

УДК 539.3
UDC 539.3

ХВИЛЬОВІ ПРОЦЕСИ В СИСТЕМІ ЦИЛІНДРИЧНА ОБОЛОНКА – ДВОШАРОВЕ ГРУНТОВЕ СЕРЕДОВИЩЕ

Мейш В.Ф., доктор фізико-математичних наук, Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України, Київ, Україна, vfmeish@gmail.com, orcid.org/0000-0003-4141-7008

Мейш Ю.А., доктор технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, juliameish@gmail.com, orcid.org/0000-0001-7492-700X

THE WAVES PROSESSES OF THE SYSTEM CYLINDRICAL SHELL – TWOLAYERED SOIL MEDIA

Meish V.F., Doctor of Science (Physics and Mathematics), S.P. Timoshenko Institute of Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, vfmeish@gmail.com, orcid.org/0000-0003-4141-7008

Meish Yu.A., Doctor of Science (Technology), National Transport University, Kyiv, Ukraine, juliameish@gmail.com, orcid.org/0000-0001-7492-700X

ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ ОБОЛОЧКА – ДВУСЛОЙНАЯ ГРУНТОВАЯ СРЕДА

Мейш В.Ф., доктор физико-математических наук, профессор, Институт механики им. С.П. Тимошенко НАН Украины, Киев, Украина, vfmeish@gmail.com, orcid.org/0000-0003-4141-7008

Мейш Ю.А., доктор технических наук, доцент, Национальный транспортный университет, Киев, Украина, juliameish@gmail.com, orcid.org/0000-0001-7492-700X

Постановка проблеми.

Питанням взаємодії деформівних тіл з навколишнім середовищем при нестационарних навантаженнях присвячено значне число робіт. Взаємодія деформівних оболонок з ґрунтовими середовищами розглянуто в роботах [1 - 3]. Перепони, що деформуються виконують роль гасителя нестационарних хвиль і в певній мірі захищає ґрунтове середовище від пошкоджень. В деяких випадках використання деформівних перешкод дозволяє регулювати величину та характер нестационарного впливу на ґрунтове середовище [4]. Отримані закономірності протікання хвильових процесів у вказаних структурах дозволяють прогнозувати їх динамічну поведінку та можуть використовуватися при побудові більш простих математичних моделей для дослідження об'єктів типу оболонка – ґрунт, оболонка на пружній основі і т. д. [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Як показує літературний огляд по темі дослідження, в цьому напрямку слід відмітити роботи по динамічній поведінці циліндричних оболонок на пружній основі Вінклера при нестационарних навантаженнях (випадок осесиметричних коливань) [2]. При цьому досліджено нестационарні коливання оболонок при визначенні напружено – деформованого стану оболонок на пружній основі. Задачі стійкості механічних систем з односторонніми зв'язками розглянуто в роботі [5] (випучування кругового кільця в пружному середовищі, стійкість циліндричної оболонки при взаємодії з пружним середовищем і т. д.). Практично відсутні дослідження для випадку коливань оболонок з врахуванням дії навколишнього середовища в рамках тривимірної теорії пружності (ґрунтове середовище і т. д.) [6]. Нижче приведено випадок задачі про коливання циліндричних оболонок при взаємодії з двошаровим ґрунтовим середовищем при нестационарних навантаженнях.

Метою роботи є дослідження хвильових процесів системи циліндрична оболонка – двошарове ґрунтове середовище при нестационарних навантаженнях.

Виклад основного матеріалу.

Розглядаються хвильові процеси в нескінченній підкріпленій порожнині в двошаровому ґрунтовому середовищі. Покладається, що до внутрішньої підкріплюючої оболонки при $r = r_0$ прикладене розподілене імпульсне навантаження $P_3(t)$. Рівняння коливань підкріплюючої тонкої циліндричної оболонки радіуса R і товщиною h має вигляд

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

де $P_3(t)$ - навантаження на внутрішню поверхню оболонки; $P_r(t)$ - тиск ґрунту на оболонку; u_3 - радіальне переміщення оболонки; ρ_{sh} , E , ν - фізико-механічні параметри матеріалу оболонки.

