.4). Сферична оболонка має наступні параметри: $R = 0,1\text{м}$; $h = 0,01\text{м}$; $E = 210\text{ГПа}$, $\nu = 0,3$; $\rho_{sh} = 7880\text{кг}/\text{м}^3$. Навантаження задавалося у вигляді (4.1). Характеристики компонент ґрунтів наступні:

- 1) повітря – $\rho_1 = 1,2\text{ кг}/\text{м}^3$; $c_1 = 330\text{ м}/\text{с}$; $\gamma_1 = 1,4$;
- 2) вода – $\rho_2 = 10^3\text{ кг}/\text{м}^3$; $c_2 = 1500\text{ м}/\text{с}$; $\gamma_2 = 7$;
- 3) твердий компонент – $\rho_3 = 2650\text{ кг}/\text{м}^3$; $c_3 = 4500\text{ м}/\text{с}$; $\gamma_3 = 4$.

Приведено результати розрахунків для двох варіантів ґрунтів. Варіант 1 – компоненти ґрунту $\alpha_1 = 0$; $\alpha_2 = 0,4$; $\alpha_3 = 0,6$ (рис. 4.2). Крива 1 відповідає часу $t_1 = T$, крива 2 – $t_2 = 3T$, крива 3 – $t_3 = 5T$, крива 4 – $t_4 = 7T$, крива 5 – $t_5 = 9T$. Варіант 2 – компоненти ґрунту $\alpha_1 = 0$; $\alpha_2 = 0,6$; $\alpha_3 = 0,4$ (рис.4.3) в ті ж самі моменти часу. Наведені результати дають можливість проводити порівняльний

аналіз зміни параметрів вихідної системи оболонка – ґрутове середовище в залежності від їх фізико – механічних характеристик по просторовій та часовій координатам.

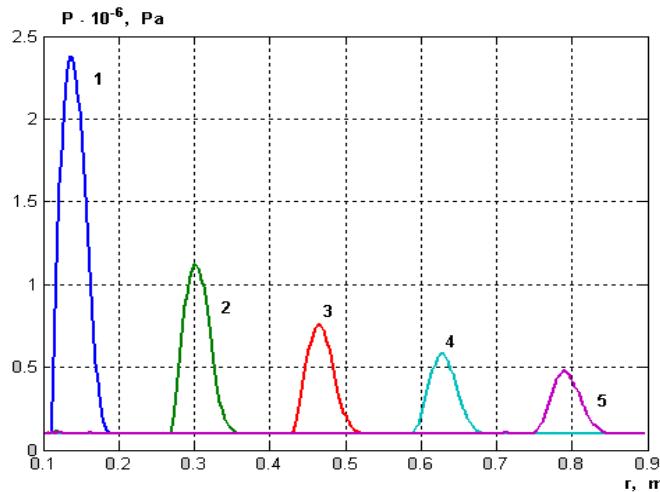


Рис. 4.2 Закономірність проходження хвилі тиску від просторової координати r для варіанту 1

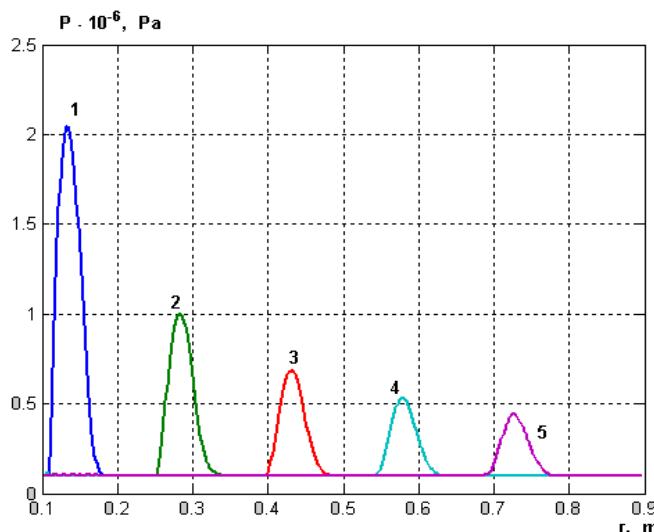


Рис. 4.3 Закономірність проходження хвилі тиску від просторової координати r для варіанту 2

Представлені результати дають можливість проводити порівняльний аналіз зміни параметрів вихідної системи оболонка – ґрутове середовище в залежності від їх фізико – механічних величин по просторовій та часовій координатам.

4.3. Циліндрична оболонка – двошарове ґрутове середовище. Схематичне зображення поставленої задачі приведено на рис. 2.1. Рівняння руху розглядалися згідно формул (2.7), (2.8), $m=1$ (циліндрична симетрія). Різницеві співвідношення – формули (3.3), (3.4). Параметри циліндричної оболонки: $R = 0.1\text{м}$; $E = 210 \text{ ГПа}$; $\nu = 0.3$; $\rho = 7,88 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$. Товщина оболонки h варіювалася. Розглядалося три випадки: 1) $h/R = 0.05$; 2) $h/R = 0.1$; 3) $h/R = 0.15$. Навантаження $P_3(t)$, задавалося у вигляді (4.1) при $A = 10^7 \text{ Па}$; $T = 50 \cdot 10^{-6} \text{ с}$.

Для першого шару ґрунтового середовища покладалося ($r_0 \leq r \leq 5r_0$) $\alpha_1 = 0; \alpha_2 = 0,7; \alpha_3 = 0,3$. Для другого шару ($5r_0 \leq r \leq \infty$) : $\alpha_1 = 0; \alpha_2 = 0,3; \alpha_3 = 0,7$. Для обох випадків: $\rho_2 = 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$, $\rho_3 = 2650 \text{ кг}/\text{м}^3$; $\gamma_2 = 7$; $\gamma_3 = 4$.

На рис. 4.4 приведено залежності хвиль тиску P по просторовій координаті r при входженні хвиль тиску в ґрунтове середовище 1 при $t \approx 0,7T$ для трьох випадків оболонок.

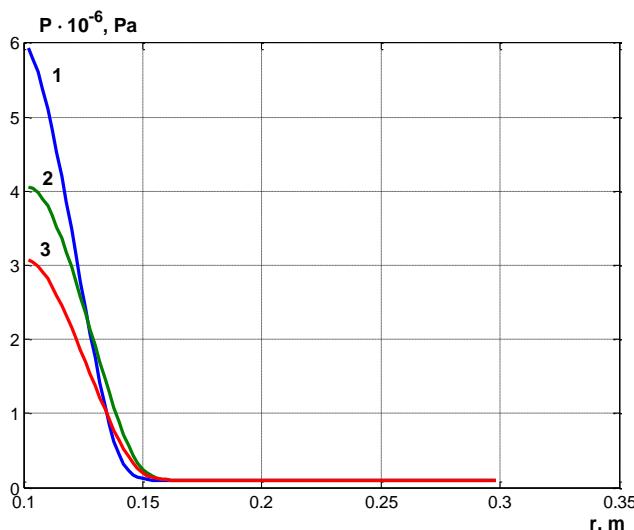


Рис. 4.4 Залежності хвиль тиску P по просторовій координаті r від характеристик оболонок

На рис. 4.4 приведено залежності хвиль тиску P просторовій координаті r при входженні хвиль тиску в ґрунтове середовище 1 при $t \approx 0,7T$ для трьох випадків оболонок (різні товщини).

На рис. 4.5 приведено залежності хвиль тиску P в момент досягнення границі ґрунтових середовищ при $r = 5r_0$, $t = 6,25T$.

При проходженні границі розділу середовищ хвиль тиску P спостерігається процес відбиття хвиль тиску (випадок проходження хвиль тиску з менш щільного середовища в більш щільне).

На рис. 4.6 в правій частині рисунку зображені основна хвиля тиску P для трьох випадків оболонок з різними товщиною. В лівій частині рисунку зображені відбиті хвилі, які рухаються в напрямку циліндричної полости. Представлені залежності відповідають часу $t = 10T$. Також, приведені залежності дозволяють відслідковувати величини амплітуд хвиль тиску в часі та просторі.

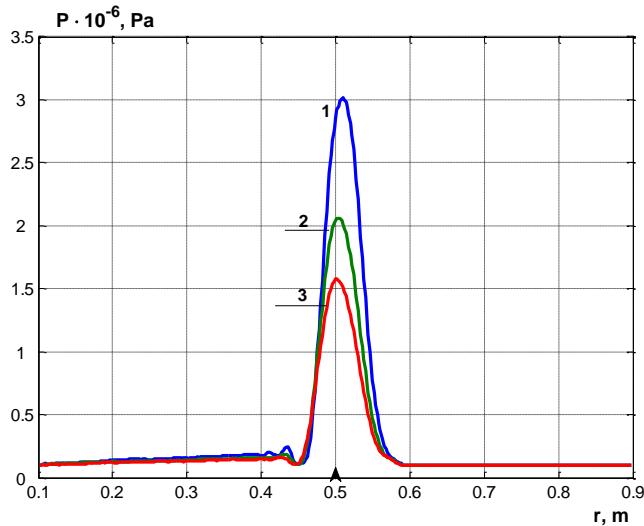


Рис. 4.5 Залежність хвилі тиску P при проходженні границі ґрунтових середовищ

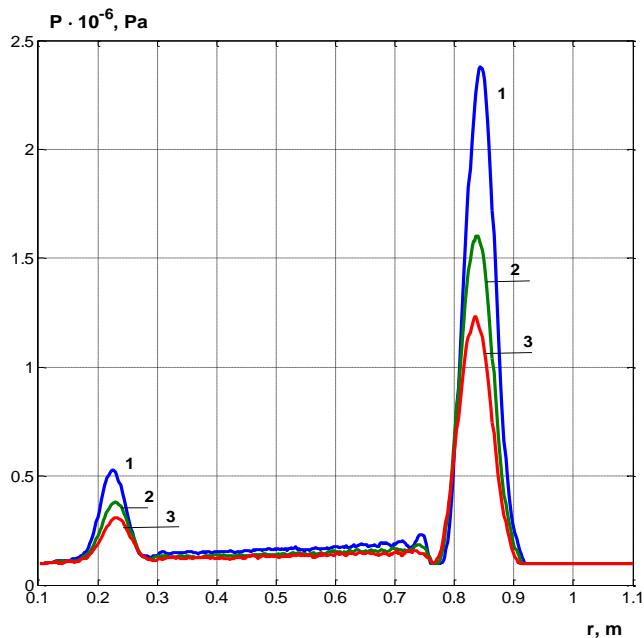


Рис. 4.6 Залежність хвилі тиску P по просторовій координаті r в момент часу $t = 10T$

