

УДК 539.595

Ткаченко Р.В.¹, аспірант
Лимарченко О.С.¹, д.тех.н., проф.

Динаміка рідини з вільною поверхнею в резервуарі на рухомій платформі під дією зовнішньої імпульсної сили

¹ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 03680, м. Київ, пр-т. Глушкова 4е,
e-mail: terri_v@mail.ru
e-mail: olelim2010@yahoo.com

Tkachenko R.V.¹, postgraduate student
Limarchenko O.S.¹, doctor of engineering, professor

Dynamics of liquid with a free surface in reservoir on movable platform under external impulse loading

¹ Taras Shevchenko National University of Kyiv,
03680, Kyiv, Glushkova ave., 4e,
e-mail: terri_v@mail.ru
e-mail: olelim2010@yahoo.com

Досліджується сумісний рух жорсткого циліндричного резервуару, частково заповненого ідеальною нестисливою рідиною з вільною поверхнею, приєднаного пружиною до рухомої платформи. Вивчаються нелінійні коливання системи під дією прикладеної до рухомої рами зовнішньої імпульсної сили.

Ключові слова: жорсткий циліндричний резервуар, рідина з вільною поверхнею, рухома платформа, нелінійні коливання, імпульсна сила.

We consider combined motion of cylindrical reservoir, which contains liquid with a free surface, attached by springs to movable platform, on the basis of nonlinear multimodal dynamical model. Nonlinear oscillations of liquid free surface, reservoir motion relative to platform, motion of platform under impulse force were analyzed. It was discovered that oscillations of liquid free surface and reservoir motion relative to platform have nonlinear character, for example, modulation of oscillations, drift of mean value of oscillations effect of high modes of oscillations are manifested. The presence of spring enforced these effects. In general the presence of spring does not result is dynamic off-tuning of oscillation, moreover, spring produces new modes of oscillations when due to transportation motion of reservoir liquid performs oscillations in non-inertial reference frame, which results in drift of mean value of oscillations and their increase on the whole. Mainly the presence of spring in attachment of reservoir with platform results in increase of liquid oscillations, however, there is narrow range of frequencies exceeding frequency of oscillation of the first normal mode approximately in 20%, where the presence of spring promotes lowering of amplitudes of liquid oscillations.

Key Words: rigid cylindrical reservoir, liquid with a free surface, movable platform, nonlinear oscillations, impulse force.

Статтю представив доктор фіз.-мат. наук, професор Я.О. Жук

Вступ

В техніці широко використовуються резервуари з рідиною, які знаходяться на рухомих платформах при різних способах закріплення і під дією різних зовнішніх навантажень [1–3]. Розв'язання таких задач проводиться на основі наближених методів, переважно основаних на варіаційних алгоритмах.

Досліджується горизонтальний рух абсолютно твердого циліндричного резервуара, частково заповненого рідиною, приєднаного пружиною до рухомої платформи. Розглянуто декілька варіан-

тів жорсткості пружини і жорстке закріплення. В початковий момент часу система знаходиться у спокої. До платформи прикладена сила у вигляді прямокутного імпульсу тривалістю 0.01с, 0.02с, 0.05с, 0.1с, 0.2с, 0.5с, 1с. Вважаємо, що рідина однорідна, нестислива, ідеальна. Рівняння вільної поверхні прийняте в формі $z = \xi(x, y, t)$.

Метою роботи є вивчення динамічних процесів руху системи рідина – резервуар при пружинному закріпленні до рухомої платформи під дією зовнішньої імпульсної сили, прикладеної до платформи.

Математична модель дослідження нелінійної динаміки сумісного руху резервуару з рідиною, який пружиною приєднано до рухомої платформи, побудована в роботі [2] на основі методів роботи [1]. Модель є системою звичайних диференціальних рівнянь відносно параметрів коливань рідини і руху резервуару і платформи.

Чисельні результати

Для чисельних розрахунків приймалася модель, яка включає 12 форм коливань [1,2]. Проведено розрахунки за вказаною моделлю та за моделлю без пружини. Прийнято такі співвідношення мас рідини, резервуару, платформи $M_l = 3141.59 \text{ кг}$, $M_{res} = 0,25 M_l$, $M_{fr} = 5 M_l$.

