

ФОРМУВАННЯ АВТОКОЛИВАНЬ ПОТОКОМ РІДИНИ У ЦИЛІНДРИЧНОМУ КАНАЛІ ЗІ СТЕНОЗАМИ

Я.П. ТРОЦЕНКО

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Досліджено течію в'язкої нестисливої рідини у циліндричному каналі з двома послідовно розташованими стенозами (звуженнями) на основі чисельного розв'язання нестационарних рівнянь Нав'є-Стокса. Встановлено, що в певному діапазоні чисел Рейнольдса течія рідини в області між стенозами нестационарна і характеризується наявністю нестійкого зсувного шару, утвореного примежовим шаром, що зривається з поверхні першого стенозу. В міжстенозній порожнині утворюється циркуляційний рух середовища, який переносить частину кінетичної енергії струменя з області отвору другого стенозу вгору за потоком. Завдяки цьому у зсувному шарі утворюється послідовний ряд вихорів, що викликають стійкі періодичні автоколивання профілю швидкості в отворі другого стенозу. Ці коливання можуть бути джерелом звуку в каналі.

ВСТУП

Течія рідини чи газу в нерегулярних каналах широко зустрічається як в природі, так і в технічних приладах. При цьому, нерідко виникають випадки, коли потік, зустрічаючи на своєму шляху перешкоди, починає генерувати акустичні коливання. Приклади таких процесів можна знайти, наприклад, в монографії [1] та в бібліографії в ній. Метою даної роботи є дослідження особливостей потоку рідини в циліндричному каналі з двома послідовно розташованими стенозами, тобто різкими звуженнями поперечного перетину, а саме: моделювання даного процесу та чисельний розрахунок, аналіз структури потоку в області між стенозами в залежності від швидкості течії, та виявлення фізичних причин, що здатні призводити до появи автоколивальних рухів середовища і, як наслідок, до появи тональних звуків.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

На рис. 1 зображено повздовжній перетин частини каналу. Вважається, що стінки каналу та стенозів нерухомі й абсолютно жорсткі. Значення геометричних параметрів обираються такими як в експериментальній роботі [2]: $D_2 = 6.35$ мм, $D_1/D_2 = D_3/D_2 = 8.16$, $L_2/D_2 = 1$, $L_3/D_2 = 6$, $L_1/D_2 = 12$, $L/D_2 = 92$. Кінематична в'язкість $\nu = 1.5 \cdot 10^{-5}$ м²/с відповідає в'язкості повітря при температурі 20°C.

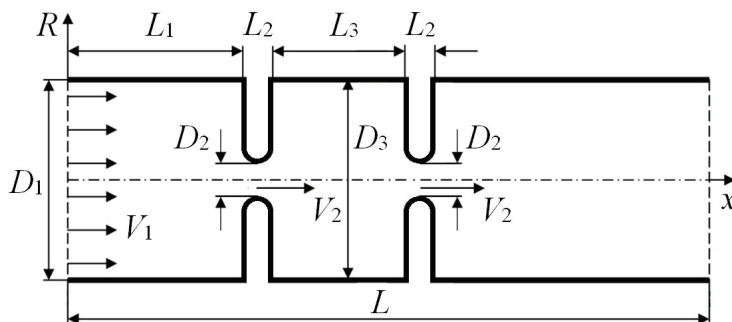


Рис. 1. Геометрія задачі

Оскільки розміри джерел звуку, що породжується потоком, тобто розміри стенозів та міжстенозної порожнини, – малі в порівнянні з довжиною звукової хвилі, то приймаються наступні гіпотези: потужність акустичних коливань є значно меншою за потужність потоку, і породжений звук не впливає на його характер. Це дозволяє розділити задачу дослідження акустичного поля в каналі на два етапи. На першому етапі розглядається гідродинамічна задача, а на другому – акустична. У зв'язку з цим гідродинамічна задача розв'язується в межах моделі в'язкої нестисливої рідини.