4.4 Циліндрична оболонка – ґрунтове середовище періодичної структури (двохвимірна задача, циліндрична симетрія). Схематичне зображення постановки задачі приведено на рис. 2.2. Рівняння руху приймаються згідно формул (2.11), (2.12) (циліндрична симетрія). Різницеві співвідношення – (3.5), (3.6). Навантаження приймалося згідно (4.1) при $A = 10^7$ Па; $T = 50 \cdot 10^{-6}$ с. Покладалося $r_0 = 0,1$ м; $L/r_0 = 4$; $r_0/h = 10$.

Було розглянуто два варіанти розрахунків. Перший варіант (рис. 4.7): при $x = 0$ згідно схематичного зображення $\alpha_1 = 0$; $\alpha_2 = 0,3$; $\alpha_3 = 0,7$; $\rho_2 = 10^3$ кг/м³, $\gamma_2 = 7$ (крива з індексом 1); при $x = L$ – $\alpha_1 = 0$; $\alpha_2 = 0,7$; $\alpha_3 = 0,3$; $\rho_3 = 2650$ кг/м³;

$\gamma_3 = 4$ (крива з індексом 2); криві з індексом 3 відповідають випадку $x = L/2$ (границя розділу шарів). Залежності хвиль тиску приведені при $A = 0,75T$; $B = 4T$; $C = 8T$. Згідно другого варіанту розрахунку (рис. 4.8): при $x = 0$: $\alpha_1 = 0$; $\alpha_2 = 0,2$; $\alpha_3 = 0,8$; при $x = L$ - $\alpha_1 = 0$; $\alpha_2 = 0,8$; $\alpha_3 = 0,2$. Часові залежності: $A = 0,75T$; $B = 4T$; $C = 7T$.

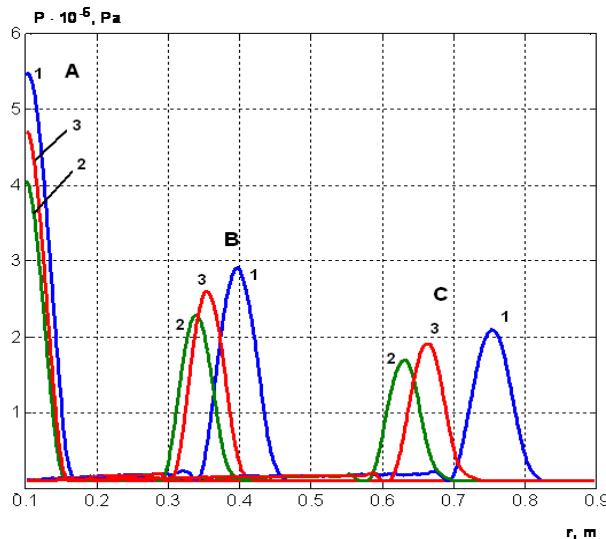


Рис. 4.7 Залежності величин тиску P від координати r (варіант 1)

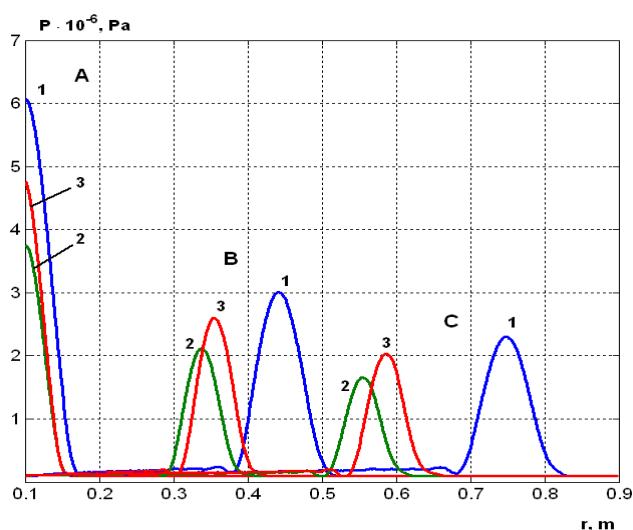


Рис. 4.8 Залежності величин тиску P від координати r (варіант 2)

Наявність підкріплюючої оболонки в циліндричній порожнині вносить свої корективи: падіння амплітуд хвиль тиску у відповідних перерізах шарів в порівнянні з результатами розв'язку зв'язаних задач циліндрична оболонка – грунтове середовище. При цьому, значення амплітуд хвиль тиску явно залежать від параметрів шару ґрунту. Також спостерігається різниця результатів по часовій координаті. Згідно розрахунків варіанту 1 амплітуда хвилі P (крива 1) в перерізі

$r/r_0 = 7,5$ досягається при $t = 8T$, а згідно розрахункам варіанту 2 – при $t = 7T$. Аналогічна картина має місце і для інших варіантів розрахунків.

В п'ятому розділі розв'язано задачі динамічної поведінки неоднорідних оболонок на пружній основі при імпульсних навантаженнях: осесиметричні задачі (неоднорідні тришарові циліндричні оболонки на пружній основі, конічні підкріплени оболонки на пружній основі); неосесиметричні задачі (поздовжньо – поперечно дискретно підкріплени циліндричні оболонки на пружній основі).

5.1. Підкріплена конічна оболонка на пружній основі (осесиметричний випадок). Рівняння руху покладалися згідно (2.2), (2.3). Параметри оболонки: $A_1 = 1$, $A_2 = R_s$, $k_1 = 0$, $k_2 = \cos\beta/R_s$, де β – кут конусності, s – текуча координата, $R_s = R_0 + s \cdot \sin\beta$.

Різницеві співвідношення - (3.1), (3.2). Краї оболонки жорстко защемлені в перерізах $s = s_0$ та $s = s_N$. Границі умови $u_1 = u_3 = \varphi_1 = 0$. Початкові умови нульові. Навантаження покладалося згідно формули:

$$P_3(\alpha_1, t) = A[\eta(t) - \eta(t - T)].$$

Геометричні та фізико – механічні параметри наступні: $s_0 = 0$, $s_N = 0.4$ м; $R_0/h = 60$; $E = 7 \cdot 10^{10}$ Па; $\rho = 2,7 \cdot 10^3$ кг/м³; $\nu = 0,3$; $A = 10^6$ Па; $T = 50 \cdot 10^{-6}$ с. Коефіцієнт постелі: $C_1 = 0,25 \cdot 10^8$ Н/м³. Ребра знаходяться в перерізах $s_j = 0,1Lj$, $j \in \overline{1,3}$; $L = s_N - s_0$. Часовий розрахунковий інтервал: $t = 40T$.

На рис. 5.1 та рис. 5.2 приведено залежності величин u_3 та σ_{22} по просторовій координаті s в момент часу $t = 4T$. Криві з індексом 1 відповідають випадку $\beta = \pi/6$, з індексом 2 - $\beta = \pi/12$.

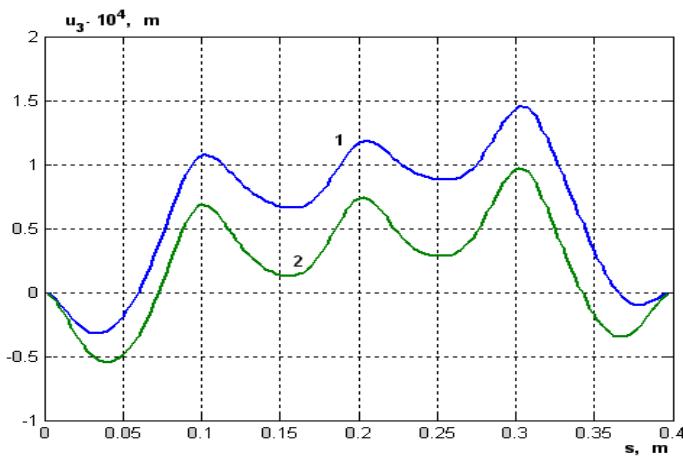


Рис. 5.1 Залежність величини u_3 від просторової координати s

На рис. 5.1 та рис. 5.2 наочно видно якісний та кількісний вплив дискретних ребер на напруженого деформованого стану конструкції, яка розглядається.