Покладемо: жорсткість пружини $C = 50 \text{ кН/м}$, 100 кН/м , 200 кН/м , 500 кН/м , 2000 кН/м . Час обрахунку взято. Сумісний рух рухомої платформи, резервуара і рідини розглядався на інтервалі до $t = 125 \text{ с}$. До платформи прикладена сила у вигляді прямокутного імпульсу з різними амплітудами і тривалістю дії. Амплітуди імпульсів підбирались так, щоб коливання вільної поверхні рідини попадали в діапазон нелінійних коливань. Чим більше тривалість імпульсу тим при меншій амплітуді імпульсу вони досягаються.

На основі чисельних розрахунків знайдено зміну в часі амплітуд коливань вільної поверхні рідини на стінці і першої вісесиметричної форми (як показник збудження нелінійних механізмів), переміщення резервуару відносно платформи (відповідно ξ , a_3 , u , віднесені до радіуса резервуара R), в залежності від часу і для різних значень жорсткостей і тривалості імпульсу.

При зміні збурень вільної поверхні рідини за час 125 с відбувається наближено $80 - 85$ періодів коливань вільної поверхні рідини. При всіх значеннях імпульсів і жорсткостях пружини

відмічаються нелінійні властивості коливань вільної поверхні рідини: модуляція коливань дрейф середнього значення, наявність двогорбих піків, що вказує на вплив вищих гармонік. Найбільший період модуляції спостерігається при жорсткості $C = 100 \text{ кН/м}$, що показано на Рис.1 для тривалості імпульсу 0.01 с . На всіх графіках приведено закони зміни параметрів на інтервалі 125 с (а.) і на меншому інтервалі (б.) для більш детального аналізу.

Зі збільшенням жорсткості пружини модуляція стає менш вираженою, період модуляції зменшується, амплітуди коливань вільної поверхні рідини зміщуються в додатному напрямку. Найменше модуляція коливань проявляється при жорсткому закріпленні (Рис. 2), де представлено коливання вільної поверхні рідини при тривалості імпульсу 0.05 с . Дрейф середнього значення амплітуди коливань вільної поверхні рідини збільшується зі збільшенням жорсткості пружини і збільшенням тривалості імпульсу. Суттєвий вплив вищих гармонік спостерігається до жорсткостей 500 кН/м включно, що ілюструє Рис. 3, де представлено коливання вільної поверхні рідини при $C = 200 \text{ кН/м}$ (тривалість імпульсу 0.1 с). Для цього режиму сильно помітний внесок вищих гармонік (Рис. 3 б). Аналіз показав, що вплив вищих гармонік послаблюється зі збільшенням тривалості імпульсу і жорсткості пружини. Найменший вплив вищих гармонік спостерігався при жорсткому закріпленні. При коливаннях вільної поверхні висота горбів хвиль більша за глибину впадин, що є характерним для нелінійного хвиле утворення.

Зміна амплітуд першої вісесиметричної форми коливань вільної поверхні рідини (Рис. 4). зумовлює несиметричність профілів хвиль, що на малюнку проявляється в вигляду суттєвого дрейфу середнього значення.

