

# Спрямовані циркуляційні течії рідини в резервуарах рухомих об'єктів

В. Ковальов<sup>1</sup>

Received: 2 November 2023 / Revised: 27 November 2023 / Accepted: 4 December 2023

**Анотація.** Наведено результати чисельного моделювання інерційних течій рідкого палива в резервуарах космічного апарату при його маневруванні на орбіті Землі. Показано, що циркуляції, що виникають при застосуванні внутрішніх напрямних апаратів у вигляді різновіддалених жорстких перегородок, можуть деформуватися та впливати на простір течії, не охопленій ними. Крім того, кругові інерційні моменти впливу рідини на перегородки можуть контролюватись за допомогою відповідного розташування напрямних апаратів за шириною та відстанню від стінки резервуара.

Розрахунок силових впливів рухомої рідини на стінки і внутрішні конструкції дозволяє досить коректно представити гідродинамічну картину розвитку інерційних течій, а також прогнозувати методи і засоби компенсації подібних збурень. Згідно отриманих результатів моделювання зазначених процесів у резервуарах можна стверджувати, що інерційні течії рідини у резервуарах є виражено нелінійні, властивості яких залежать від геометрії резервуара, початкових умов зародження пікових силових впливів на стінки та днища резервуара.

Застосування внутрішніх напрямних апаратів у потоці суттєво змінює геометрію хвильових утворень, коректує координати і тривалість резонансних течій у резервуарі. Основним завданням є мінімізація маси та габаритів перегородок з одночасним зростанням ефективності демпфірування резонансних течій. Крім того, визначення реального розподілу силових параметрів сприяє розробці новітніх більш ефективних конструкцій перегородок, що дозволять більш надійно впливати на неконтрольовані інерційні течії в резервуарах.

**Ключові слова:** паливний резервуар, інерційні течії рідини, гідродинамічні поля, чисельне моделювання, циркуляції, супутній слід за напрямним апаратом.

## Вступ

Дослідження космічного простору останнім часом отримали численні практичні застосування. Крім географічних, геологічних, метеорологічних та інших наукових досліджень, космічні апарати (КА), що виводяться на навколоремну орбіту, дозволяють встановити розгалужені та швидкодіючі телекомунікації та елементи мобільного зв'язку тощо.

Для надійного технічного забезпечення зазначених додатків необхідні ретельні дослідження динаміки та керованості КА, а також раціонального використання палива, забезпечення надійності та екологічної

безпеки польоту об'єкта. Математичне моделювання замкнених потоків, наприклад, осесиметричних течій в'язкої нестисливої рідини в резервуарах, ґрунтується, як правило, на використанні повних рівнянь руху Нав'є-Стокса, виражених у відповідних координатах. З урахуванням граничних умов прилипання рідини на стінках і нульових швидкостей на осі обертання резервуара, а також твердотільного розподілу швидкості в початковий момент руху у всьому просторі посудини можна розглядати нелінійну модель нестационарного розподілу швидкостей, тисків і кругових моментів в'язкого тертя рідини на стінках на внутрішні стабілізуючі пристрої (ВСП) [1], [2].

Важливу роль у розподілі швидкостей і силових впливів у потоці відіграють суцільні або проникні перегородки, які не тільки забезпечують більшу жорсткість конструкції резервуара, а й сприяють більш точному визначенню силових впливів на стінки та інші внутрішні конструкції. Крім безпосередніх силових

✉ В. Ковальов  
vaskov@ukr.net

<sup>1</sup> КІІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

впливів рідини на площини перегородок, у потоці виникають вихрові та циркуляційні течії на кромках і в супутньому сліді за напрямними апаратами. Вони можуть утворювати складну систему вторинних течій з нелінійним розподілом компонент вектора швидкості та полів тисків, які дозволяють більш точно прогнозувати розвиток нестационарних гідродинамічних полів та організувати ефективні компенсаційні заходи для демпфування збурень рідини.

Чисельне моделювання гідродинамічного механізму подібних течій, результати якого представлені у запропонованій статті, дозволяє представити якісну картину інерційних течій у резервуарі та запропонувати ефективні методи і засоби впливу і компенсації подібних збурень.

### Постановка завдання досліджень

Завданням поданого дослідження, проведеного в лабораторії гідроаеродинаміки Національного технічного університету “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, є імітаційне моделювання впливу напрямних апаратів у вигляді системи жорстких радіальних перегородок, розташованих у характерних точках резервуару на інерційні осесиметричні течії в’язкої рідини.