Основним параметром задачі є число Рейнольдса, яке можна визначити виразом

$$Re = V_2 D_2 / \nu, \quad (1)$$

де V_2 – це швидкість потоку в отворах стенозів, осереднена по поперечному перетину. Тоді масштабом довжини буде діаметр отвору стенозу D_2 , масштабом швидкості – швидкість V_2 , масштабом часу – величина D_2 / V_2 , а масштабом тиску – подвоєний швидкісний напір ρV_2^2 .

В межах прийнятої моделі процес описується системою нестационарних рівнянь Нав'є-Стокса, що в безрозмірних величинах у векторній формі мають вигляд

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{U}\mathbf{U} = \frac{1}{Re} \nabla \cdot \nabla \mathbf{U} - \nabla p, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0. \quad (2)$$

Крайові умови для швидкості: рівномірний потік на вході в розрахункову область, дослідження проводились в діапазоні швидкостей $V_1 = 0.09 - 0.15$ м/с ($Re = 2537 - 4228$); умова прилипання на твердих поверхнях та рівність нулю нормального градієнту на виході з розрахункової області. Для тиску задається рівність нулю нормального градієнту на всій межі області окрім виходу з неї, де обирається постійний тиск рівний нулю.

2. РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ

Задача розв'язується чисельно за допомогою бібліотек тулбоксу OpenFOAM з використанням обчислювальних потужностей комплексу СКІТ Інституту кібернетики НАН України [3]. Припускається, що рух рідини в міжстенозній порожнині є близьким до осесиметричного, на що вказують експериментальні дослідження [1, 2]. Тому в якості розрахункової області приймається половина повздовжнього перетину каналу. Розв'язання проводиться за методом скінченних об'ємів з використанням схеми другого порядку. Для дискретизації області використовується кусково-структурована сітка зі згущенням вузлів в отворах стенозів та при наближенні до їх стінок. На рис. 2 схематично зображено її частину в околі отвору першого стенозу. Детально алгоритм розв'язання описаний у роботі [4], де він був застосований для дослідження потоку в плоскому каналі.

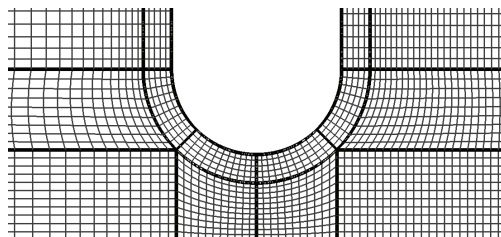


Рис. 2. Схема дискретизації розрахункової області в околі отвору першого стенозу

З метою контролю точності обчислень поле швидкості чисельно інтегрується по поперечному перетину отворів стенозів. Це дозволяє контролювати точність виконання умови нестисливості середовища, яку можна подати у вигляді

$$\left| \frac{\int_s U ds - \pi R_1^2 V_1}{\pi R_1^2 V_1} \right| < \delta. \quad (4)$$

При обраних параметрах відносна похибка δ не перевищує $3 \cdot 10^{-3}$.

3. АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

На рис. 3 зображено процес формування потоку в області між стенозами на основі поля завихреності в повздовжньому перетині каналу. В початковий момент рідина знаходиться в стані спокою, а потім на лівій межі задається рівномірний потік зі швидкістю $V_1 = 0.12 \text{ м/с}$ ($V_2 = 8 \text{ м/с}$, $Re = 3383$). В правому верхньому куті зображеної області вказано момент часу в секундах.

