

КИЇВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

На правах рукопису

КИРИЧУК Олександр Адріанович

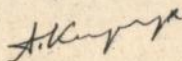
УДК 539.3

СТІЙКІСТЬ НЕЛІНІЙНИХ КОЛИВАНЬ ТОНКИХ ОВОЛОНОК
ПРИ СИЛОВИХ ТА КІНЕМАТИЧНИХ ЗБУДЖЕННЯХ

Спеціальність 05.23.17 - будівельна механіка

А в т о р е ф е р а т

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук



Київ - 1993

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі теоретичної механіки та в Науково-дослідному інституті будівельної механіки при Київському державному університеті будівництва і архітектури

Науковий консультант доктор технічних наук, професор
В. І. ГУЛЯЄВ

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
В. О. ЗАРУЦЬКИЙ

ЛННБ України ім. В. Стефаника



00802708 (P)

доктор технічних наук, професор
А. С. ДЕХТЯР

доктор технічних наук, професор
Ю. В. ВЕРЖУСЬКИЙ

Провідна установа: Інститут проблем міцності АН України

Захист відбудеться "19" листопада 1993 р. о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 068.05.02 Київського державного технічного університету будівництва і архітектури за адресою: 252037, Київ - 37, Повітрофлотський проспект, 31

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Київського державного технічного університету будівництва і архітектури

Автореферат розісланий "18" грудня 1993 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
к. т. н., с. н. с.

В. Г. КОВІЄВ

43 - 28,305

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Тонкостінні осесиметричні оболонки знаходять широке використання в різних галузях сучасної техніки. Вони є елементами багатьох будівельних конструкцій, використовуються в машинобудуванні, в авіа- та судобудівництві, в сучасній ракетній техніці, в хімічному та енергетичному машинобудуванні, в нафтовій та газовій промисловостях. Виконані із тонких осесиметричних оболонок конструкції мають високу міцність і легкість, що дозволяє найбільш ефективно вирішувати проблему зниження матеріаломісткості споруд. В той же час оболонкові конструкції в процесі експлуатації часто підлягають дії інтенсивних динамічних навантажень, що приводить до появи складних коливальних рухів. Ці коливання супроводжуються рядом специфічних ефектів та фізичних явищ, які властиві нелінійним механічним системам та характерні для класу задач, що розглядається. До них можна віднести: появу складних резонансних режимів коливань (суб- та супергармонічних), існування кількох режимів коливань при одних і тих же значеннях динамічних параметрів навантаження, зрив процесу руху серединної поверхні оболонки. Перераховані ефекти можуть переводити конструкції із стійких режимів коливань в нестійкі, а також суттєво змінювати форму змусених коливань. Тому загальна тенденція вдосконалення оболонкових елементів споруд і впровадження їх в інженерну практику в сполученні із збільшенням інтенсивності вібраційних навантажень обумовлюють високу актуальність проблеми дослідження стійкості нелінійних коливань тонких оболонок і приковують до неї постійну увагу дослідників і проєктантів.

Аналізуючи дані, що містяться в сучасній науковій літературі про результати рішень задач стійкості змусених коливань тонких осесиметричних оболонок з позицій нелінійної теорії, належить відзначити, що не дивлячись на значну кількість проведених досліджень, до теперішнього часу не створено універсальних ефективних методів дослідження нелінійних коливань тонких осесиметричних оболонок з аналізом їх стійкості. Це дозволяє зробити висновок про те, що питання розв'язання вказаного класу задач є

актуальними і викликають інтерес як в прикладному, так і в теоретичному відношеннях.

Метою роботи є розробка ефективної методики та програмного забезпечення для дослідження нелінійних коливань та стійкості тонких осесиметричних оболонок при силових і кінематичних збудженнях, що базуються на сумісному використанні методів числового та тензорного аналізу, проєкційного методу і методу продовження розв'язку по параметру.

Наукова новизна полягає в:

- розвитку теорії нелінійних коливань тонких оболонок;
- розробці чисельно-аналітичної методики дослідження стійкості нелінійних вимушених коливань осесиметричних оболонок з довільною формою твірної, в тому числі і складених;
- дослідження стійкості нелінійних коливань широкого класу оболонок при силових періодичних збудженнях;
- дослідження стійкості вимушених коливань оболонок, що кінематично збуджуються;
- постановка задачі та дослідження коливань оболонок, що обертаються та кінематично збуджуються;
- розробка програмного забезпечення для реалізації числового алгоритму побудови періодичних рішень і аналізу їх особливих станів, що характеризують втрату стійкості коливань оболонок.

Практична цінність роботи полягає в доведенні її результатів до проблемно-орієнтованого обчислювального комплексу для ЕОМ, який призначений для визначення параметрів коливань та стійкості оболонкових конструкцій, що використовуються в інженерній та будівельній практиці, при експлуатаційних режимах динамічного навантаження. Дисертаційна робота виконувалась у відповідності із загальним планом науково-дослідних робіт Київського інженерно-будівельного інституту по тематиці, визначеній завданням РН 8204.Ц.05.04 "Разработать и внедрить математическое и программное обеспечение для исследования напряженно-деформированного состояния, устойчивости и колебаний элементов конструкций при действии сейсмических, ветровых и гидродинамических воздействий с целью повышения надежности высотных и шельфовых сооружений"(номер держ реєстрації 01860102175) та темою 1.10.3.2 "Исследование процессов деформирования пространственных конструкций на основе развития теории и методов численного ана-

лиза" (номер держ. реєстрації 01860060737) республіканської цільової комплексної науково-технічної програми "Матеріалоемність", а також договорами на виконання НДР по завданнях ряду організацій.

Результати роботи і розроблені методи упроваджені в НВО "Енергія" та в НДІ електрозварки ім. Б. Е. Патона АН України.

Апробація роботи. Основні результати дисертаційної роботи обговорювались на наступних наукових симпозіумах і конференціях: на Міжнародному симпозіумі "Міцність матеріалів та елементів конструкцій при звукових та ультразвукових частотах навантаження" (Київ, 1984), на III та IV науково-технічних конференціях "Вдосконалення експлуатації і ремонту корпусів суден" (Калінінград 1984, 1986), на V Всесоюзній конференції по статичній і динамічній просторових конструкцій (Київ, 1985), на I Всесоюзному симпозіумі "Нелінійна теорія тонкостінних конструкцій та біомеханіка" (Кутаїсі, 1985), на Всесоюзній конференції "Тонкостінні та просторові конструкції покриття будівель" (Таллін, 1986), на II Всесоюзному симпозіумі "Стійкість у механіці деформованого тіла" (Калінін, 1986), на III Всесоюзній конференції "Сучасні проблеми будівельної механіки та міцності літальних апаратів" (Казань, 1988), на Всесоюзній конференції "Нелінійні задачі розрахунку конструкцій в умовах високих температур" (Саратов, 1988), на Всесоюзній конференції "Ефективні числові методи рішення крайових задач механіки твердого деформованого тіла" (Харків, 1989), на XVII Міжнародному конгресі ІКМ з питань використання математики в технічних науках (Веймар, 1990), на Всесоюзній нараді "Нормування вітрових навантажень і розрахунок будівель, ліній електропередач та ін. споруд на дію вітру" (Фрунзе, 1990), на XV Всесоюзній конференції по теорії пластинок і оболонок" (Казань, 1990), на I Всесоюзній конференції "Технологічні проблеми міцності несучих конструкцій" (Запоріжжя, 1991), на Міжнародному колоквиумі "Проблеми будівництва зернохранилищ резервуарного типу" (Київ, 1991), на V Українській конференції "Підсилення та реконструкція виробничих будівель і споруд, збудованих у металі" (Київ, 1992).

Публікації. За темою дисертації опубліковано більш, як 60 наукових робіт. Основний зміст дисертаційної роботи викладений у 44 публікаціях.

...сі ...

Автор захищає:

- розвиток теорії нелінійних коливань тонких оболонок;
- розробку чисельно-аналітичного методу побудови розв'язків нелінійних рівнянь вимушених коливань тонких оболонок з аналізом їх стійкості;
- результати дослідження стійкості коливань широкого класу осесиметричних оболонок і складених з них конструкцій при дії силових періодичних збуджень;
- результати дослідження стійкості коливань оболонкових конструкцій, що кінематично збуджуються;
- постановку задачі про стійкість коливань та результати дослідження оболонок, що обертаються, при їх кінематичних періодичних збудженнях.

Структура та об'єм роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, шести розділів, заключення і списку використаної літератури з 211 найменувань. Загальний обсяг роботи складає 413 сторінок машинописного тексту, 171 рисунок і 30 таблиць.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі приведений огляд літератури, яка присвячена динамічній поведінці та аналізу стійкості нелінійних коливань тонкостінних конструкцій. Обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульована ціль роботи.

Загальна теорія тонких пружних оболонок, а також різноманітні питання, зв'язані з розрахунками міцності оболонкових елементів конструкцій, знайшли відображення в монографіях В.З. Власова, О.Л. Гольденвейзера, М.О. Кільчевського, Н.В. Колдунова, О.І. Лур'є, А.Лява, Х.М. Муштарі та К.З. Галімова, В.В. Новожилова, С.П. Тимошенка, К.Ф. Черниха, де містяться основні положення та залежності сучасної теорії пластинок та оболонок.

Із зростанням вимог, що висуваються до сучасних конструкцій, у багатьох галузях техніки впроваджуються тонкостінні осесиметричні оболонки з складною формою твірної, в тому числі і набрані із окремих оболонкових елементів. В даній роботі розглядаються оболонки як з канонічною формою поверхні (циліндричною, сферичною, еліпсоїдальною, конічною, тороїдальною), так і складені із

сполучених фрагментів. Елементи оболонок, що розглядаються, можуть мати аналітично задану форму з постійними або перемінними геометричними параметрами, зона стику може бути гладкою поверхнею або мати влом по лінії з'єднання.

Теорія розрахунку тонких осесиметричних оболонок на протяжі останніх десятиріч отримала суттєвий розвиток. Теоретичні та експериментальні результати, що містяться в літературі, дозволяють проводити статичні розрахунки багатьох реальних об'єктів, що складаються із оболонкових елементів. Між тим, ускладнення режимів їх функціонування ставить більш високі вимоги до теорії та методів дослідження поведінки оболонок при дії динамічних навантажень.