Визначення характеру зміни швидкостей при інерційному обертанні рідини після зміни кутової швидкості резервуара за часом дозволяє визначити параметри ефективних компенсаційних впливів на збурення рідкого палива у вигляді кругових моментів, які реалізуються, як правило, за допомогою вмикання двигунів системи автоматичної стабілізації КА [2].

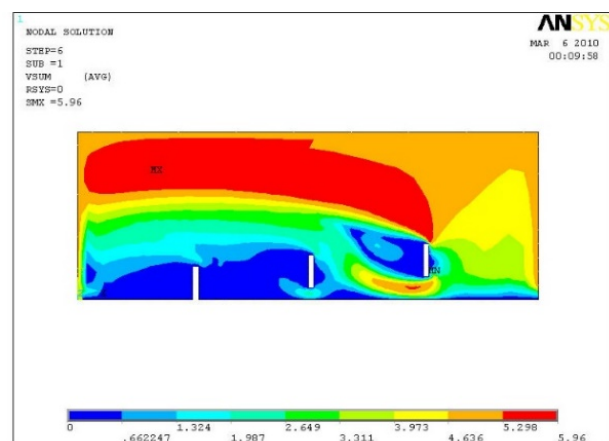
Основними критеріями оцінки впливу перегородок ВСП на течії рідини є відомі та спеціально розроблені числа подібності, наприклад, числа Рейнольдса, Россбі, Струхаля та інші. Визначення за їх допомоги нестационарної картини розподілу швидкостей безпосередньо біля перегородок та у вільному просторі течії дозволяє встановити структуру характерних шарів рідини, що рухається в резервуарах з різними варіантами перегородок. За допомогою цих параметрів, у свою чергу, можна встановити особливості їх впливу на інерційні течії при різних числах подібності та поширити результати фізичного моделювання на реальні конструкції та режими руху об’єктів із рідиною.

Як встановлено в поданій роботі, однією з важливих особливостей віддалених від стінок резервуару перегородок в інерційному потоці є менший майже на 12 % за величиною, проте більш тривалий за часом ( $T = \Omega \cdot t = 2,5 \dots 4,2$ ) вплив на швидкість основного потоку, де  $T$  – безрозмірний час,  $\Omega$  – початкова кутова швидкість резервуара,  $t$  – розмірна величина часу. Завдяки цьому пікові силові дії у початковій стадії течії у вигляді динамічного тиску на перегородки ВСП зменшуються, і стають більш прогнозованими.

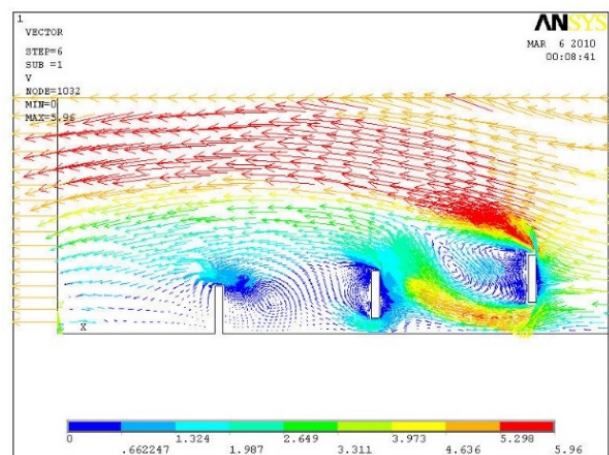
Як зазначалося у відомих літературних джерелах [3], [4], при порівняно малих числах Рейнольдса  $Re$ , побудованих за величинами кутової швидкості резервуара  $\Omega$ , радіуса  $R$  і кінематичного коефіцієнта в’язкості  $\nu$ ,

$$Re = \Omega \cdot R^2 / \nu$$

вторинна течія може формуватися в масштабі чверті вертикального перерізу сфери та мати вигляд меридіональної циркуляції. При збільшенні  $Re$  можуть виникати багатоциркуляційні структури, масштаб, конфігурація та характер розвитку яких наведено на рис. 1 [1].



