

# ЗАЛЕЖНІСТЬ ВИХРОВОГО СПЕКТРУ КАВЕРНИ ВІД ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА

Ю. В. Савчук<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
Фізико-технічний інститут

## Анотація

В роботі розглянуто вплив швидкості потоку, що обтікає стінку з каверною на частоту утворення вихорів в турбулентному та перехідному режимах течії. Результати отримані за допомогою чисельного розв'язку рівнянь Нав'є-Стокса для нестисливої рідини за алгоритмом PISO. Отримана крива дозволяє керувати і стабілізувати течію шляхом узгодження частоти мікродуву з частотою Гельмгольца каверни.

**Ключові слова:** каверна, вихори, CFD, micro-blowing technique

## Вступ

Течія, що обтікає площину, на поверхні якої розміщені каверни може бути як стаціонарною (за умови, що розміри каверни та швидкість течії відносно малі), так і суттєво аперіодичною. В проміжних випадках течія коливається з деяким набором частот, що є постійним в часі.

При моделюванні течії в діапазоні чисел Рейнольдса можливе безпосереднє вимірювання коливань. В свою чергу, техніка мікродуву базується на періодичному впливі на вихори, що існують в межах каверни з частотою, кратною частоті цих вихорів [1]. Її мета полягає в тому, щоб структуризувати внутрішні потоки рідини та зменшити викиди за межі каверни.

## 1. Постановка задачі

Каверна, розглянута в цій роботі має відношення сторін 2 : 1 : 4 (довжина, глибина, ширина) і обтікається потоком нестисливої в'язкої рідини в діапазоні  $6000 < Re < 18000$ . Каверна розміщена на постійній відстані від краю пластини. В початковий момент часу поле швидкостей в усьому просторі нульове, що спричиняє слабкі осциляції в перші декілька секунд симуляції.

Рівняння неперервності та імпульсу для нестисливої рідини

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\mathbf{u}) + \nabla \cdot (\mathbf{u}\mathbf{u}) - \nabla \cdot (\nu \nabla \mathbf{u}) = -\nabla p$$

розв'язуються за граничних умов прилипання на стінках, постійної швидкості на вході, відсутності градієнту на виході та проковзування на решті границь розрахункової області, чисельно.

## 2. Модель

Похідні за часом та координатами знаходяться методом скінченних приростів. Для розв'язку рівняння імпульсу член  $\nabla \cdot (\mathbf{u}\mathbf{u})$  знаходиться ітераційно, а умови для тиску отримуються з рівняння неперервності.

В розрахунковій області будується гексаедральна сітка. Густина сітки збільшується в області каверни та приграничного шару. Схематичне зображення сітки наведено на Рис. 1.

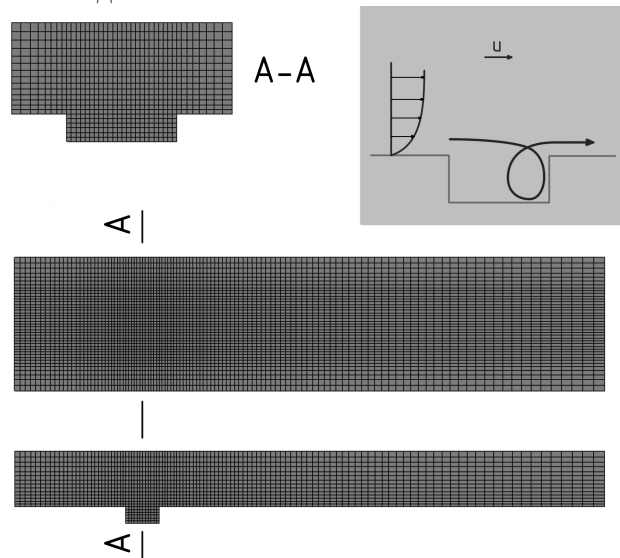


Рис. 1. Розрахункова сітка та схема обтікання каверни потоком

Слід зазначити, що крок за часом підбирається таким чином, щоб задовольнити критерій Куранта, а саме  $C_{\max} < 1$ .

