

Структура внутрішніх потоків в'язкої рідини у резервуарах з демпфуючими перегородками

В.А. Ковальов¹ • Вей Ченьюй¹

Received: 3 October 2022 / Accepted: 14 November 2022

Анотація. Сучасні рухомі об'єкти, що містять великі об'єми рідини потребують забезпечення стійкості на траєкторії руху, надійності керування при маневрах, а також можливості прогнозування та запобігання екстремальним умовам руху. У поданій статті наводяться оглядові матеріали, присвячені результатам дослідження інерційних течій в'язкої нестисливої рідини у резервуарах з внутрішніми демпфуючими перегородками. З метою силового впливу на резонансні збудження з боку рідини та компенсації нестійкостей рухомих об'єктів проводиться аналіз та проектування раціональних конструкцій засобів впливу на течії.

Серед найбільш ефективних засобів демпфування слід зазначити жорсткі внутрішні перегородки різних конструкцій, встановлені у резервуарах у найбільш ймовірних областях, де можуть виникати нестійкості та джерела збудження резонансних рухів рідини. Плоскі жорсткі перегородки, профільні проникні демпфуючі поверхні, перфоровані та утримуючі елементи, заневолювачі рідини за рахунок сил поверхневого натягу тощо, потребують всебічного та детального вивчення та аналізу.

Ключові слова: паливний резервуар, перегородка, резонансні плескання, поле швидкостей і тисків, силовий вплив потоку на перегородки.

Вступ

Сучасний розвиток різних галузей промисловості має на увазі інтенсифікацію та зростання обсягів транспортування об'єктів та матеріалів. Широкого застосування набули інтенсивні перевезення рідких промислових матеріалів, наприклад, хімічних речовин, палива та реагентів. Крім того, відомо, що у ракетно-космічній галузі зазначені проблеми пов'язані з використанням великих об'ємів рідкого палива та окиснювача (до 40 тон), де неконтрольовані рухи рідини можуть впливати на стійкість, тривалість та траєкторію польоту об'єктів.

Подібні рідини, залежно від обсягу є джерелом нестійкості, тому упродовж багатьох десятиків років численні вчені, дослідники та інженери вивчають замкнені течії в'язкої нестисливої рідини у частково заповнених резервуарах різної геометрії. Упродовж руху

об'єкта, рідина у резервуарі, як правило, утворює течії з неконтрольованим плесканням відносно однієї та кількох осей симетрії, спричинюючи таким чином резонансні силові впливи на стінки ємності. Через великі інерційні маси рідини, в результаті, подібні течії можуть стати джерелом нестійкості або навіть причиною аварії, наприклад, судна-танкера, залізничної цистерни або космічного об'єкта.

Цілком логічним та ефективним засобом впливу на подібні резонансні плескання рідини є застосування у порожнинах резервуарів внутрішніх демпфуючих перегородок чи напрямних апаратів, які дозволяють впливати на внутрішні течії, мінімізувати шкідливі дії з боку рідини та прогнозувати картину розподілу та розвиток компенсаційних заходів щодо внутрішніх течій рідини.

Постановка задачі та мета досліджень

Метою та задачами досліджень є визначення особливостей утворення та розвитку інерційних течій у резервуарах різної геометрії при їх коливаннях, кризових рухах тощо, вивчення гідродинамічного

✉ В. А. Ковальов
vaskov@ukr.net

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

механізму внутрішніх течій та можливостей керування ними за допомогою оптимального застосування спеціальних напрямних апаратів, наприклад різних конструкцій перегородок.

Слід зауважити, що застосування внутрішніх демпфуючих пристроїв у першу чергу залежить від геометрії резервуарів, що містять рухома рідину. Наприклад, у циліндричній цистерні зі співвідношенням довжини до діаметра 3:1 (рис. 1), яка рухається прямолінійно з певними прискореннями та гальмуваннями, можна розмістити вертикальні перегородки для розділення маси рідини на фрагменти і таким чином зменшити результуючий силовий вплив на стінки резервуара та конструкції об'єкта в цілому [1]. З рисунку видно, що у стані плескання непроничні перегородки можуть сприймати менші маси рідини, тому ймовірність виникнення великих нестійкостей суттєво зменшується.

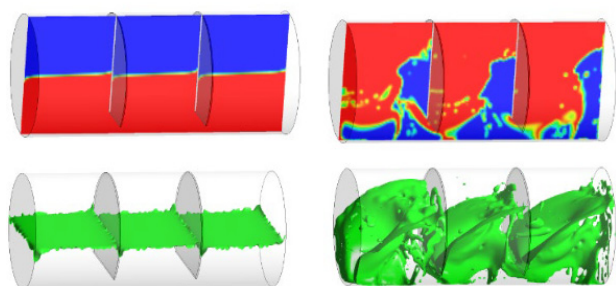


Рис. 1. Результати чисельного моделювання розподілу швидкостей при коливаннях рідини у циліндричному резервуарі з суцільними перегородками [1]

Для деякого зменшення динамічного тиску в'язких течій всередині резервуара у роботі [2] запропоновано круглі перегородки з центральним отвором (рис. 2). При використанні подібної конструкції упродовж прямолінійного прискореного руху частина рідини за дії сил інерції переливається до сусідніх секцій і таким чином зменшує піковий силовий вплив на площини перегородок, при цьому відбувається частковий перерозподіл сумарної маси потоку у резервуарі. Дослідження розподілу частот коливань рідини у резервуарі з подібними засобами впливу на потік дозволяє представити трьохмірну картину розвитку силових дій за часом, коли відбувається загасання інерційної течії у резервуарі.