а



б

**Рис. 1.** Залежність формування циркуляцій від розташування перегородок при  $Re = 1150$ : а – контурні зображення швидкостей; б – векторний розподіл компонент швидкості

Причини дроблення циркуляції на менші за масштабом системи лежать не тільки у збільшенні азимутальної швидкості, зменшенні впливу в’язкого тертя на приосьову область течії, де великі інерційні члени рівняння, а й у більш тонкій взаємодії сил, структура та характер розвитку яких досі вивчені не повністю.

### Аналіз результатів чисельного моделювання течій

Фізичні особливості інерційної течії полягають у наступному. При зміні швидкості обертання резервуара в'язка рідина, що прилягає до стінок, за умови прилипання набуває швидкості оболонки, утворюючи тонкий в'язкий пристінний шар. При цьому рідина, що знаходиться ближче до осі обертання у початковій стадії течії, становить квазітверду область течії, що рухається з колишньою кутовою швидкістю, що дорівнює  $\Omega$ .

Завдяки впливу в'язкого тертя між шарами рідини зміна азимутальної швидкості поширюється від стінок до внутрішніх шарів, зменшуючи таким чином розміри квазітвердої області. При цьому, як відомо, структура загальмованої області на бічних вертикальних стінках суттєво відрізняється від особливостей формування пристінної течії у верхній та донній областях сфери, де мають місце межові екманівські шари [3].

Результати експериментальних вимірювань [4], [5] склали тривимірну нестационарну картину розподілу швидкостей рідини, яка дозволяла встановити основні особливості формування та розвитку за часом осесиметричної течії. Встановлено, що картина розподілу швидкостей є суттєво нелінійною через виникнення меридіональних циркуляційних течій, які впливають на розподіл швидкості основної течії, тобто окружної  $u$ . Для забезпечення високої достовірності експериментальних даних проводилася їх верифікація за допомогою чисельного розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса, виражених у сферичних координатах  $(r, \Theta, \varphi)$  де завдяки умові осової симетрії всі похідні за азимутальною координатою  $\varphi$  у рівняннях руху зникають [1], [2]

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + v \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{w}{r} \frac{\partial u}{\partial \vartheta} + \frac{uv}{r} + \frac{uwctg\vartheta}{r} = \\ = v \left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2 \sin^2 \vartheta} \right), \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{w}{r} \frac{\partial w}{\partial \vartheta} + \frac{vw}{r} - \frac{u^2 ctg\vartheta}{r} = \\ = -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \vartheta} + v \left( \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} - \frac{w}{r^2 \sin^2 \vartheta} \right), \\ \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{w^2 + u^2}{r}, \end{aligned} \quad (1)$$

а також рівняння нерозривності:

$$\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \vartheta} + \frac{2v}{r} + \frac{wctg\vartheta}{r} = 0. \quad (2)$$

Граничні умови рівності нулю на осі обертання та прилипання рідини до стінок посудини виражаються у вигляді:

$$v = 0, \quad w = 0, \quad u = \Omega_0 R_0 \text{ при } r = R_0,$$

$$v = 0, \quad w = 0, \quad u = 0 \text{ при } r = 0, \quad (3)$$

$$w = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial \vartheta} = 0, \quad u = 0 \text{ при } \vartheta = 0 \text{ і } \vartheta = \pi (R < R_0),$$

де  $u$  – кругова компонента,  $v$  – радіальна і  $w$  – меридіональна складові вектора швидкості рідини,  $p$  – гідростатичний тиск у потоці.

Оцінка вагового вкладу членів рівнянь (1) і (2), наприклад, швидкостей вторинних течій – радіальної  $v$  та меридіональної  $w$  – дозволила спростити рівняння та деяким чином скоротити обсяг і тривалість комп'ютерних обчислень.

На рис. 1 наведено результати імітаційного моделювання за допомогою демонстраційної версії пакета прикладних програм з урахуванням методу кінцевих елементів під час тестування результатів розрахунків осесиметричних течій у діапазоні чисел Рейнольдса  $Re = 820 - 1150$ . Течія ламінарна, рідина в'язка нестиглива з відповідними граничними умовами рівності швидкостей нулю на стінках резервуара та площинах перегородок. За допомогою чисельного моделювання визначалися динамічні поля розподілу компонентів вектора швидкості потоку і гідростатичних тисків у потоці.

