

Імітація резонансних плескань рідини у резервуарі з вертикальною перегородкою

В. А. Ковальов¹ • Вей Ченьюй¹

Received: 10 May 2024 / Revised: 11 July 2024 / Accepted: 26 August 2024

Анотація. У поданому матеріалі представлено результати чисельного моделювання геометрії внутрішніх течій рідини у резервуарах, які піддані коливанням через зовнішні силові впливи. Подібні прикладні задачі мають місце при перевезенні значних обсягів рідини, наприклад, у суднах-танкерах. Враховуючи досить значні рухомі маси в межах резервуарів (танків), як правило, виникають ударні тиски на стінки та внутрішні конструкції напрямних апаратів, які можуть спричинити їх деформації і навіть руйнування, що приводить до серйозних аварійних ситуацій.

Численні дослідження, присвячені визначенню силових впливів течій рідини на стінки резервуарів дійшли висновку, що подані явища носять різко нелінійний характер, залежать не тільки від кількості рідини та напрямків її руху в межах резервуара, але й від формування за часом полів швидкості і тисків. Зазначені параметри є визначальними при прогнозуванні можливих резонансних явищ у резервуарах, що може стати у свою чергу основним фактором при проектуванні засобів демпфірування або керування інерційними потоками рідини.

Пропонована робота присвячена математичному моделюванню зазначених явищ у резервуарах, а також аналізу силового впливу внутрішніх інерційних течій, які спричинюють виникнення ударних тисків на внутрішні конструкції. На базі зазначених результатів досліджень можна запропонувати раціональні з точки зору демпфірування конструкції напрямних апаратів у вигляді плоских жорстких перегородок.

Ключові слова: резервуари з перегородками, внутрішні інерційні течії, резонансні ударні тиски, числа Рейнольдса, поле швидкостей і тисків.

Вступ

Плескання рідини у резервуарах є досить поширеним явищем у морському транспорті і може суттєво впливати на динамічну стійкість суден-танкерів. Подібні резонансні рухи рідини ініціюють локальні ударні тиски на стінки та кришки резервуара, що може призвести до пошкодження самого резервуара та його внутрішніх пристроїв, особливо при зовнішньому збудженні, що має частоту, близьку до резонансної. Виникнення подібних ситуацій може спричинити аварії з відповідними незворотними наслідками у вигляді розливання технічних рідин на поверхні моря, екологічного забруднення території тощо.

Одним з поширених методів запобігання сильному плесканню рідини є встановлення у проблемних місцях резервуара внутрішніх демпфіруючих перегородок. Однак, повністю гідродинамічний механізм дії перегородок на конструкцію резервуара ще не вивчений. Якщо зазначити, що подібні задачі мають також місце у наземному (автомобільні та залізничні цистерни), а також повітряному транспорті (літаки, гелікоптери, космічні кораблі тощо), то плескання рідини становить загальний інтерес для безпеки резервуарів та рухомих об'єктів у цілому. Тому дослідження плескань рідини в резервуарі з внутрішніми перегородками та пов'язаними з цим структурною поведінкою мають досить широке інженерне застосування.

Подібні обчислювальні задачі упродовж тривалого часу становлять широкий прикладний інтерес для багатьох вчених та експериментаторів, зокрема з точки зору прогнозування силових впливів рухомих мас рідини на внутрішні конструкції та стінки резервуарів. Так звані ударні тиски з боку рідини здатні внести у

✉ В.А. Ковальов
vaskov@ukr.net

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

динаміку рухомого об'єкта неконтрольовану збурюючу складову, яка може суттєво знизити стійкість руху, а також спричинити деформації або навіть руйнування самого об'єкта.

Враховуючи вищенаведене останнім часом досить поширеними стали теоретичні дослідження на базі чисельного моделювання внутрішніх інерційних течій рідини у резервуарах різної конфігурації. Подібні дослідження виконуються, як правило, за допомогою рівнянь течій у часткових похідних за Ейлером у відповідних координатах за певних граничних та початкових умов [1], [2].

За результатами математичних розрахунків отримують двохмірні та трьохмірні гідродинамічні поля швидкостей, тисків та кругових моментів, що складають досить інформативний механізм розвитку силових впливів всередині резервуарів. Поданий матеріал статті присвячений аналізу отриманих за результатами чисельного моделювання даних щодо резонансних дій рідини на стінки і внутрішні конструкції демпфіруючих перегородок та розробки практичних рекомендацій зі зменшення їх шкідливого впливу на конструкції резервуарів та рухомих об'єктів у цілому.