Загальні закономірності протікання періодичних процесів в рамках лінійної теорії коливальних тонких оболонок вивчені порівняно ретельно. Великий внесок в розвиток динаміки оболонок поклали роботи М. О. Адуяє, І. Я. Аміро, В. В. Болотіна, А. С. Вольміра, Е. І. Григолюка, В. О. Заруцького, В. І. Миченкова, В. В. Кабанова, І. Ф. Образцова, К. О. Федосова, О. М. Фролова, К. З. Хайрасова, R. R. Archer, B. Budiansky, R. S. Bodner, J. E. Crawford, J. Famili, W. Flugge, I. S. Humphreys, P. F. Jordan, W. T. Koiter, R. S. Roth, L. H. Sodel та інших авторів.

В той же час, для описання усього різноманіття явищ, що відносяться до цього напрямку, апарат лінійних диференціальних рівнянь виявляється недостатнім, оскільки в його рамки не вкладаються найбільш цікаві і характерні ефекти нелінійних коливань. До них відносяться не тільки кількісна еволюція коливального процесу, що пов'язана з нелінійною залежністю амплітуди коливань від параметрів інтенсивності збудження, але і якісні зміни, що приводять до виникнення критичних станів, відгалуження нових рішень і втраті стійкості з перебудовою форм руху. Оскільки теоретичний апарат дослідження нелінійних диференціальних рівнянь виявляється набагато складніший апарату лінійного аналізу, в динамічній теорії оболонок розглядалися лише простіші задачі, які можуть моделюватись системами з невеликою кількістю степенів свободи та малою нелінійністю.

В працях Н. В. Валішвілі, В. З. Власова, А. С. Вольміра, І. І. Воровича, Я. М. Григоренка, В. І. Гуляєва, К. З. Галімова, М. С. Корнішина, Х. М. Муштарі, В. В. Новожилова та інших дослідників геометрично нелінійна теорія отримала прикладний розвиток при вивченні нап-

ружено-деформованого стану та стійкості пластинок і оболонок різних форм. Постановка задачі про стійкість коливань пластинок і оболонок належить В. М. Челомею. В роботах А. С. Вольміра, І. Г. Кільдібекова, Г. В. Мішенкова, Г. А. Хегемайера, Е. Рейснера, F. C. U. Fu, Y. C. Fung та інш. досліджені вимушені коливання пластинок, циліндричних та сферичних панелей на основі моделей з одним ступенем свободи. Розглянуто задачі, що зв'язані з швидкоплинним перехідним процесом, який приводить до втрати стійкості руху пластин і оболонок. Побудовано амплітудно-частотні характеристики для великих діапазонів частот коливань, показана неоднозначність режимів нелінійних коливань різної амплітуди при одній і тій самій частоті.

Виконаний в дисертаційній роботі аналіз публікацій в напрямку дослідження нелінійних коливань тонких оболонок та їх стійкості, дозволив зробити висновок, що до теперішнього часу питання вимушених коливань оболонок з великими амплітудами при дії періодичних навантажень вивчені недостатньо.

Перший розділ зміщує описання побудови математичної моделі вимушених коливань оболонки в геометрично нелінійній постановці і розробці методів числового дослідження динаміки та стійкості нелінійних коливань осесиметричних оболонки з твірною довільної форми. В тензорній формі на основі принципу Даламбера формулюються рівняння руху елемента оболонки при періодичних в часі збудженнях. Враховуються сили інерції не тільки в нормальному, але і в тангенціальних напрямках базисних векторів середньої поверхні оболонки. Коефіцієнти першої та другої квадратичних форм, що характеризують геометрію оболонки, представлені в загальному вигляді, що дозволяє досліджувати будь-які поверхні обертання. Методика побудови наближених періодичних розв'язків нелінійних диференціальних рівнянь в часткових похідних, які описують установлені режими вимушених коливань оболонки, базується на методі гармонічного балансу, що враховує фільтруючі якості нелінійних механічних систем. Це дозволяє розкласти систему невідомих функцій в тригонометричні ряди по коловій та часовій координатам та утримати в них невелике число гармонік. За допомогою проєкційного методу в роботі одержані рівняння відносно коефіцієнтів розкладу системи функцій в подвійні тригонометричні ряди. В напрямку базисного вектора вздовж твірної оболонки використовується модифіційний кінцево-різницецький ме-

тод криволінійних сіток, на основі якого рівняння руху приводяться до нелінійної системи алгебраїчних рівнянь великої розмірності. Стаціонарні розв'язки системи нелінійних алгебраїчних рівнянь будуються на основі синтезу методів продовження рішення по параметру та Ньютона-Канторовича. Дослідження стійкості коливань оболонки ґрунтуються на теоремах стійкості Ляпунова по першому наближенню. Оскільки в критичних станах дійсна частина характеристичних показників змінює знак, критерієм втрати стійкості коливань оболонки є обертання в нуль якобіана системи. Граничне значення параметру інтенсивності збудження, при якому якобіан змінює знак, характеризує верхню критичну точку або точку біфуркації.

Диференціальні рівняння руху елемента оболонки в локальній системі ортогональних криволінійних координат (x^1, x^2) будуються за умовою, що головний вектор і головний момент всіх сил, включаючи й сили інерції, прикладених до елемента середньої поверхні оболонки, дорівнює нулю

$$\frac{\partial \sqrt{a} \vec{T}^\alpha}{\partial x^\alpha} + \sqrt{a} \vec{q}(t) - \sqrt{a} \gamma h \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \sqrt{a} \vec{M}^\alpha}{\partial x^\alpha} + [\vec{e}_\alpha \times \vec{T}^\alpha] \sqrt{a} = 0; \quad (2)$$

$$\alpha = 1, 2.$$

Тут a - фундаментальний детермінант метричного тензора поверхні оболонки, h - товщина, γ - щільність матеріалу, \vec{T}^α ,

\vec{M}^α - контраваріантні вектори внутрішніх зусиль та моментів,

$\vec{u}(x^1, x^2, t)$ - вектор перемішень, $\vec{q}(x^1, x^2, t)$ - вектор зовнішніх навантажень. Криволінійні координати поверхні x^1, x^2 зорієнтовані, відповідно, в круговому напрямку і вздовж твірної.

Контраваріантні вектори внутрішніх зусиль \vec{T}^α та моментів \vec{M}^α розкладаються по векторах основного локального базису $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$ недеформованої середньої поверхні оболонки

$$\vec{T}^\alpha = T^{\alpha\beta} \vec{e}_\beta + T^{\alpha 3} \vec{e}_3; \quad \vec{M}^\alpha = C_{\beta\gamma} M^{\alpha\beta} \vec{e}_\gamma,$$

де M^{11} , M^{22} - згинаючі моменти; M^{12} , M^{21} - крутні моменти; $C_{\beta\gamma}$ - дискримінантний тензор поверхні.

Контраваріантні складові тензорів $T^{\alpha\beta}$ та $M^{\alpha\beta}$ виражаються через коваріантні компоненти тензорів мембранних $E_{\alpha\beta}$ та згинних $M_{\alpha\beta}$ деформацій залежностями:

$$T^{\alpha\beta} = \frac{Eh}{1-\nu^2} \varepsilon_{\alpha\delta} [\nu a^{\alpha\beta} a^{\gamma\delta} + (1-\nu) a^{\alpha\gamma} a^{\beta\delta}], \quad (4)$$

$$M^{\alpha\beta} = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \mu_{\gamma\delta} [\nu a^{\alpha\beta} a^{\gamma\delta} + (1-\nu) a^{\alpha\gamma} a^{\beta\delta}], \quad (5)$$

$(\alpha, \beta, \gamma, \delta) = 1, 2.$

Компоненти деформацій $E_{\alpha\beta}$, $M_{\alpha\beta}$ визначаються через компоненти вектору переміщень $\vec{u} = \{u, v, w\}$ як:

$$E_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial x^\alpha} \vec{e}_\beta + \frac{\partial \vec{u}}{\partial x^\beta} \vec{e}_\alpha + \nu_\alpha \nu_\beta \right), \quad (6)$$

$$\mu_{\alpha,\beta} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{c^{\alpha\delta}} \frac{\partial \vec{\Omega}}{\partial x^\beta} \vec{e}^\delta + \frac{1}{c^{\beta\delta}} \frac{\partial \vec{\Omega}}{\partial x^\alpha} \vec{e}^\delta \right), \quad (7)$$

$$\vec{\Omega} = c^{\alpha\beta} \nu_\alpha \vec{e}_\beta; \quad \nu_\alpha = (\partial \vec{u} / \partial x^\alpha) \vec{e}_\alpha.$$

Користуючись співвідношеннями (3) - (7) рівняння руху елемента оболонки (1), (2) приводяться до рівнянь в переміщеннях, які мають загальний вигляд

$$\frac{d^2 \vec{u}}{dt^2} + \vec{F}(\vec{u}) + \vec{q} = 0, \quad (8)$$

де \vec{F} - нелінійний диференціальний оператор. Ця процедура автоматизована і виконується з допомогою обчислювального програмного комплексу.

Припускаючи, що інтенсивність навантаження змінюється в часі в періодом T , представимо T -періодичне рішення системи (8) у вигляді:

$$\vec{u}(x^1, x^2, t) = \sum_{n=-N}^N \sum_{m=2}^2 \vec{u}_{nm}(x^2) e^{i(nx^1 + m\theta t)} \quad (9)$$

де компоненти $\vec{u}_{nm}(x^2)$ визначаються по формулах

$$\vec{u}_{nm}(x^2) = \frac{2}{\pi T} \int_0^{2\pi T} \int_0^0 \vec{u}(x^1, x^2, t) e^{i(nx^1 + m\theta t)} dx^1 dt \quad (10)$$

Тут параметр n характеризує циклічно симетричну в напрямі x^1 форму коливань оболонки. Підставляючи вирази (9), (10) в рівняння (8) та виконуючи операції проектування отриманих співвідно-

шень на систему базисних функцій $\sin nx^1, \cos nx^1,$

$\cos m\theta t$, побудуємо систему нелінійних звичайних диференціальних рівнянь.