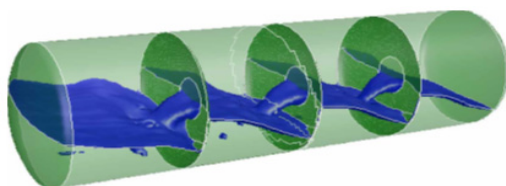


Рис. 2. Результати чисельного моделювання розподілу швидкостей при коливаннях рідини у циліндричному резервуарі (перегородка з центральним отвором) [2]

Аналіз конструкцій та методів силового впливу на резонансні потоки в'язкої нестисливої рідини у резервуарах

Експериментальні дослідження, пов'язані з використанням внутрішньо-бакових демпферів мають розгалуження за декількома напрямками. З одного боку, є прагнення охопити перегородками весь об'єм резервуара, а з іншого – мінімізувати габарити і масу внутрішніх пристроїв. Тому дослідники застосовують для моделювання різноманітні за конфігурацією та розташуванням конструкції демпферів. Наприклад, на рис. 3 у прямокутному баку запропоновано Т-видний придонний елемент, який формує вільну поверхню рідини при резонансному плесканні у коливальному потоці, де гребні вільної поверхні рідини становлять до 15% маси [3].

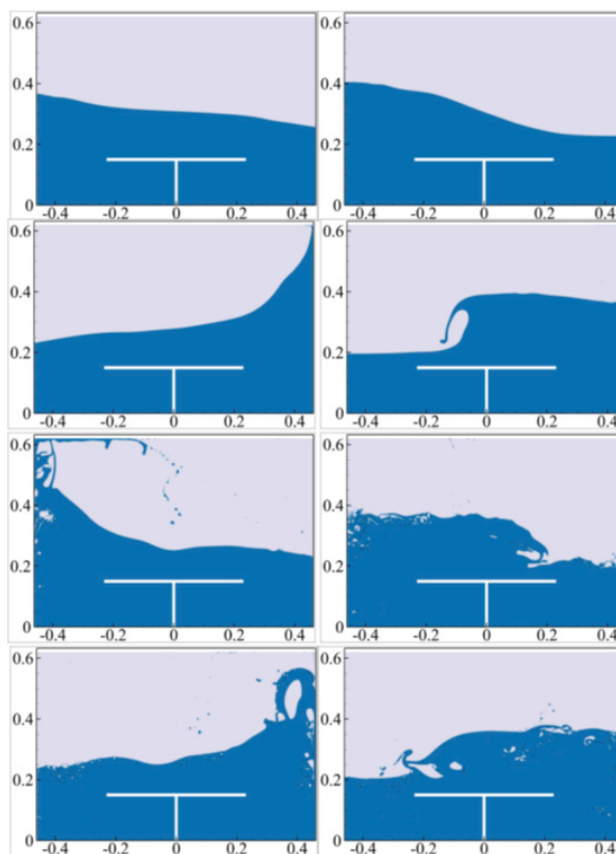


Рис. 3. Застосування Т-видного придонного демпфуючого елемента при резонансних коливаннях рідини у прямокутному резервуарі [3]

Розвиток подібної течії за часом свідчить про швидке загасання резонансного плескання потоку. Таким чином, можна зробити висновок про ефективність впливу подібної конструкції демпфера на характер розподілу та розвиток силових дій у потоці.

Найбільш поширеним методом ефективного впливу на внутрішні потоки в'язкої рідини вважають розташування горизонтальних перегородок різної ши-

рини та конфігурації на периферії резервуара, де, як правило, виникають максимальні градієнти полів швидкості та тисків. На рис. 4 наведено результати математичного моделювання внутрішніх резонансних течій у резервуарі прямокутного перерізу, де можна побачити утворення дрібних циркуляційних течій, що можуть виникати поблизу перегородок та мігрувати в усьому просторі баку [4].