Мета та постановка задачі дослідження

Основною метою проведених розрахункових досліджень було чисельне моделювання внутрішніх течій рідини у резервуарі з перегородками для виявлення резонансних силових впливів на стінки та конструкції демпферів, а також мінімізації деформацій та можливих руйнувань резервуарів.

У Національному технічному університеті України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” проводяться наукові дослідження з математичного моделювання внутрішніх резонансних течій рідини в замкнених потоках для прогнозування можливих екстремальних силових впливів рідини на стінки

та конструкції резервуарів. Як відомо, подібні дослідження мають широке застосування при експлуатації великих залізничних та автомобільних цистерн, суден-танкерів, а також космічних літальних апаратів.

Досить широкий діапазон таких параметрів як амплітуда і частота коливань резервуарів з рідиною за умов руху зазначених об'єктів дозволяють стверджувати про нагальну необхідність здійснювати ефективні силові впливи на замкнені інерційні течії. Найбільш поширеними методами та засобами такого впливу, як відомо, є застосування внутрішніх перегородок, встановлених у певних точках резервуарів, а також на їх стінках [3], [4]. Перерозподіл ударних тисків з боку інерційних течій рідини за простором резервуара, а також за часом дозволяє суттєво зменшити ймовірність деформації, або навіть руйнування його стінок.

Математичне моделювання внутрішніх плескань рідини при коливаннях вільної поверхні проводиться, як правило, за допомогою системи рівнянь Нав'є-Стокса за досить малих величин чисел Рейнольдса ($Re = 1-1000$). Це дозволяє встановити вплив таких гідродинамічних параметрів як швидкість потоку у характерних областях резервуара, у безпосередній близькості від перегородок, а також полів тисків біля стінок і днища. Це також дає можливість варіювати розташуванням перегородок в усьому просторі резервуара залежно від особливостей розподілу силових дій.

Для розробки коректної моделі досить складних тривимірних течій з перегородками вважалося доцільним провести певні тестові розрахунки на спрощених моделях двовимірних течій. На рис. 1 представлено результати розрахунку поля швидкості течій у каналі з різноорієнтованими плоскими перегородками, де чітко видно утворення спарених вихрових структур у супутньому сліді за кожною з перегородок.

Згідно з попередніми дослідженнями [2], [3] виявлено суттєвий вплив супутнього сліду течій на розподіл ударних тисків залежно від початкових чисел

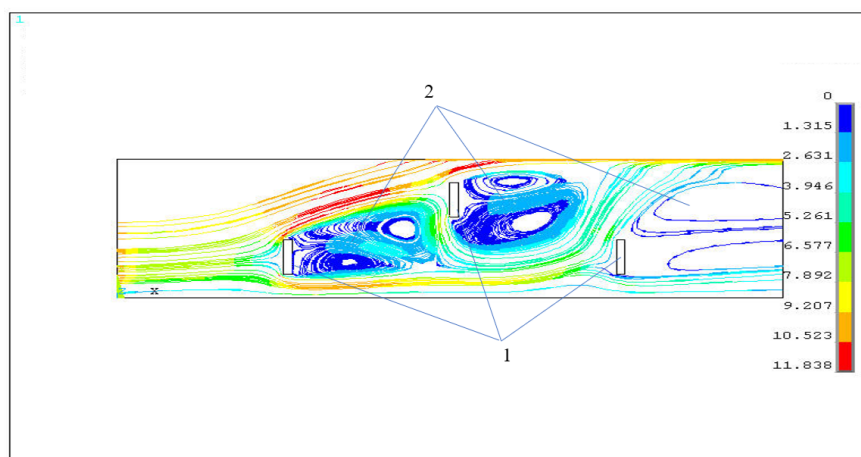


Рис. 1. Результати тестових розрахунків полів швидкості рідини у каналах з радіальними перегородками при $Re = 920$; 1 – радіальні перегородки, 2 – циркуляційні структури у супутньому сліді

Рейнольдса ($Re = 920$), а також взаємний вплив перегородок, розташованих на відстані $l = 70$ мм одна від одної. Як видно з рисунка, утворений лабиринтний гідравлічний опір, позначений відповідними лініями струму, здійснює досить ефективне демпфірування потоку у межах впливу перегородок, а також за їх межами. При цьому поздовжня компонента швидкості зменшується майже у 7 разів, але сумарний розподіл полів швидкості принципово не змінюється.