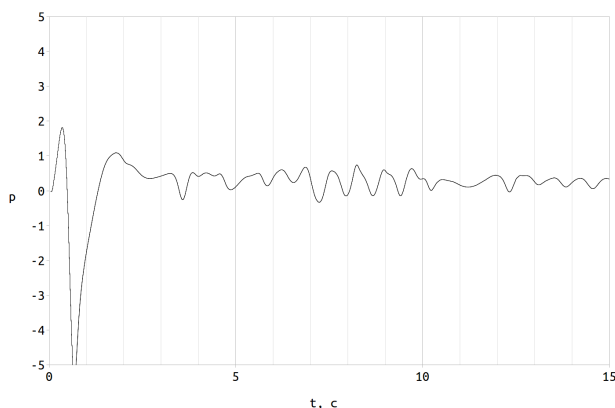


Рис. 2.  $p(t)$ ,  $Re = 6000$

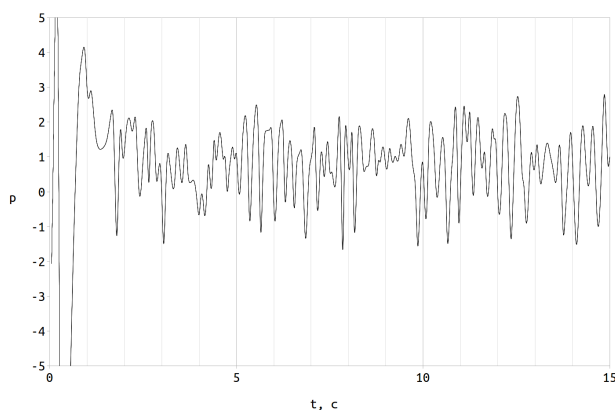


Рис. 3.  $p(t)$ ,  $Re = 12000$

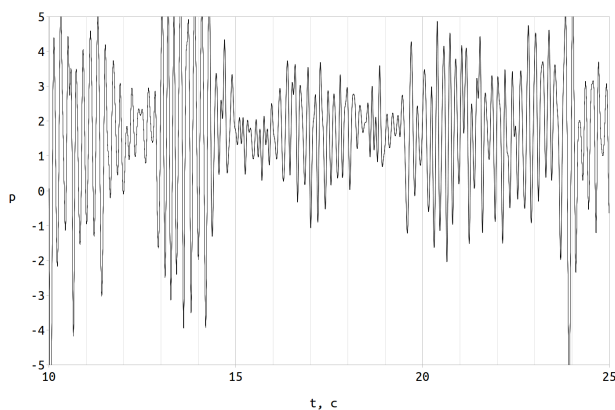


Рис. 4.  $p(t)$ ,  $Re = 18000$

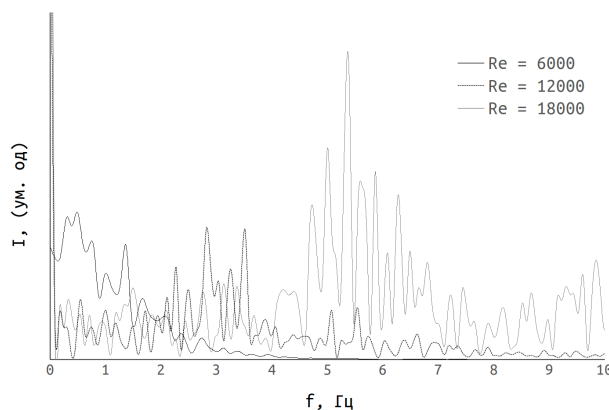


Рис. 5. Спектри сигналів з Рис.2 – 4

### 3. Результати розрахунків

Через відносно велику ширину каверни структура вихорів майже не змінюється в напрямку, що перпендикулярний потоку[2]. Це дозволяє нехтувати явищами взаємодії потоку з бічними стінками, а, отже, моделювати задачу як плоску. Надалі розглядатимемо лише центральний переріз каверни.

За  $Re < 6000$  в каверні формується вихор, що заповнює весь її об'єм. Обміну речовини між каверною і потоком не відбувається. В початковий момент часу цей вихор коливається з невеликою частотою і згодом стабілізується[3].

За  $Re = 12000$  час від часу потік заходить в каверну, кількість внутрішніх вихорів збільшується до 3. Найбільший з них зсувається до дальньої стінки і час від часу збурюється, виходячи за межі каверни. На передній стінці каверни починається відрив потоку що запускає маленькі вихори над каверною. Досягаючи задньої стінки вони взаємодіють з основним вихором. Амплітуда осциляцій більша в порівнянні з  $Re = 6000$  [3].

За  $Re > 18000$  основний вихор постійно збурюється. Частота утворення вихорів на передній стінці збільшується. Амплітуда значно більша, ніж в попередніх випадках [3].

Вимірювання значення тиску проводиться в точці на поверхні стінки на відстані  $1/3$  довжини каверни вниз по течії. Спостерігаються осциляції на високій і низькій частоті. За високочастотні осциляції відповідають вихори, що відриваються від стінки, в той час як за низькочастотні – вихори в каверні. Значення тиску – відносні, змасштабовані.