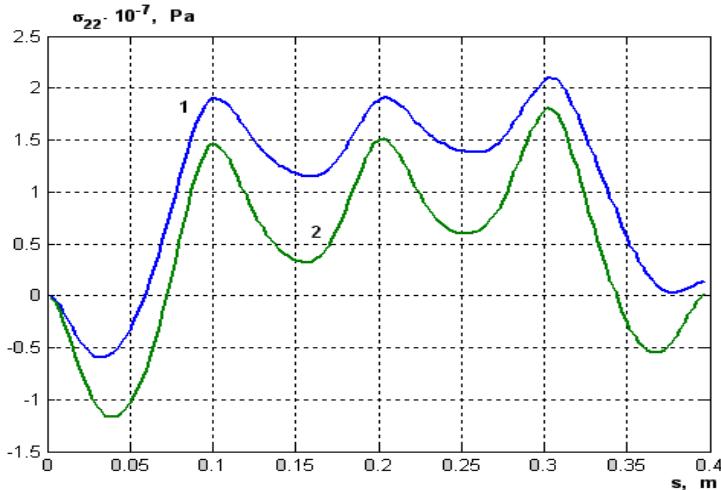


Рис. 5.2 Залежність величини σ_{22} від просторової координати s

5.2. Нестаціонарна деформація повздовжньо - поперечно підкріплених циліндричних оболонок на пружній основі (неосесиметрична задача). Постановка задачі проводиться згідно рівнянь (2.2), (2.3). Різницеві співвідношення - (3.1), (3.2). Краї оболонки при $x = 0$, $x = L$ жорстко защемлені. Поперечні ребра знаходяться в перерізах: $x_i = 0,25Li$, ($i = \overline{1, 3}$). Повздовжні ребра - в перерізах: $y_j = \pi R(j-1)/2$, ($j = \overline{1, 4}$). Навантаження покладалося згідно формул:

$$P_3(s_1, s_2, t) = A \cdot [\eta(t) - \eta(t-T)],$$

де $E_1/A = 7 \cdot 10^4$; $T = 2,5R/c$; $c = \{E_1/[\rho(1-\nu_1\nu_2)]\}^{1/2}$. Геометричні та фізико – механічні параметри конструкції наступні: $E_1 = E_2 = 7 \cdot 10^{10}$ Па; $\nu_1 = \nu_2 = 0,3$; $R/h = 10$ м; $L/R = 4$ м. Для підкріплюючих ребер: $E_i = E_j = E$; $F_i = F_j = a_j h_j$; $a_i = a_j = h$; $h_i = h_j = 2h$.

Задача розглядалася для трьох випадків коефіцієнта Вінклера: 1) $C_1 = 1 \cdot 10^9$ Н/м³; 2) $C_1 = 2 \cdot 10^9$ Н/м³; 3) $C_1 = 3 \cdot 10^9$ Н/м³. Розрахунки проводилися на часовому інтервалі $0 < t \leq 40T$.

На рис. 5.3 приведено залежності величин u_3 по просторовій координаті x в перерізі $y=0$ в момент часу $t = 8,5T$ (час досягнення максимального значення величини u_3 при $C_1 = 1 \cdot 10^9$ Н/м³).

На рис. 5.4, рис. 5.5 наведено залежності величин σ_{22} , ε_{22} по просторовій координаті x для наступних випадків коефіцієнта Вінклера: 1) $C_1 = 0$; 2) $C_1 = 1 \cdot 10^9$ Н/м³; 3) $C_1 = 2 \cdot 10^9$ Н/м³; 4) $C_1 = 3 \cdot 10^9$ Н/м³. Результати розрахунків для σ_{22} (рис. 5.4) приведено в перерізі $y=0$ (на лінії поперечного перерізу центра ваги повздовжнього ребра).

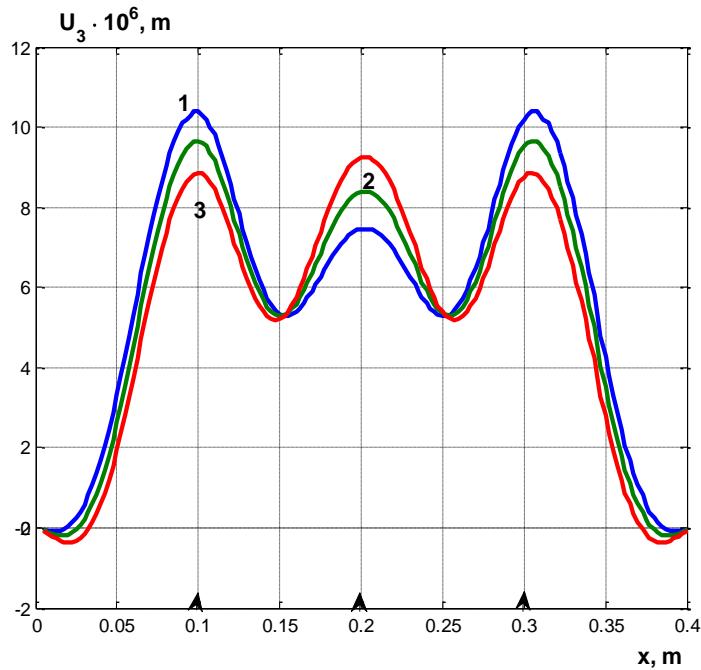


Рис. 5.3 Залежність величин u_3 по просторовій координаті x

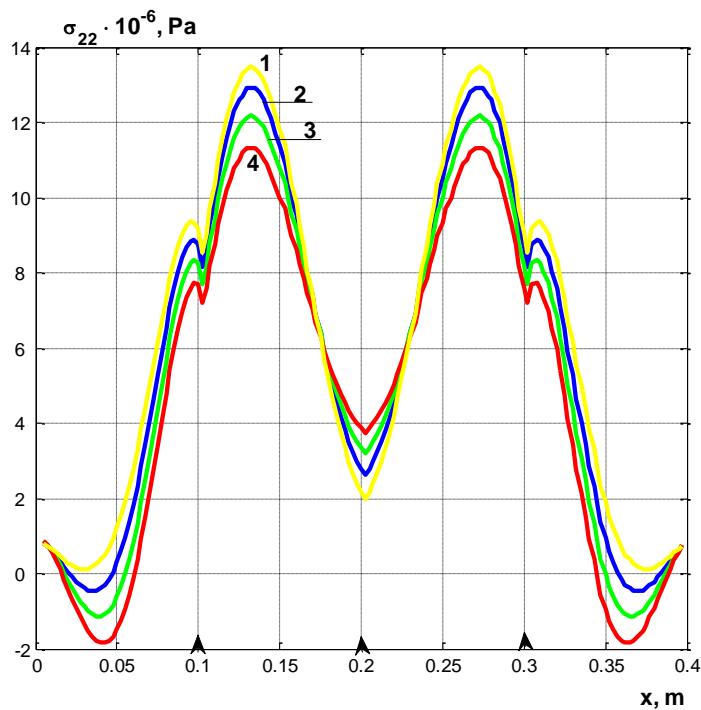


Рис. 5.4 Залежність величин σ_{22} по просторовій координаті x

Розрахунки для величин ε_{22} по просторовій координаті x приведено в перерізі $y = \pi R / 4$ (просторова лінія x між ребрами - рис. 5.5). Для величин ε_{22} та σ_{22} чітко проявляються просторові розриви в перерізах, де знаходяться ребра. Представлені залежності величин u_3 , ε_{22} та σ_{22} дають можливість провести оцінку впливу коефіцієнта Вінклера на напруженого деформований стан циліндричної підкріпленої оболонки.

Вплив ребер по просторовій координаті x , виходячи із представлених графіків, визначається візуально. Для величин деформацій ε_{22} та напружень σ_{22} спостерігаються просторові розриви по лініях розташування поперечних ребер. В перерізах між ребрами ці залежності мають більш виражений характер. Врахування пружної основи при приведених значеннях коефіцієнтів C_1 приводить до змін напружено – деформованого стану неоднорідної оболонки по відношенню до величин без пружної основи (максимальні відмінності по величинам деформацій ε_{22} складають 14 - 16%, а по величинам напружень σ_{22} - 25%).

Представлений графічний матеріал дозволяє детально аналізувати напружено – деформований стан неоднорідної пружної структури в залежності від її фізико – механічних та геометричних параметрів та параметрів пружної основи.

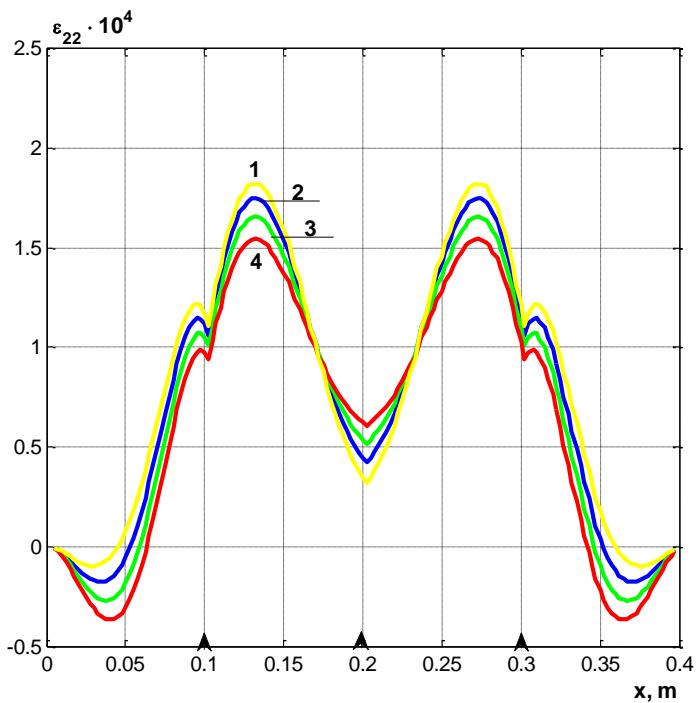


Рис. 5.5 Залежність величин ε_{22} по просторовій координаті x

В шостому розділі розглядаються чисельні розв'язки задач про напружено деформований стан циліндричних оболонок еліптичного перерізу на пружній основі. Також, розглянуто задачі про динамічну поведінку поперечно підкріплених циліндричних оболонок еліптичного перерізу на пружній основі при дії внутрішнього імпульсного навантаження.

