

Чисельне моделювання внутрішніх течій у резервуарах з перегородками

В.А. Ковальов¹ • О.Г. Шибасєв² • Вей Ченьюй¹

Received: 10 January 2023 / Revised: 9 March 2023 / Accepted: 24 March 2023

Анотація. У пропонованій статті наведено матеріали експериментальних та математичних досліджень внутрішніх інерційних течій нестисливої рідини при її коливаннях у резервуарах. Проведений аналіз сучасних проблем, пов'язаних зі шкідливим впливом резонансних плескань рідини на конструкції резервуарів, а також на траєкторію та характер руху самого об'єкта з рідиною.

Застосування у подібних замкнених потоках демпфіруючих перегородок та напрямних апаратів дозволяє докорінно змінити структуру внутрішніх течій, зменшивши градієнти ударних тисків у потоках, а також перерозподілити основні інерційні впливи рідини. Чисельне моделювання подібних течій якісно підтверджує результати експериментальних досліджень і дозволяє побудувати досить складну нестационарну трьохмірну картину розвитку коливань у потоках рідини.

Крім застосування самих конструкцій демпфіруючих перегородок пропонується виконання площини перегородки перфорованою з різним ступенем проникності за рахунок діаметра отворів та їх кількості. Виникає ефект гідравлічного опору, коли енергія потоку втрачається через подолання штучних перешкод у вигляді отворів малого діаметра. Таким чином ударні впливи потоку на стінки резервуара прогнозуються меншої амплітуди і тривалості дії.

Застосування пропонованих лабіринтних конструкцій демпферів дозволяє лише гідравлічними засобами керувати силовими впливами рідини і таким чином зменшити кількість та габарити внутрішніх напрямних апаратів.

Ключові слова: резервуар з рідиною, резонансні коливання рідини, розподіл ударних тисків, демпфірування інерційних течій.

Вступ

Широко відомо, що при перевезенні великих обсягів технічних рідин (нафтопродукти, хімічні речовини, рідкі добрива тощо) велика увага приділяється можливостям та засобам контролю спонтанних та резонансних рухів рідини у резервуарах. При плесканні рідини від впливу зовнішніх масових сил у частково заповнених баках, як правило, виникають так звані ударні тиски, створювані великою кількістю та значною кінетичною енергією маси рідини. Такі дії з боку рідини, особливо при резонансних плесканнях, можуть становити серйозну небезпеку для міцності та витривалості конструкцій резервуарів, морських танків, паливних цистерн і баків літальних апаратів тощо.

✉ В.А. Ковальов
vaskov@ukr.net

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

² Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

Багато вчених-дослідників опікувалися вивченням гідродинамічного механізму замкнених течій у резервуарах різної конфігурації для встановлення особливостей розподілу тисків у потоках, а також трьохмірних полів швидкості рідини. Логічним розвитком подібних теоретичних та експериментальних досліджень стало застосування внутрішніх демпфіруючих пристроїв у резервуарах у вигляді перегородок або напрямних апаратів різної конфігурації та розташування. Горизонтальні та вертикальні, кільцеві та прямокутні, пристінні та придонні, ортогональні та перфоровані перегородки становили основну сукупність жорстких засобів силового впливу на неконтрольовані внутрішні течії рідини [1, 2, 7].

Для детального вивчення зазначених явищ і процесів у середині минулого сторіччя стали широко застосовуватися досить тривалі та дорогі експериментальні дослідження внутрішніх течій у резервуарах [3, 4, 10], з використанням сучасної на той час виміральної та реєструючої техніки. Аналіз результатів вимірювання швидкостей та тисків дозволяв отримати досить складну картину розподілу гідродинамічних параметрів та пропонувати раціональні конструкції

внутрішніх демпфіруючих пристроїв для зменшення резонансних впливів рідини на конструкції баків. Разом зі стрімким розвитком комп'ютерної техніки та програмного забезпечення стали доцільними та досить ефективними методи чисельного моделювання гідродинамічних явищ і процесів за допомогою пакетів прикладних програм. Такий математичний інструмент дозволив значно розширити діапазон досліджень та представити отримані результати у максимально зручному вигляді та форматі.