В дисертаційній роботі для рішення задач стійкості вимушених нелінійних коливань оболонок використовується метод криволінійних сіток, за допомогою якого здійснюється перехід від векторних звичайних диференціальних співвідношень до нелінійної системи алгебраїчних рівнянь. Специфіка методу полягає в тому, що кінцеві різниці використовуються до векторних рівнянь руху оболонок. При цьому система складених осесиметричних оболонок може розглядатись цілому, без розтину її на окремі фрагменти, у зв'язку з чим зникає необхідність додаткових рівнянь, що описують умови контакту. В місцях стику та на границях відсутні законтурні вузли, різницеві співвідношення залишаються справедливими в місцях злому серединної поверхні. Ще одна перевага методу полягає в збільшенні швидкості збіжності рішень за рахунок виключення помилки апроксимації коваріантної похідної вектор-функції жорстких змішень, яка має місце в більшості числових методів.

Система нелінійних різницевих рівнянь коливань оболонок, яка сформульована для (j) -го вузла за допомогою метода криволінійних сіток, має вигляд:

$$\frac{1}{2} (\sqrt{a_{j+0,5}} + \sqrt{a_{j-0,5}}) \left[\frac{n}{m(j)} T^{11} + \frac{1}{2} \Gamma_{12(j)}^{11} (\alpha_{1(j+0,5)}^{10}) a_{2(j+0,5)}^{2(j)} \frac{n}{m(j+0,5)} T^{12} \right] +$$

$$\begin{aligned}
 & + a_{1(j-0.5)}^{1j} a_{2(j-0.5)}^{2j} \frac{T^{n-12}}{m(j-0.5)} - \frac{1}{2} (a_{1(j+0.5)}^{1j} a_{2(j+0.5)}^{2j} \frac{\beta^1 T^{n-12}}{m(j+0.5)}) + \\
 & + a_{1(j-0.5)}^{1j} a_{2(j-0.5)}^{2j} \frac{\beta^1 T^{n-12}}{m(j-0.5)} + (\sqrt{a} T^{n-21})_{j+0.5} a_{1(j+0.5)}^{1j} - (\sqrt{a} T^{n-21})_{j-0.5} a_{1(j-0.5)}^{1j} + \\
 & + \frac{1}{2} [(\sqrt{a} q_m^{n-1})_{j+0.5} a_{1(j+0.5)}^{1j} - (\sqrt{a} q_m^{n-1})_{j-0.5} a_{1(j-0.5)}^{1j}] + \\
 & + \gamma h m^2 \theta^2 [(\sqrt{a} u_m^n)_j a_j^{11}] = 0; \quad (11)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{2} (\sqrt{a}_{j+0.5} + \sqrt{a}_{j-0.5}) \left[\frac{1}{2} n (a_{1(j+0.5)}^{1j} a_{2(j+0.5)}^{2j} \frac{T^{n-12}}{m(j+0.5)}) + \right. \\
 & + a_{1(j-0.5)}^{1j} a_{2(j-0.5)}^{2j} \frac{T^{n-12}}{m(j-0.5)} + (\Gamma_{11}^2 \frac{T^{n-11}}{m})_j \left. \right] + (\sqrt{a} T^{n-22})_{j+0.5} a_{2(j+0.5)}^{2j} - \\
 & - (\sqrt{a} T^{n-22})_{j-0.5} a_{2(j-0.5)}^{2j} + (\sqrt{a} T^{n-23})_{j+0.5} a_{3(j+0.5)}^{2j} - \\
 & - (\sqrt{a} T^{n-23})_{j-0.5} a_{3(j-0.5)}^{2j} + \frac{1}{2} [\sqrt{a}_{j+0.5} (q_m^{n-2})_{j+0.5} a_{2(j+0.5)}^{2j} + \\
 & + q_m^{n-3} (j+0.5) + \sqrt{a}_{j-0.5} (q_m^{n-2})_{j-0.5} a_{2(j-0.5)}^{2j} + q_m^{n-3} (j-0.5) a_{2(j-0.5)}^{2j}] + \\
 & + \gamma h m^2 \theta^2 (\sqrt{a} u_m^n)_j a_j^{22} = 0;
 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{2} (\sqrt{a}_{j+0.5} + \sqrt{a}_{j-0.5}) \left[(\Gamma_{11}^n \frac{\beta_{11}}{m})_j + \frac{1}{2} n (a_{1(j+0.5)}^{1j} a_{3(j+0.5)}^{3j} \frac{T^{n-13}}{m(j+0.5)}) + \right. \\
 & + a_{1(j-0.5)}^{1j} a_{3(j-0.5)}^{3j} \frac{T^{n-13}}{m(j-0.5)} + (\sqrt{a} T^{n-22})_{j+0.5} a_{2(j+0.5)}^{3j} - \\
 & - (\sqrt{a} T^{n-22})_{j-0.5} a_{2(j-0.5)}^{3j} + (\sqrt{a} T^{n-23})_{j+0.5} a_{3(j+0.5)}^{3j} - (\sqrt{a} T^{n-23})_{j-0.5} a_{3(j-0.5)}^{3j} + \\
 & + \frac{1}{2} [\sqrt{a}_{j+0.5} (q_m^{n-2})_{j+0.5} a_{2(j+0.5)}^{3j} + q_m^{n-3} (j+0.5) a_{2(j+0.5)}^{3j} + \\
 & \left. + \sqrt{a}_{j-0.5} (q_m^{n-2})_{j-0.5} a_{2(j-0.5)}^{3j} + q_m^{n-3} (j-0.5) a_{2(j-0.5)}^{3j}] \right] + \\
 & + \gamma h m^2 \theta^2 (\sqrt{a} u_m^n)_j a_j^{33} = 0; \quad (13)
 \end{aligned}$$

$$+ \sqrt{a_{j-0,5}} \left(q_{m(j-0,5)}^{n_2} a_{2(j-0,5)}^{3j} + q_{m(j-0,5)}^{n_3} a_{3(j-0,5)}^{3j} \right) + \gamma h^2 m^2 \theta^2 (\sqrt{a_{m3}^n})_j = 0,$$

де $\Gamma_{12}^1, \Gamma_{11}^2$ - символи Кристофеля, $a_{k(j+0,5)}^{ij}$ - коефіцієнти перетворення векторних компонент при переході з локального базису в точці $(j+0,5)$ в локальний базис точки (j) , $m = 0, 1, 2$.

Сформулюємо задачу про побудову та дослідження стаціонарних розв'язків нелінійних рівнянь (11)-(13), що описують вимушені коливання осесиметричних оболонок. Припустимо, що на оболонку діє періодичне за часом з періодом T та симетричне відносно осі симетрії оболонки навантаження, інтенсивність якого має вигляд:

$$q = q_0 \cos \theta t, \quad \theta = 2\pi/T. \quad (14)$$

Колівання оболонки при дії збудження (7), починаючи з недеформованого симетричного стану, при збільшенні інтенсивності навантаження залишатимуться осесиметричними до деякого рівня збудження, яке вважається критичним. Втрата стійкості коливань може відбутись в результаті зміни симетричної форми встановлених коливань на циклічно симетричну або у випадку різкого наростання амплітуди із збереженням симетрії форми коливань. В першому випадку втрата стійкості відбувається через точку біфуркації, в другому - через граничну точку.

Тому задача дослідження стійкості вимушених коливань оболонок зв'язана з побудовою кривих стаціонарних станів, що повністю описують еволюцію коливальних рухів, та знаходженням на них особливих точок, що характеризують критичні стани.

Поставлена задача вирішується за допомогою методу продовження розв'язку по параметру та схеми методу Н'ютон-Канторовича, які дозволяють розв'язок нелінійної крайової задачі звести до розв'язку послідовності лінеаризованих крайових задач, починаючи з відомого нульового розв'язку. На кожному кроці реалізації обчислювального алгоритму аналізуються значення визначників матриці лінеаризованих рівнянь, що відповідають симетричним або циклічно симетричним формам коливань. Критерій втрати стійкості коливань полягає в зміні знаку відповідного визначника, а рівень інтенсивності навантаження, що відповідає цьому стану, характеризує критичне динамічне навантаження.

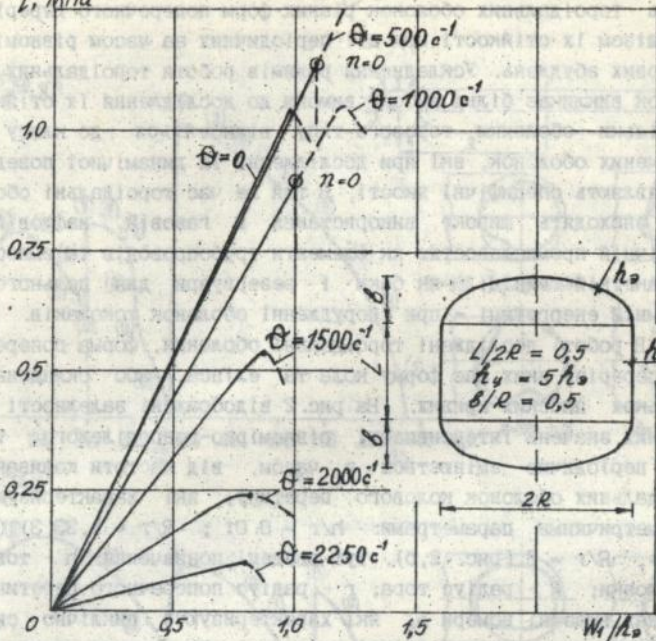
В другому розділі розглядаються питання достовірності побудованої методики та оцінюється її працездатність. На прикладі розв'язку ряду задач та порівнянні отриманих результатів з даними розрахунків, проведених іншими авторами і аналітичними розв'язками, що містяться в літературі, демонструється обґрунтованість математичних моделей процесів, що досліджуються, та достовірність виконаних розв'язків. На конкретному прикладі показана можливість стабілізації коливаннями високої частоти нестійких станів рівноваги деформованих систем, що відомо з літератури.