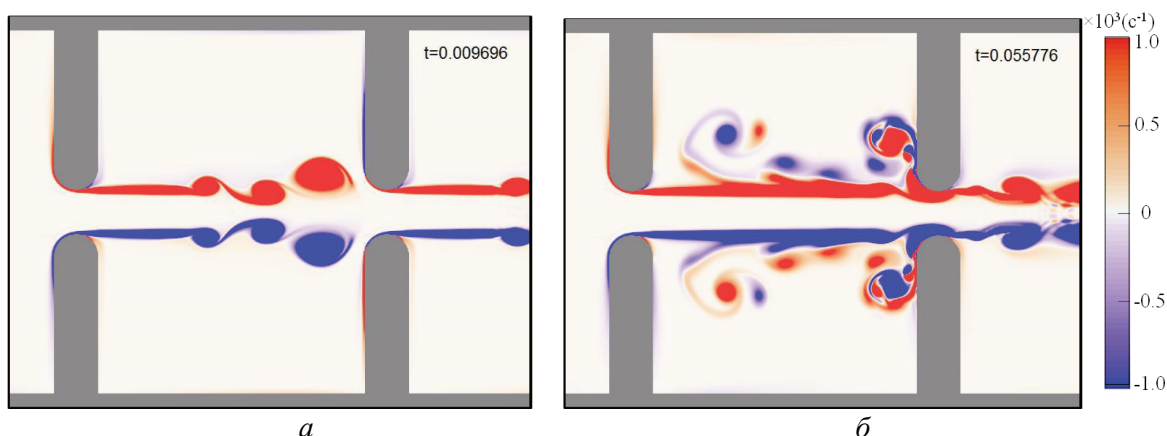


Рис. 3. Поле завихреності в міжстенозній області для випадку $V_1 = 0.12 \text{ м/с}$ при $a - t = 0.009669 \text{ с}$, $b - t = 0.055776 \text{ с}$

На поверхнях обох стенозів формуються ламінарні примежові шари, які, відриваючись від стенозів, утворюють кільцеві вихори (рис. 3, *a*). Перший вихор зноситься течією до поверхні другого стенозу та дещо вглиб порожнини. Наступні вихори розрізаються стенозом на дві частини. Одна проходить далі в отвір, а друга – втягується у циркуляційний рух. Таким чином, біля другого стенозу починає формуватися великий кільцевий вихор (рис. 3, *b*). При взаємодії цього вихору з примежовим шаром другого стенозу утворюється ряд вихорів протилежної завихреності. Вони рухаються вгору за потоком вздовж кільцевого зсувного шару, що сформувався на межі струменя та міжстенозної порожнини. Завдяки цьому біля поверхні першого стенозу формується другий великий кільцевий вихор протилежної завихреності.

Таким чином, в міжстенозній порожнині утворюється циркуляційний рух середовища, який переносить частину кінетичної енергії струменя з області його входу в отвір другого стенозу вгору за потоком. Цей процес можна інтерпретувати як гідродинамічний канал зворотного зв'язку, що створює умови для виникнення

автоколивань в даній системі. Дійсно, зсувний шар при наближенні до другого стенозу приймає хвилястий характер, і в ньому послідовно утворюються вихори, що зносяться потоком в отвір другого стенозу (рис. 3, б).

На рис. 4 зображені поля завихреності після закінчення перехідних процесів та лінії течії в половині повздожнього перетину для двох значень швидкості потоку. Рис. 4, *а* відповідає випадку стаціонарної течії при $V_1 = 0.09 \text{ м/с}$ ($V_2 = 6 \text{ м/с}$, $Re = 2537$). Тобто, при відносно низькій входній швидкості, енергії в каналі зворотного зв'язку не достатньо для утворення автоколивань. На рис 4, *б* видно, що при дещо вищій швидкості потоку $V_1 = 0.1 \text{ м/с}$ ($V_2 = 6.65 \text{ м/с}$, $Re = 2819$), зсувний шар стає нестационарним і біля отвору другого стенозу утворюються кільцеві вихори.