Отримані коливання тиску зображені на Рис.2 – 4. Для отримання частот, з яких складаються коливання використаємо Фур'є-перетворення. Спектр коливань зображений на Рис. 5.

### 4. Аналіз результатів

З Рис. 5 видно, що осциляції тиску складаються з великої кількості різних частот. Найбільш помітним є те, що за низьких чисел Рейнольдса спектр складається в основному з низькочастотних коливань. Збільшення числа Рейнольдса відображається зростанням частоти і появою високочастотних мод. Роз-

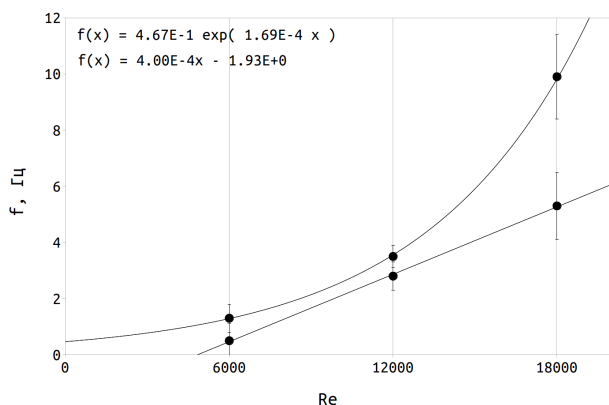


Рис. 6. Зарезність частот коливань від числа Re

глядаючи високо- і низькочастотні коливання окремо (хоча вони і взаємопов'язані, але викликані різними фізичними процесами) зобразимо це на Рис.6.

З рисунку видно, що збільшення числа Рейнольдса спричиняє лінійне збільшення частоти «низькочастотних» коливань і більш, ніж лінійне для «високочастотних». Апроксимуємо це відповідними залежностями (1) та (2).

$$f(\text{Re}) = 4.00 \cdot 10^{-4} \left[ \frac{\text{Гц}}{1} \right] \cdot \text{Re} - 1.93[\text{Гц}] \quad (1)$$

$$f(\text{Re}) = 0.47[\text{Гц}] \cdot e^{1.93\text{Re}} \quad (2)$$

Слід зазначити, що в роботі [1] частота вдуву для керування і стабілізації системи обиралась з розрахунку малих чисел Рейнольдса і становила приблизно 0.5 Гц. Вона має відповідати частоті коливань зсувного шару (збурень через відрив потоку) або частоті коливань основного внутрішнього вихору каверни. Втім, ми спостерігаємо, що вона залежить від числа Рейнольдса. Можливо, для керування частотою вдуву для швидких течій варто розраховувати її з формули (1) або (2).

## Висновки

- При обтіканні в каверни утворюються періодичні збурення вихрової структури, що призводять

до дестабілізації потоку як в середині, так і в «сліді» за нею.

- Серед спектру періодичних збурень виділяються високочастотні, спричинені відривом потоку на передній кромці каверни та низькочастотні, спричинені взаємодією вихорів, що існують в об'ємі каверни, з зовнішнім потоком.
- Високочастотні збурення виникають при досягненні певного числа Рейнольдса ( $\text{Re} > 6000$ ).
- Зміна швидкості потоку, що обтікає каверну впливає на частоти, з якими виникають збурення та на їх інтенсивність, а саме: збільшення швидкості обтікання підсилює їх інтенсивність і скорочує час між ними.

## 5. Програмне забезпечення

- Розрахункова сітка: SALOME, [salome-platform.org](http://salome-platform.org)
- Чисельний розв'язок: OpenFOAM, [openfoam.org](http://openfoam.org)
- Алгоритм: icoFoam
- Візуалізація: ParaView, [paraview.org](http://paraview.org)

## Перелік використаних джерел

1. Воропаев Г. А., Розумнюк Н. В. Управление течением в каверне с помощью периодического вдува // Прикладная гидромеханика. — 2010. — № 3. — С. 3–12.
2. Dismile P. J., Toy N., Savory E. Effect of planform aspect ratio on flow oscillations in rectangular cavities // J. of Fluids Engineering. — 2000. — no. 122. — P. 32–38.
3. Экспериментальное исследование сопротивления и картины обтекания прямоугольных каверн в турбулентном потоке / В. Г. Белинский, Г. А. Воропаев, А. В. Воскобойник, Ю.А. Парамонов // Прикладная гидромеханика. — 2012. — № 4. — С. 3–26.