Рис. 1. Типова залізнична цистерна ємністю до 70 м³ для перевезення технічних рідин

Чисельне моделювання внутрішніх течій дозволило значно ефективніше визначити оптимальні за конфігурацією та розташуванням у потоці рідини конструкції демпферів для зменшення впливу резонансних плескань та ударних тисків на стінки та днище резервуару [5, 6, 8]. Крім того, використання нелінійних рівнянь руху рідини у резервуарах дозволило виявити та кількісно оцінити найдрібніші вторинні течії та гідродинамічні ефекти для побудови коректної картини розвитку силових впливів резонансних потоків на стінки резервуарів та внутрішні перегородки.

Слід зазначити, що застосування внутрішніх напрямних апаратів у резервуарах у вигляді плоских перегородок є логічним та ефективним методом силового впливу на резонансні течії рідини при плесканні. Але самі конструкції перегородок займають певний, а часто чималий об'єм і становлять велику масу, збільшуючи таким чином сумарну масу та момент інерції рухомого об'єкта, наприклад, танкера чи цистерни. Тому досить актуальними представляються дослідження ефективності внутрішніх конструкцій з максимальним ефектом демпфірування при мінімальній масі.

Мета та постановка завдання дослідження

Велика сукупність результатів експериментальних та теоретичних досліджень замкнених течій в'язкої рідини в обмежених об'ємах дозволяє стверджувати, що подана тематика є досить актуальною у теперішній час, що дозволяє запропонувати нові оригінальні методи і засоби вивчення подібних гідродинамічних явищ і процесів.

Метою поданого дослідження є аналіз гідродинамічного механізму внутрішніх резонансних течій в

обмежених об'ємах, створення фізичної та математичної моделей трьохмірних течій при плесканні рідини у резервуарах різної конфігурації за допомогою рівнянь руху та відповідних граничних умов та розробка найбільш раціональних з гідродинамічної точки зору внутрішніх демпфіруючих пристроїв для силового впливу на рідину.

Подана мета включає в себе розв'язання наступних завдань:

1. Аналіз особливостей замкнених течій в'язкої рідини та використання системи рівнянь руху відповідно геометрії та режимам коливань резервуарів та розробка граничних умов задачі.
2. Аналіз розподілу гідродинамічних параметрів – полів швидкості та тисків – для визначення найбільш ефективних засобів силового впливу на течії.
3. Розробка конструкцій та розташування внутрішніх демпфіруючих пристроїв у вигляді жорстких перегородок або напрямних апаратів для ефективного впливу на течії.

Постановкою завдання у поданій статті передбачено побудову фізичної моделі замкнених течій у резервуарах з демпфіруючими перегородками, а також перевірку коректності моделі за допомогою чисельного моделювання при зміні гідродинамічних параметрів.

У якості прикладу позначених течій використано результати математичних досліджень S.Rakheja [1], наведених на рис. 2, де у трьохмірному вигляді показано процеси перетікання та плескання в'язкої рідини у циліндричній цистерні.

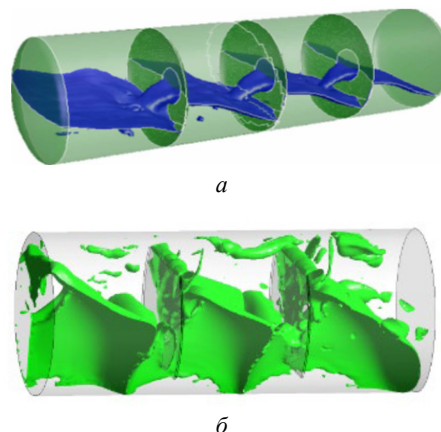


Рис. 2. Результати чисельного моделювання процесів плескання рідкого палива у циліндричній залізничній цистерні [1]: а – розташування рідини у резервуарі, б – розподіл ударних тисків на вертикальних стінках резервуару.

