

УДК 532.5

ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ СХЕМ УПРАВЛІННЯ ПРИСТІННОЮ ТЕЧІЄЮ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНТЕРЦЕПТОРІВ

В. О. ГОРБАНЬ
І. М. ГОРБАНЬ

Інститут гідромеханіки НАН України, Київ

Одержано 15.03.2000

В рамках плоскої задачі розглянуті можливості утворення крупних стаціонарних вихорів при обтіканні виступів (інтерцепторів). Використана модель ідеальної нестисливої рідини. Для побудови розв'язків застосовується метод дискретних вихорів. Одержано залежності для інтенсивності стаціонарного вихора, його координат та власної частоти від кута нахилу інтерцептора. Показано, що зменшення розмірів відривної зони та стабілізація циркуляційної течії можна досягнути відбором рідини за інтерцептором. Отримані залежності для необхідної інтенсивності відбору рідини, яка забезпечує локалізацію відриву і стійкість відповідних циркуляційних зон, для випадків одного, двох та ряду інтерцепторів.

В рамках плоской задачи рассмотрены возможности формирования крупных стационарных вихрей при обтекании выступов (интерцепторов). Использована модель идеальной несжимаемой жидкости. Для построения решений применяется метод дискретных вихрей. Получены зависимости для интенсивности стационарного вихря, его координат и собственных частот от угла наклона интерцептора. Показано, что уменьшения размеров отрывной области и стабилизации соответствующих циркуляционных зон можно достичь применением отсоса жидкости за интерцептором. Получены зависимости для необходимой интенсивности отсоса жидкости, при которой обеспечивается локализация отрыва и устойчивость соответствующих циркуляционных зон, для случаев одного, двух и ряда интерцепторов.

The paper considers techniques for a flow control near bodies based on application of special plates, interceptors, that can be mounted on the body surface. To derive the flow regimes when the interceptor is able to generate a large-scale stable vortex near the surface, topological analysis of the flow pattern was carried out by numerical methods. It included determination of critical points of the flow field and their type at different flow conditions. Numerical simulations of separated flows behind the interceptors were also done by the discrete vortex method. An inclined interceptor was obtained to form the vortex of neutral stability. Parameters of the vortex, coordinates, circulation and eigenfrequency, were obtained against the angle of inclination. To strengthen the vortex stability, it is proposed to apply the suction of fluid from the separation zone. This flow modification was shown to lead to change of critical point type. The intensity of the suction was evaluated for the different flow conditions, when one, two or a set of interceptors were disposed on the surface.

ВСТУП

Одним із ефективних засобів управління структурою пристінної течії є штучне формування локальних відривних зон. Для утворення таких зон використовуються нерівності поверхні, зокрема, спеціальні виступи – інтерцептори. Найбільш поширені інтерцептори в авіаційній та морській техніці [3, 5, 11]. Вони застосовуються, наприклад, для різкої зміни аеродинамічних характеристик крил, що є необхідним при маневруванні чи посадці літака. Своєрідні природні аналоги інтерцепторів зустрічаються в будові крил деяких птахів. Зокрема, у лелеки (*Ciconia Briss.*), поморника (*Stercorarius Briss.*), деяких інших птахів крило складається з декількох рядів пір'я, причому пір'я одного ряду можуть рухатись відносно сусідніх рядів [19]. Як показують експериментальні спостереження, в польоті при виконанні маневру один ряд пір'я (середній по довжині хорди крила) відхиляється, що приводить до утворення за

ним відривної зони. Така зміна конфігурації крила забезпечує оптимальну структуру обтікання при великих кутах атаки [19]. Хоча механізм роботи таких крил до кінця не з'ясований, останнім часом зростає інтерес дослідників та інженерів до крилових схем із застосуванням інтерцепторів різних типів (рухомих, віброуючих, висувних і т.п.), а також в комбінації з іншими засобами управління пристінною течією [1, 3, 11]. В даній роботі розглядаються лише стаціонарні інтерцептори. Особливостям роботи рухомих інтерцепторів буде присвячена окрема стаття.

Ефективність інтерцептора істотно залежить від структури пристінної течії, що формується за ним, зокрема, від стійкості і динамічних характеристик циркуляційної течії у відривній зоні. Як правило, оптимальні характеристики інтерцептора досягаються у випадку, коли відривна зона за ним є локальною і стійкою до збурень. Властивості відривної зони визначаються її вихровою структурою, тобто інтенсивністю, масштабом та

просторовою орієнтацією вихорів. Генеровані інтерцептором вихрові структури дуже чутливі до зміни його форми, розмірів та форми поверхні, числа Рейнольдса, інтенсивності і частоти збурень швидкості потоку.