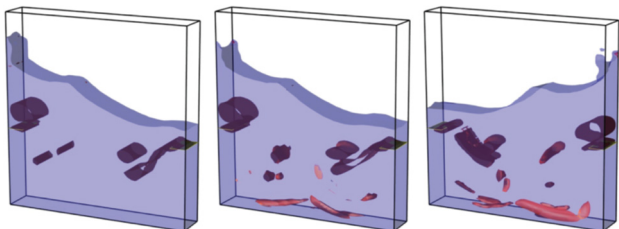


Рис. 4. Вплив дрібних циркуляцій в околі периферійних перегородок на формування збуджень на вільній поверхні у прямокутному резервуарі [4]

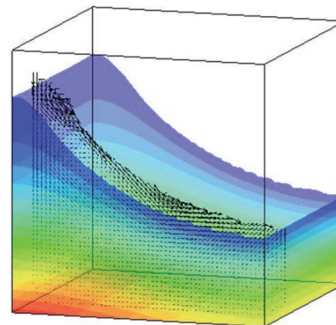
Циркуляційні маломасштабні утворення, хоча безпосередньо і не впливають на величину кругового збуджуючого моменту, але вони приймають участь у формуванні стійкої інерційної течії поблизу вільної поверхні рідини. Циркуляційна течія поглинає частину кінетичної енергії потоку, зменшуючи плескання вільної поверхні рідини.

Поширеною тенденцією при конструюванні внутрішніх напрямних апаратів у резервуарах з в'язкою рідиною є виконання конструкцій з отворами на площинах перегородок. Крім зменшеної їх маси, протікання рідини крізь отвори створює додаткові гідравлічні опори для інерційного потоку і забезпечує радикальний перерозподіл гідродинамічних полів – компонент вектора швидкості та тисків. На рис. 5 представлена характерна для замкнених течій конструкція проникного демпфуючого пристрою з прямокутними вікнами, а також заглибленими горизонтальними перегородками. У порівнянні з резервуаром без перегородок (рис. 5, а), така конструкція здатна утримувати досить велику кількість рідини у стабілізованому стані (рис. 5, б) без можливого утворення резонансних плескань [5].

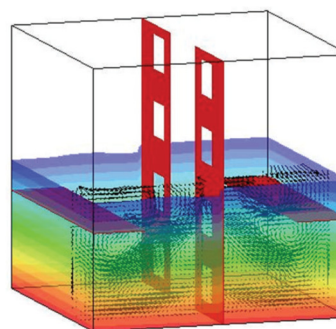
З іншого боку, обтяження громіздкими та масивними конструкціями напрямних апаратів баків рухомих об'єктів з паливом є досить ризикованим через суттєві обмеження при маневруванні об'єкта. Наприклад, за умов криволінійного руху автомобільної цистерни ємністю до 20 тон зі швидкістю 80 км/год подібна маса баку з перегородками здатна створити круговий момент перекидання цистерни порядку 180 кгм.

Перфорація площини перегородки отворами різного діаметра створює дещо іншу ситуацію з точки зору динамічного тиску потоку в'язкої рідини на площини перегородок. У порівнянні з динамічним впливом потоку на суцільну перегородку інерційні течії частково проникають крізь отвори перфорації, змен-

шуючи сумарний тиск на площини перегородок. Таким чином пікові силові впливи можуть зменшуватися до 18%, а у зонах у супутньому сліді за перегородками утворювати зони розрідження та радикального перерозподілу динамічних полів.



а



б

Рис. 5. Застосування вертикальних перфорованих жорстких перегородок та периферійних горизонтальних конструкцій [5]

Експериментальні дослідження багатьох вчених-математиків направлені на моделювання фрагментів внутрішніх течій в'язкої рідини в околі перегородок (наприклад, [6]). На рис. 6 показано структуру вторинних течій біля горизонтальної перегородки та її розвиток за часом інерційної течії. Із зображення видно процес міграції хвильового розподілу швидкості відносно площини перегородки і таким чином ми можемо виділити пікові силові впливи на площину перегородки, а також ефективність подолання резонансних явищ за часом інерційної течії.

Одним з ефективних методів впливу на внутрішні резонансні течії в резервуарах є використання рухомих демпферів, які можуть переміщатися під дією рідини, одночасно створюючи гідравлічний опір потоку і поглинаючи частину його енергії [7]. На рис. 7 представлено конструкцію резервуара з використанням плаваючої платформи, яка здатна реагувати на зовнішні сили з боку рідини. Поряд з функцією ізолювання газової та рідкої фаз у резервуарі така платформа, що має позитивну плавучість, може змінювати свої положення відповідно силовим впливам з боку рідини, виключаючи явище резонансного плескання.

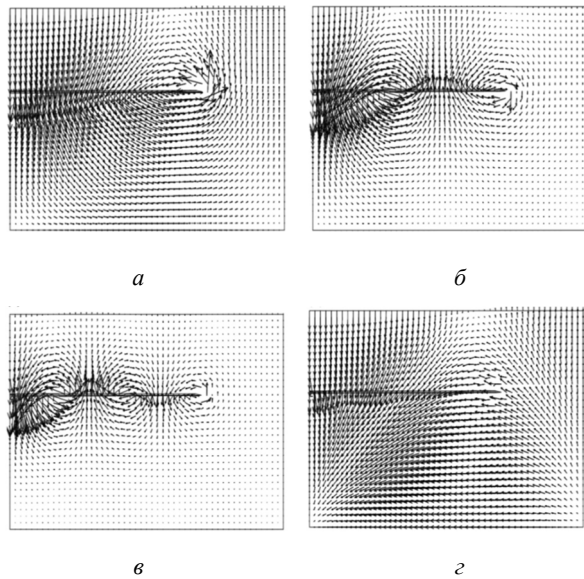


Рис. 6. Структура вторинних течій біля горизонтальної непроникної перегородки за часом інерційної течії в'язкої рідини [6]