Для опису поведінки шарів ґрунтового середовища використовується модель нелінійного рідкого багатокомпонентного середовища, згідно роботи [4, 7]. Рівняння стану даної моделі записуються у вигляді

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

де $\chi_i = 1/\gamma_i$, γ_i - показник ізентропи i -ої компоненти середовища.

Для рівняння стану трикомпонентного середовища (водонасиченого ґрунту) (2) введено наступні позначення: α_i - вміст по об'єму компонент; ρ_{i0} - густина; V_{i0} - їх питомий об'єм; c_{i0} - швидкість звуку в компонентах при атмосферному тиску P_0 ; i - номер компоненти (1 - повітря, 2 - рідина, 3 - тверді частинки). При тиску $P = P_0$ густина середовища ρ_0 та питомий об'єм V_0 визначаються згідно формул:

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

Характеристики кожного шару визначаються відповідними величинами α_i , ρ_{i0} . Рух двошарового ґрунтового середовища для випадку розповсюдження циліндричних хвиль описується системою рівнянь в ейлерових координатах [8]

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho U) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r(\rho U^2 + P)] - \frac{1}{r} P &= 0, \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r(\rho U)] &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

В рівняннях (3) - r - просторова координата, t - часова координата, U - швидкість, ρ - густина, P - тиск.

Рівняння руху ґрунтового середовища (3) доповнюються рівняннями стану (2) вигляду $F(P, \rho) = 0$, де

$$F(P, \rho) = \sum_{i=1}^3 \alpha_i \left[\frac{\gamma_i (P - P_0)}{\rho_{i0} c_{i0}^2} + 1 \right]^{-1/\gamma_i} - \frac{\rho_0}{\rho}. \quad (4)$$

Зв'язаність задачі взаємодії оболонка - ґрунтове середовище забезпечується наданням умов непротікання на деформівній поверхні контакту оболонка - ґрунтове середовище

$$\dot{u}_3 = U_r, \quad (5)$$

де U_r - швидкість границі ґрунтового середовища.

За граничні умови для задач динаміки ґрунтового середовища приймаються рівняння (1), (5) при $r = r_0$ і умови незбуреного руху на нескінченності. На границі контакту ґрунтів з різними густинами задаються умови неперервності швидкості.

Алгоритм розв'язку задачі про розповсюдження циліндричних хвиль в ґрунтовому середовищі (рівняння (3) - (4)) базується на використанні скінченно - різницевої схеми Мак-Кормака [2, 9].

На кроці предиктор різницеві рівняння мають вигляд :

$$\begin{aligned} \tilde{\rho}_k &= \rho_k^n - \frac{\tau}{r_k} \left[\frac{(r \rho^n U^n)_{k+1} - (r \rho^n U^n)_k}{\Delta r} \right], \\ (\tilde{\rho} \tilde{U})_k &= (\rho^n U^n)_k - \frac{\tau}{r_k} \left\{ \frac{[r(\rho U^2 + P)^n]_{k+1} - [r(\rho U^2 + P)^n]_k}{\Delta r} - P_k^n \right\}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$F(\tilde{P}_k, \tilde{\rho}_k) = 0.$$

На кроці коректор рівняння записуються наступним чином:

$$\rho_k^{n+1} = 0,5 \left\{ \rho_k^n + \tilde{\rho}_k - \frac{\tau}{r_k} \left[\frac{(r\tilde{\rho}\tilde{U})_k - (r\tilde{\rho}\tilde{U})_{k-1}}{\Delta r} \right] \right\}, \quad (7)$$

$$(\rho U)_k^{n+1} = 0,5 \left\{ (\rho^n U^n)_k + (\tilde{\rho}\tilde{U})_k - \frac{\tau}{r_k} \left[\frac{[r(\tilde{\rho}\tilde{U}^2 + \tilde{P})]_k - [r(\tilde{\rho}\tilde{U}^2 + \tilde{P})]_{k-1}}{\Delta r} - \tilde{P}_k \right] \right\},$$

$$F(P_k^{n+1}, \rho_k^{n+1}) = 0.$$

Для знаходження величини тиску P по заданим значенням густини ρ в рівнянні (4) застосовується ітераційна процедура Ньютона – Рафсона. Враховуючи, що різницева схема Мак – Кормака (6), (7) є явною, то при розрахунках використовується умова стійкості різницевої схем вигляду: $(U + c)\tau / \Delta r < 1$, де величина c відповідає локальній швидкості звуку [8, 9].