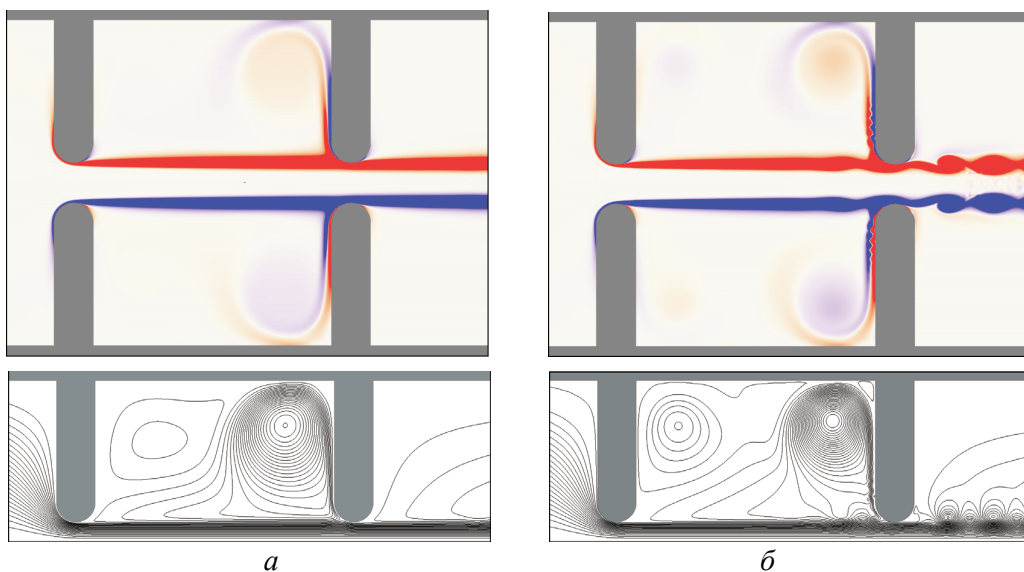


Рис. 4. Поле завихреності та лінії течії в міжстенозній області після закінчення перехідних процесів при *а* – $V_1 = 0.09 \text{ м/с}$, *б* – $V_1 = 0.1 \text{ м/с}$

На рис. 5 зображено зміну профілю осцилюючої частини повздожньої швидкості $V_x^{(o)}$ в отворі другого стенозу протягом одного періоду коливань T з кроком $T/6$ при $V_2 = 6.65 \text{ м/с}$. Отже, вихорі, що утворюються у зсувному шарі набігають на отвір стенозу та спричиняють осесиметричні коливання повздожньої швидкості. Ці коливання мають яскраво виражений періодичний характер та можуть бути джерелом звуку в каналі.

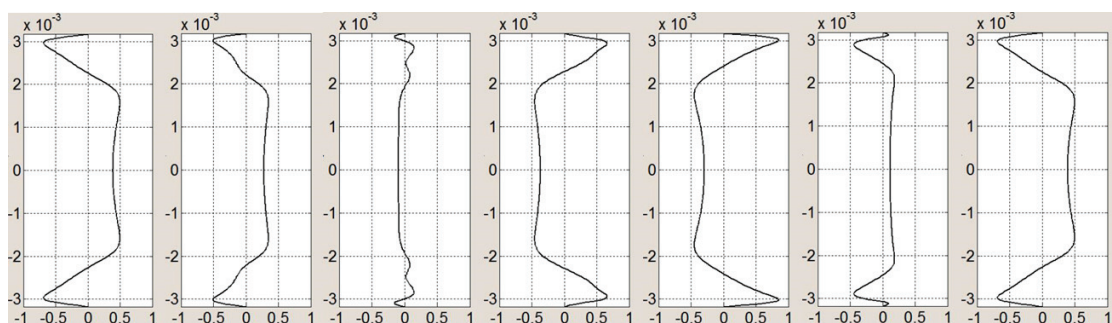


Рис. 5. Зміна профілю осцилюючої частини повздожньої швидкості $V_x^{(o)}$ в отворі другого стенозу протягом одного періоду коливань T при $V_2 = 6.65 \text{ м/с}$

При збільшенні швидкості потоку структура поля завихреності дещо змінюється. На рис. 6, *а*, що відповідає випадку $V_1 = 0.13 \text{ м/с}$ ($V_2 = 8.66 \text{ м/с}$, $Re = 3664$), видно, що великий кільцевий вихор біля другого стенозу зменшився у розмірі, а у зсувному шарі утворення вихорів відбувається вище за потоком. При подальшому збільшенні швидкості великий вихор втрачає стійкість і, як видно з рис. 6, *б*, при $V_1 = 0.15 \text{ м/с}$ ($V_2 = 10 \text{ м/с}$, $Re = 4228$) він вже руйнується. Тут також відбувається утворення вихорів у зсувному шарі, проте воно вже не є періодичним.