При малих числах Рейнольдса $Re < 200 \div 500$ завихреність, генерована інтерцептором (при відповідному виборі його форми) концентрується в одному крупному вихорі. Його стабільність при невисокому рівні зовнішніх збурень може бути забезпечена домінуючою дією в'язких сил. При збільшенні числа Рейнольдса вихрове поле відривної зони стає неоднорідним, частина завихреності концентрується в окремих згустках (або кристалах), інша частина складає дрібновихровий фон. Зростання кількості таких "кристалів", ускладнення їх траєкторій призводить до хаотизації структури циркуляційної течії, "вимиванню" завихреності із відривної зони, до нестійкості та крупномасштабних пульсацій відривної зони в цілому [3]. Алгоритми управління та відповідні засоби стабілізації відривних зон повинні враховувати ці особливості відривних течій. Пасивні схеми управління, що не потребують додаткових енергетичних витрат, як правило, ґрунтуються на використанні в'язкості рідини для подавлення збурень і локалізації відриву. Для цього відповідним чином вибираються форма і розміри інтерцептора. Перевагою активних схем управління є значне розширення умов обтікання (діапазону чисел Рейнольдса та інтенсивності збурень), а також можливість використання алгоритмів управління із зворотнім зв'язком [12].

В даній роботі проводиться аналіз динамічних властивостей вихорів, що формуються за пластиною-виступом, та розвиваються теоретичні основи як пасивних, так і активних схем управління пристінною течією із застосуванням інтерцепторів.

1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Для описання циркуляційної течії за інтерцептором будуть використовуватись чисельні методи вихрового моделювання [7, 15–17], які розглядають рух вихрових ниток в потоці ідеальної нестисливої рідини поблизу границі складної форми. Обмежимося аналізом плоскої задачі. Досвід застосування чисельних дискретно-вихрових апроксимацій [15–17] показав їх ефективність. Отримані за допомогою цієї методики поля швидкості та тиску близькі до відповідних експериментальних даних [8, 10, 15].

Інтегральні характеристики циркуляційної течії

наближено описує модель з одним точковим вихором в обмеженому потоці, яка вважає, що вихор розташовується в центрі завихреності відривної зони, а його циркуляція дорівнює інтегральній завихреності в області. Ця модель використовується для вивчення топологічних особливостей поля течії, коли знаходяться особливі точки течії та вивчаються їх властивості. Вихор, який співпадає з такою точкою, знаходиться у рівновазі, тобто є нерухомим або "стоячим". Дослідження динамічних характеристик стоячих вихорів дозволяє з'ясувати деякі причини нестійкості циркуляційних течій та інтенсивних нестационарних пульсацій, що спостерігаються як в фізичних експериментах, так і при чисельному дискретно-вихровому моделюванні. Критичні точки, що відповідають стаціонарним положенням вихорів в пристінному потоці, можуть бути сідлами, фокусами чи вузлами в залежності від реакції стоячого вихора на малі збурення. Ці топологічні особливості течії можуть бути змінені локальною модифікацією форми границі чи активним впливом на структуру течії, наприклад, інжекцією або відбором рідини.

Комплексний потенціал $\Phi(z)$ пристінної течії біля виступа-інтерцептора, за яким розташований стоячий вихор, має вигляд

$$\Phi(z) = U_{\infty}z + \frac{1}{2\pi i} \int_L \gamma(\sigma) \ln \frac{z - z(\sigma)}{z - \bar{z}(\sigma)} + \frac{1}{2\pi i} \Gamma_0 \ln \frac{z - z_0}{z - \bar{z}_0}, \quad (1)$$

де $\gamma(\sigma)$ – інтенсивність неперервного вихрового шару, який моделює поверхню з інтерцептором; U_{∞} – швидкість течії; Γ_0 , z_0 – циркуляція та комплексна координата стоячого вихора.

Тут і далі за характерну довжину, що використовується при переході до безрозмірних величин, вибрано довжину інтерцептора. Вибір потенціала в формі (1) забезпечує виконання умови непротікання на поверхні $y = 0$.

Якщо неперервний вихровий шар замінити системою дискретних вихорів, а точки, в яких виконується умова непротікання, розташувати посередині між вихорами, то сингулярний інтеграл в (1) зводиться до квадратури [2]. З урахуванням цього, комплексний потенціал течії приймає вигляд

$$\Phi(z) = U_{\infty}z + \frac{1}{2\pi i} \sum_{k=1}^n \Gamma_k \ln \frac{z - z_k}{z - \bar{z}_k} +$$

$$(2) \quad + \frac{1}{2\pi i} \Gamma_0 \ln \frac{z - z_0}{z - \bar{z}_0},$$

де n , Γ_k , z_k – кількість, циркуляції та координати "приєднаних" дискретних вихорів відповідно.