На основі розробленої в даній роботі числової методики проведені дослідження нелінійних установлених коливань з фіксованою частотою при наростанні інтенсивності періодичного силового збудження для тонких осесиметричних оболонок, в тому числі і складених.

В третьому розділі наведені результати розв'язку ряду задач стійкості вимушених нелінійних коливань еліпсоїдальної та тороподібних оболонок, циліндричних оболонок з еліпсоїдальними та тороподібними днищами та кришками при дії рівномірно розподіленого гармонічного по часу навантаження. Визначені значення критичних динамічних навантажень в залежності від частоти установлених коливань в області нижчих частот. Побудовані осесиметричні форми вимушених коливань та циклічно симетричні форми втрати стійкості коливань об'єктів, що досліджуються.

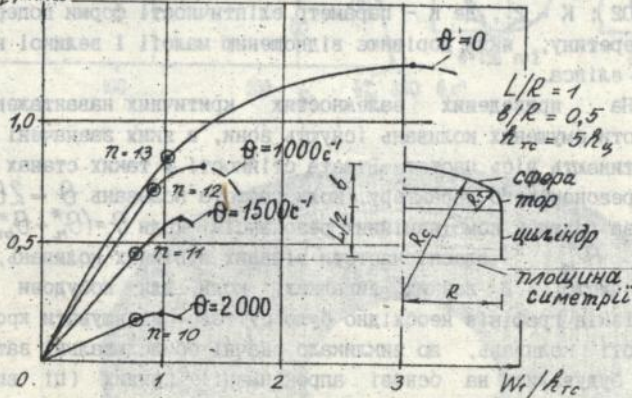
На рис. 1,а приведені діаграми динамічного навантаження оболонки резервуарного типу, що складається із циліндричної оболонки, замкнутої на обох краях еліпсоїдальними кришками. Втрата стійкості коливань оболонки, як свідчать результати дослідження, відбувається через граничну точку із збереженням осевої симетрії форми коливань оболонки. Збільшення частоти збудження коливань приводить до зниження критичних значень її інтенсивності. Рис. 1,б демонструє результати аналогічного дослідження оболонки резервуарного типу із сферичними кришками, що сполучені із циліндричним фрагментом тороїдальними поясами. В даному випадку втрата стійкості реалізується через біфуркаційні точки на кривих стаціонарних станів, яким відповідають циклічно симетричні форми нестійких коливань. Відповідні номери колових гармонік відмічені на графіках.

$q, \text{ МПа}$



а)

$q, \text{ МПа}$



б)

Четвертий розділ присвячений дослідженню нелінійних коливань тороїдальних оболонок різних форм поперечного перерізу з аналізом їх стійкості при дії періодичних за часом рівномірних силових абуджень. Ускладнення режимів роботи тороїдальних оболонок викликає більш високі вимоги до дослідження їх стійкості, оскільки оболонки торового типу відносяться до класу мало вивчених оболонок, які при дослідженні їх динамічної поведінки проявляють специфічні якості. В той же час тороїдальні оболонки знаходять широке використання в газовій, нафтовій та хімічній промисловостях як елементи трубопроводів та ємностей, в ракетній техніці - як баки і резервуари для пального, в атомній енергетиці - при спорудженні оболонок токомаків.

В роботі досліджені тороїдальні оболонки, форма поперечного перерізу яких має форму кола та еліпса, або складена із кількох плоских кривих. На рис. 2 відображені залежності критичних значень інтенсивності рівномірно-розподіленого тиску, що періодично змінюється з часом, від частоти коливань тороїдальних оболонок колового перетину, які характеризуються геометричними параметрами: $h/r = 0.01$; $R/r = 1.33(3)$ (рис. 2, а), $R/r = 2$ (рис. 2, б). Тут введені позначення: h - товщина оболонки; R - радіус тора; r - радіус поперечного перетину. В дужках вказані номери n , які характеризують циклічно симетричні форми втрати стійкості коливань. На рисунку також наведені характерні форми нестійких коливань розглянутих об'єктів. Рис. 3 демонструє результати дослідження тороїдальних оболонок еліптичного перетину з параметрами: $R/r = 2$; $h/r = 0.01$; $h/r = 0.02$; $K = 2$, де K - параметр еліптичності форми поперечного перетину, який дорівнює відношенню малої і великої напівосей еліпса.

На приведених залежностях критичних навантажень від частоти змушених коливань існують зони, в яких зазначені криві перетинають вісь частот. Втрата стійкості в таких станах набуває резонансного характеру, коли частота коливань $\theta = 2\theta_n^*/k$, або за рахунок комбінаційних резонансів, коли $\theta = (\theta_n^* + \theta_m^*)/k$. Тут θ_n^* - власні частоти вільних лінійних коливань, k - ціле число. В деяких випадках, коли для побудови таких відрізків графіків необхідно було суттєво зменшувати крок по частоті коливань, що викликало значні обчислювальні затрати, вони будувались на основі апроксимації кривих (ці випадки

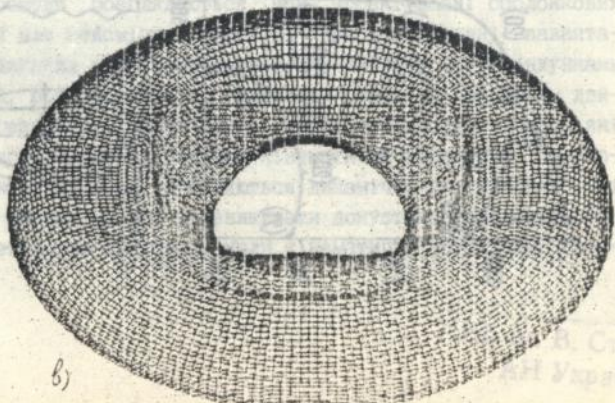
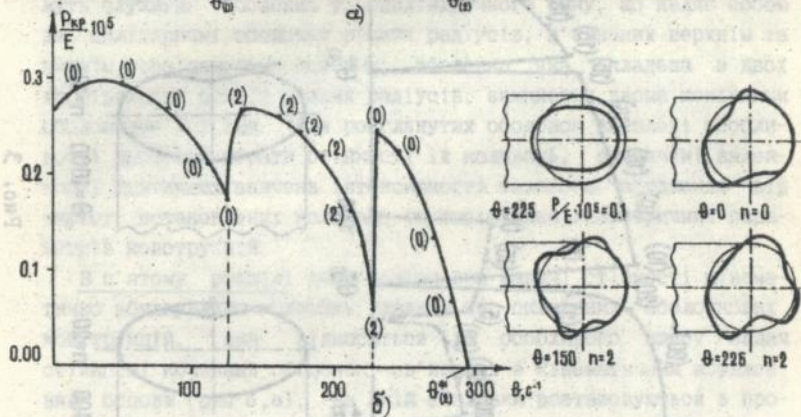
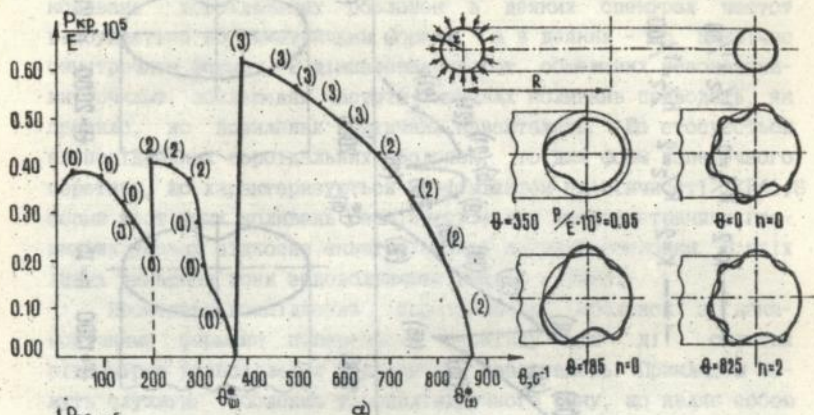
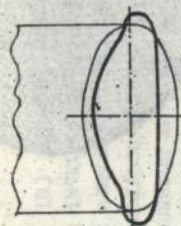
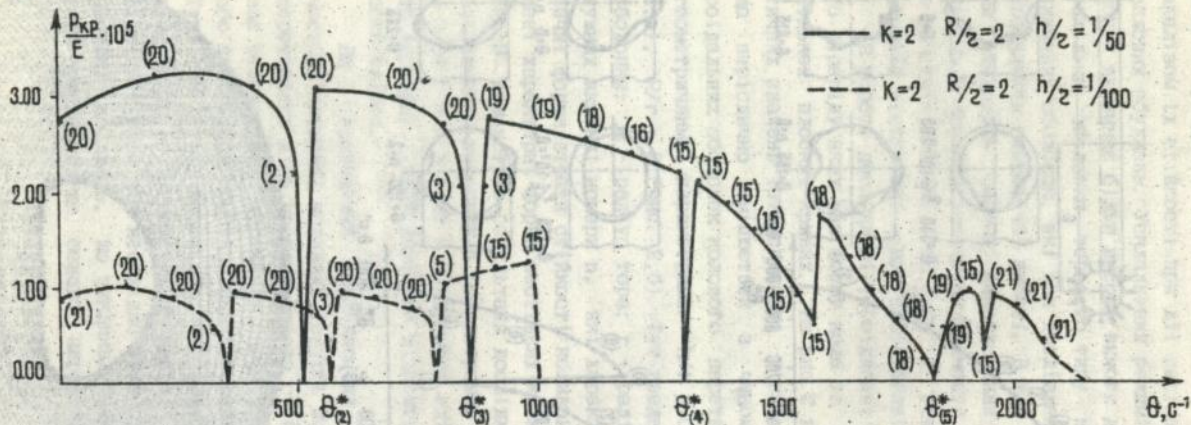
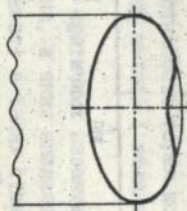


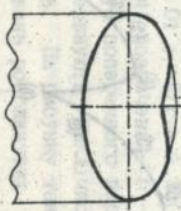
Рис. 2



$\theta=400 \quad n=20$
 $P/E \cdot 10^5 = 2.00$



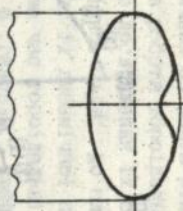
$\theta=400 \quad n=20$



$\theta=1000 \quad n=19$



$\theta=1300 \quad n=15$



$\theta=2000 \quad n=21$

Рис. 3

помічені пунктирними лініями).