Результати досліджень.

При розрахунках покладалося, що підкріплююча циліндрична оболонка має наступні параметри: радіус - $R = 0,15$ м; h - товщина оболонки; $R/h = 10$; модуль Юнга матеріалу оболонки - $E = 210$ ГПа; коефіцієнт Пуассона - $\nu = 0,3$; густина - $\rho = 7,88 \cdot 10^3$ кг/м³.

Навантаження $P_3(t)$, що прикладалося до внутрішньої поверхні оболонки при $r = r_0$, задавалося наступною залежністю $P_3(t) = A \sin \frac{\pi t}{T} [\eta(t) - \eta(t - T)]$, де $A = 10^6$ Па; $T = 50 \cdot 10^{-6}$ с, $\eta(t)$ - функція Хевісайда.

В розрахунках покладалися наступні параметри для формули (2) шарів ґрунтових середовищ: $\rho_2 = 10^3$ кг/м³, $\rho_3 = 2650$ кг/м³; $\gamma_2 = 7$; $\gamma_3 = 4$; $c_{20} = 1500$ м/с; $c_{30} = 4500$ м/с.

Проведено розрахунки для випадків різного вмісту по об'єму компонент шарів ґрунтового середовища.

1) Перший шар ґрунтового середовища при $r_0 \leq r \leq 2r_0$ ($r_0 = 0.1$) з параметрами $\alpha_1 = 0$; $\alpha_2 = 0,2$; $\alpha_3 = 0,8$. Для другого шару при $2r_0 \leq r \leq \infty$ покладалося: $\alpha_1 = 0$; $\alpha_2 = 0,65$; $\alpha_3 = 0,35$.

2) Для першого шару: $\alpha_1 = 0$; $\alpha_2 = 0,3$; $\alpha_3 = 0,7$, для другого: $\alpha_1 = 0$; $\alpha_2 = 0,65$; $\alpha_3 = 0,35$.

3) Для першого шару: $\alpha_1 = 0$; $\alpha_2 = 0,4$; $\alpha_3 = 0,6$, для другого: $\alpha_1 = 0$; $\alpha_2 = 0,65$; $\alpha_3 = 0,35$.

4) Для першого шару: $\alpha_1 = 0$; $\alpha_2 = 0,8$; $\alpha_3 = 0,2$, для другого: $\alpha_1 = 0$; $\alpha_2 = 0,35$; $\alpha_3 = 0,65$.

5) Для першого шару: $\alpha_1 = 0$; $\alpha_2 = 0,7$; $\alpha_3 = 0,3$, для другого: $\alpha_1 = 0$; $\alpha_2 = 0,35$; $\alpha_3 = 0,65$.

6) Для першого шару: $\alpha_1 = 0$; $\alpha_2 = 0,6$; $\alpha_3 = 0,4$, для другого: $\alpha_1 = 0$; $\alpha_2 = 0,35$; $\alpha_3 = 0,65$.

В перших трьох випадках перший шар представляє собою більш щільне ґрунтове середовище, другий шар – менш щільне ґрунтове середовище. У випадках 4) – 6) навпаки.

На рис. 1 – 3 приведені залежності хвилі тиску P по просторовій координаті r в деякі моменти часу. На рис. 1 приведені залежності вхідної хвилі тиску P по просторовій координаті. Криві 1 - 3 відповідають випадкам входження хвилі тиску в більш щільне ґрунтове середовище (випадки розрахунків 1) - 3)). Крива 4 відповідає входженню хвилі тиску в менш щільне середовище (випадки 4) – 6)). В другому випадку три криві практично співпадають.