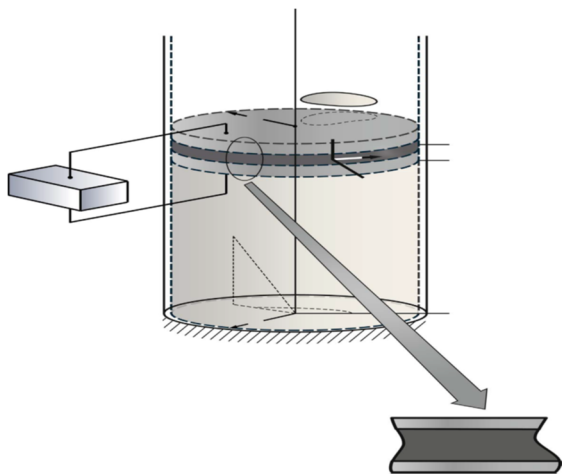


Рис. 7. Плаваюча платформа певної маси для поглинання коливань поверхні рідини у циліндрі [7]

Ще одним типом використання плаваючих перегородок є конструкції, що мають певний зазор між стінками резервуара та зовнішніми кромками напрямного апарату (рис. 8) [8]. Як видно з рисунка, будь-яка динаміка вільної поверхні рідини при коливаннях у резервуарі, включаючи резонансні плескання, відстежуються плаваючою пластиною, яка може змінювати кут нахилу її площини відносно горизонтальної поверхні.

Оскільки маса подібної плаваючої платформи може складати досить велику величину, то її лінійне переміщення навіть на незначну відстань або кут може віднімати частину кінетичної енергії інерційного потоку в'язкої рідини. Певним недоліком подібних демферів є те, що вони можуть здійснювати неконтрольовані рухи у різних площинах паливного резервуару, а також вони нечутливі до зміни рівня наповнення баку.

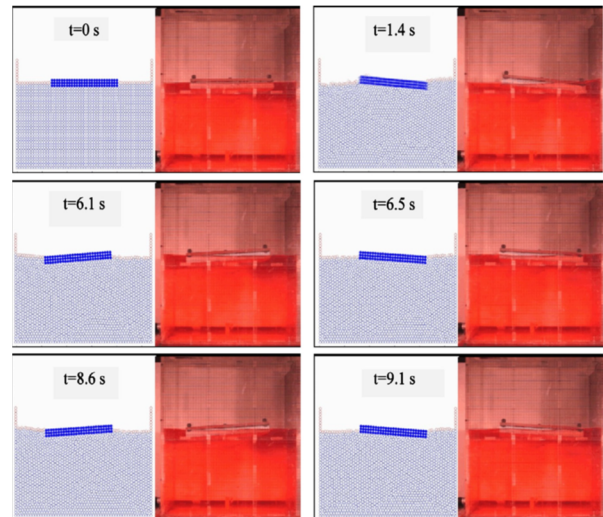


Рис. 8. Порівняння геометрії вільної поверхні рідини за результатами чисельного моделювання та фізичного експерименту [8]

Поєднання переваг фіксованих і плаваючих перегородок, дає змогу запропонувати нову плаваючу комірчасту конструкцію (рис. 9) [9]. Завдяки наявності плаваючих елементів перегородок рідина в резервуарі поділяється на менші робочі об'єми з більш розсіяною структурою потоку. Таким чином, плескання вільної поверхні потоку суттєво знижується, а ударний тиск на стінки баку зменшується.

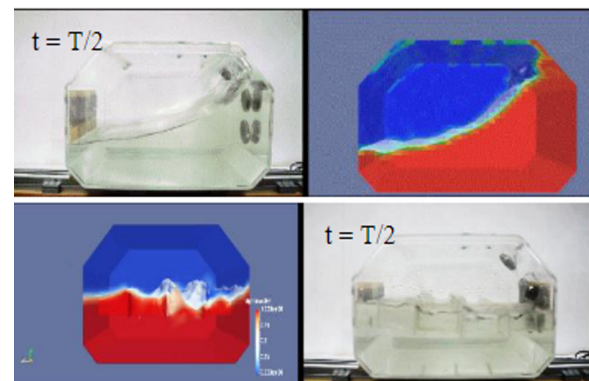
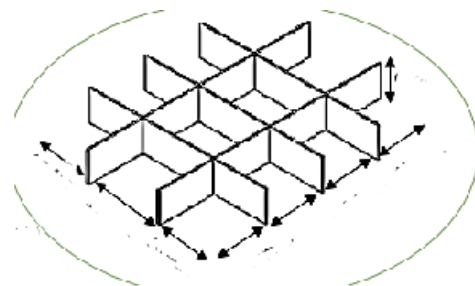


Рис. 9. Структура плаваючої комірчастої перегородки та положення рідини у резервуарі з перегородкою та без неї [9]

На рис. 10 показана графічна залежність поверхні розділу “рідина-газ” від терміну коливальних, де очевидна поява резонансних гребенів розподілу пікових утворень на поверхні рідини. Від’ємні фрагменти графічних залежностей демонструють розкачування вільної поверхні та вказують на технічні можливості щодо ефективного впливу на внутрішні течії рідкого палива.