При аналізі гідродинамічних параметрів у резервуарах важливим є встановлення характеру розташування рідини при резонансних силових впливах рухомої рідини та розвитку конфігурації плескань відносно стінок резервуару, як показано на рис. 3. Зі збільшенням кількості перегородок пікові переміщення силових

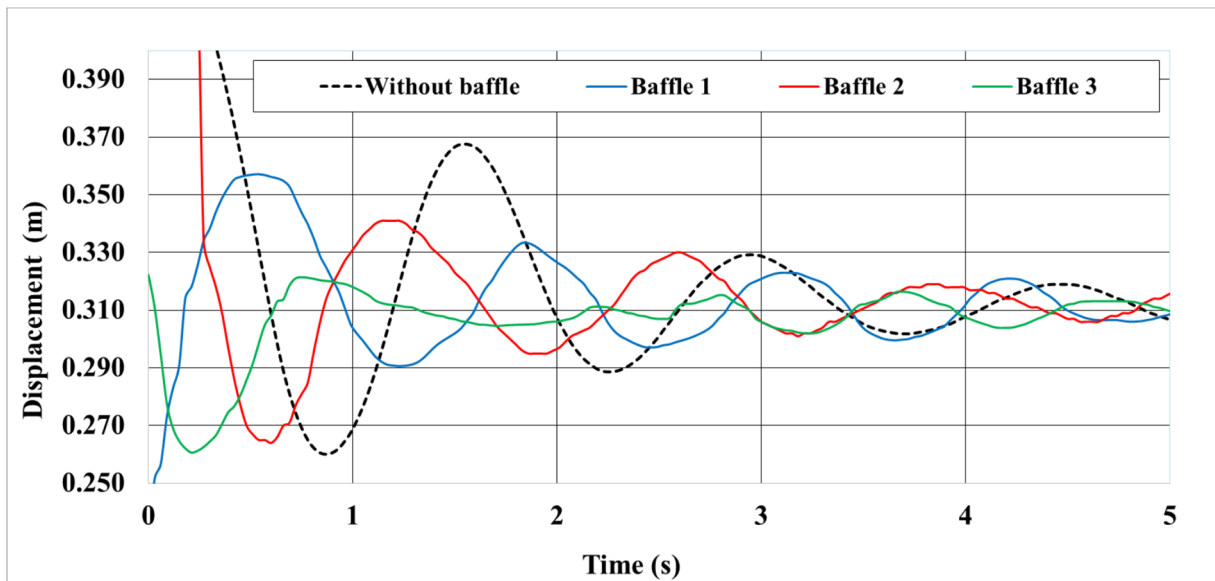


Рис. 3. Залежність розташування рідини у цистерні у резервуарах без перегородок, з однією, двома та трьома перегородками [1]

впливів стають меншими за величиною та більш віддаленими за часом процесу плескання. Крім того, через вплив в'язкості амплітуда коливань вільної поверхні рідини досить швидко загасає, а її роль у розподілі силових тисків стає менш значною.

Неспівпадіння пікових величин резонансів плескання за часом свідчить не тільки про суттєвий вплив перегородок на коливальний процес у резервуарі, а також на перерозподіл ударних тисків на стінках, при чому зазначаючи певну роль кожної з перегородок. З рис. 3 очевидно, що збільшення кількості перегородок можна вважати недоцільним через зростання їх сумарної маси та суттєвого зменшення їх впливу на епюри швидкості рідини при коливаннях.

Аналіз результатів чисельного моделювання інерційних течій у цистерні

Одним з характерних прикладів впливу інерційних течій на стінки резервуарів є задача про криволінійний рух залізничної цистерни цілком заповненої в'язкою рідиною, результати чисельного моделювання якої представлено на рис. 4. На рисунку показано розподіл динамічних тисків у просторі циліндричного резервуару при повороті цистерни на кут до 15 градусів при швидкості об'єкта до 80 км/год.