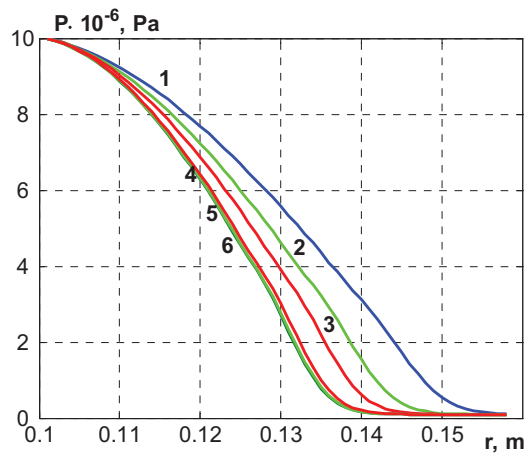


Рисунок 1 – Вхідний імпульс для часу $t = 0,5T$
 Figure 1 - Input pulse for time $t = 0,5T$

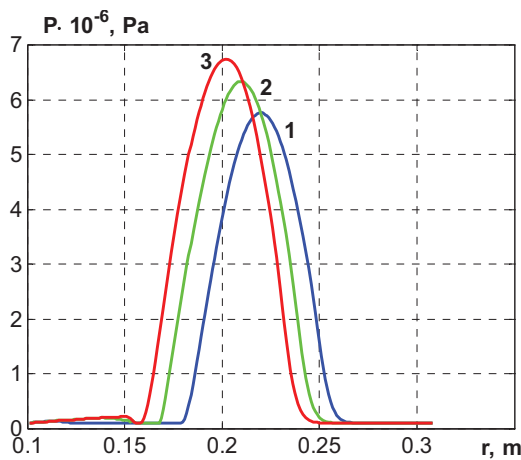


Рисунок 2 – Залежність хвилі тиску від координати для часу $t = 1,75T$
 перехід із твердого ґрунту в більш м'який
 Figure 2 - Dependence of the pressure wave from the coordinates for time $t = 1,75T$
 the transition from the solid to the softer

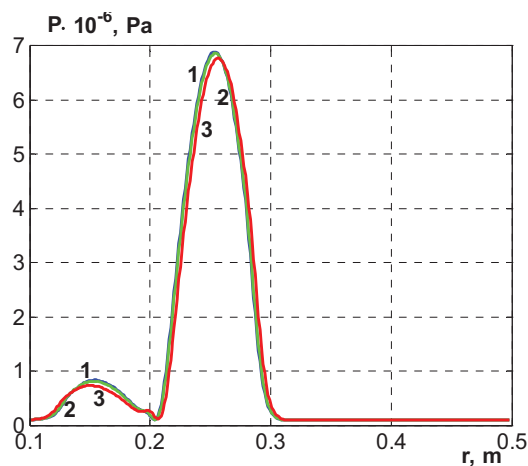


Рисунок 3 – Залежність хвилі тиску від координати для часу $t = 2,5T$
 перехід із м'якого ґрунту в більш твердий
 Figure 3 - Dependence of the pressure wave from the coordinates for time $t = 2,5T$
 transition from soft soil to more solid

На рис. 2 представлені залежності хвиль тиску від координати при проходженні границі двох середовищ в момент часу $t = 1,75T$ (перехід із більш щільного ґрунтового середовища в менш щільне) – розрахунки для випадків 1) – 3).

На рис. 3 представлені залежності хвилі тиску від просторової координати при проходженні із більш м'якого ґрунту в ґрунт з більшою щільністю в момент часу $t = 2,5T$ (випадки розрахунків 4) – б)). Спостерігаються відбиті хвилі.

Висновки.

Чисельний розв'язок зв'язаної задачі циліндрична оболонка – двошарове ґрунтове середовище при дії внутрішнього імпульсного навантаження дає можливість регулювати параметри вхідної хвилі тиску в ґрунт в залежності від геометричних та фізико – механічних параметрів оболонки та ґрунтового середовища. Отримані чисельні результати дозволяють прогнозувати хвильові процеси в неоднорідному ґрунтовому середовищі при проходженні хвиль через контактну границю шарів ґрунту в залежності від їх параметрів.