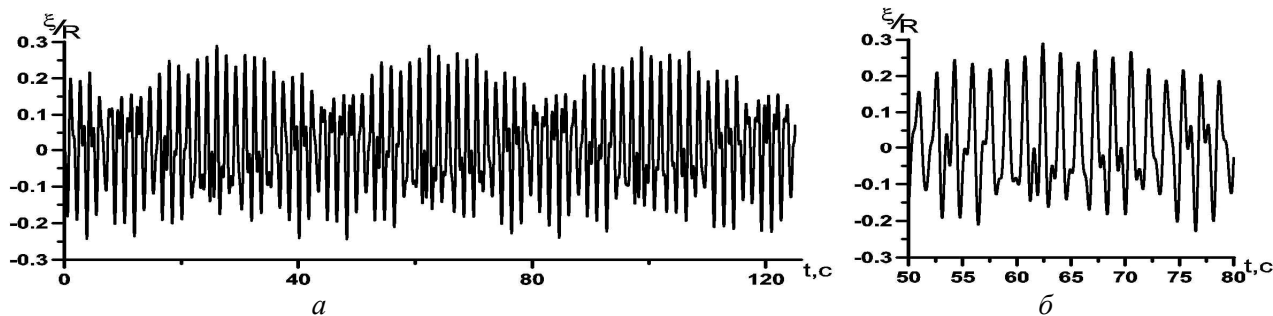


Рис 1. Коливання вільної поверхні рідини на стінці при $C = 100 \text{ кН/м}$, тривалість імпульсу 0.05 с (а – інтервал $0 - 125 \text{ с}$, б – $50 - 80 \text{ с}$)

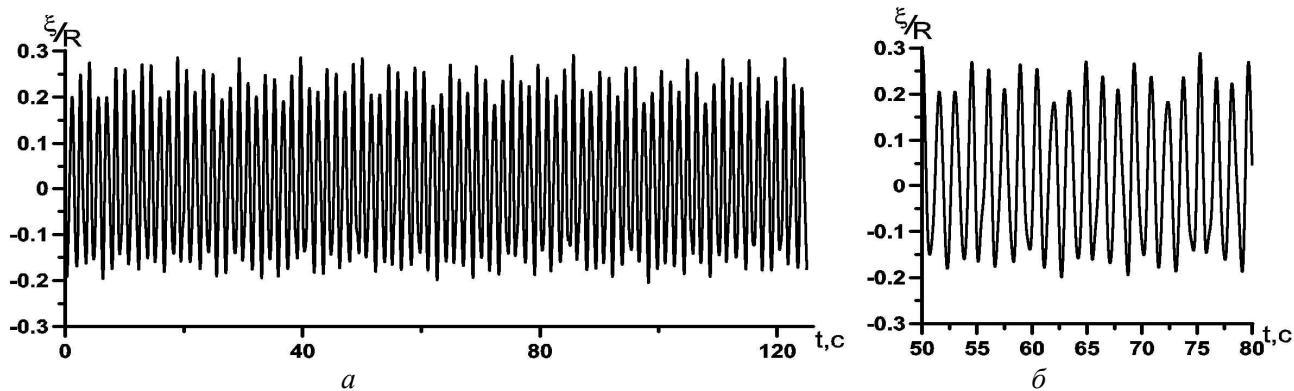


Рис 2. Коливання вільної поверхні рідини при жорсткому закріпленні, тривалість імпульсу 0.05 с
(a – інтервал 0–125 с, b – 50–80 с)

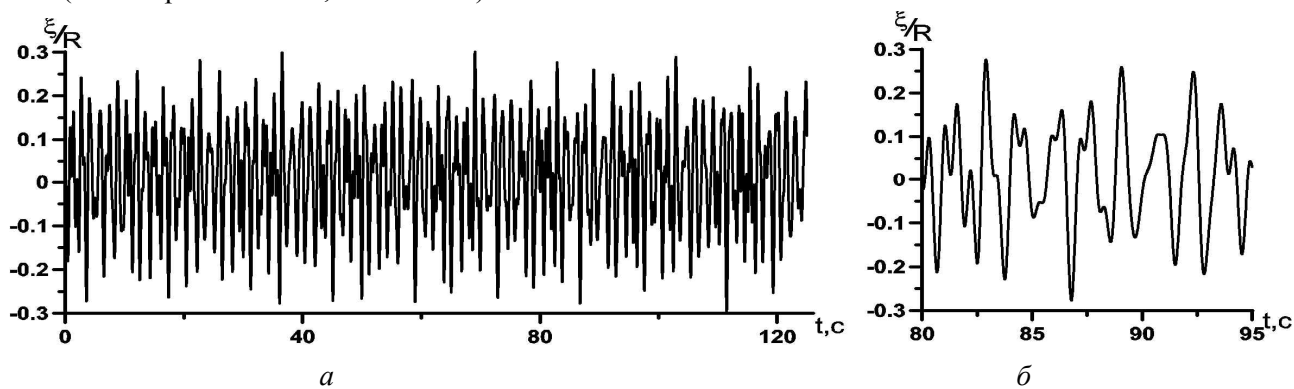


Рис 3. Коливання вільної поверхні рідини при $C=200$ kN/m, тривалість імпульсу 0.1 с
(a – інтервал 0–125 с, b – 80–95 с)