Результати дослідження засвідчують, що втрата стійкості коливань тороїдальних оболонок в деяких спектрах частот відбувається по симетричним формам, а в деяких - по циклічно симетричним формам. В діапазонах частот, обмежених резонансними точками, збільшення частоти змушених коливань приводить, як правило, до пониження критичних навантажень. Що стосується еліпсоїдальних тороїдальних оболонок, то для форм поперечного перетину, що характеризуються коефіцієнтом еліптичності $1 < K < 1,8$ форми нестійких коливань реалізуються при кососиметричних граничних умовах відносно екваторіальної площини оболонки. В усіх інших випадках вони задовольняють умовам симетрії.

Проведено дослідження тороїдальних оболонок з неканонічними формами поперечного перетину при дії силових рівномірно розподілених періодичних навантажень. Прикладом можуть служити: оболонка тороциліндричного баку, що являє собою дві циліндричні оболонки різних радіусів, з'єднаних верхнім та нижнім тороїдальними поясами; оболонка, яка складена з двох тороїдальних поясів різних радіусів, замкнених двома кінцевими оболонками і т. інш. Для розглянутих оболонок виявлені особливості процесів втрати стійкості їх коливань, визначені залежності критичних значень інтенсивності силового збудження від частот встановлених коливань та варіювання геометричних параметрів конструкцій.

В п'ятому розділі дана постановка задачі стійкості кінематично збуджуваних коливань гладких та складених оболонкових конструкцій, яка відноситься до особливого класу задач стійкості коливань оболонок, зв'язаних з кінематичним збудженням основи (рис 6, а), на якій оболонки розташовуються в процесі експлуатації. Як один з видів динамічного навантаження, вібрації основи розглядаються при проектуванні оболонкових конструкцій для сейсмічних районів, при дослідженні навантажень, викликаних транспортуванням, у зв'язку із розрахунками конструкцій, розташованих на загальній основі з працюючим двигуном. В результаті прискореного переміщення опор, через які оболонці передається вібраційне кінематичне збудження, в оболонкових конструкціях з'являються динамічні напруження, які при деяких умовах можуть перевищувати допустимі значення. Це відбувається у тих випадках, коли кінематично збуджувані коли-

вання оболонок набувають резонансного характеру чи втрачають стійкість, в результаті чого швидко нарастає амплітуда змущених коливань, або відбувається зміна форм коливань. Оскільки кінематично збуджувані сили інерції, що діють на оболонку, прямо пропорційні квадрату частоти, з її збільшенням несуча здатність оболонки швидко падає. Тому при кінематичних збудженнях коливань оболонок задача дослідження їх стійкості набуває значної актуальності.

Ще одна особливість теоретичного вивчення коливань оболонок, що кінематично збуджуються, полягає в тому, що на відміну від випадку силового збудження, в результаті якого провідну роль грають, як правило, сили інерції, направлені по нормалі до серединної поверхні оболонки, при коливаннях оболонки, розташованої на несучому тілі, виникають сили інерції, напрямки яких в різних точках оболонки мають різну орієнтацію. Це приводить до того, що форми кінематично збуджуваних коливань оболонок помітно відрізняються від форм коливань тих же оболонок при дії силових навантажень. В результаті цього стає неможливим нехтування в рівняннях руху сил інерції в тангенціальних напрямках, як це традиційно робиться у випадках силового збудження коливань, і необхідно розглядати повну систему рівнянь динаміки.

В дисертаційній роботі робиться припущення, що оболонка жорстко закріплена на основі, рух якої є періодично поступальним і відбувається в паралельному осі симетрії оболонки напрямку. Для цього випадку формулюються рівняння нелінійних коливань осесиметричних оболонок при поступальному вібраційному русі зв'язаної з нею основи. Введено інерціальну систему координат O, X, Y, Z , та рухому систему координат $OXYZ$. Рух кожного елемента оболонки вважається складним. Рух системи координат $OXYZ$ відносно інерціальної системи O, X, Y, Z є переносним, а рух оболонки в системі $OXYZ$ - відносним. Нехай закон руху основи в інерціальній системі координат задається співвідношенням:

$$\vec{z}_0 = H \cos \theta t \vec{k}, \quad (15)$$

В такому випадку рівняння руху елемента оболонки матимуть

вигляд:

$$\frac{\partial \sqrt{a} \vec{T}^\alpha}{\partial x^\alpha} + \sqrt{a} \chi h (H \theta^2 \cos \theta t \vec{k}_1 - \ddot{x} \vec{i} - \ddot{y} \vec{j} - \ddot{z} \vec{k}) = 0,$$

$$\frac{\partial \sqrt{a} \vec{M}^\alpha}{\partial x^\alpha} + [\vec{e}_\alpha \times \vec{T}^\alpha] \sqrt{a} = 0, \quad \alpha = 1, 2. \quad (16)$$

Використовуючи розроблену в роботі методику побудови періодичних розв'язків системи рівнянь (16) та аналізу їх стійкості, проведено аналіз кінематично збуджуваних коливань широкого класу оболонок. На рис. 4, б приведені результати дослідження складених торосферичних оболонок двох типів, за допомогою яких моделювалось відхилення геометрії еліпсоїдальної оболонки, що має однакові значення великої і малої напівосей та товщини. Пунктирна лінія характеризує залежність критичних значень амплітуди кінематичного збудження від частоти коливань для еліпсоїдальної оболонки, крива I - для торосферичної оболонки з відношенням $R_T/R = 0,25$; крива II - для оболонки з відношенням $R_T/R = 0,4$. Аналіз результатів засвідчує, що втрата стійкості еліпсоїда реалізується через граничну точку із збереженням осрової симетрії поверхні. Втрата стійкості коливань торосферичних оболонок відбувається через біфуркаційні точки із зміною форм коливань на циклічно симетричні, як слідує із рис. 4, в, г, на яких зображені діаграми стаціонарних станів торосферичних оболонок. В межах однієї частоти збільшення відношення R_T/R спричиняє зменшення величин критичних амплітуд.

Аналогічне дослідження проведено для циліндричних оболонок, з'єднаних по одному із торців з віброуючою основою, а на іншому торці замкнених сферичними, еліпсоїдальними і торосферичними (рис. 5, а, б, в) кришками.

Можна відзначити загальний для даного класу задач ефект, який полягає в тому, що при збільшенні частоти коливань стійкість оболонок помітно зменшується, а із зменшенням частоти коливань до нуля критична амплітуда необмежено зростає.

Як приклад дослідження реального будівельного об'єкту, в роботі приведені результати розрахунку оболонки градирні при дії навантаження від власної ваги, рівномірно розподіленого

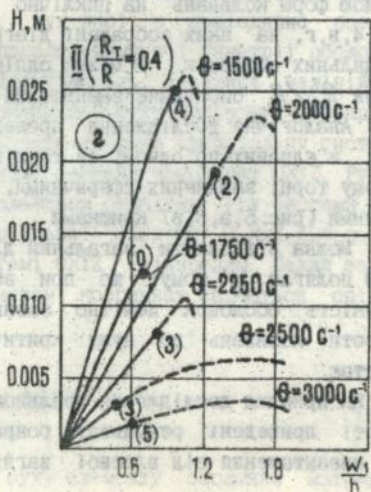
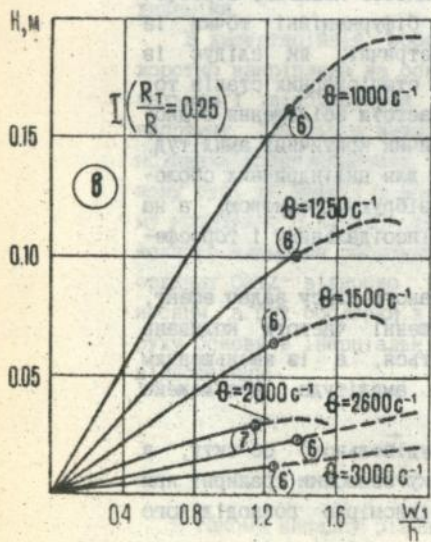
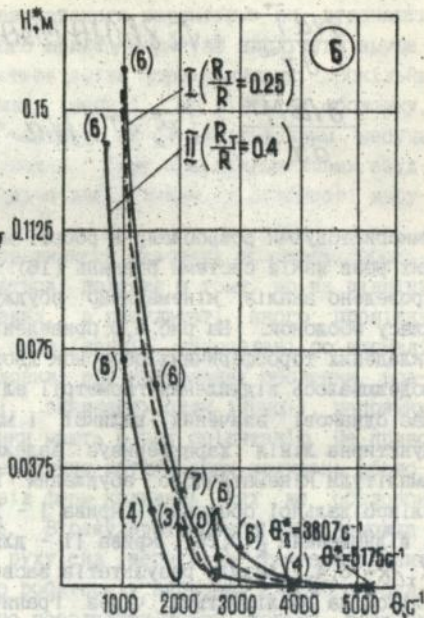
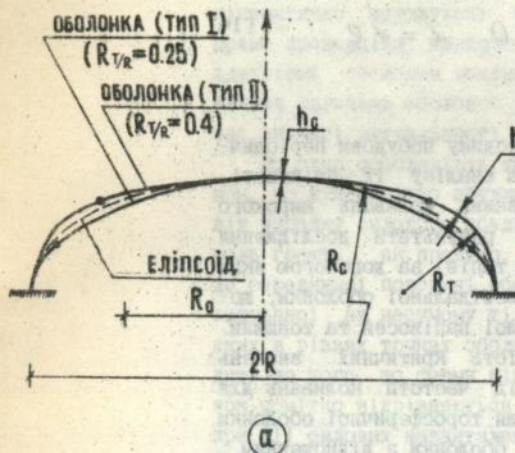
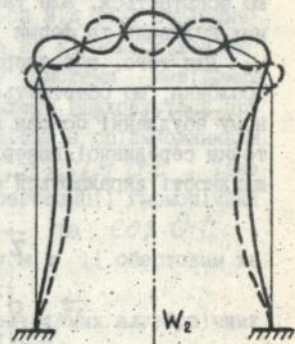
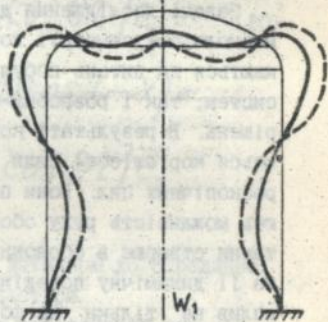
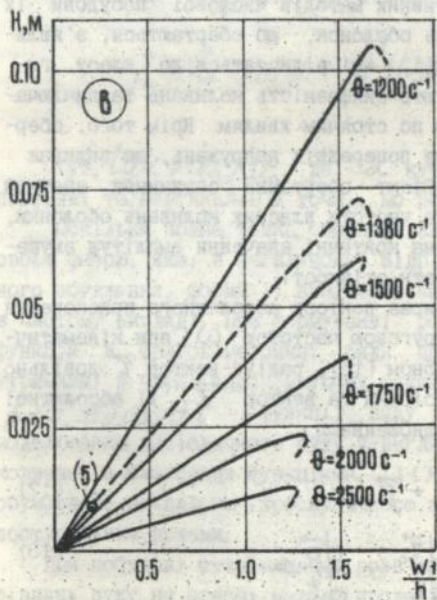
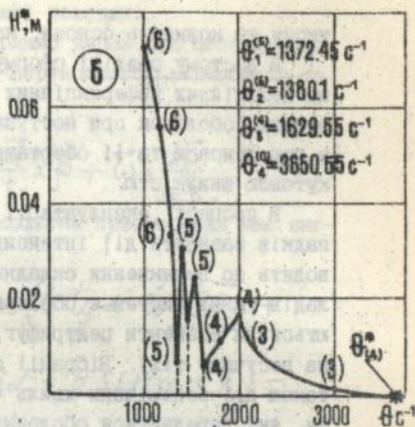
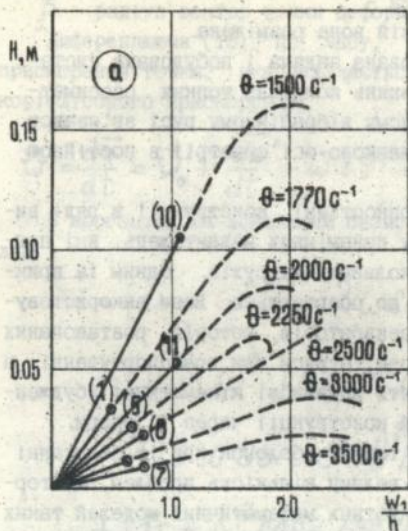