Перспективи дослідження задач даного класу полягають у розв'язку зв'язаних задач системи оболонки більш складної геометричної форми (сферичні, конічні, еліпсоїдальні оболонки) – неоднорідне ґрунтове середовище.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Баженов В.Г. Деформирование цилиндрических оболочек в мягкой грунтовой среде под действием внутреннего импульсного нагружения / В.Г.Баженов, А.В. Кочетков, В.Р. Фельдгун // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Методы решения задач упругости и пластичности. – Горький: Горьковский ун-т, 1989. – С. 87 – 95.
2. Головко К.Г. Динамика неоднородных оболочек при нестационарных нагрузках: монография / К.Г. Головко, П.З. Луговой, В.Ф. Мейш; под ред. акад НАН Украины А.Н. Гузя. – К.: Изд. полигр. центр «Киевский ун-т», 2012. – 541 с.
3. Луговой П.З. До розв'язку динамічних задач теорії оболонок в ґрунтовому середовищі при імпульсних навантаженнях / П.З. Луговой, В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш // Проблеми обчислювальної механіки та міцності конструкцій. Дніпропетровський національний університет. - 2010. – Вип.14. – С. 230–238.
4. Лучко И.А. Механический эффект взрыва в грунтах. / И.А. Лучко, В.А. Плаксий, Н.С. Ремез и др. – Киев: Наук. думка, 1989. – 232 с.
5. Гуляев В.И. Устойчивость нелинейных механических систем. / В.И. Гуляев, В.А. Баженов, Е.А. Гоцуляк – Львов: «Вища школа», 1982. – 255 с.
6. Гузь А.Н. Теория нестационарной аэрогидроупругости оболочек. / А.Н. Гузь, В.Д. Кубенко – Киев: Наук. думка, 1982. – Т. 5. - 400 с.
7. Ляхов Г.М. Волны в грунтах и пористых многокомпонентных средах / Г.М. Ляхов. – М.: Наука, 1982. – 288 с.
8. Рождественский Б.Л. Системы квазилинейных уравнений и их приложение к газовой динамике. / Б.Л. Рождественский, Н.И. Яненко – М.: Наука, 1978. – 688 с.
9. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. Т. 2 / К. Флетчер. – М.: Мир, 1991. – 552 с.

REFERENCES

1. Bazhenov V.G., Kochetkov A.V., Feldgun V.R. (1989) Deformirovanie cylindricheskikh obolochek v myagkoiy gruntovoyy srede pod deystviem vnutrennego impul'snogo nagruzheniya [Deformation of cylindrical shells in a soft ground environment under the action of internal impulse loading]. Prikladnie problemu prochnosti i plastichnosti. Metodu resheniya zadach uprugosti i plastichnosti. [Applied problems of strength and plasticity. Methods for solving the problems of elasticity and plasticity]. Gorky: Gorky University, 87 - 95. [in Russian].
2. Golovko K.G., Lugovoy P.Z., Meish V.F. (2012) Dinamika neodnorodnykh obolochek pri nestacionarnykh nagruzkah [Dynamics of inhomogeneous shells under nonstationary loads: monograph ed. acad. of NAS of Ukraine A.N. Guz.]. Kyiv: Ed. polygraph. center "Kyiv Un-t". [in Russian].
3. Lugoviy P.Z., Meish V.F., Meish Yu.A. (2010) Do rozvyazky dynamichnykh zadach teoryy obolonok v gruntovomy seredovyshy pru impyl'snykh navantazhennyah [Prior to the discovery of the dynamic problems of the theory of shells in the soil medium in the case of impulse reservoirs]. Problemu obchislyvalnoy mehaniky ta mitcnosty konstruktsyy. [The problems of calculating mechanics and engineering design. Dnipropetrovsk National University],14, 230 - 238. [in Ukrainian].
4. Luchko I.A., Plaksy V.A., Remez N.S. and others. (1989). Mehanicheskyy effekt vzruva v gruntah. [The mechanical effect of an explosion in soils]. Kiev: Nauk. Dumka. [in Russian].
5. Gulyaev V.I., Bazhenov V.A., Gotsulyak E.A. (1982). Ustoychivost' mehanicheskyykh system. [Stability of nonlinear mechanical systems]. - Lviv: "Vishcha school". [in Russian].