Подібні результати підтверджуються даними при $Re = 1450$, де зростають лише градієнти швидкості, але структура течій за часом протікання залишається досить стійкою. Отже, подані результати моделювання дають можливість прогнозувати приблизні величини динамічних тисків на поверхню перегородки, а значить – силові дії, що спричинюють значне зниження стійкості течій у резервуарах.

Аналіз результатів моделювання інерційних резонансних течій

Для порівняння динамічних впливів течій на перегородки при коливаннях резервуару слід встановити залежність зміни координат вільної поверхні рідини упродовж виникнення резонансних режимів коливальної течії. Для цього можна побудувати графічну залежність вертикальної координати Y за часом протікання рідини, яка представлена на рис. 2.

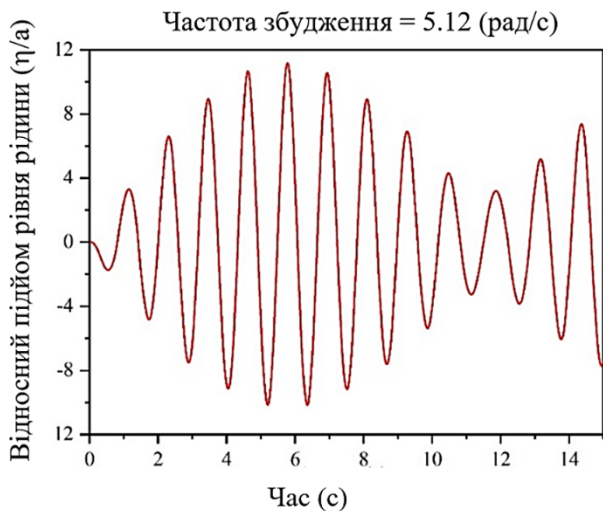


Рис. 2. Залежність за часом вертикальних координат вільної поверхні рідини у резервуарі з перегородками при $Re = 1450$

З рисунка видна поява двох характерних частот коливань вільної поверхні, наприклад, низькочастотної порядку 0,1 Гц, а також високочастотної до 1 Гц, що свідчить про формування дрібних вихрових структур у масштабі газової фази течії. Такі вихрові формування не можуть вносити суттєві збурення у розподіл ударних тисків, але вони означають деякі характерні

режими течії, що можуть бути передумовою виникнення резонансних плескань.

Таким чином, можна встановити найбільш ймовірні частоти та амплітуди коливань вільної поверхні для визначення проблемних режимів течій і основних параметрів силових впливів на внутрішні конструкції демпфіруючих пристроїв.

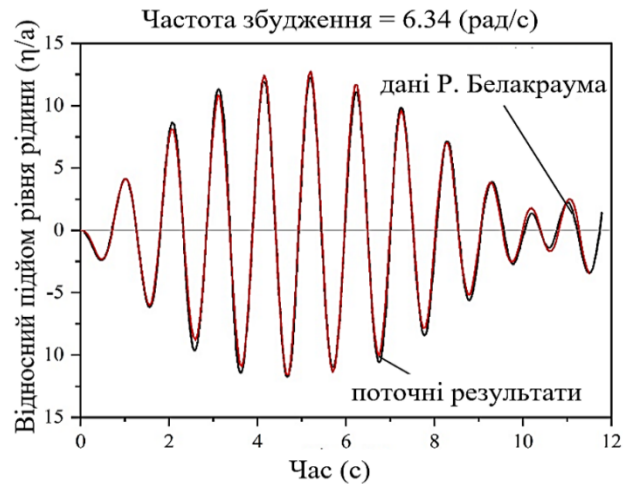


Рис. 3. Порівняння результатів розрахунків коливань вільної поверхні рідини у резервуарі з даними роботи [2]

Для моделювання використовувалася 2D модель з довжиною резервуара $L = 0,9$ м, висотою $H = 0,9$ м і висотою рівня рідини $h = 0,6$ м. Упродовж моделювання знайдено причини відхилення результатів моделювання від даних, представлених у роботі [5], і вона порівнюється з відносним підвищенням вільної поверхні біля лівої стінки при ковзанні рідини на стінках при частоті зовнішнього збудження $\omega = 6,34$ рад/с, тобто $\omega/\omega_0 = 1,1$.