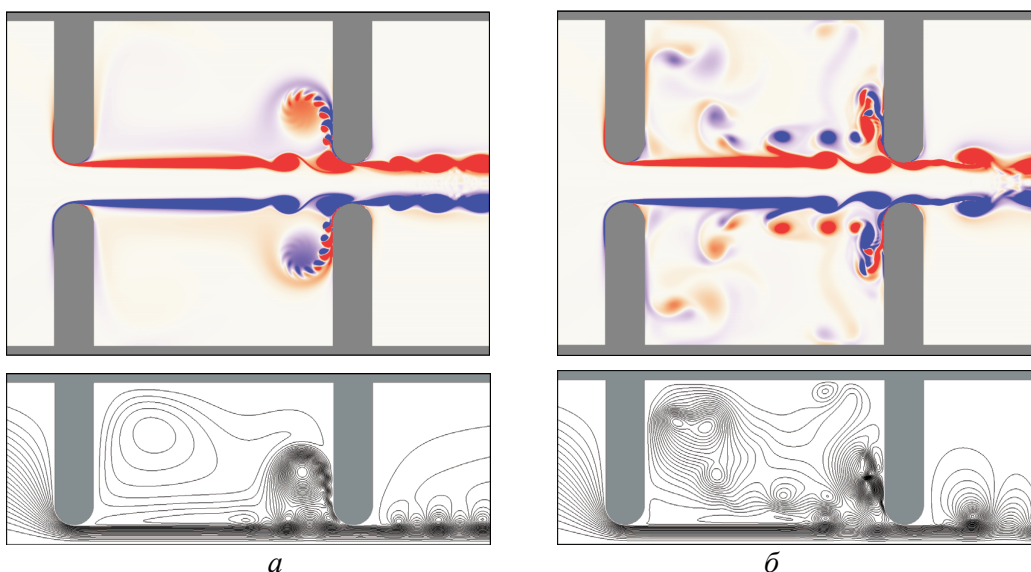


Рис. 6. Поле завихреності та лінії течії в міжстенозній області після закінчення перехідних процесів при *а* – $V_1 = 0.13 \text{ м/с}$, *б* – $V_1 = 0.15 \text{ м/с}$

На рис. 7 зображені амплітудно-частотні спектри коливань осцилюючої частини повздовжньої швидкості $V_x^{(0)}$ в точці отвору другого стенозу M з координатами $x = L_1 + 3L_2 / 2 + L_3$, $R = 0$. З рис. 7, *а* видно, що при $V_1 = 0.1 \text{ м/с}$, в каналі дійсно встановились періодичні коливання з яскраво вираженою основною частотою, амплітуда якої значно переважає амплітуди інших гармонік. З рис. 7, *б* видно, що при $V_1 = 0.15 \text{ м/с}$, спектр має вигляд характерний для шуму.

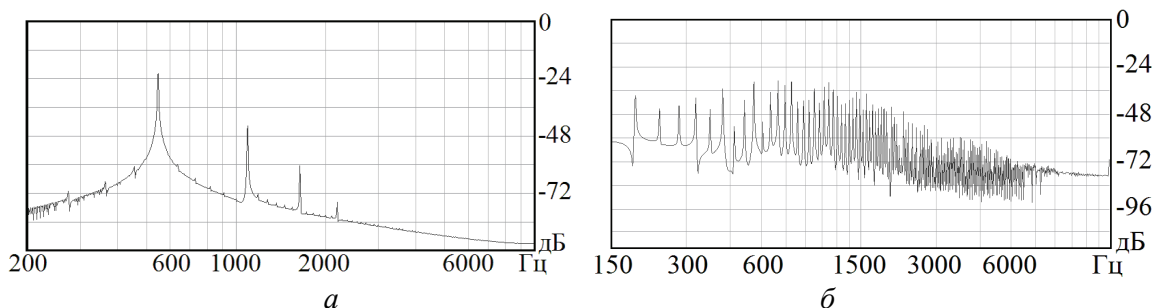


Рис. 7. Амплітудно-частотні спектри коливань повздовжньої швидкості в точці отвору другого стенозу M при *а* – $V_1 = 0.1 \text{ м/с}$, *б* – $V_1 = 0.15 \text{ м/с}$