6.1. Коливання циліндричних оболонок еліптичного перерізу на пружній основі при імпульсних навантаженнях. Розглядалася циліндрична оболонка еліптичного перерізу на пружній основі. Коефіцієнти першої квадратичної форми та кривизни оболонки покладалися згідно формул

$$A_1 = 1, \quad k_1 = 0; \quad (6.1)$$

$$A_2 = (a^2 \cos^2 \alpha_2 + b^2 \sin^2 \alpha_2)^{1/2};$$

$$k_2 = ab(a^2 \cos^2 \alpha_2 + b^2 \sin^2 \alpha_2)^{-3/2};$$

Постановка задачі приймалася згідно рівнянь (2.2). Різницеві співвідношення – рівняння (3.1). Навантаження: $P_3(s_1, s_2, t) = A[\eta(t) - \eta(t-T)]$. Геометричні та фізико-механічні параметри оболонки наступні $E_1 = E_2 = 7 \cdot 10^{10}$ Па; $\nu_1 = \nu_2 = 0,3$; $h = 10^{-2}$ м; $L = 0,4$ м. Параметри еліптичності: 1) $a = b = 0,1$; 2) $a = 1,2b$. Розрахунки проводилися в області $D = \left\{ 0 \leq s_1 \leq L, 0 \leq s_2 \leq A_2 \frac{\pi}{8} \right\}$, на часовому інтервалі $0 \leq t \leq 80T$.

На рис. 6.1 при $a/b=1$ приведено залежності величини u_3 по просторовій координаті s_1 при різних значеннях коефіцієнту Вінклера. Криві з індексом 1 відповідають значенню коефіцієнта Вінклера $C_1 = 10^9$ Н/м³, з індексом 2 значенню $-C_1 = 2 \cdot 10^9$ Н/м³, з індексом 3 при $C_1 = 3 \cdot 10^9$ Н/м³ (криві 1 – 3 відповідають часу $t = 11,25T$ – час досягнення максимального значення прогину при $C_1 = 10^9$ Н/м³).

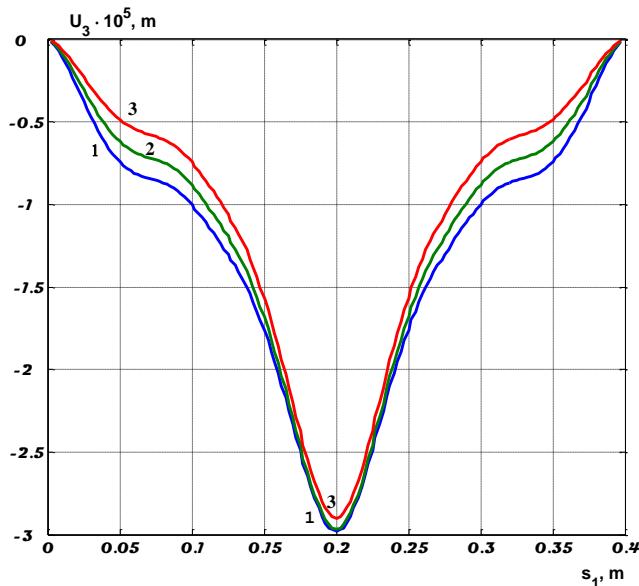


Рис. 6.1 Залежність величини u_3 від просторової координати s_1 при $a/b = 1$

На рис. 6.2 приведено залежності величини u_3 по просторовій координаті s_1 при різних значеннях коефіцієнту Вінклера при $a/b = 1,2$. Позначення кривих аналогічні позначенням попередньої задачі.

Виходячи з результатів розрахунків можна зробити висновок, що параметри еліптичності поперечного перерізу оболонки значно впливають на напружене деформований стан оболонок. Зокрема, максимальне значення величини u_3 при $a/b = 1$ та $a/b = 1,2$ відрізняється за абсолютною величиною на $\approx 45\%$.

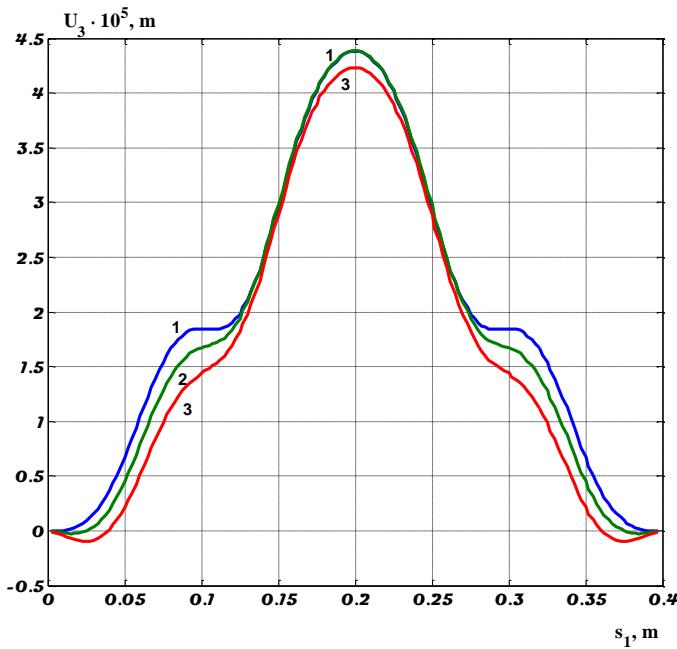


Рис. 6.2 Залежність величини u_3 від просторової координати s_1
при $a/b = 1,2$

6.2. Нестаціонарні коливання поперечно підкріплених циліндричних оболонок еліптичного перерізу на пружній основі. Розглядаються рівняння коливань поперечно підкріплених циліндричних оболонок еліптичного перерізу на пружній основі - рівняння (2.2), (2.3), (6.1). Різницеві співвідношення рівняння (3.1), (3.2).

Розглядалися задачі при наступних параметрах еліптичності поперечного перерізу: 1) $a = b = 0,1$; 2) $a = 1,2b$. Розрахунки проводилися в області $D = \left\{ 0 \leq s_1 \leq L, 0 \leq s_2 \leq A_2 \frac{\pi}{8} \right\}$. Покладалося, що край панелі жорстко защемлені.

Задача розглядалася на часовому інтервалі $0 \leq t \leq 80T$. Поперечні ребра розташовані в перерізах: $s_{1j} = 0,25jL$; $j = \overline{1, 3}$. Задача розглядалася для трьох випадків значень коефіцієнту Вінклера: 1) $C_1 = 10^9 \text{ H/m}^3$, 2) $C_1 = 2 \cdot 10^9 \text{ H/m}^3$, 3) $C_1 = 3 \cdot 10^9 \text{ H/m}^3$.

На рис. 6.3 та рис. 6.4 представлена результати чисельних розрахунків для величин u_3 для випадку $C_1 = 10^9 \text{ H/m}^3$. Криві з індексом 1 відповідають випадку $a/b = 1$, а з індексом 2 - $a/b = 1,2$.

На рис. 6.3 приведені залежності величин u_3 від часової координати t в точці $s_1 = 0,375L$; $s_2 = 0$ (середина відстані між першим та другим ребром в перерізі $s_2 = 0$). Як бачимо, наявність еліптичності поперечного перерізу оболонки приводить до значної відмінності як по амплітуді значень, так і по частотним характеристикам в порівнянні з оболонкою кругового перерізу.

На рис. 6.4 приведено залежності величини u_3 по просторовій координаті s_1 в перерізі $s_2 = 0$ для випадку $t = 3,5T$ (час досягнення максимального значення

величини u_3 для випадку $a/b=1$ на досліджуваному інтервалі часу). Значна відмінність величин u_3 для двох випадків розрахунків аналізується, виходячи із залежностей, представлених на рис. 6.3. Розрахунки для випадків пружної основи $C_1 = 2 \cdot 10^9 \text{ H/m}^3$ та $C_1 = 3 \cdot 10^9 \text{ H/m}^3$ мають аналогічний якісний та кількісний характер.