Як видно з рисунка, у передній частині резервуару ліворуч утворюються досить тонкі області знижено-

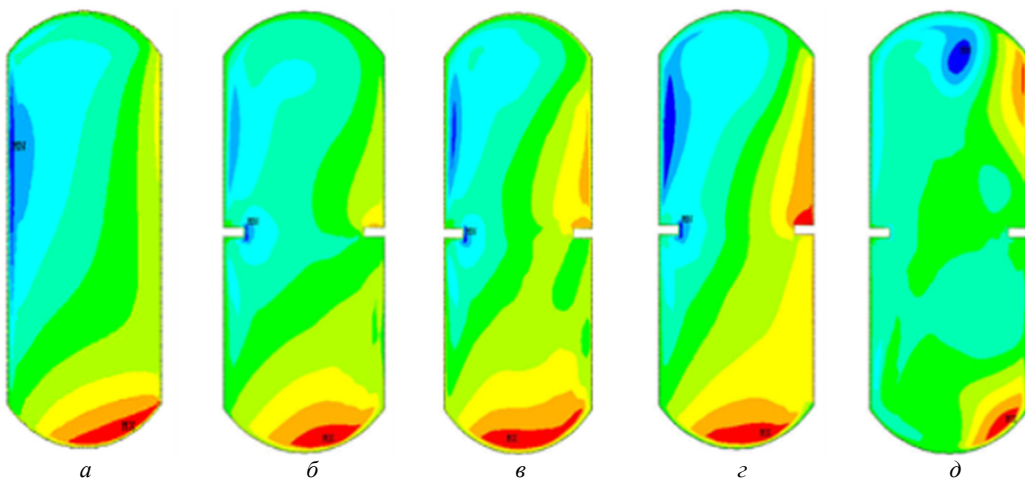


Рис. 4. Розподіл тиску у циліндричному резервуарі на круговій траєкторії рухомого об'єкта без внутрішніх перегородок (а), а також з двома поперечними перегородками у різні моменти руху: б – $T=1,8$ с; в – $3,6$ с; г – $7,2$ с; д – $11,5$ с [6, 10]

го тиску (темні зони), що свідчить про утворення так званих відливних течій. У той же час у нижній області резервуара виникають саме ударні течії (світлі зони), дещо зміщені від осі симетрії цистерни та напрямлені до торцевих її стінок. Такий розподіл силових впливів демонструє не тільки появу джерел нестійкості об'єкта з рідиною, які можуть привести до розвитку кругових перекидаючих моментів, але й градієнтів ударних тисків на елементи резервуара.

Наведений приклад внутрішніх течій допомагає встановити характерну структуру силових дій з боку рухомої маси рідини і стати підґрунтям для моделювання резонансних плескань рідини у резервуарах різної конфігурації. Крім того, встановлення гідродинамічного механізму розвитку нестационарних інерційних течій дозволить більш коректно поставити задачу про вплив резонансних ударних тисків з боку рідини на стінки та інші внутрішні конструкції паливних цистерн.

Одним з характерних прикладів силового впливу внутрішніх течій на конструкції баків представляється задача про обтікання жорстких перешкод [5], результати моделювання якої наведено на рис. 5. Досить показовою з точки зору розподілу швидкостей потоку навколо перешкоди є властивість утворення над перешкодою та за нею спеціальної області прискореної течії, яка може поширюватися на велику відстань.

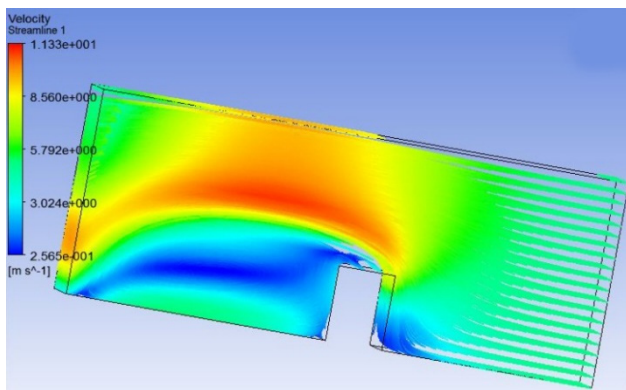


Рис. 5. Результати чисельного моделювання задачі про обтікання прямокутної перешкоди у потоці нестисливої рідини при початковій швидкості потоку $V = 4,5$ м/с [5, 9]

Таким чином, можна стверджувати про суто нелінійний характер протікання рідини навколо перешкоди, а також встановити нові закономірності побудови профілів швидкості через суттєвий вплив інерційних властивостей потоку. У попередніх наукових матеріалах подібні явища висвітлено недостатньо через необхідність проведення додаткових експериментальних досліджень та чисельних розрахунків, тому для нашої задачі цей аспект має бути розкритий більш докладно.