Крім певного заощадження маси подібних конструкцій через наявність отворів упродовж усієї площини перегородки та демпфування силових впливів завдяки її проникності перегородки являють собою ребра жорсткості для забезпечення міцності усієї конструкції паливного резервуару. Перспективами широкого застосування подібних жорстких конструкцій нап-

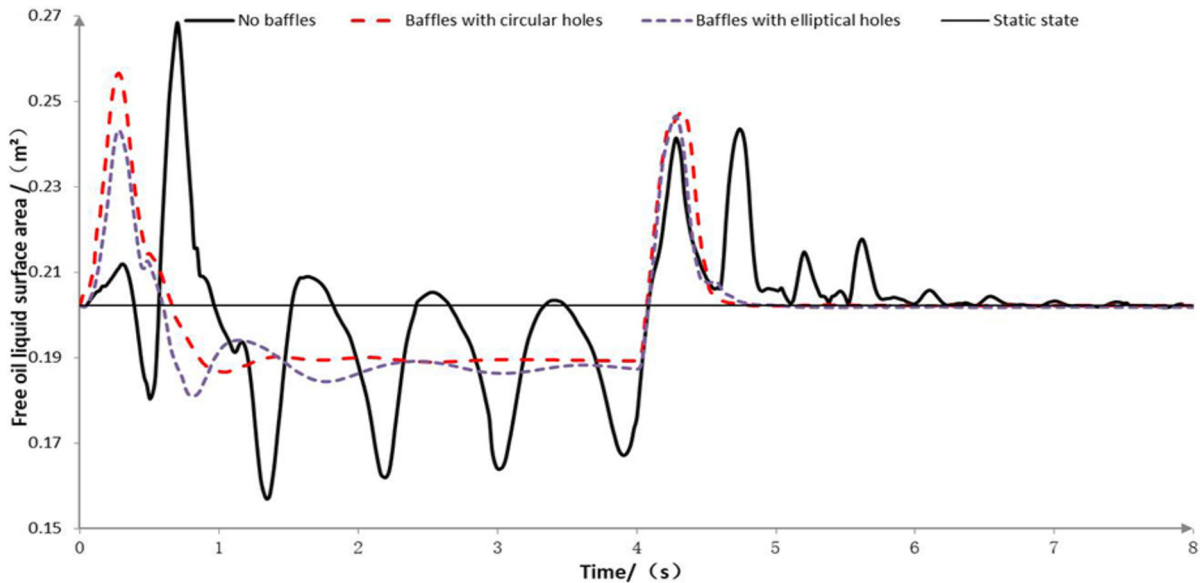


Рис. 10. Залежності зміни за часом вільної поверхні масла у паливному баку з перегородками різної форми [10]

Як зазначалося, досить ефективними для силового впливу на течії в'язкої рідини у паливних баках рухомих об'єктів є перфоровані плоскі перегородки з різним ступенем проникності, залежно від діаметра отворів перфорації. Проникність площин подібних перегородок також створює певний гідравлічний опір для потоків, ефективно долаючи резонансні плескання рідини (рис. 11).

рямних апаратів є застосування гнучких комплексних пристроїв, які здатні поглинати деяку частину кінетичної енергії потоку через деформації площини самої перегородки.

При цьому гнучка перегородка, результати розрахунку якої представлено на рис. 12, може значно зменшити ударний вплив рідини на стінці баку. За рахунок своєї деформації вона поглинає частину енергії плескання рідини і таким чином зменшує силові навантаження на конструкцію перегородки.

На рис. 13 показана величина ударного тиску, визначена на стінці резервуару при різних її модулях пружності. Така сама структура перегородки також впливає на її демпфіруючу здатність до плескання через зміну жорсткості.

Можна стверджувати, що подібні конструкції нагадують існування річкових або морських водоростей у середовищі яких швидкості води відсутні або складають дуже малу величину. Головною фізичною властивістю водоростей є дуже короткі терміни гасіння різного роду рухів води у межах їх впливу. Таким чином, варіюючи гнучкістю перегородок, ступенем їх проникності та розташуванням у паливних резервуарах можна запропонувати досить ефективні засоби керування внутрішніми інерційними потоками в'язкої рідини.