Після підбору параметрів результати моделювання добре узгоджуються з результатами, наведеними у статті [2]. Максимальне значення висоти перетікання рідини майже однакове – 12,36 у цій роботі та 12,08 у поданих результатах моделювання, з похибкою близько 4 %. Однак, висота рівня рідини не повністю збігається з положенням, показаним на рис. 4.

Однак, якщо порівняти отримані результати з результатами іншої роботи, то зміни висоти вільної поверхні майже не узгоджуються. Відрізняється не тільки тенденція зміни, але й максимальне значення висоти.

Частота зовнішнього збудження має значний вплив на амплітуду коливань вільної поверхні, особливо коли частота зовнішнього збудження ω/ω_0 знаходиться в діапазоні 0,9–1,1. Максимальна висота коливань поверхні рідини різко зростає до максимального значення, а потім швидко зменшується. Коли висота коливань рідини досягає екстремального значення, відповідна частота зовнішнього збудження $\omega = 5,65$ рад/с, і цей результат є дещо меншим за власну частоту найнижчого порядку $\omega_0 = 5,762$ рад/с, розраховану за формулою.

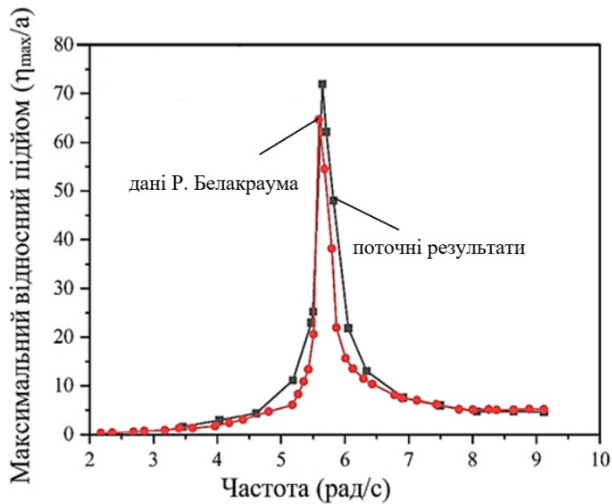


Рис. 4. Залежність максимального підйому рідини при резонансному плесканні від частоти коливань резервуара за даними Р. Белакурама [2], а також за результатами пропонуваніх досліджень

Як показано у роботі [2], екстремальне значення висоти хвилі становить 64.67, тоді як екстремальне значення цього розрахунку сягає 83.6. Таким чином встановлено, що причиною цього явища є розмір часового кроку під час чисельного розрахунку. І лише поблизу власної частоти ω_0 , часовий крок може суттєво впливати на висоту хвилі. При $\omega = 0.98\omega_0 = 5.648$ рад/с. Для часового кроку $\Delta t = 0.005$ с екстремальне значення висоти становить $\eta_{\max}/a = 40$; $\Delta t = 0.004$ с, $\eta_{\max}/a = 45$; $\Delta t = 0.003$ с, $\eta_{\max}/a = 62.3$; $\Delta t = 0.002$ с, $\eta_{\max}/a = 71.96$.

Коли частота зовнішнього збудження знаходиться в діапазоні $0.5\omega_0 < \omega < 0.9\omega_0$ і $1.1\omega_0 < \omega < 1.5\omega_0$, зміна розміру часового кроку стає причиною коливання висоти хвилі в межах 5%. Наприклад, коли $\omega = 1.1\omega_0 = 6.34$ рад/с, η_{\max}/a завжди становить близько 13.

Також висота перегородки впливає на власну частоту плескання. Зі збільшенням висоти перегородки h/H власна частота найнижчого порядку резервуара зберігає тенденцію до зниження. Максимальну відносну висоту кожної перегородки та коефіцієнт затухання від висоти можна побачити на рис. 4, де видно що зі збільшенням висоти перегородки власна частота зменшується, і це зменшення поступово зростає.

Отже збільшення висоти перегородки має поступово зростаючий вплив на власну частоту. Коли висота перегородки становить $h/H < 0.4$, власна частота практично не змінюється, а різниця з початковою власною частотою ω_0 становить лише близько 5%.