6. Guz A.N., Kubenko V.D. (1982). Teoriya nestacionarnoyu aerouprugosty obolochek. [Theory of non-stationary aerohydroelasticity of shells]. Kiev: Naukova Dumka. V. 5. [in Russian].
7. Lyakhov V.M. (1982). Volnu v gruntah v porystykh mnogokomponentnykh sredah. [Waves in soils and porous multicomponent media]. Moskva: Nedra. [in Russian].
8. Rozhdestvensky B.L., Yanenko N.I. (1978). Systemu kvazilineykh uravneniy e ih prylozhenie k gazovoyu dynamyke. [Systems of quasilinear equations and their application to gas dynamics]. - Moskva: Nauka. [in Russian].
9. Fletcher K. (1991). Vychyslitel'nie metodu v dynamike zhydkosteyu. [Computational methods in the dynamics of liquids. V. 2]. Moskva: Mir. [in Russian].

РЕФЕРАТ

Мейш В.Ф. Хвильові процеси в системі циліндрична оболонка – двошарове ґрунтове середовище / В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. – К.: НТУ, 2018. – Вип. 1 (40).

В роботі визначено залежності хвиль тиску по просторовій та часовій координатам в системі циліндрична оболонка – двошарове ґрунтове середовище при динамічних навантаженнях.

Об'єктом дослідження є хвильові процеси в системі циліндрична оболонка – двошарове ґрунтове середовище.

Мета роботи полягає в дослідженні хвильових процесів системи циліндрична оболонка – двошарове ґрунтове середовище при нестационарних навантаженнях.

Методи дослідження включають чисельні методи розв'язування рівнянь коливань оболонок та рівнянь руху двошарового ґрунту в рамках теорії механіки суцільних середовищ.

Розглянуто задачі динамічної поведінки системи циліндрична оболонка – двошарове ґрунтове середовище при нестационарних навантаженнях.

Отримані в роботі результати можуть бути використані для дослідження прикладних задач, що виникають при прогнозуванні динамічної поведінки колекторів нафто- та газових свердловин. Результати роботи можуть бути впроваджені в практиці теоретичного та експериментального дослідження взаємодії системи циліндрична оболонка – двошарове ґрунтове середовище.

Прогнозні припущення щодо розвитку об'єкта дослідження – визначення оптимальних геометричних та фізико – механічних параметрів циліндричних оболонок при взаємодії з двошаровим ґрунтовим середовищем.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЦИЛІНДРИЧНА ОБОЛОНКА, ДВОШАРОВЕ ГРУНТОВЕ СЕРЕДОВИЩЕ, ХВИЛЬОВІ ПРОЦЕСИ, ЧИСЕЛЬНІ МЕТОДИ

ABSTRACT

Meish V.F., Meish Yu.A. The waves processes of the system cylindrical shell – twolayered soil media. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific and Technical Collection. – Kyiv. National Transport University, 2018. – Issue 1 (40).

The dependence of pressure waves on the spatial and temporal coordinate in the system the cylindrical shell - two-layer soil medium under action of dynamic loads are determined.

The object of the study are the wave processes of the system cylindrical shell - two-layer soil medium.

Purpose of the paper consists in study the wave processes of the system cylindrical shell - two-layer soil medium under nonstationary loads.

The methods of investigation include numerical methods for solving the wave theory of shell equations and the equations of motion of a two-layer soil in the framework of the theory of continuum mechanics.

The problems of the dynamic behavior of the system the cylindrical shell - two-layer soil medium under nonstationary loads are considered.

The results obtained in this paper can be used to study applied problems arising in predicting the dynamic behavior of oil and gas well collectors. The results of the work can be used in practice of theoretical and experimental investigation of the interaction of the system cylindrical shell - two-layer soil medium.

The projected assumptions regarding the development of the research object are the determination of the optimal geometric and physicomechanical parameters of the cylindrical shells in interaction with the soil medium.