Рис. 4



2 $\theta = 3500 \text{ c}^{-1}$

Рис. 5

тиску та коливань основи, на якій вона розміщена.

В шостому розділі сформульована задача і побудована система нелінійних диференціальних рівнянь коливань тонких осесиметричних оболонок при поступальному вібраційному русі зв'язаню з нею основою та її обертанні навколо осі симетрії з постійною кутовою швидкістю.

В процесі експлуатації тонкостінні конструкції в ряді випадків зазнають дії інтенсивних динамічних навантажень, які приводять до виникнення складних коливальних рухів. Одним із прикладів таких систем є оболонки, що обертаються. Вони використовуються як елементи центрифуг, сепараторів, роторів, розташованих на несучому тілі. Вібрації основи, струси при транспортуванні, а також дії сейсмічних хвиль чинять додаткові кінематичні збудження, які передаються оболонковій конструкції через її опори.

Задачі дослідження динаміки тонких оболонок при їх обертанні навколо осі симетрії порушують велику кількість проблем, що торкаються як питань побудови адекватних математичних моделей таких систем, так і розробки ефективних методів числової побудови їх рішень. В результаті коливань оболонок, що обертаються, з'являються коріолісові сили інерції, які відносяться до класу гірскопічних сил. Вони порушують синфазність коливань та виключають можливість руху оболонки по стоячим хвилям. Крім того, обертання створює в оболонці поле попередніх напружень, що впливає на її динамічну поведінку. Ефект обертання спричиняє значний вплив не тільки на форми та частоти власних коливань оболонки, що обертається, але також і на критичні значення амплітуд змушених коливань та форми їх втрати стійкості.

Для того, щоб одержати вираз вектору абсолютного прискорення оболонки, що обертається з круговою частотою ω , при кінематичному збудженні основи за законом (15), радіус-вектор \vec{r} довільної точки серединної поверхні оболонки та вектор \vec{V} її абсолютної швидкості виражаються співвідношеннями

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{\rho}; \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \vec{V} &= \frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{d\vec{r}_0}{dt} + \frac{d\vec{\rho}}{dt} = \\ &= \vec{V}_0 + \vec{V}^z + \vec{\omega} \times \vec{\rho}. \end{aligned} \quad (18)$$

де \vec{r}_0 - радіус-вектор початку координат системи OXYZ (рис. 6, а);
 $\vec{\rho}$ - радіус-вектор точки деформованої поверхні.

Диференцюючи (18) по часу, одержимо вираз для абсолютного прискорення точки, яке складається з переносного, відносного та коріолісового прискорення:

$$\vec{W} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{W}_0 + \frac{d\vec{v}^z}{dt} + \vec{\omega} \times \vec{v}^z + \frac{d\vec{\omega}}{dt} \times \vec{\rho} + \vec{\omega} \times \frac{d\vec{\rho}}{dt}. \quad (19)$$

В проєкціях на локальний базис абсолютне прискорення має вигляд:

$$\begin{aligned} \vec{W} = & [\ddot{u} - \omega^2 u + 2\omega \cos \alpha (\dot{v} \operatorname{tg} \alpha - \dot{w})] \vec{e}_1 + \\ & + [\ddot{v} + \omega^2 \sin \alpha (\omega \cos \alpha - v \sin \alpha + x) - \\ & - 2\omega \dot{u} \sin \alpha + \theta^2 H \cos \alpha \cos \theta t] \vec{e}_2 + \quad (20) \\ & + [\ddot{w} + \omega^2 \cos \alpha (v \sin \alpha - \omega \cos \alpha - x) + \\ & + 2\omega \dot{u} \cos \alpha + \theta^2 H \sin \alpha \cos \theta t] \vec{e}_3. \end{aligned}$$

Тут $\operatorname{tg} \alpha = dx/dz$, де α кут між дотичною до серединної поверхні та вертикаллю в точці, що розглядається.

Оскільки кожна точка оболонки виконує періодичний рух із своєю фазою, яка, в загальному, відрізняється від фази періодичного збудження, форма її вимушених коливань не є стоячою хвилею в чистому вигляді. При формуванні розкладу системи невідомих функцій в тригонометричні ряди цей фактор враховується при утриманні в числі апроксимуючих функцій нарівні з співмножниками $f_1(x', x'') \cos \theta t$ функції виду $f_2(x', x'') \sin \theta t$. Таке моделювання періодичного руху у вигляді суперпозиції гармонічних коливань з базисними функціями $\sin \theta t$ та $\cos \theta t$ обумовлене наявністю гіроскопічного зв'язку між її обертовим та поступальним рухами.

При побудові стаціонарних розв'язків нелінійних алгебраїчних рівнянь руху на основі методу продовження розв'язку по параметру для цього випадку вводяться два параметри λ_1 та λ_2 , а

рівняння руху набувають вигляду

$$\frac{d^2 \vec{u}}{dt^2} + \vec{F}(\vec{u}) = \lambda_1 \omega^2 (\vec{u} + \vec{x}) + 2\vec{\omega} \times \frac{d\vec{u}}{dt} + \lambda_2 H \theta^2 \cos \theta t \vec{k}, \quad (21)$$

За допомогою параметру λ_1 , на першому етапі дослідження варіюється значення квадрату кругової частоти обертання, а за допомогою λ_2 - значення амплітуди кінематичного збудження H , що здійснюється на другому етапі дослідження.

На основі розробленої методики одержано розв'язки задач про власні коливання оболонок, що обертаються, канонічної форми та складених із окремих фрагментів. На рис. 6,б показані залежності частот власних коливань конічної оболонки від кутової швидкості обертання. На графіках відмічені номери окружних гармонік, що характеризують форми коливань. Із збільшенням ω величини власних частот коливань ростуть і при деяких ω відбувається обмін формами коливань. На рис. 6,в приведені криві залежностей критичних амплітуд від частоти коливань оболонки при різних величинах швидкості обертання, що свідчить про збільшення H^* при наростанні ω . Форма вимушених нестійких коливань конічної оболонки при $\omega = 500 \text{ с}^{-1}$ та $\theta = 2000 \text{ с}^{-1}$ демонструється на рис. 6,г.

Як приклад розрахунку комбінованої оболонкової конструкції в рамках даної постановки задачі розглянуто циліндричні оболонки, з'єднані з кришками еліпсоїдальної та торосферичної форм. Результати дослідження спектру нижчих частот та відповідних форм власних коливань оболонки з еліпсоїдальною кришкою приведені на рис. 7,а. Припускається, що оболонка жорстко прикріплена до основи, що обертається. Виявлено, що обертання системи суттєво впливає на частоти і відповідні форми власних коливань. Так, наприклад, при відсутності обертання ($\omega = 0$) низша частота $\theta_{(9)}^* = 1870 \text{ с}^{-1}$ відповідає коливанням з дев'ятью хвилями в окружному напрямку. При збільшенні швидкості обертання значення власних частот збільшуються. Для $\omega = 360 \text{ с}^{-1}$ відбувається обмін формами коливань, що відповідають першій та другій нижчим частотам. Кількість окружних хвиль в даному випадку дорівнює двом.