Для якісної оцінки частоти коливань рідини у резервуарі на рис. 5 показано коефіцієнт ослаблення максимального значення відносної висоти зсуву вільної поверхні та його залежність від висоти перегородки. Видно, що здатність вертикальної перегородки затухати за висотою поступово зростає зі збільшенням відношення висоти перегородки h/H . Існує певна лінійна

залежність між співвідношенням висоти h/H екрана і коефіцієнтом ослаблення підйому поверхні рівня. Це у свою чергу свідчить про досить очевидний вплив силових факторів на формування ударних тисків на стінки резервуара (рис. 6).

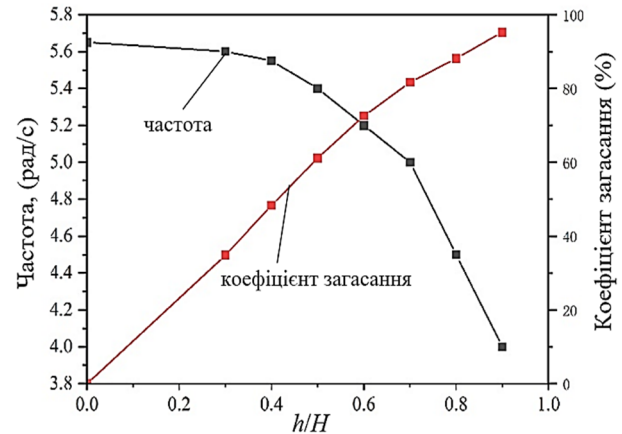


Рис. 5. Мінімальна власна частота та коефіцієнт загасання при коливаннях для різних висотах перегородки h/H

Крім того, як видно з рис. 5, зменшення частоти коливань рідини у резервуарі є причиною зниження відносного коефіцієнта загасання таких резонансних параметрів потоку як швидкість і гідростатичний тиск. Таким чином, перерозподіл циркуляції у передній та задніх областях перегородок може служити показником розвитку силового впливу потоку на стінки резервуара.

На рис. 6 показано зміну поля швидкостей для резервуара з внутрішньою вертикальною донною перегородкою при частоті збудження, що дорівнює власній частоті найнижчого порядку. Для більшої наочності позначено структури циркуляції в околі перегородки.

Рідиною, що використовується в моделі, є водопровідна вода. З представленого рисунка видно існування спеціальної області збурення на верхній кромці перегородки, яка ініціює різнонапрямлені інерційні течії залежно від напрямку потоку. Ці області означають появу зон нестійкості та вплив на розподіл швидкостей залежно від висоти перегородки у резервуарі-танку судна-танкера тоннажністю до 60 тисяч тон.

Наприклад, при $h = 0,3$ Н (рис. 6 а) така зона може складати до 0,7 Н, що еквівалентно масі рідини до 55 тон, що у свою чергу може викликати ударні тиски до 7–8 тон. Зі зростанням висоти перегородки її вплив на загальний простір течії у резервуарі невинно зростає (рис. 6 б, в), що візуально підтверджується зоною збудження біля верхньої кромки перегородки.

Це надає інформації про те, що більша частина потоку вже загальмована і не приймає участі у перерозподілі поля швидкостей у резервуарі. Таким чином, частота збудження ω для моделювання течії у резервуарі обрана в діапазоні 3,46–8,643 рад/с, що в перерахунку частоти коливань має бути в межах 0,55 Гц–1,375 Гц.