Наприклад, на рис. 5 можна побачити очевидну область прискореного потоку, що займає до 85% від висоти самої перешкоди, при цьому за самою перешкодою спостерігається утворення вихрової структури

зі зниженими градієнтами тиску. Власне ці області супутнього вихрового сліду в свою чергу утворюють суттєвий вплив лобового опору для кількісної оцінки ударних тисків на поверхню перегородки.

Про коректність результатів обчислення свідчить класична структура потоку крізь прямокутну перешкоду з появою критичної загальмованої області перед нею та інтенсивною циркуляцією у супутньому сліді за нею. Якісна оцінка гідродинамічного механізму запропонованої течії дозволяє провести аналогію з резонансними плесканнями рідини у частково заповнених резервуарах та побудову трьохмірної картини розподілу ударних тисків на площини внутрішніх перегородок.

Як зазначалося у роботах [5, 6, 7], для ефективного силового впливу внутрішніх перегородок на потоки у резервуарах пропонуються багатоеlementні плоскі конструкції, розташовані у різних зонах резервуарів та орієнтовані перпендикулярно ймовірним напрямкам резонансних течій у резервуарі. Однією з таких конструкцій є так звані лабіринтні напрямні апарати, приклад яких наведено на рис. 8.

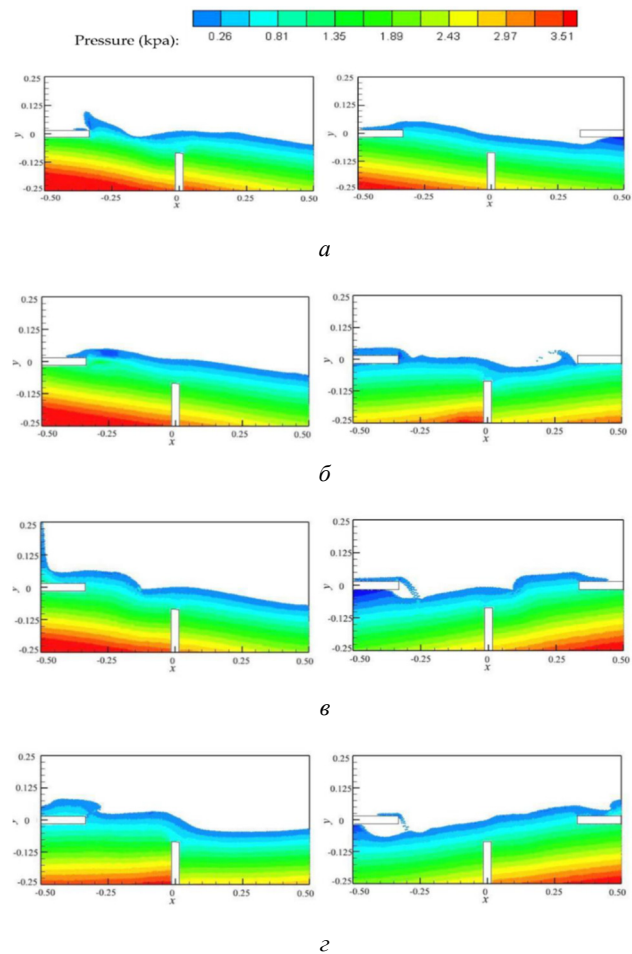


Рис. 6. Результати розрахунку течії нестисливої рідини крізь різно-орієнтовані внутрішні перегородки [2]: (а) 0,0Т; (б) Т/6; (в) Т/3; (г) Т/2 (ліворуч: випадок, рис. 6 б; праворуч: випадок, рис. 6 в) [7].

