

РЕАКЦІЯ ПОРИСТОПРУЖНОЇ ВОДОНАСИЧЕНОЇ ОСНОВИ НА ВИМУШЕНІ КОЛИВАННЯ НЕВАГОМОГО ФУНДАМЕНТА

Савицький О.А.

Інститут гідромеханіки НАН України

Трофимчук О.М.

Інститут телекомунікацій

і глобального інформаційного простору НАН України

м. Київ, Україна

АНОТАЦІЯ: Моделюються вертикальні гармонічні коливання непронижного штампа на пористопружній насиченій рідиною основі. Аналізується зміна імпедансу основи в залежності від властивостей моделі.

АННОТАЦИЯ: Моделируются вертикальные гармонические колебания непроницаемого штампа на пористоупругом насыщенном жидкостью основании. Анализируется изменение импеданса основания в зависимости от свойств модели.

ABSTRACT: Harmonic vertical oscillations of a impermeable stamp on the poroelastic liquid-saturated base is considered. Change of an impedance of the basis depending on properties of model is analyzed.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: непроникий штамп, гармонічні коливання, пористоупружна насичена рідиною основа, модель Біо, імпеданс.

Динамічній взаємодії плитних фундаментів з водонасиченою ґрунтовою основою присвячено дослідження [2, 4, 7, 8] та ін. Розрахункові дані свідчать, що найбільший вплив водонасиченої основи на характеристики коливань проявляється при вертикальних переміщеннях фундаменту.

Розглядається змішана просторова динамічна гранична задача для вертикальних коливань прямокутного штампа на пористопружному наси-

ченому рідиною (ППНР) півпосторі (модель М. Біо [3]). Модель враховує механічну та інерційну взаємодію пористопружної твердої та в'язкої рідинної фаз, фільтрацію рідини в порах, розповсюдження хвиль від джерела коливань, загасання хвиль. Підшва штампа непроникна для порової рідини, дотичні контактні напруження не враховуються. Отримано систему двовимірних сингулярних рівнянь на прямокутнику. Розв'язок такої системи методом ортогональних поліномів а також рівняння моделі Біо представлено в роботі [2]. Знайдено аналітичні вирази для переміщень фаз. Отримано нескінчену систему лінійних алгебраїчних рівнянь відносно коефіцієнтів рядів, з яких знаходяться контактні напруження та поровий тиск, реакції та переміщення. Коефіцієнти системи представлено подвійними інтегралами з ядрами, які представляють компоненти переміщень фаз від навантажень на фази. На основі аналізу ядер підінтегральних функцій та їх асимптотик розроблено методу обчислення інтегралів. Тестові результати розрахунку відповідають даним роботи [4].

При числовому аналізі визначається механічний імпеданс $Z(\zeta)$ - повний опір основи при гармонічних вимушених вертикальних коливаннях з одиничною амплітудою переміщення для невагомго штампа, $Z(\zeta) = k(\zeta) + i\zeta c(\zeta)$, де $k = \text{Re} Z$ - жорсткість основи, $c = \text{Im} Z / \zeta$ - характеристика демпфірування коливань за рахунок випромінювання хвиль в основу та взаємодії фаз, $\zeta = a\omega / c_2$ - безрозмірна частота вимушених коливань, $2a$ - ширина прямокутного штампа, ω - кругова частота коливань, c_2 - швидкість поперечної хвилі в основі. Особливістю даної методики є розділення в аналітичній формі реакції (імпедансу) на складові для твердої та рідинної фаз окремо. Повний імпеданс позначимо Z_0 , а його складові для твердої та рідинної фаз – відповідно Z_s та Z_f .

Застосування функцій імпедансу для моделювання системи фундамент-основа представлено, зокрема, в роботах [5, 7, 8], а обернених до імпедансу функцій податливості - в статтях [1, 4] та інших. Роботи [1, 6] присвячено визначенню згаданих функцій експериментальними натурними методами.

Основні параметри двофазного середовища по моделі Біо при розв'язку динамічних задач наступні: осереднені коефіцієнт фільтрації k_f та пористість \mathcal{P} ; динамічний коефіцієнт в'язкості порової рідини θ_0 ; щільність матеріалу пружного скелету ρ_s ; щільність рідинної фази ρ_f ; параметр динамічного зв'язку фаз ρ_{12} ; істинний модуль стисливості твердої фази K_r ; модуль об'ємної стисливості порової рідини K_0 ; параметри

Ламе пружного скелету λ , μ . Звідси коефіцієнт Пуассона твердої фази визначається як $\nu = 0.5\lambda/(\lambda + \mu)$. Значення основних параметрів моделі прийнято згідно статті [4].