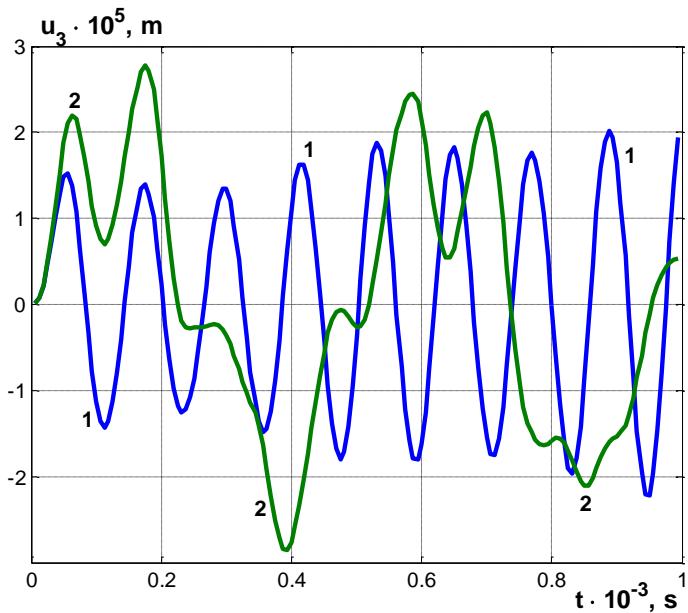


Рис. 6.3 Залежність величин u_3 від часової координати t

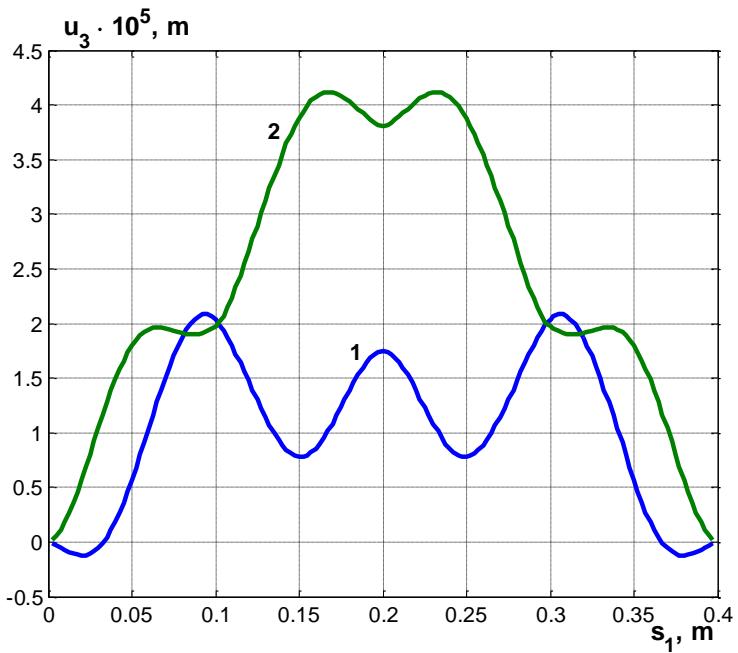


Рис. 6.4 Залежність величини u_3 по просторовій координаті s_1

ВИСНОВКИ

В роботі створена нова науково – обґрунтована загальна методика математичного дослідження напружено деформованого стану неоднорідних елементів конструкцій на основі пружних середовищ Вінклера та Пастернака при зовнішніх та внутрішніх динамічних навантаженнях, розв'язані зв'язні задачі теорії оболонка – ґрутове середовище в рамках механіки суцільних середовищ, приведені нові теоретичні результати, включаючи:

- механіко – математичні моделі коливань неоднорідних елементів конструкцій (підкріплени циліндричні, сферичні та конічні оболонки, тришарові оболонки обертання згідно теорії незалежних апроксимацій до кожного шару) в пружному середовищі, які включають виведення рівнянь коливань виходячи з варіаційного принципу Гамільтона – Остроградського та Рейсснера в зусиллях та переміщеннях; формуллювання відповідних природних граничних та початкових умов з врахуванням пружних середовищ Вінклера та Пастернака;
- формуллювання зв'язаних задач теорії оболонка – ґрутове середовище циліндричної та сферичної симетрії в рамках моделей механіки суцільних середовищ; рівняння стану ґрутового середовища приймаються в рамках моделі нелінійного водонасиченого трикомпонентного ґрунта; для опису рівнянь руху ґрутового середовища приймаються рівняння Ейлера;
- чисельний розв'язок зв'язаних задач теорії оболонка – ґрутове середовище для циліндричної та сферичної симетрії в рамках моделей механіки суцільних середовищ, зокрема циліндрична оболонка – ґрутове середовище періодичної структури базується на використанні скінченно – різницевих схем Мак – Кормака; даний підхід дає ефективні розв'язки при проходженні хвиль через середовище з різними фізико – механічними параметрами; на основі отриманих розрахунків запропонована формула для отримання коефіцієнта Вінклера в залежності від геометричних параметрів оболонки та фізико – механічних параметрів ґрутового середовища при відповідних динамічних навантаженнях;
- чисельний розв'язок задач про вимушені коливання неоднорідних елементів конструкцій (гладких та підкріплених циліндричних, сферичних та конічних оболонок) в пружному середовищі Вінклера та Пастернака при імпульсних навантаженнях, включаючи, розв'язки неосесиметричних задач дискретно підкріплених циліндричних оболонок з повздовжньо - поперечним підкріпленням та поперечно підкріплених циліндричних оболонок еліптичного перерізу з використанням коефіцієнтів Вінклера, які отримані при розв'язку зв'язаних задач;
- чисельний параметричний аналіз вимушених коливань та напружено деформований стан неоднорідних елементів конструкцій в залежності від їх геометричних та фізико – механічних параметрів та параметрів пружного середовища; чисельний аналіз впливу пружно – нелінійного ґрутового середовища на напружено деформований стан циліндричних та сферичних оболонок при нестационарних навантаженнях.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Мейш В.Ф. Сравнительный анализ динамического поведения трехслойных оболочек в рамках прикладных теорий при нестационарных нагрузлениях / В.Ф. Мейш, Ю.А. Хамренко // Прикладная механика, 39, №7, 2003. - С.123–130.
2. Луговой П.З. Нестационарное деформирование продольно – поперечно подкрепленных цилиндрических оболочек на упругом основании / П.З. Луговой, Ю.А. Мейш // Прикладная механика. – 2016. – 52, № 1. – С. 95 – 107.
3. Мейш В.Ф. Постановка и численный алгоритм решения задач вынужденных колебаний теории трехслойных цилиндрических оболочек с кусочно-однородным заполнителем / В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Математичні проблеми технічної механіки. - Дніпропетровськ, 2003, № 2 (25). - С. 21-26.
4. Хамренко Ю.А. Численное моделирование процессов расслоения в двухслойных цилиндрических оболочках при нестационарных нагрузления / Ю.А. Хамренко, В.Ф. Мейш // Збірник наукових праць: Системні методи керування, технологія та організація виробництва, ремонту і експлуатації автомобілів. – Київ: НТУ, 2002. – Вип. №14. - С.185 – 188.
5. Мейш В.Ф. Чисельний розв'язок задач вимушених коливань тришарових циліндрических оболонок з кусково – однорідним заповнювачем / В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш // Вісник Національного транспортного університету. – Київ: НТУ, 2003, № 8. – С. 432–437.
6. Мейш Ю.А. До розрахунку вимушених осесиметричних коливань тришарових конічних оболонок при дії нестационарного навантаження / Ю.А. Мейш // Системні технології. Математичні проблеми технічної механіки. – Дніпропетровськ, 2004, №3 (32). – С. 154 – 160.
7. Мейш В.Ф. Динамическое поведение трехслойных балок в рамках прикладных теорий при нестационарных нагрузлениях / В.Ф. Мейш В.Ф., Ю.А. Мейш, Э.А. Штанцель // Системні технології. Математичні проблеми технічної механіки. – Дніпропетровськ, 2007, №4 (51). – С. 27 – 34.
8. Луговий П.З. Хвильові процеси в системі сферична оболонка – ґрунтове середовище при імпульсному навантаженні / П.З. Луговий, Ю.А. Мейш // Вісник Національного транспортного університету. – Київ: НТУ, 2008, № 13. – С. 332–337.
9. Мейш В.Ф. До розрахунку нестационарних коливань тришарових пологих циліндрических оболонок з дискретним ребристим наповнювачем / В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш Ю.А., Д.А. Таєвере // Вісник Національного транспортного ун – ту. Ч. 2. – Київ: НТУ, 2008. – Вип. 17. – С. 409 – 414.
10. Луговой П.З. О решении осесимметричных задач динамики подкрепленных конических оболочек на упругом основании / П.З. Луговой, В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій / Дніпропетровський Національний ун–т. – 2009. - Вип. 13. – С. 142 – 148.
11. Луговий П.З. Динамічна поведінка циліндрических та сферичних оболонок в ґрунтовому середовищі при імпульсному навантаженні / П.З. Луговий, В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш // Вісник Національного транспортного університету № 19, Ч. 2. - Київ: НТУ, 2009. – С. 249 - 254.