Досить велику ефективність демпфірування силового впливу потоку, а також суттєвого зменшення ударних складових градієнта тиску можна досягти за рахунок розташування перегородок таким чином, щоб потік частково змінював напрямок дії, втрачаючи свою енергію по аналогії з гідродинамічним опором. Таким чином, у продовженій за часом інерційній течії, що постійно втрачає свою енергію за довжиною потоку, будуть відсутні короточасні ударні навантаження, але буде існувати слабкий стійкий тиск на перегородки, а також стінки та інші внутрішні конструкції резервуара.

На рис. 6 наведено результати чисельного моделювання резонансного плескання у резервуарі прямокутного поперечного перерізу, частково заповненого рідиною [2]. За результатами аналізу фізичної картини розподілу ударних тисків у потоці можна стверджувати про певну симетричність процесу коливань, а також досить важливу роль середньої придонної перегородки. Саме вона стримує розхитування рідини вздовж донної частини резервуара та участь придонних шарів у накопиченні енергії руху рідини для утворення ударного тиску.

При цьому горизонтальні перегородки на бокових стінках резервуара виконують роль певних обме-

жувачів часткового розплескування рідини, в основному направляючи надлишкові вторинні потоки до нижньої частини резервуара. Досить малі градієнти швидкості рідини на поверхні розмежування «рідина-газ» свідчать про незначний, до 12% вплив цих областей потоку на утворення ударної дії рідини на стінки та внутрішні конструкції резервуара.

Враховуючи сторону швидкості потоку, установка перегородки може пригнічувати інтенсивність внутрішнього розшарування рідини, коли резервуар знаходиться під впливом збудження. На рис. 8 показано результати моделювання поля швидкостей всередині резервуара з лабіринтними перегородками [6]. Швидкість рідини збільшується зі зменшенням відстані від вільної поверхні рідини. Вертикальна перегородка може ефективно пригнічувати горизонтальну складову швидкості рідини і зменшувати загальну кількість рідини під час розшарування, таким чином зменшуючи вплив конструкцію.

Зі збільшенням висоти перегородки швидкість у всьому полі потоку зменшується, а ударний тиск рідини на стінку резервуара знижується. Однак, верхівка перегородки буде піддаватися більшій силі удару. Це пов'язано з різким збільшенням швидкості рідини на