Залежності критичного значення амплітуди кінематичного збудження від частоти для різних величин ω відображені на рис. 7,б

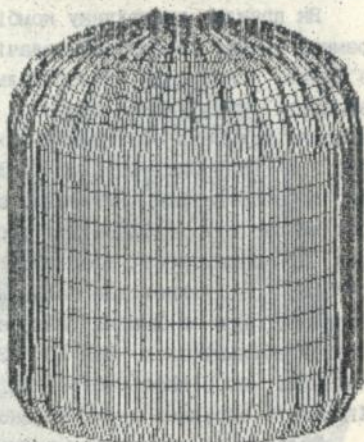
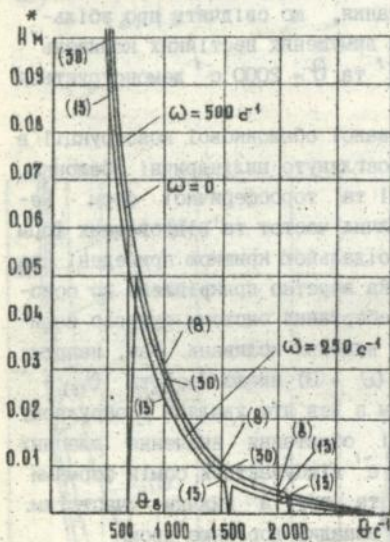
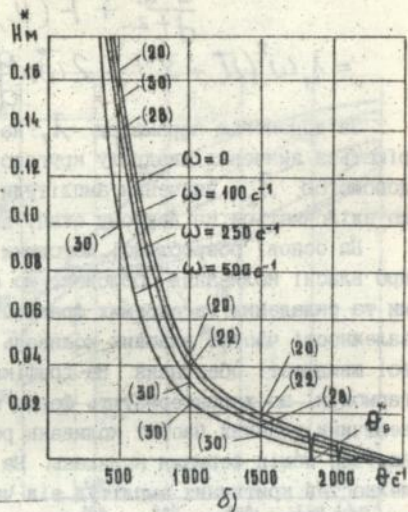
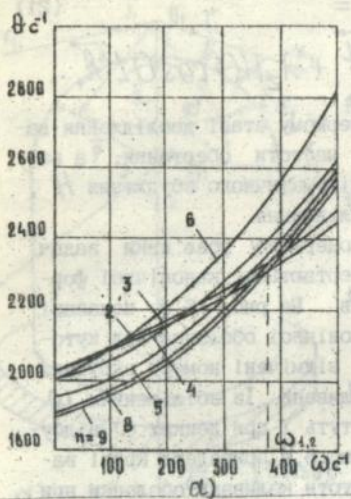


Рис. 7

звідки слідує, що несуча здатність конструкції падає із збільшенням кутової швидкості обертання, номери колових гармонік зростають. При відсутності обертання ($\omega=0$) спостерігаються значні деформації на циліндричній частині оболонки в зоні контакту з основою, які з ростом зникають. Аналогічні результати розрахунку циліндричної оболонки з тороферичною кришкою приведені на рис. 7, в. На рис. 7, г показана форма нестійких коливань циліндричної оболонки з еліпсоїдальною кришкою.

В закінченні сформульовані основні результати та висновки, одержані в дисертаційній роботі. Вони полягають в тому, що:

1. Вперше дана постановка задачі про стійкість нелінійних вимушених коливань тонких осесиметричних оболонок при періодичних за часом збудженнях.

2. Розроблено чисельно-аналітичний метод побудови та дослідження стійкості періодичних розв'язків нелінійних диференціальних рівнянь, що описують вимушені встановлені коливання оболонок при силових та кінематичних збудженнях. Методика розв'язку базується на синтезі методів тензорного аналізу, процедури проектування з допомогою тригонометричних базисних функцій, спеціальної модифікації методу кінцевих різниць та методу продовження розв'язку по параметру.

3. На основі розробленої методики створено автоматизований проблемно-орієнтований обчислювальний комплекс, що реалізує на ЕОМ числові алгоритми розв'язків задач стійкості вимушених коливань оболонок при довільних граничних умовах.

4. Розв'язаний широкий клас задач стійкості вимушених нелінійних коливань симетричних оболонок при силових гармонійних збудженнях. Досліджена стійкість коливань замкнутих еліпсоїдальної та тороферичної оболонок, циліндричних оболонок з еліпсоїдальними та тороферичними кришками. Одержані розв'язки задач стійкості коливань тороїдальних оболонок кругового та еліптичного перерізу, а також складених оболонкових конструкцій, набраних із циліндричних та конічних фрагментів та кільцевих пластин, сполучених тороїдальними поясами різних радіусів.

5. Дана постановка задачі стійкості кінематично збуджуваних коливань оболонкових конструкцій, розташованих на основі, що періодично рухається. Розглянуті сферичні та еліпсоїдальні сегменти, тороферичні оболонки, циліндричні ре-

аервуари із сферичними, еліпсоїдальними та торосферичними кришками. Визначені критичні амплітуди кінематичного збудження в залежності від геометричних співвідношень та частот коливань.

6. Сформульована задача стійкості кінематично збуджуваних коливань оболонок, що обертаються. Вивчені параметри власних та вимушених коливань в залежності від швидкості обертання для циліндричної оболонки, зрізаного конуса, сферичного, еліпсоїдального та торосферичного сегментів, циліндричних оболонок з сферичною, еліпсоїдальною та торосферичною кришками. Для розглянутих об'єктів знайдені критичні амплітуди збудження, побудовані форми коливань в докритичних та критичних станах.

7. Питання достовірності та працездатності побудованої методики вирішуються шляхом використання обгрунтованої геометрично нелінійної моделі динамічного деформування тонких оболонок та задоволення умовам збіжності результатів при використанні числових методів. На прикладі розв'язку ряду задач та порівнянні одержаних результатів з даними інших авторів та аналітичними розв'язками демонструється обгрунтованість математичних моделей процесів, що досліджуються, та достовірність отриманих результатів.

Основний зміст дисертації опубліковано в роботах:

1. Гоцуляк Е. А., Гуляев В. И., Дехтярж Е. С., Киричук А. А. Численное исследование устойчивости нелинейных вынужденных колебаний тонких оболочек // Прикладные проблемы прочности и пластичности. - Горький, 1981
2. Гоцуляк Е. А., Гуляев В. И., Дехтярж Е. С., Киричук А. А. Устойчивость нелинейных колебаний оболочек вращения // Прикладная механика. - Киев, т. 18, № 6, 1982
3. Гоцуляк Е. А., Киричук А. А. Исследование динамической устойчивости оболочек на основе метода редукции базиса // Тезисы докладов II Всесоюзного симпозиума "Устойчивость в механике деформируемого тела". - Калинин, 1986.
4. Гоцуляк Е. А., Киричук А. А. Метод редукции базиса в задаче о динамическом проследживании упругих оболочек // Прикладные проблемы прочности и пластичности. - Горький, вып. 37, 1987.
5. Гоцуляк Е. А., Киричук А. А. Об устойчивости переходных процессов в оболочках сложной формы // Прикладная механика. - т. 24, № 6, 1988.
6. Гоцуляк Е. А., Киричук А. А., Жадрасинов Н. Т. Устойчивость

гибкой составной оболочки вращения // Сопротивление материалов и теория сооружений. - Киев, 1982. - Вып. 41.

7. Гуляев В. И., Киричук А. А. Эффект стабилизации высокочастотными колебаниями неустойчивых состояний равновесия тонких оболочек // Труды I Всесоюзного симпозиума "Нелинейная теория тонкостенных конструкций и биомеханика". - Тбилиси, 1985.

8. Гуляев В. И., Киричук А. А. Стабилизация неустойчивых состояний равновесия эллипсоидальных панелей при совместном действии статической и периодической во времени нагрузок // Тезисы докладов V Всесоюзной конференции по статике и динамике пространственных конструкций. - Киев, КИСИ. - 1985.

9. Гуляев В. И., Киричук А. А. Стабилизация состояний неустойчивого равновесия оболочек при действии ультразвуковых возмущений // Ультразвуковые колебания и их влияние на механические характеристики конструкционных материалов. - Киев, - 1986.

10. Гуляев В. И., Киричук А. А. Численное исследование устойчивости кинематически возбуждаемых оболочек вращения // Нелинейные задачи расчета тонкостенных конструкций. - Саратов, 1988.

11. Гуляев В. И., Киричук А. А. Устойчивость нелинейных колебаний выпуклых оболочек вращения при периодических кинематических возбуждениях // Современные проблемы строительной механики и прочности летательных аппаратов: Тезисы докладов III Всесоюзной конференции. - Казань, 1988.

12. Гуляев В. И., Киричук А. А. Устойчивость кинематически возбуждаемых нелинейных колебаний тонких оболочек вращения // Проблемы механики оболочек. - Калинин - 1988, С. 53-63.

13. Гуляев В. И., Киричук А. А. Устойчивость нелинейных колебаний тонких оболочек // Доклады расширенных заседаний семинара ИТМ им. Векуа. - Тбилиси. 1989, т. 4, №2.

14. Гуляев В. И., Киричук А. А. Устойчивость нелинейных колебаний тонких составных оболочек // Исследования по теории пластин и оболочек. - Казань, 1989.

15. Гуляев В. И., Киричук А. А. Устойчивость нелинейных колебаний тонких оболочек при силовых и кинематических возбуждениях // Эффективные численные методы решения краевых задач механики твердого деформируемого тела. - Харьков, 1989. С. 89-90.

16. Гуляев В. И., Киричук А. А. Устойчивость равновесия и вынужденных колебаний башни градирни при силовых и кинематических возбуждениях // Труды XVII международного конгресса по вопросам применения математики в технических науках. - Веймар, т. 5, 1990.