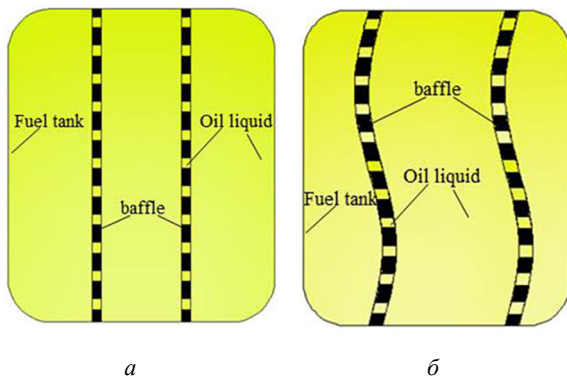


Рис. 11. Схематичні зображення перерізів перфорованих напрямних апаратів у паливному резервуарі: (а) прямолінійні перегородки, (б) синусоїдальні перегородки [10]

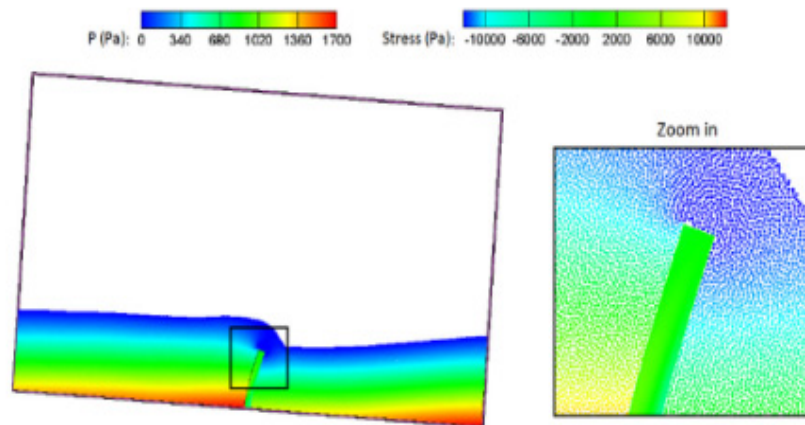


Рис. 12. Поле тиску рідини та поле напружень пружної перегородки [11]

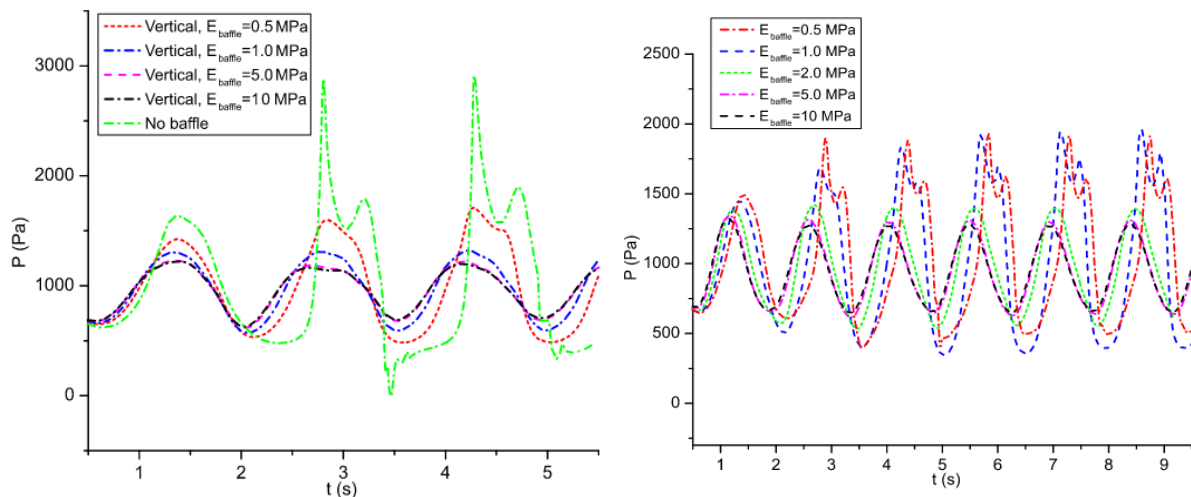


Рис. 13. Залежність за часом тиску на стінку резервуару при плесканні рідини з різною пружністю перегородки [11]

Для визначення гідродинамічного механізму розвитку нестационарних інерційних течій у резервуарах рухомих об'єктів, як правило, користуються методами математичного або імітаційного моделювання за допомогою пакетів прикладних комп'ютерних програм, які дозволяють цілком коректно відобразити основні гідродинамічні поля у тих чи інших трьохмірних потоках в'язкої нестисливої рідини. Для цього, наприклад, застосовують рівняння руху в'язкої рідини у формі Нав'є-Стокса, а також рівняння нерозривності потоку. Як зазначалося, дослідник повинен коректно задати параметри моделі, чітко призначити граничні та початкові умови моделювання, у результаті чого можна отримати досить вичерпну гідродинамічну картину течій.

На рис. 14 показано схему та деякі розмірні параметри моделі циліндра, частково заповненим в'язкою рідиною та із розташованим над поверхнею кільцевим демпфером. Графічні залежності свідчать про утворен-

ня потоків за межами впливу кільцевої перегородки з досить великими градієнтами швидкості, а також активне і тривале плескання вільної поверхні рідини.