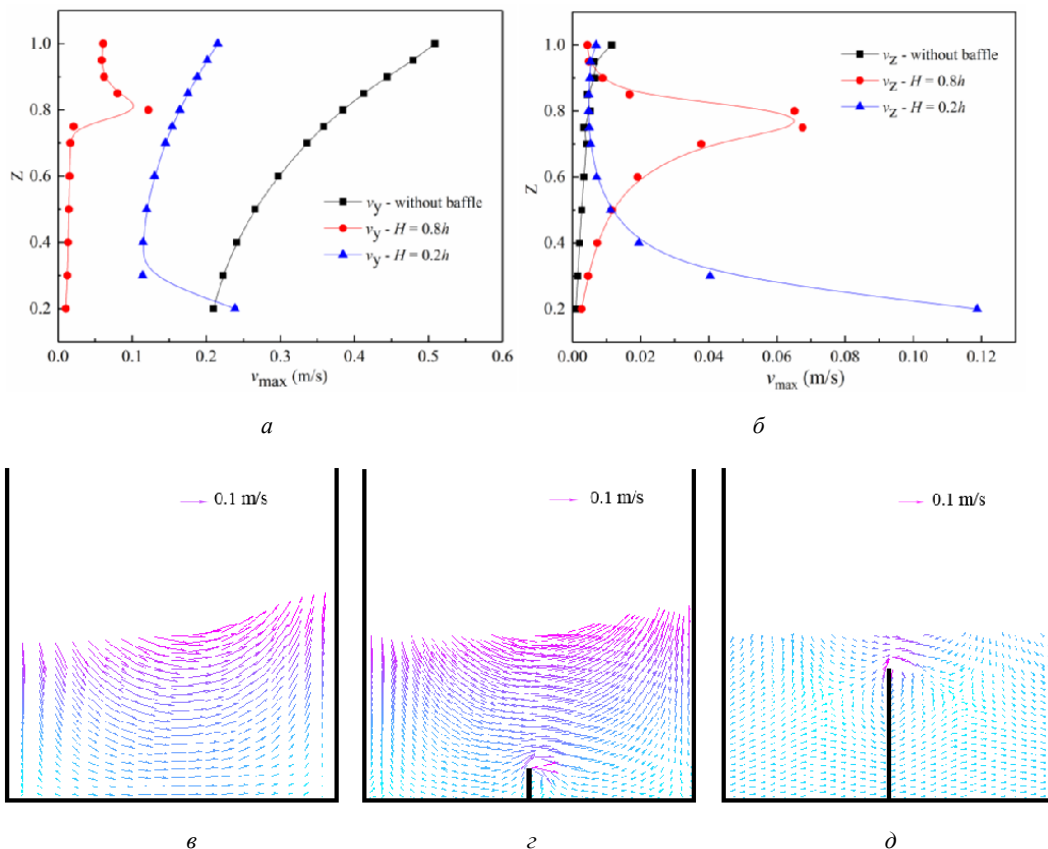


Рис. 7. Розподіл швидкості потоку в резервуарі при різній висоті перегородки: (а) горизонтальна складова швидкості на центральній лінії резервуара; (б) вертикальна складова швидкості на центральній лінії резервуара; (в) без перегородки; (г) висота перегородки $H=0,2h$; (д) висота перегородки $H=0,8h$ [4]

крайці перегородки, що генерує вихори, і сильним взаємним впливом між рідиною і перегородкою, що робить потік досить збуреним.

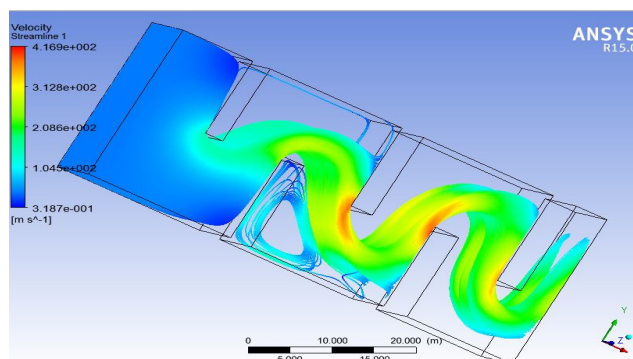


Рис. 8. Приклад чисельного розрахунку поля швидкості при застосуванні лабіринтних внутрішніх перегородок при $V_0 = 3$ м/с [6]

Наведені аргументи щодо інерційних течій нестисливої рідини, свідчать про те, що одним з ефективних методів їх стримування представляється використання так званих лабіринтних конструкцій напрямних апаратів, один з прикладів який наведено на рис. 8. Пропонована течія, проходячи крізь різноорієнтовані перегородки, змінюючи напрям руху і долаючи штучні звуження ефективного перерізу, прискорюється і таким чином втрачає велику частину кінетичної енергії. Подібне розсіювання енергії стає причиною суттєвого зменшення резонансних плескань і ударних тисків у резервуарі.