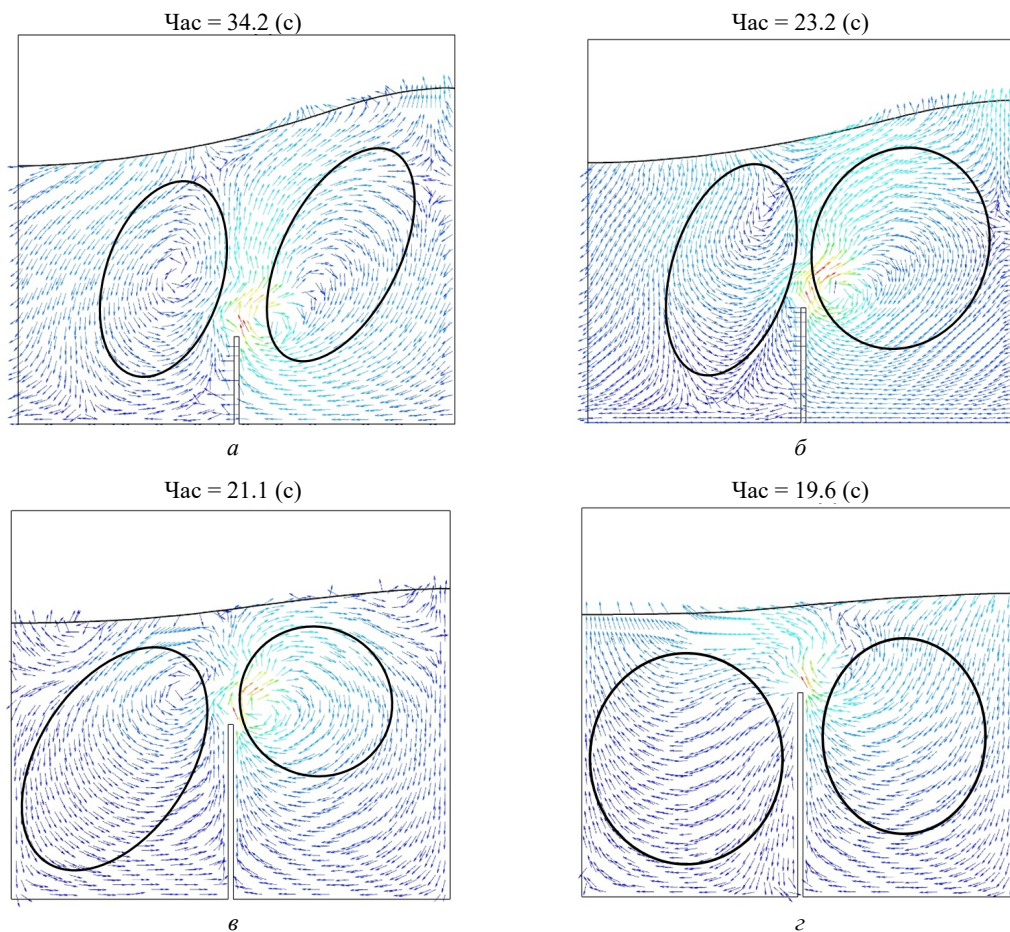


Рис. 6. Розподіл полів швидкості та формування циркуляційних структур у меридіональних площинах резервуара кубічної форми за різної висоти вертикальної перегородки h/H : $a - 0,3$; $b - 0,4$; $v - 0,6$; $z - 0,7$

Аналіз розвитку течії за часом при початкових коливаннях вільної поверхні рідини до 0.89 Гц свідчить про те, що резонансні плескання можуть мати місце з періодичністю до 65–70 разів за хвилину. Це надає можливість прогнозувати та коректувати силові впливи рідини на внутрішні конструкції резервуарів. Крім геометрії вертикальної придонної перегородки, у потоці можна прослідкувати різні варіанти її розташування для створення ефективного засобу демпфірування резонансних течій для мінімізації силових дій з боку інерційного потоку.

Висновки

Проведені у рамках поданого матеріалу дослідження на базі чисельного моделювання дозволяють зробити висновки про досить складний, різко нелінійний характер гідродинамічного механізму у резервуарі з рідиною. Враховуючи сумарні об'єми рухомої рідини, а також частоти ініційованих коливань від 0,55 Гц до 1,375 Гц у потоці можуть виникати силові впливи з боку рідини порядку 1,5 до 4,8 тон. Цей фактор може

стати причиною виникнення гідродинамічної нестійкості та втрати стабільності руху досліджуваного об'єкта.

Отримані результати дають змогу визначити найбільш вразливі області коливального потоку для використання в них спеціальних напрямних апаратів у вигляді демпфіруючих перегородок різного розташування і геометрії. Найбільш доцільними представляються не тільки жорсткі плоскі перегородки, але й пружні конструкції, які здатні поглинати деяку (до 35 %) частину кінетичної енергії потоку і таким чином суттєво зменшити силові впливи з боку рідини на внутрішні конструкції резервуару.

Перспективними гідродинамічними дослідженнями у цій галузі представляються вимірювання та моделювання інерційних течій з пружними конструкціями демпферів та визначення характеру розподілу полів швидкості та тисків у безпосередній близькості від стінок резервуара та самих напрямних апаратів. Це дасть змогу ефективно керувати компенсаційними заходами в усьому просторі тривимірної течії, а також заздалегідь прогнозувати характер розвитку подібних явищ у резервуарах.