Отримані результати розрахунку повірилися результатами експериментальних досліджень, що свідчило про якісну відповідність теоретичних та розрахункових даних. Інтегральну оцінку сили в'язкого тертя можна представити у вигляді:

$$F_{\text{в'яз}} \approx 4/3 \pi \cdot \rho \cdot \Omega_0^2 \cdot R^4. \quad (4)$$

Однак, біля стінки резервуара азимутальні швидкості малі, а спрямований до осі обертання радіальний градієнт тиску, який при твердотільному русі рідини і посудини був пропорціональний відцентровим силам інерції, залишається таким же за величиною і починає переважати над ними, обумовлюючи виникнення радіальної течії, спрямованої до середини сфери:

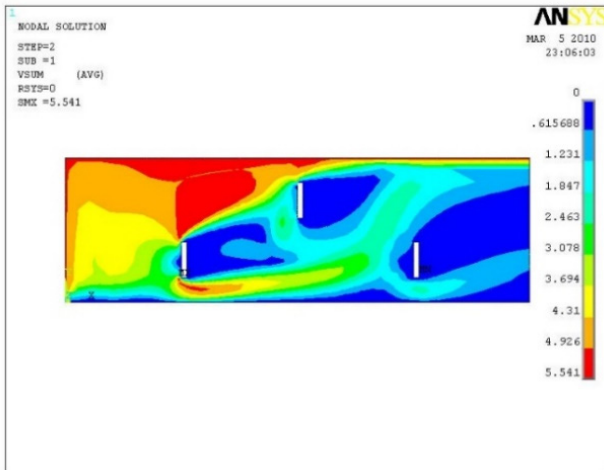
$$\frac{\partial p}{\partial r} = \rho \frac{u^2}{r}. \quad (5)$$

Враховуючи умову нерозривності течії, рідкі частинки, що рухаються до осі обертання, формують висхідну течію в осьовому напрямку, утворюючи, таким чином, меридіональну течію, подібну до задачі про обертання рідини біля нерухомого диска [3].

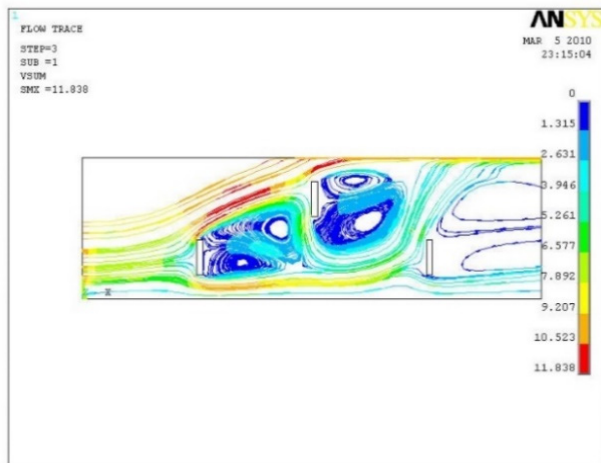
Порівнюючи траєкторії частинок рідини, наведені на рис. 2, можна дійти висновку, що зі збільшенням числа Рейнольдса, останні не піддаються дробленню на більш дрібні утворення. З рис. 2 б чітко видно здвоєні структури як за першою, так і за другою перегородками, які майже не змінюють свою орієнтацію і розташування у супутньому сліді за напрямними апаратами.

При цьому за третьою перегородкою (рис. 2 б) спостерігається різке зниження інтенсивності циркуляцій і, як наслідок, зменшення динамічного впливу

на площину перегородки. Враховуючи, що конструкції відстають від стінок резервуара на відстані  $0,1R$ , пристінна течія може деформувати циркуляції, відхиляючи їх у бік, протилежний стінкам резервуара, передаючи силовий вплив до простору, не охопленого перегородками.



а



б

**Рис. 2.** Контурні зображення поля швидкості при розв’язанні тестових задач для обтікання каскадних напрямних апаратів (а); циркуляції у супутньому сліді за перегородками (б) [5], [6]

Проаналізуємо сили, що впливають на формування інерційної осесиметричної течії у резервуарі. Рівняння Нав’є-Стокса для обертювих течій можна представити у векторній формі [4], [5]

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\nabla u = -\frac{1}{\rho}\nabla p - \Omega \times (\Omega \times r) - 2\Omega \times u_R + \nu \nabla^2 u, \quad (6)$$

де локальні та конвективні прискорення у лівій частині рівняння урівноважуються доданками у правій частині –  $\Omega \times (\Omega \times r)$  – відцентровими силами інерції,  $2\Omega \times u_R$  – силами Коріоліса,  $\frac{1}{\rho}\nabla p$  – радіальним градієнтом тиску

і  $\nu \nabla^2 u$  – силами в’язкого тертя.