12. Луговий П.З. До розв'язку динамічних задач теорії оболонок в ґрунтовому середовищі при імпульсних навантаженнях / П.З. Луговий, В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш // Проблеми обчислювальної механіки та міцності конструкцій. Дніпропетровський національний університет, 2010. – Вип.14. – С.230 – 238.
13. Мейш В.Ф. Динамічна поведінка двошарових циліндрических оболонок в ґрунтовому середовищі при нестационарних навантаженнях / В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій. - Збірник наукових праць. Дніпропетровський національний університет.– Дніпропетровськ. Ліра, 2011. – Вип. 17. – С. 195 – 201.
14. Луговой П.З. Вынужденные колебания пятислойных цилиндрических оболочек с продольно – поперечным дискретным подкреплением при распределенном нагружении / П.З. Луговой, В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш, Г.М. Заболотний // Методы розв'язування прикладних задач механіки деформівного твердого тіла. - Збірник наукових праць. – ДНУ, Дніпропетровськ, 2011. - № 12. – С. 203 – 209.
15. Мейш В.Ф. К решению задач о взаимодействии цилиндрической оболочки с грунтовой трехкомпонентной нелинейной средой периодической структуры при нестационарной нагрузке / В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій. Дніпропетровський національний університет, 2012. – Вип.20. – С. 238 - 244.
16. Мейш В.Ф. Динамическое поведение продольно подкрепленных цилиндрических оболочек с эллиптическим поперечным сечением при нестационарных загрузках / В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш, Н.П. Кепенач // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій. Дніпропетровський національний університет, 2012. – Вип.20. – С. 245 - 252.
17. Луговий П.З. До розв'язку динамічних задач теорії товстостінних пластин в рамках прикладних теорій / П.З. Луговий, В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш // Вісник Національного транспортного університету № 24, ч. 2.- К.: НТУ, 2011. - С. 316 - 320.
18. Мейш В.Ф. Математическое моделирование волновых процессов в системе цилиндрическая оболочка – двухслойная грунтовая середа / В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво». Збірник наукових праць. – К.: НТУУ «КПІ». – 2012. – Вип. 22. – С. 3 – 8.
19. Мейш Ю.А. Динамическое поведение дискретно подкрепленных цилиндрических оболочек на упругом основании при нестационарной нагрузке / Ю.А. Мейш // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету: тематичний випуск «Математичні проблеми технічної механіки» / Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2013. – Випуск 2(22). – с. 105 – 110.
20. Мейш Ю.А. Коливання циліндрических дискретно підкріплених оболонок на пружній основі при нестационарних навантаженнях / Ю.А. Мейш // Вісник Національного транспортного університету: Ч. 2. – К.: НТУ, 2012. – Вип. 26. - С. 578 - 583.
21. Мейш В.Ф. Чисельне моделювання динамічної поведінки конічної оболонки змінної товщини при дії розподіленого імпульсного навантаження / В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш, В.М. Мельник // Проблеми обчислювальної механіки і міцності

- конструкцій: зб. наук. праць. – Дніпропетровськ: Ліра, 2014. – Вип. 22. – С. 169 – 181.
22. Мейш Ю.А. Задачі про вимушенні коливання циліндричних оболонок еліптичного перерізу на пружній основі при нестационарних навантаженнях / Ю.А. Мейш // Вісник Національного транспортного університету. – К.: НТУ, 2014. – Випуск 29. – С. 233 – 239.
 23. Мейш В.Ф. Решение задач динамического поведения цилиндрических оболочек эллиптического сечения при нестационарных загрузках / В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш, Н.П. Кепенач // Теоретическая и прикл. механика. – 2014, вып.8(54). – С. 98-105
 24. Луговой П.З. Решение задач динамического поведения подкрепленных цилиндрических оболочек (конструктивно–ортотропная модель) при нестационарных нагрузках / П.З. Луговой, В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій. Збірник наукових праць. – Дніпропетровськ: Ліра, 2014. – Вип. 23. – С.95- 105.
 25. Луговой П.З. Численное решение задач о динамическом взаимодействии неоднородных цилиндрических оболочек с упругой грунтовой средой / П.З. Луговой, В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій. Збірник наукових праць. – Дніпропетровськ: Ліра, 2014. – Вип. 23. – С.106- 116.
 26. Луговой П.З. Динамічна взаємодія конструктивно ортотропних циліндрических оболонок з пружною основою / П.З. Луговой, В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш // Збірник наук. праць ДДТУ, 1(24). – 2014. (доповнення). – С. 8 – 14.
 27. Мейш Ю.А. Вимушенні коливання поперечно підкріплених циліндрических оболонок еліптичного перерізу на пружній основі при нестационарних навантаженнях / Ю.А. Мейш // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково – технічний збірник. Вип. 1 (34), 2016.— К. : НТУ, 2016. — С. 267 – 274.
 28. Хамренко Ю.А. К исследованию колебательных процессов в трехслойных эллипсоидальных оболочках при нестационарных нагружениях / Ю.А. Хамренко // III Міжнародна науково – практична конференція “Людина і космос”. (18 – 20 квітня 2001 р.) Збірник тез. Дніпропетровськ. НЦАОМУ. – 2001. – С. 105.
 29. Хамренко Ю.А. Дослідження впливу геометрично нелінійних факторів на напружене –деформований стан тришарових оболонок обертання / Ю.А. Хамренко // IV Міжнародна науково – практична конференція “Людина і космос”. (18 – 20 квітня 2001 р.) Збірник тез. Дніпропетровськ. НЦАОМУ. – 2002. – С. 141.
 30. Хамренко Ю.А. Математическое моделирование процессов расслоения в трехслойных цилиндрических оболочках при краевых импульсных нагружениях / Ю.А. Хамренко // Друга всеукраїнська наукова конференція, 2002. Математичні проблеми технічної механіки. (Тези доповідей). – Дніпродзержинськ, 2002. – С. 116.
 31. Мейш В. Проведення порівняльного аналізу динамічної поведінки неоднорідних тришарових оболонок обертання в рамках прикладних теорій при вимушених навантаженнях / В. Мейш, Ю. Хамренко // Матеріали IX Міжнародної наукової конференції ім. академіка М. Кравчука. – 15 –17 травня 2002р., Київ., 2002. – С. 235.
 32. Мейш В.Ф., Хамренко Ю.А. О некоторых подходах конечно – разностной аппроксимации уравнений колебаний теории оболочек и пластин типа Тимошенко //

- Обчислювальна та прикладна математика. Збірка тез міжнародної конференції 09. – 10.09.2002, Київ. – К.: Київський національний ун-т, 2002. – С.68.
33. Мейш В.Ф. Численное моделирование динамического поведения трехслойных цилиндрических оболочек с кусочно- однородным наполнителем при нестационарных нагрузлениях / В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш // Третя Всеукраїнська наукова конференція. Математичні проблеми технічної механіки.- Дніпродзержинськ, 2003. - С.123.
 34. Мейш В.Ф. Вимушені коливання тришарових циліндрических оболонок з Кусково-однорідним наповнювачем при нестационарних навантаженнях / В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш // International Conferens: Dynamical system modelling and stability investigation. Modelling and stability thesis of conference reports// Kyiv, 2003. – С. 335.
 35. Мейш Ю.А. Динамічна поведінка тришарових конічних оболонок при розподіленому нестационарному навантаженні / Ю.А. Мейш // Четверта всеукраїнська наукова конференція, 2004. Математичні проблеми технічної механіки. (Матеріали конференції). – Дніпродзержинськ, 2004. – С. 100.
 36. Конышев В.С. Численное моделирование динамического поведения трехслойных круговых пластин при нестационарных загрузках / В.С. Конышев, Ю.А. Мейш // Журнал обчислювальної та прикладної математики. – 2004, № 2 (91). – С. 101–102.
 37. Мейш Ю.А. Динамічна поведінка циліндрических оболонок еліптичного зрізу при розподіленому нестационарному навантаженні / Ю.А. Мейш // Міжнародна наукова конференція, 2005р. Математичні проблеми технічної механіки. (Матеріали конференції). – Дніпродзержинськ, 2005. – С. 66.
 38. Мейш Ю.А. К расчету динамического поведения цилиндрических оболочек эллиптического сечения при продольном краевом нагружении / Ю.А. Мейш, Э.А. Штанцель // Міжнародна наукова конференція, 2006р. Математичні проблеми технічної механіки. (Матеріали конференції). – Дніпропетровськ – Дніпродзержинськ, 2006. – С. 12.
 39. Мейш Ю.А. Влияние геометрической нелинейности на напряженно – деформированное состояние трехслойных оюолочек при нестационарном нагружении / Ю.А. Мейш, Э.А. Штанцель // Восьмая Крымская Международная Математическая школа МФЛ – 2006, Крым, Алушта, 2006. – Симферополь: Таврический национальный ун – н, 2006. – С. 116.
 40. Дубовик Л.С., Мейш Ю.А. Изгиб трехслойных пластин под действием распределенной импульсной нагрузки / Л.С. Дубовик, Ю.А. Мейш // Міжнародна наукова конференція, 2007р. Математичні проблеми технічної механіки. (Матеріали конференції). – Дніпродзержинськ, 2007. – С. 62.
 41. Мейш Ю.А. Динамическое поведение трехслойных балок при нестационарных загрузках / Ю.А. Мейш, Э.А. Штанцель // Міжнародна наукова конференція, 2007р. Математичні проблеми технічної механіки. (Матеріали конференції). – Дніпродзержинськ, 2007. – С. 160 – 161.
 42. Луговой П.З. Взаимодействие цилиндрических волн в грунтовой среде с деформируемыми преградами цилиндрической формы / П.З. Луговой, Ю.А. Мейш // IX Крымская Международная математическая школа “ Метод функций Ляпунова и