17. Гуляев В. И., Киричук А. А. Комплекс программ численного исследования устойчивости равновесия и нелинейных колебаний оболочек вращения // Труды XVII международного конгресса по вопросам применения математики в технических науках. - Веймар, т. 4, 1990.
18. Гуляев В. И., Киричук А. А. Устойчивость вынужденных колебаний составных оболочек вращения при звуковых частотах нагружения // Проблемы прочности. - 1990, Киев, №. С. 95 - 98
19. Гуляев В. И., Киричук А. А. Устойчивость нелинейных колебаний тороидальных оболочек // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Методы решения. - Н. Новгород. -1991 С. 70-75.
20. Гуляев В. И., Киричук А. А. Устойчивость вынужденных нелинейных колебаний торовых оболочек сложного профиля // Доклады АН УССР сер. "Механика". -1991. -N10. - С. 51-55
21. Гуляев В. И., Киричук А. А. Устойчивость оболочек резервуаров при действии вибрационных нагрузок // Тезисы докладов Межд. коллоквиума "Проблемы строительства зернохранилищ резервуарного типа. - Киев, 1991.
22. Гуляев В. И., Киричук А. А., Мруз З. А. Устойчивость вынужденных нелинейных колебаний замкнутой эллипсоидальной оболочки // Сопротивление материалов и теория сооружений. - Киев, 1988. - Вып. 53. - С. 3-6.
23. Гуляев В. И., Киричук А. А., Мруз З. А. Устойчивость нелинейных вынужденных колебаний сферических оболочечных элементов машин // Надежность и долговечность машин и сооружений. - Киев, 1989, N15. - С. 36-42.
24. Гуляев В. И., Киричук А. А., Мруз З. А. Устойчивость нелинейных колебаний замкнутых тороидальных оболочек // Прикладные проблемы механики оболочек. - Казань, 1989. - С. 29-34.
25. Гуляев В. И., Киричук А. А., Мруз З. А., Садък О. М. Устойчивость нелинейных колебаний сферических оболочек при кинематических возбуждениях // Сопротивление материалов и теория сооружений. - Киев, 1989. - Вып. 54. -С. 8-12.
26. Гуляев В. И., Киричук А. А., Садък О. М. Устойчивость нелинейных колебаний эллипсоидальных оболочек при кинематическом возбуждении // Динамика и прочность машин. - 1991, вып. 52, Харьков. С. 20-24.
27. Гуляев В. И., Киричук А. А., Лизунов П. П., Мирчевский А. В. Колебания вращающейся мембраны при нестационарных поворотах оси вращения // Проблемы прочности. - Киев, N2, 1990.
28. Гуляев В. И., Киричук А. А., Лизунов П. П., Мирчевский А. В.

Колебания вращающейся мембраны при кинематическом гармоническом возбуждении // Механика гироскопических систем. - 1991, N 10. С. 10-15

29. Гуляев В. И., Киричук А. А., Лизунов П. П., Мирчевский А. В. Динамический анализ горизонтально-пропеллерной ветроэлектрической установки // Материалы совещания "Нормирование ветровых нагрузок и расчет зданий, линий электропередачи и др. сооружений на действие ветра". - Фрунзе, 1989. С. 7-9.

30. Гуляев В. И., Киричук А. А., Ясинский В. А. Устойчивость нелинейных колебаний тонких оболочек при кинематических возбуждениях // Труды XV Всесоюзной конференции по теории пластин и оболочек. - Казань, 1990.

31. Гуляев В. И., Киричук А. А., Ясинский В. А. Устойчивость колебаний вращающейся оболочки при кинематических возмущениях ее основания // Сопротивление материалов и теория сооружений. - Киев, 1991. - Вып. 58. С.

32. Гуляев В. И., Киричук А. А., Ясинский В. А. Устойчивость кинематически возбуждаемых колебаний вращающейся сферической оболочки // Прикладная механика. - 1991, Киев Т. 27., N 9. С. 39 - 47

33. Гуляев В. И., Киричук А. А., Ясинский В. А. Устойчивость нелинейных колебаний вращающейся цилиндрической оболочки со сферической крышкой // Труды I Всесоюзной конференции "Технологические проблемы прочности несущих конструкций". - Запорожье: ЗИИ, 1991. - Т. 1, ч. 2. - С. 390-395.

34. Киричук А. А. Нелинейная устойчивость конических оболочек при действии осевой нагрузки // Сопротивление материалов и теория сооружений. - Киев, 1981. - Вып. 40.

35. Киричук А. А. Динамическая устойчивость сферических и эллипсоидальных панелей при периодических нагружениях // Тезисы докладов на III научно-технической конференции "Совершенствование эксплуатации и ремонта корпусов судов". - Калининград, 1984.

36. Киричук А. А. Влияние динамической составляющей нагрузки на устойчивость пологих сферических оболочек // Сопротивление материалов и теория сооружений. - Киев, 1985. - Вып. 45.

37. Киричук А. А. Устойчивость вынужденных колебаний торовой оболочки с поперечным квадратным сечением // Сопротивление материалов и теория сооружений. - Киев, 1991. - Вып. 59. С. 60-65

38. Киричук А. А. Устойчивость вынужденных колебаний вращающейся тороидальной оболочки // Сопротивление материалов и

теория сооружений. - Киев, -1992. - Вып. 60. С.

39. Киричук А. А., Гбену А. О. Устойчивость нелинейных колебаний тороидальной оболочки эллиптического сечения // Сопrotивление материалов и теория сооружений. - Киев, 1990. - Вып. 57. С. 28-32.

40. Киричук А. А., Кошелев В. А. Динамический расчет тонкой предварительно напряженной параболической оболочки // Сопrotивление материалов и теория сооружений. - Киев, 1984. - Вып. 44.

41. Киричук А. А., Мруз З. А. Стабилизация статически неустойчивых состояний нелинейной механической системы при действии периодических возмущений // Сопrotивление материалов и теория сооружений. - Киев, 1987. - Вып. 50.

42. Киричук А. А., Мруз З. А., Садык О. М. Устойчивость нелинейных вынужденных колебаний тонкостенных оболочек вращения // Краевые задачи математической физики. - Киев, 1990.

43. Киричук А. А., Мирчевский А. В. Колебания вращающейся мембраны при плоских периодических поворотах ее оси // Сопrotивление материалов и теория сооружений. - Киев, 1989. - Вып. 55. - С. 24-28.

44. Киричук А. А., Лизунов П. П., Мирчевский А. В. Колебания мембран, совершающих сложное вращение при импульсном нагружении // Сопrotивление материалов и теория сооружений. - Киев, 1990. - Вып. 56. С. 11-15.

Подп. к печ. 11.10.93

Формат 60×84¹/₁₆.

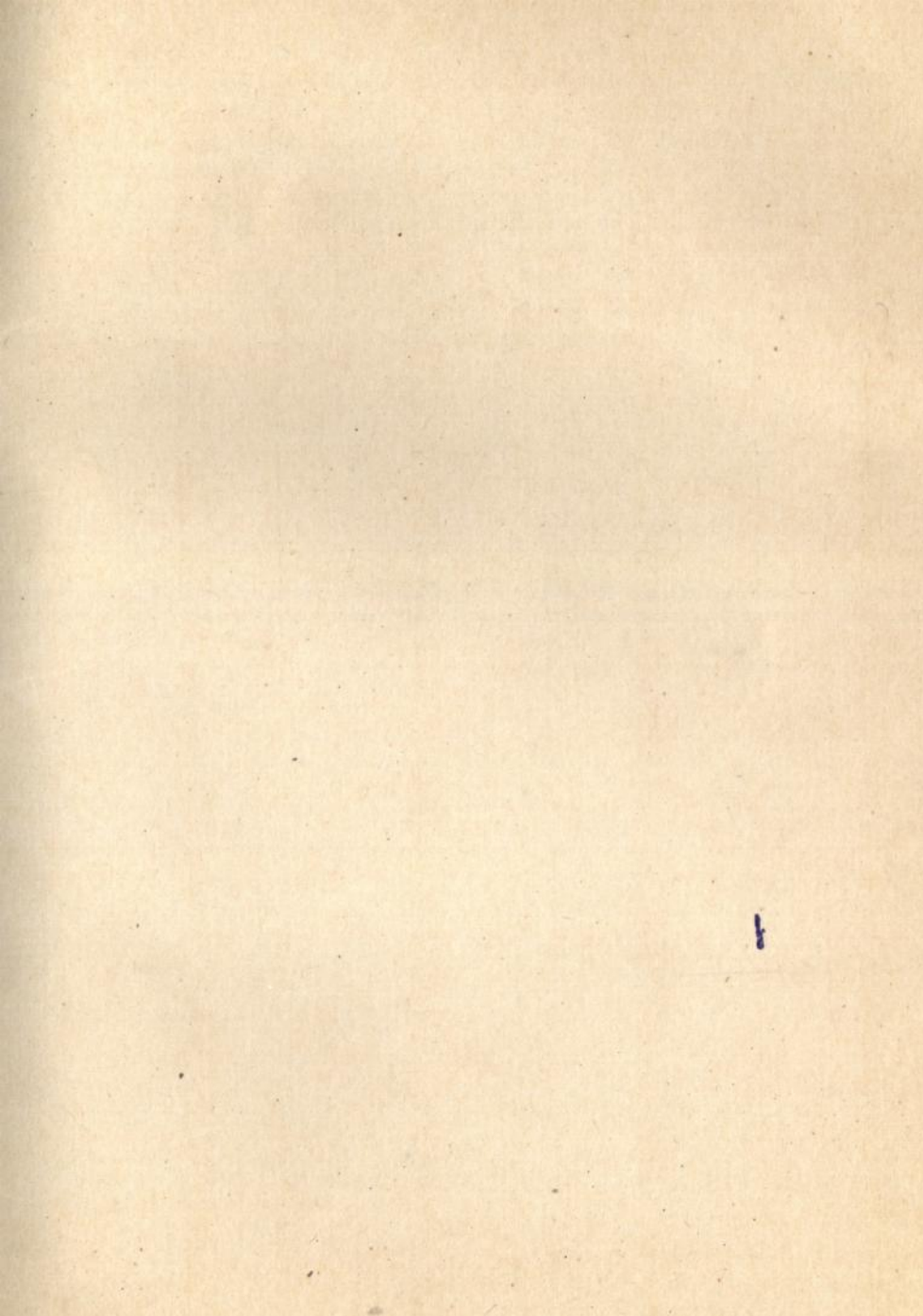
Бумага тип. № 3. Способ печати офсетный. Услови. печ. л. 186.

Услови. кр.-отт. 2,09. Уч.-изд. л. 1,0

Тираж 100. Зак. № 5908. Бесплатно.

Фирма «ВИПОЛ»

252151, г. Киев, ул. Волинская, 60.



Безплатно

AB 28.305
AB 28.305