Але найбільш цікавими представляються результати чисельного моделювання інерційних стратифікованих потоків рідини у цілком заповненому циліндрі із загуреною кільцевою перегородкою, наведеними на рис. 15, з якого видно нелінійний у досить короткий термін розподіл ліній струму та значний вплив перегородок.

Навіть невеликі швидкості течій у просторах вище та нижче перегородки свідчать про суттєву нелінійність розвитку гідродинамічного механізму потоку. На рисунку показано найбільш виражені лінії потоку у перші моменти нестационарної течії та схильність рідини до аномального розвитку нелінійного розподілу швидкостей в основному у верхній частині резервуара. Саме тут відбуваються основні силові впливи на стінки циліндра та кільцеву перегородку.

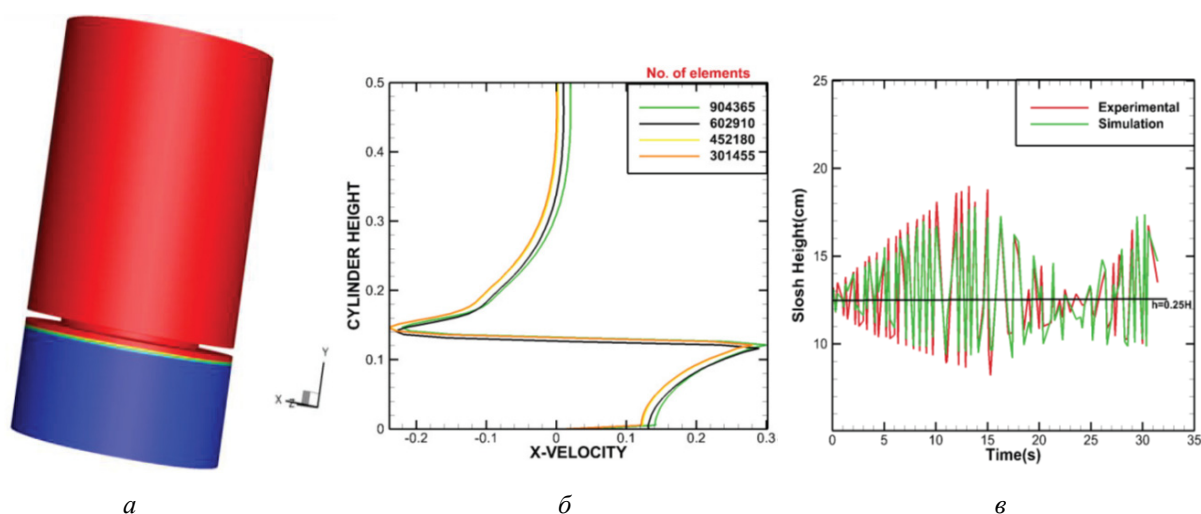


Рис. 14. Схематичне зображення циліндра з кільцевою горизонтальною перегородкою (а), розподіл швидкості рідини за висотою циліндра (б) та амплітуди плескання за часом (в) [12]

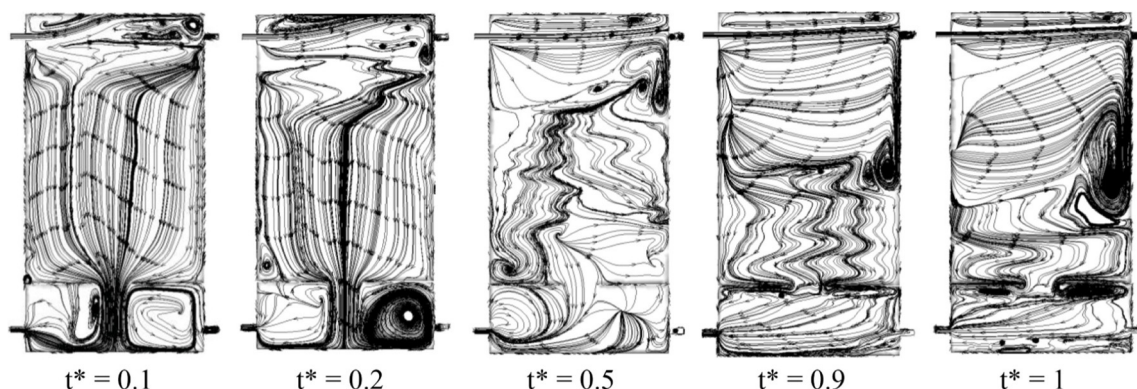


Рис. 15. Лінії струму у резервуарі з водою у різні моменти течії [13]

Висновки

Аналітичний огляд методів та пристроїв силового впливу на внутрішні течії нестисливої в'язкої рідини в резервуарах рухомих об'єктів дозволив дійти певних висновків, які пов'язані із конкретними науковими і технічними задачами. По-перше, ефективне застосування внутрішніх демпфіруючих пристроїв, враховуючи картину виникнення та розвитку за часом інерційних течій (вихрових, циркуляційних течій, плескання вільної поверхні потоку). По-друге, характер розташування конструкцій демпферів у просторі резервуару, а також урахування фізичних властивостей рідини (наприклад, рідкого палива у баку). По-третє, забезпечення мінімальної маси і габаритів демпфуючих пристроїв для уникнення перевантаження рухомих об'єктів та унеможливлення небезпечних відхилень при

маневруванні в умовах нестационарного руху або криволінійної траєкторії руху.