Члени рівняння, пов’язані з відцентровою силою, можуть вводити до величини уявного радіального градієнта тиску:

$$\Omega \times (\Omega \times r) = -\nabla \left( \frac{1}{2} \Omega^2 r^2 \sin^2 \vartheta \right) = -\nabla \left[ \frac{1}{2} \Omega^2 (x^2 + y^2) \right]. \quad (7)$$

Таким чином, рівняння (6) можна записати у вигляді:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\nabla u = -\frac{1}{\rho}\nabla p' - 2\Omega \times u_R + \nu \nabla^2 u, \quad (8)$$

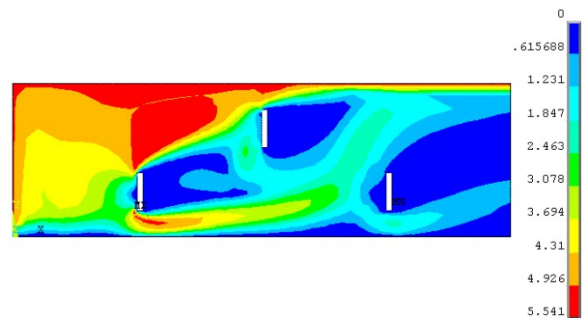
де 
$$p' = p - \frac{1}{2} \rho \Omega^2 (x^2 + y^2).$$

Згідно до відомих виразів [4, 5] сили в’язкого тертя рідини на стінках пропорційні:

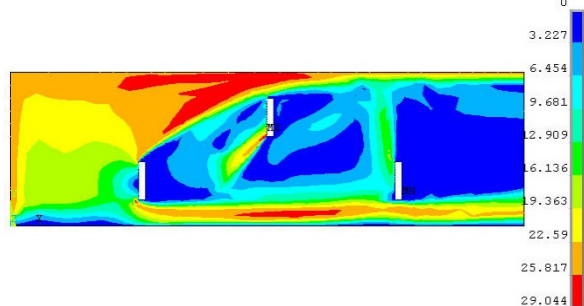
$$F_{\text{в'яз}} \approx \frac{\rho \cdot \nu \cdot u \cdot R^2}{\delta}, \quad (9)$$

де  $\delta$  – товщина пристінної течії.

На рис. 3 наведено контурні зображення розподілу швидкостей циркуляції біля каскадних перегородок за різних числах Рейнольдса [5]–[7]. Зони течії, позначені темним кольором, свідчать про досить малі швидкості і гідростатичний тиск у супутньому сліді, за величинами яких можна визначити силові впливи потоку на площину перегородок.



а



б

**Рис. 3.** Траєкторії рідких часток у течії з комбінованими віддаленими перегородками при тестуванні математичної моделі обертювої рідини при різних числах Рейнольдса: а –  $Re = 820$ , б –  $Re = 950$  [5], [6]

При цьому в області перед перегородками (ліва частина рисунка) динамічний вплив збільшується, незважаючи на ефект “прослизування” рідини у пристінній області [8], [9]. Таким чином, можна зробити висновки про те, що за допомогою варіативного розташування перегородок з урахуванням специфіки їх обтікання в’язкою нестисливою рідиною силові дії можна коригувати з урахуванням геометрії резонансної течії [10], конструкції резервуару та поставлених гідродинамічних завдань.

## Висновки

Порівняння отриманих даних щодо квазітвердої області течії дозволяє зробити висновок про більш сильний вплив на неї перших віддалених перегородок, біля яких згасання швидкості відбувається на 19% швидше, ніж у суцільній конструкції. Розташовані у

супутньому сліді третя і далі перегородки досить слабо (3–5%) впливають не тільки на початкову стадію інерційної течії, коли градієнти окружної швидкості у супутньому сліді і біля стінки досить великі, а й при загасанні вектора швидкості за часом.

При використанні перфорованих перегородок, у заключній стадії течії, при великих значеннях часу  $T$  процес облітерації отворів перфорації помітно знижує ефект проникності перегородок і впливає слабо на розподіл швидкості у всіх характерних зонах течії.