Досліджено, зокрема, вплив величини параметрів моделі k_f , ν , ϑ (в межах характерних значень для піщаного ґрунту) на жорсткість основи $\text{Re } Z_0$ (на графіках - криві сірого кольору) і внесок фаз (криві чорного кольору): $\text{Re } Z_s$ (графіки а) та $\text{Re } Z_f$ (графіки б). На графіках в, г рис. 2 та рис. 3 представлено також порівняння коефіцієнту демпфірування $\text{Im } Z_0 / \zeta$ (сірі криві) з його складовими для фаз $\text{Im } Z_s / \zeta$ та $\text{Im } Z_f / \zeta$ (чорні криві).

Вплив величини коефіцієнта фільтрації на дійсну частину імпедансу представлено на рис. 1, зі збільшенням k_f складова твердої фази збільшується, уявна частина імпедансу практично не змінюється.

Зміну з частотою функції імпедансу та її складників для ряду величин коефіцієнта Пуассона твердого скелету показано на рис. 2. Зі збільшенням ν жорсткість зростає, а загасання зменшується.

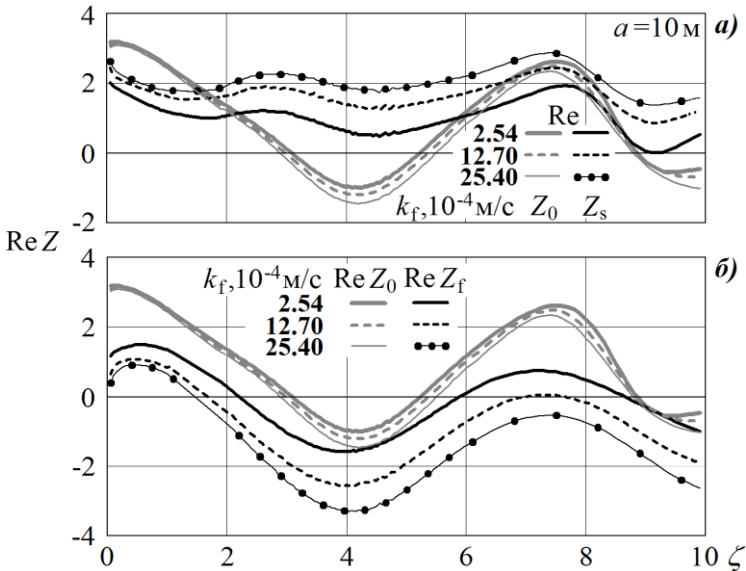


Рис. 1. Порівняння жорсткості та її складових для фаз при значеннях коефіцієнта фільтрації $k_f = 2.54 \cdot 10^{-4}$ м/с; $1.257 \cdot 10^{-3}$ м/с; $2.54 \cdot 10^{-3}$ м/с