KEY WORDS: CYLINDRICAL SHELL, TWOLAYERED SOIL MEDIA, WAVES PROCESSES, NUMERICAL METHODS

РЕФЕРАТ

Мейш В.Ф. Волновые процессы в системе цилиндрическая оболочка – двухслойная грунтовая среда / В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш // Вестник Национального транспортного университета. Серия «Технические науки». Научно-технический сборник. – К.: НТУ, 2018. – Вып. 1 (40).

В работе определены зависимости волн давления по пространственной и временной координатам в системе цилиндрическая оболочка – двухслойная грунтовая среда при динамических нагрузках.

Объектом исследования являются волновые процессы в системе цилиндрическая оболочка – двухслойная грунтовая среда.

Цель работы состоит в исследовании волновых процессов системы цилиндрическая оболочка – двухслойная грунтовая среда при нестационарных нагрузках.

Методы исследования включают численные методы решения уравнений колебаний оболочек и уравнений движения двухслойного грунта в рамках теории механики сплошных сред.

Рассмотрены задачи динамического поведения системы цилиндрическая оболочка – двухслойная грунтовая среда при нестационарных нагрузках.

Полученные в работе результаты могут быть использованы для исследования прикладных задач, возникающих при прогнозировании динамического поведения коллекторов нефти - и газовых скважин. Результаты работы могут быть использованы на практике теоретического и экспериментального исследования взаимодействия системы цилиндрическая оболочка – двухслойная грунтовая среда.

Прогнозируемые допущения, относительно развития объекта исследования – определение оптимальных геометрических и физико-механических параметров цилиндрических оболочек при взаимодействии с грунтовой средой.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ ОБОЛОЧКА, ДВУХСЛОЙНАЯ ГРУНТОВАЯ СРЕДА, ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

АВТОРИ:

Мейш Володимир Федорович, доктор фізико-математичних наук, професор, Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України, головний науковий співробітник, e-mail: vfmeish@gmail.com, tel. +380502519697, Україна, 03057, г. Київ, вул. Нестерова, 3, orcid.org/0000-0003-4141-7008.

Мейш Юлія Анатоліївна, доктор технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, професор кафедри вищої математики, e-mail: juliameish@gmail.com, tel. +380954035196, Україна, 01010, м. Київ, вул. Кіквідзе 42, к. 502, orcid.org/0000-0001-7492-700X.

Meish Vladimir Fedorovich, Doctor of Mathematics, professor, Institute of Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Main researcher, e-mail: vfmeish@gmail.com, tel. +380502519697, Ukraine, 03057, Kyiv, Nesterov str., 3, orcid.org/0000-0003-4141-7008.

Meish Yuliya Anatolievna, D. Eng., associate professor, National Transport University, Higher mathematics department professor, e-mail: juliameish@gmail.com, tel. +380954035196, Ukraine, 01010, Kyiv, Kikvidze str. 42, of. 502, orcid.org/0000-0001-7492-700X.

АВТОРЫ:

Мейш Владимир Федорович, доктор физико-математических наук, профессор, Институт механики им. С.П. Тимошенко НАН Украины, главный научный сотрудник, e-mail: vfmeish@gmail.com, tel. +380502519697, Украина, 03057, г. Киев, ул. Нестерова, 3, orcid.org/0000-0003-4141-7008.

Мейш Юлия Анатольевна, доктор технических наук, доцент, Национальный транспортный университет, профессор кафедры высшей математики, e-mail: juliameish@gmail.com, tel. +380954035196, Украина, 01010, г. Киев, ул. Киквидзе 42, к. 502, orcid.org/0000-0001-7492-700X.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Луговий П.З., доктор технічних наук, професор, Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України, завідувач відділом будівельної механіки тонкостінних конструкцій, Київ, Україна.

Лоза І.А., доктор фізико-математичних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри теоретичної механіки, Київ, Україна.

REVIEWER:

Lugovoy P.Z., D. Eng., professor, S.P Timoshenko Institute of Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Structure mechanics of thin – walled structures department head professor, Kyiv, Ukraine.

Loza I.A., Doctor of Mathematics, professor, National Transport University, Head of Department of Theoretical Mechanics, Kiev, Ukraine.