Аналіз результатів експериментальних вимірювань дозволив зробити висновок про досить складний характер розвитку гідродинамічних полів течії в’язкої нестисливої рідини в резервуарах різної геометрії з внутрішніми напрямними апаратами. Це, у свою чергу, необхідно враховувати при складанні номограми силових впливів, що вводиться до бортового комп’ютера системи стабілізації космічного апарата для оптимізації компенсаційних заходів під час його тривалого орбітального польоту.

## References

- [1] K. Kolesnikov, *Dinamika raket*, Moscow: Mashinobuduvannya, 1980.
- [2] G. Mikishev, *Eksperimental'nye metody v dinamike kosmicheskogo apparata*, Moscow: Mashinostroenie, 1978.
- [3] Kh. Grinspen, *Teoriya vrashchayushchikhsya zhidkosti*, Moscow: Gidrometeoizdat, 1975.
- [4] V. Kovalev, “Vliyanie vnutribakovykh peregorodok na techenie zhidkogo topliva v bakakh kosmicheskogo aparata”, *Vestnik NTUU “KPI”*, *Mashinostroenie*, No. 48, pp. 73–79, 2006.
- [5] V. Kovalev, “Opredelenie gidrodinamicheskogo soprotivleniya stabilizatorov v toplivnykh bakakh kosmicheskogo letatel'nogo apparata”, *Vestnik NTUU “KPI”*, *Mashinostroenie*, Vol. 42, No. 1, pp. 107–111, 2002.
- [6] E. Nikiforovich, E. Bruyatskii and A. Kostin, “Vikhrevaya struktura potoka v ploskom kanale pri nalichii na ego stenke kvadratnogo prepyatstviya,” *Visnik Donets'kogo Natsional'nogo universitetu, seriya A: Prirodnichi nauki*, No. 2. pp. 42–50, 2011.
- [7] X. Zheng, Y. You, Q. Ma and A. Khayyer, “A Comparative Study on Violent Sloshing with Complex Baffles Using the ISPH Method,” *Appl. Sci.*, Vol. 8, 904, 2018, doi: 10.3390/app8060904.
- [8] E. Zhang, W. Zhu and L. Wang, “Influencing analysis of different baffle factors on oil liquid sloshing in automobile fuel tank,” *J. Automobile Engineering. I mech E*, pp. 1–14, 2020, doi: 10.1177/0954407020919584.
- [9] R. Belakroum *et al.*, “An efficient passive technique for reducing sloshing in rectangular tanks partially filled with liquid,” *J. Mechanics Research Communications*, 37(3), pp. 341–346, 2010, doi: 10.1016/j.mechrescom.2010.02.003.
- [10] L. Ren *et al.*, “Numerical Modeling of Coupled Surge-Heave Sloshing in a Rectangular Tank with Baffles,” *Shock and Vibration Hindawi*, Article ID 5545635, 2021, doi: 10.1155/2021/5545635.

## Directed circulating flows in tanks of moving objects

V. Kovalev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

**Abstract.** The results of liquid fuel inertial flows numerical modeling in the tanks of the spacecraft during its maneuvering in the Earth's orbit are given. It is shown that the circulations that occur when internal guiding devices are used in the form of widely spaced rigid baffles can be deformed and affect the flow space not covered by them. In addition, the circular moments of inertia of the liquid on the baffles can be controlled by means of the appropriate location of the guide devices in terms of width and distance from the tank wall.

The force effects calculation of the moving fluid on the walls and internal structures makes it possible to fairly correctly present the hydrodynamic picture of the inertial flows development, as well as predict the methods and means of compensation for such disturbances. According to the obtained results of the specified processes simulation in the tanks, it can be stated that the inertial flows of the liquid in the tanks are strongly nonlinear, the properties of which depend on the geometry, the initial conditions for the generation of peak force effects tank on the tank walls and bottoms.

The use of internal guiding devices in the flow significantly changes the geometry of wave formations, corrects the coordinates and duration of resonant currents in the tank. The main task is to minimize the mass and dimensions of the baffles with a simultaneous increase in the damping efficiency of resonant flows. In addition, the determination of the power parameters real distribution contributes to the development of the latest, more effective designs of baffles, which will allow more reliable influence on uncontrolled inertial flows in tanks.

**Keywords:** fuel tank, inertial fluid flows, hydrodynamic fields, numerical modeling, circulations, accompanying wake of the guidance apparatus.