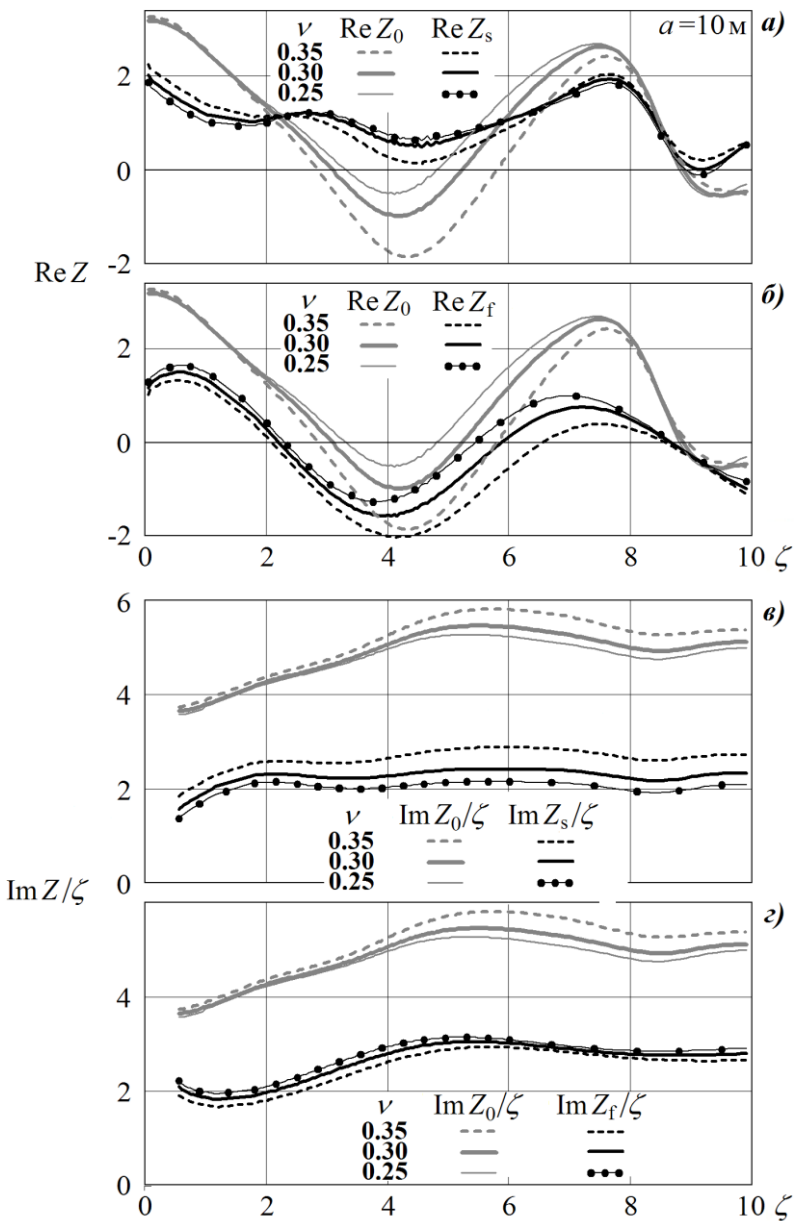


Рис. 2. Порівняння жорсткості, коефіцієнта демпфірування та їх складових для фаз при $\nu = 0.25$; 0.30 ; 0.35

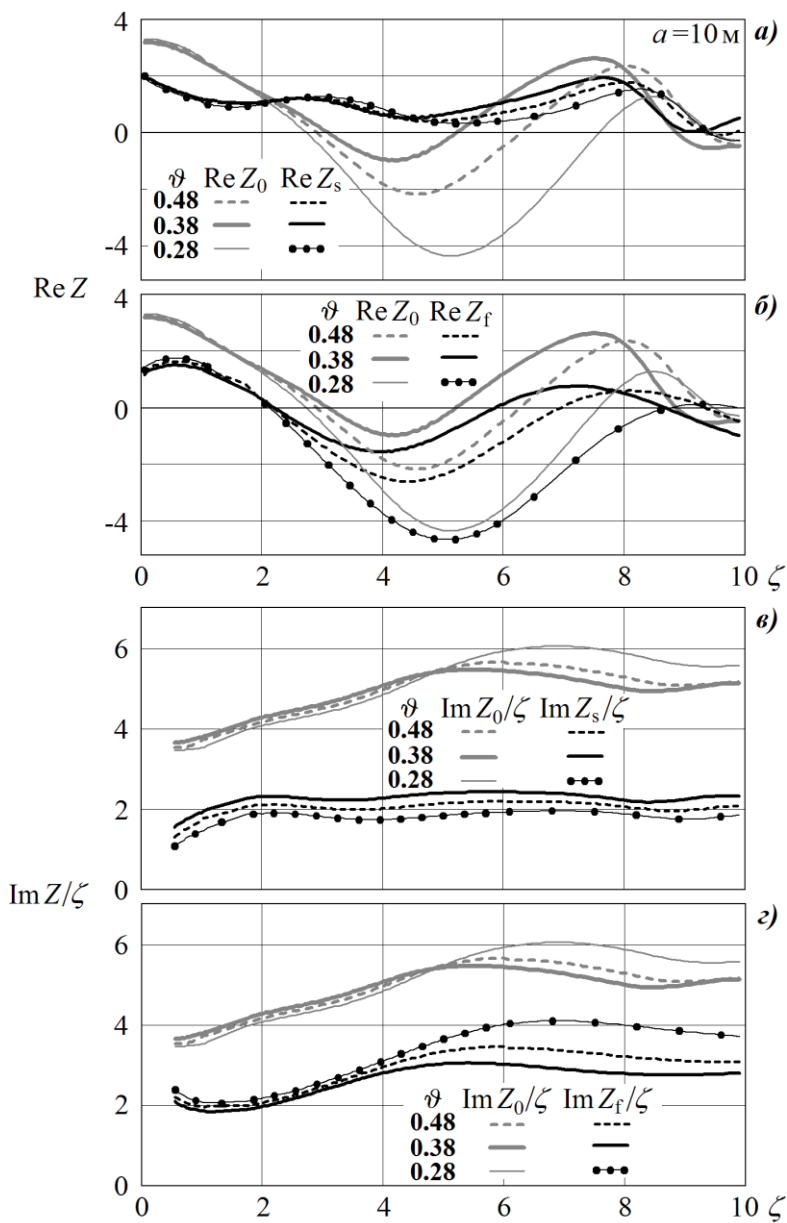


Рис. 3. Порівняння жорсткості, коефіцієнта демпфірування та їх складових для фаз при $\vartheta = 0.48; 0.38; 0.28$

Графіки рис. 3 ілюструють зміну з частотою імпедансу для значень пористості $\rho = 0.28; 0.38; 0.48$ (щільність основи $\rho = 2200 \text{ кг/м}^3; 2032 \text{ кг/м}^3; 1864 \text{ кг/м}^3$ відповідно). Жорсткість помітно залежить від пористості, мінімальний вплив рідинної фази спостерігається при $\rho = 0.38$.