- его приложения»: Тез. докл.; Алушта, 2008г. / Тавріческий нац. ун-т. – Симферополь, 2008. – С. 99.
43. Мейш Ю.А. Вынужденные колебания трехслойных круговых пластин при нестационарных нагрузках / Ю.А. Мейш // Міжнародна наукова конференція: математичні проблеми технічної механіки. – 2009, 20 – 23 квітня 2009р. – Дніпродзержинськ – Дніпропетровськ, 2009. – С. 37.
 44. Мейш Ю.А. Нелинейные волновые процессы в системе цилиндрическая оболочка – водонасыщенный грунт при нестационарных нагрузках / Ю.А. Мейш // Тезисы докладов конференции молодых ученых «Механика деформируемого твердого тела – 2008», посвященной 90-й годовщине НАН Украины и Института механики им. С.П. Тимошенко НАН Украины / Прикладная механика. – 2009. – 45, № 3. – С. 133.
 45. Луговой П.З. Вынужденные колебания подкрепленных конических оболочек на упругом основании при импульсных загрузках / П.З. Луговой, Ю.А. Мейш // Сучасні проблеми природничих наук та підготовки фахівців у цій галузі. Тези доповідей XII Всеукраїнської наук.-метод. конф. – 2009р., 17 – 19 вересня. – Миколаїв, 2009р. – С. 33.
 46. Луговой П.З. Задача взаємодії сферичної оболонки з ґрутовим середовищем при імпульсному навантаженні / П.З. Луговой, В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш // X Крымская международная школа «Метод функций Ляпунова и его приложений» (MFL – 2010), Крым, Алушта, 13-18 сентября, 2010. – С. 81.
 47. Луговой П.З. Нестационарные осесимметричные колебания подкрепленных конических оболочек на упругом основании / П.З. Луговой, В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш // Материалы XVII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций» им. А. Г. Горшкова. Т. 1. – Москва, 2011. – С. 134 – 136.
 48. Мейш В.Ф. До розв'язку задач двошарових циліндрических оболонок в ґрутовому середовищі при нестационарних навантаженнях / В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш // Математичні проблеми технічної механіки. Міжнародна наукова конференція. Т. 1. – Дніпропетровськ-Дніпродзержинськ. 13-15 квітня 2011р. – С. 174.
 49. Мейш В.Ф. Численное моделирование динамического поведения подкрепленных конических оболочек при нестационарном воздействии / В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш // Матеріали міжнародної конференції «Актуальные проблемы инженерной механики», Миколаїв, 24 – 26 жовтня 2011р. – Миколаїв, Національний ун – т кораблебудування., 2011. - С. 56-57.
 50. Мейш В.Ф. Численное моделирование динамического поведения подкрепленных конических оболочек при нестационарном воздействии / В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш // Актуальні проблеми інженерної механіки. Міжн. наук.-техн. конференція. – Миколаїв (24 – 26 жовтня 2011 р.), Національний університет кораблебудування. – С. 20 - 21.
 51. Мейш В.Ф. Задача о взаимодействии цилиндрической оболочки с грунтовой средой периодической структуры при нестационарных загрузках / В.Ф. Мейш, П.З. Луговой, Ю.А. Мейш // Математичні проблеми технічної механіки. Міжнародна

- наукова конференція. Матеріали конференції (Том 1) – Дніпропетровськ-Дніпродзержинськ (16-19 квітня 2012р.) – С. 34 - 35.
52. Мейш В.Ф. Волновые процессы в грунтовых средах периодической структуры при нестационарных загрузках / В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш // Математичні проблеми технічної механіки. Міжнародна наукова конференція. Матеріали конференції (Том 1) – Дніпропетровськ - Дніпродзержинськ (16-19 квітня 2012р.) – С. 36.
53. Луговой П.З. Динамическое поведение цилиндрической оболочки при взаимодействии с трехкомпонентной грунтовой средой периодической структуры / П.З. Луговой, В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш // Нестационарные процессы деформирования элементов конструкций, обусловленные взаимодействием полей различной физической природы / Збірник наукових праць. Львів: Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України, 2012. – Вип.20. – С.99 - 102.
54. Мейш В.Ф. К расчету взаимодействия цилиндрических волн с деформируемыми преградами в многокомпонентной грунтовой среде / В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш // Актуальні проблеми інженерної механіки: Матеріали ІІ Міжнародної науково – технічної конференції. – Миколаїв: Національний університет кораблебудування, 2012. – С.19 - 20.
55. Мейш В.Ф. Численное моделирование распространения цилиндрических волн в двухслойной грунтовой среде / В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш // Необратимые процессы в природе и технике / Труды VII Всероссийской конференции, 29 – 31 января 2013. – Москва, 2013. – М.: МГТУ им. Баумана, 2013. – Ч. 3. – С. 121 – 124.
56. Мейш В.Ф. Деформирование подкрепленных конических оболочек на упругом основании при динамических нагрузках / В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш // Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса. Материалы III Международной научно – практической конференции. – Гомель, 17 – 19 октября, 2013. – Гомель: Бел ГУТ, 2013. – С. 372 – 374.
57. Мейш В.Ф. Решение задач о вынужденных колебаниях дискретно подкрепленных цилиндрических оболочек эллиптического сечения / В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш, Н.П. Кепенач // Актуальные проблемы механики деформируемого твердого тела / Труды VII Международной научной конференции. (Донецк – Мелекино, 11 – 14 июня 2013 г.). – Т. 2. – Донецк: ДНУ, 2013. – С. 49 – 52.
58. Мейш В.Ф. Динаміка підкріплених циліндрических оболонок еліптичного перерізу на пружній основі / В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш, Н.П. Кепенач, А.С. Богатирчук // Матеріали Всеукраїнської науково – методичної конференції «Сучасні науково – методичні проблеми у вищій школі», 26 – 27 червня 2013. – Київ, 2013. – К.; НУХТ, 2013.- С. 39 – 40.
59. Мейш В.Ф. Динамическое поведение дискретно подкрепленных цилиндрических оболочек эллиптического сечения при нестационарных нагрузках / В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш, Н.П. Кепенач // Теория оболочек и мембран в механике и биологии: от макро- до наноразмерных структур: Материалы международной научной конференции. 16 – 20 сентября 2013 г., Минск, Беларусь. – Минск: Изд. Центр БГУ, 2013. – С. 243 – 245.
60. Мейш Ю.А. К решению динамических задач теории продольно – поперечно подкрепленных цилиндрических оболочек на упругом основании при

- нестаціонарних навантаженнях / Ю.А. Мейш // Математичні проблеми технічної механіки / Матеріали міжнародної наукової конференції. 15 – 18 квітня, 2013 р. – Дніпродзержинськ, 2013. – С. 33.
61. Луговой П.З. Численное моделирование динамического поведения подкрепленных цилиндрических оболочек на упругом основании при действии импульсной нагрузки / П.З. Луговой, Ю.А. Мейш // Сучасні проблеми механіки деформівного твердого тіла, диференціальних та інтегральних рівнянь / Тези доповідей Міжнародної наукової конференції (23 – 26 серпня 2013, м. Одеса). – Одеса: Астропrint, 2013. – С. 83.
 62. Луговий П.З. Нестаціонарне деформування дискретно підкріплених конічних оболонок в рамках геометрично нелінійної теорії / П.З. Луговий, В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш // Сучасні проблеми фізико – математичних наук та підготовка фахівців у цій галузі / Матеріали XIV Всеукраїнської науково – методичної конференції присвяченої 100 – річчю з дня заснування МНУ ім. В.О. Сухомлинського, 12 – 14 вересня 2013 р. – Миколаїв, 2013. – С. 36 – 37.
 63. Луговий П.З. Чисельний розв'язок нелінійних задач теорії підкріплених циліндрических оболонок при нестаціонарних навантаженнях / П.З. Луговий, В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш // Математика в сучасному технічному ун-ті. Друга міжнар. науково–практична конф. – Київ (20-21 грудня 2013р.) – Київ: НТУУ «КПІ», 2013. – С. 52 - 55
 64. Луговий П.З. До розв'язку динамічних задач теорії підкріплених циліндрических оболонок при розподілених навантаженнях / П.З. Луговой, Ю.А. Мейш // Математичні проблеми технічної механіки. Міжнародна наукова конференція. (Том 2) – Дніпропетровськ, Дніпродзержинськ (14 - 17 квітня 2014р.) – С.17
 65. Мейш В.Ф. Решение динамических задач о взаимодействии цилиндрических оболочек с грунтовыми средами периодической структуры / В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш / Тезисы докладов II Международной научно – практической конференции (16 – 20 марта 2015 г, Киев - Одесса). – Одесса: ТЭС, 2015 – С. 64.
 66. Богатырчук А. К решению динамических задач взаимодействия цилиндрических оболочек с грунтовой средой периодической структуры / А. Богатырчук, В. Мейш, Ю. Мейш // Міжнародна науково – методична конференція «Сучасні науково – методичні проблеми математики у вищій школі», 25 - 26 червня 2015 р. – К.: НУХТ, 2015р. – С. 62-64.
 67. Богатырчук А. Динамическое поведение цилиндрической оболочки на упругом основании переменной структуры / А. Богатырчук, В. Мейш, Ю. Мейш // Міжнародна науково – методична конференція «Сучасні науково – методичні проблеми математики у вищій школі», 25 - 26 червня 2015 р. – К.: НУХТ, 2015р. – С. 64 - 65.
 68. Мейш В.Ф. Поведение цилиндрических оболочек с деформируемыми перегородками при продольном ударе / В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш // Всеукраїнська наукова конференція «Математичне моделювання та математична фізика» присвячена 165- річчю від дня народження С.В. Ковалевської: матеріали конференції. – Кременчук: Кременчуцький національний університет ім. М. Остроградського, 2015. – С. 120-121.

69. Луговий П.З. До чисельного розв'язку динамічних задач взаємодії неоднорідних циліндрических оболонок з пружним грунтовим середовищем / П.З. Луговий, Ю.А. Мейш // LXXI Наукова конференція професорсько – викладацького складу, аспірантів, студентів та відокремлених структурних підрозділів університету. – К.: НТУ, 2015. - С. 462.
70. Мейш Ю.А. Динамика трехслойных цилиндрических оболочек на упругом основании при импульсных загрузках / Ю.А. Мейш // III Международная конференция «Актуальные проблемы инженерной механики». Тезисы докладов. – Одесса – 2016. – С. 157.
71. Мейш Ю.А. Динамика цилиндрических оболочек еллиптического сечения на упругом основании при нестационарных загрузках / Ю.А. Мейш // Математичні проблеми технічної механіки - 2016. Міжнародна наукова конференція. (Том 1) – Дніпропетровськ, Дніпродзержинськ, Київ (18-21 квітня 2016р.) – С. 109.