На рис. 8 зображено графік залежності частоти коливань повздожньої швидкості $V_x^{(o)}$ від швидкості струменя V_2 . Лінія 1 відображає частоту першої гармоніки f_1 , лінія 2 – другої гармоніки f_2 , а лінія 3 – частоту експериментально виявленого звуку $f_{\text{експ}}$. Можна відмітити, що автоколивання в системі виникають тільки після досягнення певної критичної швидкості потоку, що є типовим для подібних гідродинамічних систем [1]. Далі частота коливань зростає зі збільшенням швидкості потоку до деякої другої критичної швидкості, після якої коливання втрачають періодичність. Це підтверджується експериментальними дослідженнями даної системи [2].

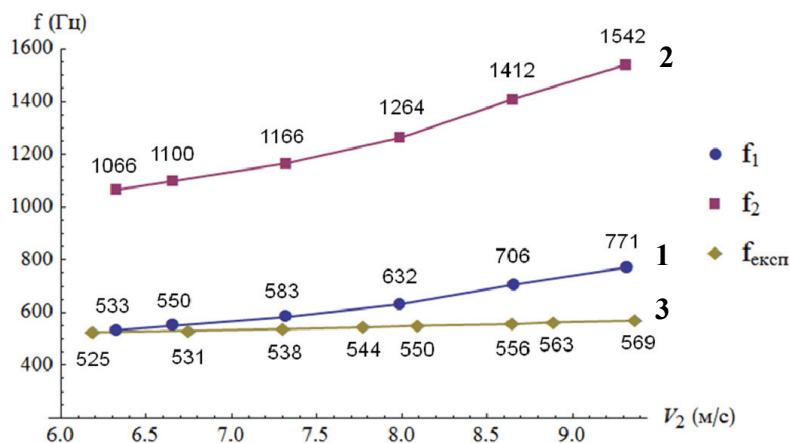


Рис. 8. Частота коливань повздожньої швидкості $V_x^{(o)}$ як функція швидкості струменя V_2

ВИСНОВКИ

Отже, проведено чисельне моделювання течії в'язкої нестисливої рідини в циліндричному каналі з двома послідовно розташованими стенозами. Проведено аналіз особливостей руху середовища в області між стенозами в залежності від швидкості потоку на основі полів завихреності, ліній течії та профілів швидкості в отворах стенозів. Встановлено, що в певному діапазоні чисел Рейнольдса у зсувному шарі утворюється послідовний ряд вихорів, що спричиняють періодичні коливання профілю швидкості в отворі другого стенозу. Ці автоколивання можуть бути джерелом звуку в каналі.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Вовк І. В., Гринченко В. Т.* Звук, рожденный потоком (очерки об аэрогидродинамической акустике). – Киев: Наукова думка, 2010. – 221 с.
2. *Wilson T. A., Beavers G. S., DeCoster M. A., Holger D. K., Regenfuss M. D.* Experiments on the fluid mechanics of whistling // J. Acoust. Soc. Am. – 1971. – Vol. 50, Issue 1B. – P. 366–372.
3. *Головинський А. Л., Маленко А. Л., Сергієнко І. В., Тульчинський В. Г.* Енергоефективний суперкомп'ютер СКІТ-4 // Вісн. НАН України. – 2013. – № 2. – С. 50–59.
4. *Малюга В.С.* Численное исследование течения в канале с двумя последовательно расположенными стенозами. Алгоритм решения // Прикл. гідромех. – 2010. – Том 12, № 4. – С. 45–62.