Функція імпедансу для моделі основи, в якій враховується взаємодія між твердою пористопружною та в'язкою рідинною фазами відрізняється від імпедансу для моделі пружного півпростору зменшенням загальної жорсткості і деяким збільшенням уявної частини ζc (загасання). Аналогічні висновки було зроблено в роботі [8], але розділення реакцій фаз в даному методі дозволяє уточнити, що жорсткість твердого скелету подібна до жорсткості пружного півпростору і залишається додатньою, а складова жорсткості рідинної фази приймає зі збільшенням частоти від'ємне значення.

Представлена методика не враховує заглиблення фундаменту, яке, згідно розрахункових даних [8] призводить при вертикальних коливаннях до збільшення жорсткості основи і коефіцієнту демпфірування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ильичев В. А. Экспериментальное изучение взаимодействия вертикально колеблющегося фундамента и его основания / В. А. Ильичев, В. Г. Таранов // Основания, фундаменты и механика грунтов. - 1976. - № 2. - С. 9-13.
2. Трофимчук А. Н. Динамика пористоупругих насыщенных жидкостью сред / А. Н. Трофимчук, А. М. Гомилко, О. А. Савицкий. - К.: Наук. думка, 2003. - 230 с.
3. Biot M. A. Theory of propagation of elastic waves in fluid-saturated porous solid. I. Lower-frequency range / M. A. Biot // J. Acoust. Soc. Amer. - 1956. - 28, No. 2. - P. 68-78.
4. Halpern M. R. Steady-state harmonic response of a rigid plate bearing on a liquid-saturated poroelastic half-space / M. R. Halpern, P. Christiano // Earthquake Eng. and Struct. Dyn. - 1986. - 14, No. 3. - P. 439-454.
5. Luco J. E. Impedance functions for a rigid foundation on a layered medium / J. E. Luco // Nuclear Engineering and Design. - 1974. - 31. - P. 204-217.
6. Luco J. E. Identification of Soil Properties from Foundation Impedance Functions / J. E. Luco, H. L. Wong // Journal of Geotechnical Engineering. - 1992. - 118, No. 5. - P. 780-796.
7. Simos N. Impedance Function Calculations for Saturated Layered Soils / N. Simos, A. J. Philippacopoulos et al. // Transactions, SMiRT 16, Washington DC, August 2001, Paper No. 1755. - P. 1-8.

8. Senjuntichai T. Vertical vibration of an embedded rigid foundation in a poroelastic soil / T. Senjuntichai, S. Mania, R. K. N. D. Rajapakse // Soil Dyn. Earthquake Engng. - 2006. - 26, No. 6-7. - P. 626-636.

REFERENCES

1. Il'ichev, V.A. and Taranov, V.G. (1976). `Jeksperimental'noe izuchenie vzaimodejstvija vertikal'no kolebljushhegosja fundamenta i ego osnovanija', Osnovanija, fundamenty i mehanika gruntov, vol. 2, pp. 9-13. (in Russian)
2. Trofymchuk, A.N. Gomilko, A.M. & Savitsky, O.A. (2003). Dinamika poristouprugih nasyshhennyh zhidkost'ju sred [Dynamics of poroelastic liquid-saturated media], Naukova dumka, Kyiv, Ukraine (in Russian).
3. Biot, M.A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid. I. Low frequency range. J. Acoust. Soc. Am. 1956, 28(2), 168–78.
4. Halpern, M.R. and Christiano, P. Steady state harmonic response of a rigid plate bearing on a liquid-saturated poroelastic half space. Earthq. Eng. Struct. Dyn. 1986, 14, 439–54.
5. Luco, J. (1992). Impedance functions for a rigid surface on a layered medium. Nuclear Engineering and Design. 31(2), 204-17.
6. Luco, J. and Wong, H. (1992). Identification of Soil Properties from Foundation Impedance Functions. J. Geotech. Engrng. 118:5, 780-95.
7. Simos, N. Philippacopoulos, A.J. et al. Impedance function calculations for saturated layered soils. Transactions, SMiRT 16, Washington DC, August 2001, Paper No. 1755, 1-8.
8. Senjuntichai, T. Mania, S. Rajapakse, R.K.N.D. Vertical vibration of an embedded rigid foundation in a poroelastic soil. Soil Dyn. Earthquake Engng., 2006, 26:6–7, 626–36.

Стаття надійшла до редакції 20.07.2016 р.