АНОТАЦІЯ

Мейш Ю.А. Динаміка підкріплених оболонок при нестационарних навантаженнях та оболонок з врахуванням дії грунтових середовищ. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла. – Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України, Київ, 2016.

В дисертації створена нова науково – обґрунтована загальна методика математичного дослідження напружено деформованого стану неоднорідних елементів конструкцій на основі пружних середовищ Вінклера та Пастернака при зовнішніх та внутрішніх динамічних навантаженнях. Розв'язані зв'язані задачі теорії оболонка – грунтове середовище в рамках механіки суцільних середовищ, які дозволяють отримати коефіцієнти Вінклера для задач різної геометрії (циліндр, сфера) та різних фізико – механічних параметрів грунтового середовища. В роботі наведено механіко – математичні моделі коливань неоднорідних елементів конструкцій (підкріплені циліндричні, сферичні та конічні оболонки, тришарові оболонки обертання згідно теорії незалежних апроксимацій до кожного шару) в пружному середовищі, які включають виведення рівнянь коливань виходячи з варіаційного принципу Гамільтона – Остроградського та Рейсснера в зусиллях та переміщеннях. Сформульовані відповідні природні граничні та початкові умови з врахуванням пружних середовищ Вінклера та Пастернака. Сформульована постановка зв'язаних задач теорії оболонка – грунтове середовище для циліндричної та сферичної симетрії в рамках моделей механіки суцільних середовищ. Рівняння стану грунтового середовища приймаються в рамках моделі нелінійного водонасиченого трикомпонентного ґрунта. Для опису рівнянь руху грунтового середовища приймаються рівняння Ейлера. Чисельний розв'язок зв'язаних задач теорії оболонка – грунтове середовище для циліндричної та сферичної симетрії в рамках моделей механіки суцільних середовищ, зокрема, циліндрична оболонка – грунтове середовище періодичної структури, базується на використанні скінченно – різницевих схем Мак – Кормака. Даний підхід дає ефективні розв'язки при проходженні хвиль через середовища з різними фізико – механічними параметрами.

На основі отриманих розрахунків запропонована формула для отримання коефіцієнтів Вінклера в залежності від геометричних параметрів оболонки та фізико – механічних параметрів ґрутового середовища при відповідних динамічних навантаженнях. Приведено чисельний розв'язок задач про вимушені коливання неоднорідних елементів конструкцій (гладких та підкріплених циліндричних, сферичних та конічних оболонок) в пружному середовищі Вінклера та Пастернака при імпульсних навантаженнях, включаючи, розв'язки неосесиметричних задач дискретно підкріплених циліндричних оболонок з повздовжньо - поперечним підкріпленням та поперечно підкріплених циліндричних оболонок еліптичного перерізу з використанням коефіцієнтів Вінклера, які отримані при розв'язку зв'язаних задач. Проведено чисельний параметричний аналіз вимушених коливань та напружено деформованого стану неоднорідних елементів конструкцій в залежності від їх геометричних та фізико – механічних параметрів та параметрів пружного середовища, а також чисельний аналіз впливу ґрутового середовища на напружено деформований стан циліндричних та сферичних оболонок при нестационарних навантаженнях.

АННОТАЦИЯ

Мейш Ю.А. Динамика подкрепленных оболочек при нестационарных нагрузках и оболочек с учетом действия грунтовых сред. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.02.04 – механика деформированного твердого тела. – Институт механики им. С.П. Тимошенко НАН Украины, Киев, 2016.

В диссертации создана новая научно – обоснованная общая методика математического исследования напряженно деформированного состояния неоднородных элементов конструкций на основе упругих сред Винклера и Пастернака при внешних и внутренних динамических нагрузках. Решены связанные задачи теории оболочки – ґрутова среда в рамках механики сплошных сред, позволяющих получить коэффициенты Винклера для задач разной геометрии (цилиндр, сфера) и разных физико – механических параметров ґрутової среды. В работе представлены механико – математические модели колебаний неоднородных элементов конструкций (подкрепленные цилиндрические, сферические и конические оболочки, трехслойные оболочки вращения согласно теории независимых аппроксимаций к каждому слою) в упругой среде, включающие вывод уравнений колебаний исходя из вариационного принципа Гамильтона – Остроградского и Рейсснера в усилиях и перемещениях. Уравнения колебаний элементов конструкций представлены в рамках модели теории оболочек и ребер, основанных на гипотезах С.П. Тимошенко. Сформулированы соответствующие естественные граничные и начальные условия с учетом упругих сред Винклера и Пастернака. Сформулирована постановка связанных задач теории оболочки – ґрутова среда для цилиндрической и сферической симметрии в рамках моделей механики сплошных сред. Уравнения состояния ґрутової среды принимаются в рамках модели нелинейного водонасыщенного трехкомпонентного грунта. Для описания уравнений движения ґрутової среды принимаются уравнения Эйлера.

Численное решение связанных задач теории оболочки – грунтовая среда для цилиндрической и сферической симметрии в рамках моделей механики сплошных сред, в частности, цилиндрическая оболочка – грунтовая среда периодической структуры, основывается на использовании конечно – разностных схем Мак – Кормака. Данный подход дает эффективные решения при прохождении волн через среду с разными физико – механическими параметрами. На основе полученных расчетов предложена формула для получения коэффициента Винклера в зависимости от геометрических параметров оболочки и физико – механических параметров грунтовой среды при соответствующих динамических нагрузках. Приведено численное решение задач о вынужденных колебаниях неоднородных элементов конструкций (гладких и подкрепленных цилиндрических, сферических и конических оболочек) в упругой среде Винклера и Пастернака при импульсных нагрузлениях. Численный алгоритм решения представленных задач основан на использовании интегро – интерполяционного метода построения разностных схем по пространственным координатам и явной конечно – разностной аппроксимации по временной координате. Данный подход дает возможность выполнения закона сохранения полной механической энергии на разностном уровне. В работе проведено теоретическое и практическое исследование сходимости численных результатов для подкрепленных оболочек на упругом основании, включая решения неосесимметричных задач дискретно подкрепленных цилиндрических оболочек с продольно-поперечным подкреплением и поперечно подкрепленных цилиндрических оболочек эллиптического сечения, используя коэффициенты Винклера, полученные при решении связанных задач. Проведен численный параметрический анализ вынужденных колебаний и напряженно деформированного состояния неоднородных элементов конструкций в зависимости от их геометрических и физико – механических параметров и параметров упругой среды, а также численный анализ влияния грунтовой среды на напряженно деформированное состояние цилиндрических и сферических оболочек при нестационарных нагрузках.

SUMMARY

Meish Yu.A. Dynamics of Reinforced Shells under Nonstationary Loads and Shells Taking into Account Soil Reaction. – Manuscript.

The thesis submitted for the Technical Science Doctoral degree in specialty 01.02.04 – Mechanics of Deformable Solids. – S.P. Timoshenko Institute of Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2016.

The dissertation proposes a new science-based general methodology of mathematical research of stress-deformed state of nonlinear structure elements based on Winkler–Pasternak elastic substrate medium under the influence of external and internal dynamic loads. Within the framework of continuum mechanics the related problems of shell-soil theory were solved, which allowed to obtain Winkler coefficient for problems of different geometry (cylinder, sphere) and different physical-mechanical parameters of soils. The paper presents mechanical-mathematical models of inhomogeneous structure elements oscillations (reinforced cylindrical, spherical and conical shells; three-layered

shells of revolution according to the theory of independent approximations to each layer) in elastic medium. It also includes derivation of oscillation equations based on the Hamilton-Ostrogradskyy and Reissner variational principle in force and displacement. Corresponding natural boundary and initial conditions were formulated taking into account Winkler and Pasternak elastic media. Within the framework of continuum mechanics models related problems of the shell-soil theory for cylindrical and spherical symmetries were formulated. Equations of groundwater soil state are adopted within the framework of nonlinear model of the three-component water-saturated soil. Euler equations are applied for description of groundwater motion equations. Basing on the use of MacCormack finite-difference schemes the numerical solution of problems related to the shell-soil theory for cylindrical and spherical symmetry within the framework of continuum mechanics models, in particular, cylindrical shell-soil periodic structure was made. This approach provides effective solutions for the wave propagation through a medium with different physical-mechanical parameters. On the basis of the calculations a formula was proposed for obtaining Winkler coefficient dependant on shell geometrical parameters and soil physical-mechanical parameters at corresponding dynamic loads. The numerical solution of the problems was performed of inhomogeneous construction elements forced oscillations (including smooth and reinforced cylindrical, spherical and conical shells) in Winkler- Pasternak elastic medium under impact loading. These included axysymmetric problems solutions of discretely stiffened cylindrical shells with longitudinal and transverse reinforcement and transversely stiffened cylindrical shell of elliptical cross-section using Winkler coefficients obtained by solving related problems. A numerical parametric analysis was performed of forced vibrations and stress strain state of inhomogeneous structural elements taking into account their geometrical and physical-mechanical and elastic parameters of the medium, as well as the numerical analysis of the effect of soil on the stress strain state of cylindrical and spherical shells under transient load conditions.