References

- [1] S. Rakheja *et al.*, “Three-dimensional analysis of transient slosh within a partly-filled tank equipped with baffles”, *Vehicle System Dynamics*, Vol. 45, No. 6, June 2007, pp. 525–548. DOI: 10.1080/00423110601059013
- [2] X. Zheng *et al.*, “A Comparative Study on Violent Sloshing with Complex Baffles Using the ISPH Method”, *Appl. Sci.*, 8 (6), 904, 2018. DOI: 10.3390/app8060904
- [3] O. Ugur, G. Bilici and H. Akyildiz, “Liquid sloshing in a two-dimensional rectangular tank: A numerical investigation with a T-shaped baffle”, *Ocean Engineering*, 187, 106183, 2019.
- [4] E. Zhang, W. Zhu and L. Wang, “Influencing analysis of different baffle factors on oil liquid sloshing in automobile fuel tank”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering*, Vol. 234, Issue 13, 2020, pp. 1–14. DOI:10.1177/0954407020919584
- [5] V.A. Kovalev, “Struktura tsirkuliatcionnykh techenii zhidkogo topliva v rezervuarakh kosmicheskogo apparata”, in *Proc. Mizhnarodna nauk.tekhn. konferencija “Ghidroaeromekhanika v inzhenernij praktyci”*, 2019, pp. 34–38.
- [6] V.A. Kovalev, “Opredelenie gidrodinamicheskogo soprotivleniia stabilizatorov v toplivnykh bakakh kosmicheskogo letatel'nogo apparata”, *Journal of Mechanical Engineering NTUU “Kyiv Polytechnic Institute”*, No. 42, Vol. 1, pp.107–111, 2002.
- [7] L. Kullman, “Unsteady viscous fluid flow in a rotating sphere”, *Periodica Polytechnica of Mechanical Engineering*, Vol. 26, No. 1, pp. 39–54, 1982.
- [8] C. Hubert, “Behavior of spinning space vehicles with onboard liquids”, *Hubert Astronautics Tech. Report B3007*, NASA/KSC, contract NAS10-02016, 2003, pp.1–14.
- [9] A. Kageyama *et al.*, “Numerical and Experimental Investigation of Circulation in Short Cylinders”, *Journal of Physical Society of Japan*, Vol. 73, No. 9, pp. 2424–2437, 2004. DOI: 10.1143/JPSJ.73.2424
- [10] P. Griffin *et al.*, “Design and manufacture of a fuel tank assembly”, in *Proc. 39th AIAA Propulsion Conference*, AIAA-2003-4606, USA, Alabama, 2003, pp. 1–20. DOI: 10.2514/6.2003-4606

Висновки

Серед великої кількості засобів силового впливу на внутрішні течії нестисливої рідини при плесканні у частково заповненому резервуарі найбільш поширеними є жорсткі плоскі перегородки, розташовані на стінках і донній частині резервуара. Вони складають основний потенціал для керування інерційних течій та саме за їх допомоги можна уникнути великих силових впливів потоку на конструкції резервуара.

Крім процесу відбивання хвильових та резонансних потоків від коливань рідини у резервуарі, додаткові внутрішні конструкції значно збільшують сумарну вагу та інертність резервуара, тому набуває особливої актуальності не тільки зменшення кількості перегородок та напрямних апаратів, а й збільшення ефективності їх роботи. Цього можна досягти за допомогою використання, наприклад, гнучких конструкцій, а також методом організації спеціальних поглиначів кінетичної енергії рідини із застосуванням гідравлічних опорів.

Як зазначається, потік, долаючи штучні перешкоди, наприклад, лабіринтні, втрачає частину енергії та не може скласти достатню сумарну резонансну величину для формування ударного тиску. Тому використання подібних поглиначів енергії є досить актуальним поряд з гнучкими конструкціями перегородок, динаміка яких в обмежених об'ємах буде розглядатися у наступних наукових публікаціях.

Numerical modeling of internal flows in tanks with baffles

V. Kovalev¹, O. Shibaev², Wei Chenyu¹

¹ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

² Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine

Abstract. The proposed article presents the materials of experimental and mathematical studies of internal inertial flows of an incompressible liquid during its fluctuations in tanks. An analysis of modern problems related to the harmful effect of liquid resonant splashing on tank structures, as well as on the trajectory and nature of the object movement itself with the liquid, was carried out.

The use of damping baffles and guide devices in similar closed flows allows to fundamentally change the structure of internal flows, reducing gradients of shock pressures in flows, as well as redistributing the main liquid inertial effects. Numerical modeling of such flows qualitatively confirms the results of experimental studies and allows us to build a rather complex three-dimensional development picture of fluctuations in fluid flows.

In addition to the use of the damping baffles structures, it is proposed to make the plane of baffles perforated with different degrees of permeability due to the diameter of the holes and their number. The effect of hydraulic resistance occurs when flow energy is lost due to overcoming artificial obstacles in the form of holes of small diameter. Thus, the shock effects of the flow on the walls of the tank are predicted to have a smaller amplitude and duration.

The use of the proposed dampers labyrinth structures allows to control the force effects of the liquid only by hydraulic means and thus reduce the number and dimensions of the internal guide devices.

Keywords: liquid tank, liquid resonant oscillations, distribution of shock pressures, inertial flows damping.