References

- [1] V. Kovalev, “Influence of intratube baffles on the technology of liquid fuel in spacecraft tanks”, Bulletin of the National Technical University of Ukraine “KPI”, Mechanical Engineering, No. 48, pp. 73–79, 2006.
- [2] V. Kovalev, “Determination of hydrodynamic support of torus stabilisation in the upper tanks of the spacecraft, Bulletin of the National Technical University of Ukraine “KPI”, Mechanical Engineering, No. 42, vol. 1, pp.107–111, 2002.
- [3] R. Belakroum, M. Kadja, T.H. Mai, et al., “An efficient passive technique for reducing sloshing in rectangular tanks partially filled with liquid”, *Mechanics Research Communications*, Vol. 37 (3), pp. 341–346, 2010, doi: 10.1016/j.mechrescom.2010.02.003.
- [4] B.F. Chen, R. Nokes, “Time-independent finite difference analysis of fully non-linear and viscous fluid sloshing in a rectangular tank”, *Journal of Computational Physics*, Vol. 209 (1), pp. 47–81, 2005, doi: 10.1016/j.jcp.2005.03.006.
- [5] D. Liu, P. Lin, “A numerical study of three-dimensional liquid sloshing in tanks”, *Journal of Computational Physics*, Vol. 227 (8), pp. 3921–3939, 2007, doi:10.1016/j.jcp.2007.12.006.
- [6] X. Zheng, Y. You, Q. Ma, A. Khayyer, “A Comparative Study on Violent Sloshing with Complex Baffles Using the ISPH Method”, *Appl. Sci.*, Vol. 8 (6), 904, 2018, doi: 10.3390/app8060904.
- [7] E. Zhang, W. Zhu, L. Wang, “Influencing analysis of different baffle factors on oil liquid sloshing in automobile fuel tank”, *Automobile Engineering*, Vol. 234 (13), pp.1–14, 2020, doi: 10.1177/09544070209195.
- [8] L Ren, Y Zou, J Tang, et al., “Numerical Modeling of Coupled Surge-Heave Sloshing in a Rectangular Tank with Baffles”, *Shock and Vibration Hindawi*, Vol. 2021, Article ID 5545635, 2021, doi: 10.1155/2021/5545635.
- [9] V. Kovalev and W. Chenyu, “The structure of viscous liquid internal flows in tanks with damping baffles”, *Mech. Adv. Technol.*, Vol. 6, No. 3, pp. 309–316, 2022, doi: 10.20535/2521-1943.2022.6.3.266603.
- [10] V. Kovalev, O. Shibaev, and W. Chenyu, “Numerical modeling of internal flows in tanks with baffles”, *Mech. Adv. Technol.*, Vol. 7, No. 1 (97), pp. 122–128, 2023, doi: 10.20535/2521-1943.2023.7.1.270308.

Simulation of resonant liquid sloshing in a tank with vertical baffles

V. Kovalev¹ • Wei Chenyu¹

¹ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

Abstract. The material presents the results of numerical modeling of internal fluid flows geometry in tanks that are subject to fluctuations due to external force influences. Similar applied problems occur when transporting large volumes of liquid, for example, in tanker ships. Given the rather significant moving masses within the reservoirs (tanks), as a rule, there are shock pressures on the walls and internal structures of the guiding devices, which can cause their deformation and even destruction, which leads to serious emergency situations.

Numerous studies devoted to the determination of the force effects of liquid flows on the walls of tanks came to the conclusion that the presented phenomena are of a strongly nonlinear nature, depend not only on the amount of liquid and the directions of its movement within the tank, but also on the formation of velocity and pressure fields over time. The specified parameters are decisive in predicting possible resonance phenomena in tanks, which in turn can become the main factor in the design of means of damping or control of inertial fluid flows.

The proposed work is devoted to the mathematical modeling of the mentioned phenomena in tanks, as well as the analysis of the force effect of internal inertial flows, which cause the occurrence of shock pressures on internal structures. On the basis of the indicated research results, it is possible to propose rational from the point of view of damping the design of guide devices in the form of flat rigid baffles.

Keywords: reservoirs with baffles, internal inertial flows, resonant shock pressures, Reynolds numbers, velocity and pressure field.