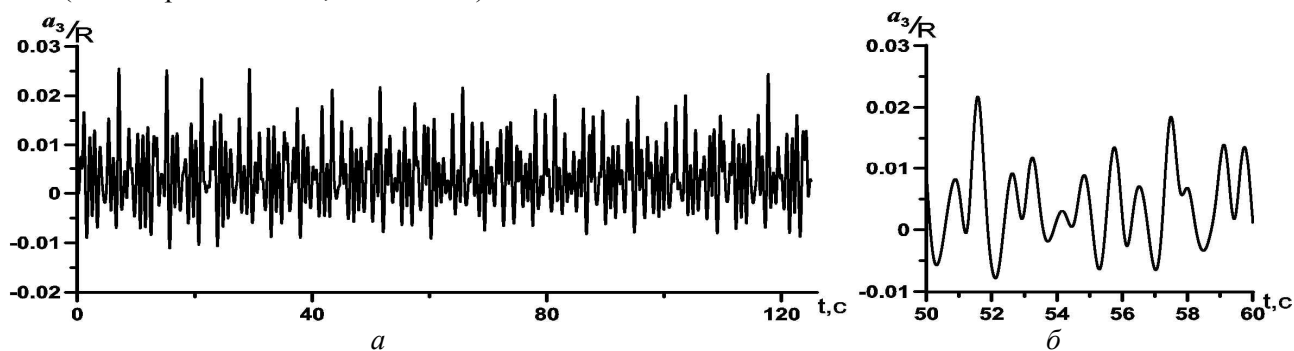


Рис 4. Збурення першої осесиметричної форми при $C=100$ kN/m тривалістю імпульсу 0.05 с
(a – інтервал 0–125 с, b – 50–60 с)

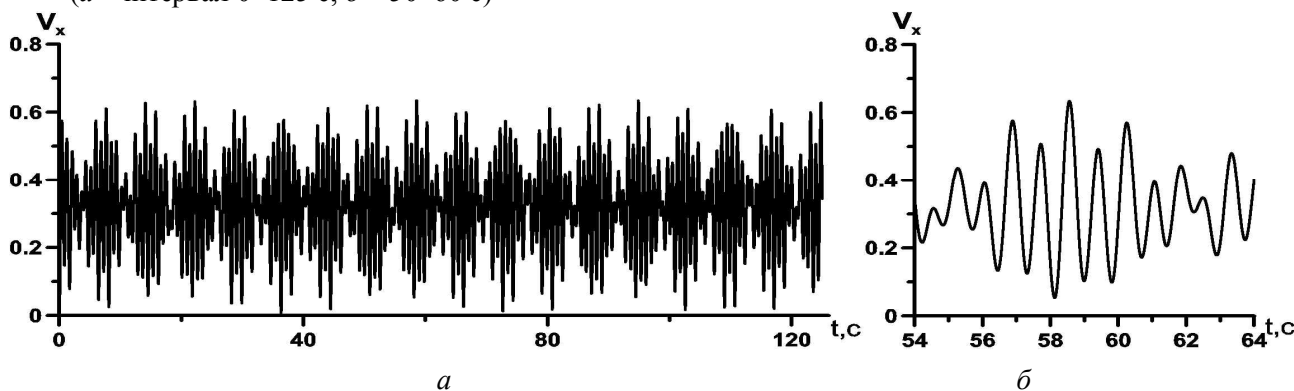


Рис 5. Швидкість руху циліндра при $C=100$ kN/m, тривалість імпульсу 0.05 с
(a – інтервал 0–125 с, b – 54–64 с)