Моделювання гідродинамічних процесів у подібних обмежених об'ємах дозволяє суттєво скоротити обсяг та терміни фізичного експериментування та дійти коректних висновків щодо методів і засобів ефективного силового впливу на течії. Крім того, дані щодо дії внутрішніх інерційних течій у паливних резервуарах дозволяють прогнозувати раціональні режими руху об'єкта та можливі умови настання нестійкості при маневруванні.

Перспективні теоретичні та експериментальні дослідження мають проводитися з огляду на умови впливу внутрішніх пристроїв на демпфування резонансних плескань рідини та мінімізації впливу сил та кругових моментів збудження з боку рідини на стінки резервуарів та внутрішні пристрої.

References

- [1] Linlin Duan *et al.*, “Numerical study of the liquid sloshing in the cylindrical tank with baffles”, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 1985, 012050, 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/1985/1/012050
- [2] M.T. Korang, S. Rakheja and I.Stiharu, “Three-dimensional analysis of transient slosh within a partly-filled tank equipped with baffles”, *Vehicle System Dynamics*, Vol. 45, No. 6, 2007, pp. 525–548. DOI: 10.1080/00423110601059013
- [3] O. Ugur, GBilici and H. Akyıldız, “Liquid sloshing in a two-dimensional rectangular tank: A numerical investigation with a T-shaped baffle”, *Ocean Engineering*, 187, 106183, 2019. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106183
- [4] L. Ren *et al.*, “Numerical Modeling of Coupled Surge-Heave Sloshing in a Rectangular Tank with Baffles”, *Shock and Vibration Hindawi* 2021. DOI: 10.1155/2021/5545635
- [5] M.A. Xue, J. Zheng and P. Lin, “Numerical Simulation of Sloshing Phenomena in Cubic Tank with Multiple Baffles”, *Hindawi Publ. Corp. J. of Applied Math.*, 2012. doi:10.1155/2012/245702
- [6] E. Askari, K. HoonJeong and M. Amabili, “Hydroelastic vibration of circular plates immersed in a liquid-filled container with free surface”, *J. of Sound and Vibration*, Vol. 332, pp. 3064–3085, 2013. DOI: 10.1016/j.jsv.2013.01.007
- [7] S. Hasheminejad and M. Mohammadi, “Active sloshing control in a smart flexible cylindrical floating rooftopank”, *Journal of Fluids and Structures*, 66, pp. 350–381, 2016. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2016.07.022
- [8] C.G. Koh *et al.*, “Modelling of liquid sloshing with constrained floating baffle”, *Dept, National University of Singapore*, 117576.
- [9] U. Arif *et al.*, “Suppression of hydrodynamic sloshing in liquefied natural gas tank with floating baffle: Experimental and numerical studies”, in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 463(1), 2020. DOI: 10.1088/1755-1315/463/1/012111
- [10] E. Zhang, W. Zhu and L. Wang, “Influencing analysis of different baffle factors on oil liquid sloshing in automobile fuel tank”, *J Automobile Engineering*, Vol. 234, Issue 13, pp.1–14, 2020. DOI: 10.1177/0954407020919584
- [11] Z. Zhang *et al.*, “Investigations on sloshing mitigation using elastic baffles by coupling smoothed finite element method and decoupled finite particle method”, *Journal of Fluids and Structures*, 94, April 2020. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2020.102942
- [12] U. Gopalakrishnan *et al.*, “Investigation on the effect of baffle position on sloshing in tanks”, in *AIP Conference Proceedings*, 2134, 040005, 2019. DOI: 10.1063/1.5120213
- [13] L. Gao *et al.*, “Numerical and experimental investigation on thermal stratification characteristics affected by the baffle plate in thermal storage tank”, *Journal of Energy Storage*, Vol. 34, 2021. DOI: 10.1016/j.est.2020.102117

The structure of viscous liquid internal flows in tanks with damping baffles

Vasyl Kovalev, Wei Chenyu

Abstract. Modern moving objects containing large volumes of liquid need to ensure stability on the movement trajectory, reliability of control during maneuvers, as well as the ability to predict and prevent extreme movement conditions. The presented article provides review materials devoted to the research results into inertial flows of viscous incompressible fluid in tanks with internal damping baffles. In order to exert force on resonant excitations from the liquid side and to compensate for the instabilities of moving objects, the analysis and design of rational structures of influence means on currents is carried out.

Among the most effective means of damping should be noted rigid internal baffles of various designs installed in tanks in the most likely areas where instabilities and sources of excitation of resonant fluid movements may occur. Flat rigid partitions, profiled permeable damping surfaces, perforated and retaining elements, enslavers of liquid due to surface tension forces, etc., require comprehensive and detailed study and analysis.

Keywords: fuel tank, baffle, resonant sloshing, velocity and pressure field, force effect of flow on baffles.