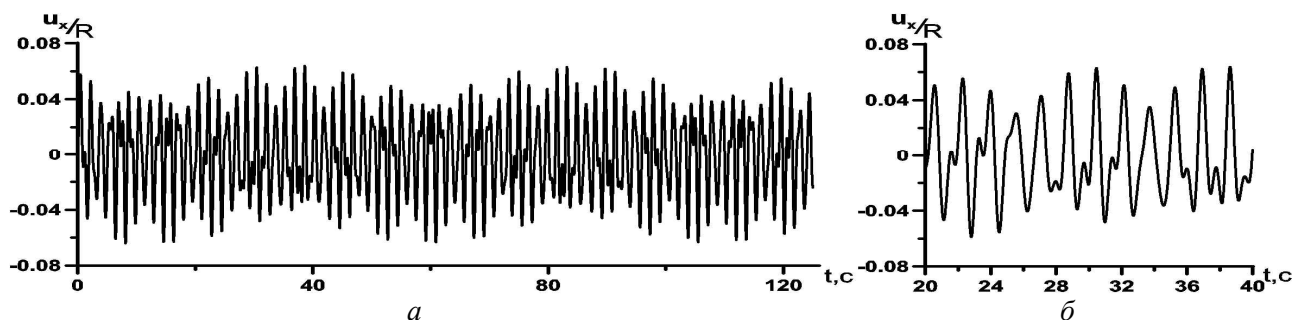


Рис 6. Рух циліндра відносно рами при $C = 100$ kN/m, тривалість імпульсу 0.5 с.
(a – інтервал 0–125 с., b – 20–40 с.)

Проаналізуємо рух резервуара. Графік швидкості руху резервуара при відсутності пружини має вигляд усталеного гармонічного коливання з малою амплітудою. При наявності пружини маємо коливання з модуляцією з суттєвим впливом вищих гармонік, наприклад, Рис. 5 (з жорсткістю $C=100$ kN/m, і тривалістю імпульсу 0.05 с.).

Розглянуто рух резервуара відносно платформи (Рис. 6). Встановлено, що наявність пружного закріплення сприяє збудженню вищих гармонік спектру і прояву дрейфу середнього значення коливань.

Висновки

В нелінійній постановці розглянуто задачу про сумісний рух циліндричного резервуару,

заповненого рідиною з вільною поверхнею, приєднаного пружиною до рухомої платформи, на яку діє імпульсна сила.

Встановлено, що наявність пружинного закріплення сприяє таким механічним ефектам як модуляція коливань, дрейф середнього значення, вплив вищих гармонік спектру, несиметричність профілів хвиль. Показано, що рух резервуара відносно платформи і рух платформи теж мають такі ж властивості.

В цілому аналіз результатів моделювання для різних значень жорсткостей та інтенсивності імпульсного навантаження дозволив встановити, що застосування пружини в якості демфера коливань вільної поверхні рідини не є ефективним засобом, навпаки, в більшості випадків це призводить до збільшення амплітуд коливань

Список використаних джерел

1. *Limarchenko O.*, Rotational motion of structures with tanks partially filled by liquid / O. Limarchenko, G. Matarazzo, V. Yasinsky – Kyiv: FADA, 2003. – 286 p.
2. *Limarchenko O.* Effect of spring fixation on dynamics of cylindrical reservoir with liquid on movable platform / O. Limarchenko, R. Tkachenko // International Applied Mechanics, 2014. – 50. – №3. – P. 69–76.
3. *Faltinsen O.M.* Multidimensional modal analysis of nonlinear sloshing in a rectangular tank with finite water depth / O.M. Faltinsen, O.F. Rognebakke, I.A. Lukovsky, A.N. Timokha // Journal of Fluid Mechanics. Cambridge University Press. 2000, V.407. – P. 201-234.

References

1. LIMARCHENKO, O., MATARAZZO, G., YASINSKY, V. (2003) *Rotational motion of structures with tanks partially filled by liquid*. Kyiv.
2. LIMARCHENKO, O., TKACHENCO, R. (2014) *Effect of spring fixation on dynamics of cylindrical reservoir with liquid on movable platform*. – International Applied Mechanics. – 50. – № 3., p.69-76
3. FALTINSEN, O.M., ROGNEBAKKE, O.F., LUKOVSKY, I.A., TIMOKHA, A.N. (2000) *Multidimensional modal analysis of nonlinear sloshing in a rectangular tank with finite water depth*. – Journal of Fluid Mechanics. Cambridge University Press. V.407., 201-234.

Надійшла до редколегії 19.08.14