Для знаходження параметрів стоячого вихора Γ_0 , x_0 , y_0 при заданому куті нахилу пластини-інтерцептора α використовуються умова стаціонарності вихора і умова Кутта-Жуковського про обмеженість швидкості в гострій кромці пластини. Остання з них відповідає відсутності генерації завихреності на кінці пластини. З цього витікає, що стоячий вихор з одержаними таким чином параметрами повинен ліквідувати породження вихрової пелени в кромці управляючої пластини.

Умова стаціонарності вихора має наступний вигляд:

$$\frac{dz_0}{dt} = U_\infty + \frac{1}{2\pi i} \sum_{k=1}^n \Gamma_k \left(\frac{1}{z_0 - z_k} - \frac{1}{z_0 - \bar{z}_k} \right) + \frac{\Gamma_0}{4\pi y_0}. \quad (3)$$

Умова Кутта-Жуковського на кінці пластини є еквівалентною рівнянню

$$\Gamma_n = 0, \quad (4)$$

де Γ_n – циркуляція дискретного вихора, розташованого в гострій кромці.

Таким чином, задача полягає у визначенні координат і циркуляції стоячого вихора та циркуляцій n дискретних вихорів ($i = 1, 2, \dots, n$) із системи $(n + 3)$ -х рівнянь, а саме, n рівнянь, що впливають із умов непроникності границі, умови Кутта-Жуковського в кромці інтерцептора та умов стаціонарності вихора, який моделює циркуляційну течію в відривній зоні:

$$\begin{aligned} (V_n)_j &= 0, \quad (j = 1, 2, \dots, n), \\ \Gamma_n &= 0, \\ (V_x)_0 &= 0, \\ (V_y)_0 &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Тут $(V_n)_j$ – нормальна складова швидкості, індукованої в j -тій контрольній точці системою "приєднаних" вихорів та стоячим вихором за виступом; $(V_x)_0$, $(V_y)_0$ – составляючі швидкості вихора. Відзначимо, що ці рівняння є нелінійними відносно невідомих x_0 , y_0 , Γ_0 .

Такий алгоритм дозволяє досліджувати особливості обтікання широкого класу інтерцепторів, що

застосовуються в техніці. Поряд з ним, для моделювання відривної течії в даній роботі використовувався також традиційний метод дискретних вихорів [2, 7, 8],

2. СТОЯЧИЙ ВИХОР ЗА НАХИЛЕНИМ ІНТЕРЦЕПТОРОМ

Відомо, що організація стоячого вихора за інтерцептором, розташованим перпендикулярно до стінки, потребує додаткових витрат енергії [12, 13]. На відміну від цього, нами одержано, що при кутах нахилу інтерцептора $\alpha < \pi/2$ система рівнянь (5) має нетривіальні розв'язки, тобто стоячі вихори існують. Відповідні стаціонарні точки є фокусами з нейтральною стійкістю. При наявності періодичних збурень вихор рухається в околі такої стаціонарної точки вздовж замкненої траєкторії. На рис. 1, 2 показані картини течії при $\alpha = \pi/4$, одержані за допомогою одновихрової моделі та із застосуванням методу дискретних вихорів, який використовувався для моделювання еволюції вихрової пелени. Порівняння цих результатів між собою та з експериментальними даними (рис. 2) [7] свідчать про те, що одновихрова модель краще описує характеристики течії при малих числах Рейнольдса, коли у відривній зоні формується один стійкий вихор. Результати дискретно-вихрового моделювання (рис. 3) відповідають великим числам Рейнольдса, коли циркуляційна течія у відривній зоні формується системою вихрових структур, що хаотично обертаються навколо спільного центру. Розміри відривної зони в цьому випадку є значно більшими, ніж при малих числах Рейнольдса, що зумовлено інтенсивними збуреннями поля швидкості в області приєднання потоку та періодичними викидами вихрових структур із зони циркуляційної течії в пристінну область. Нестійкість відривної зони істотно знижує ефективність управління пристінною течією за допомогою інтерцепторів.

При розробці технічних схем підвищення стійкості циркуляційної течії необхідно враховувати динамічну поведінку стоячого вихора в полі малих збурень. Ця поведінка характеризується, зокрема, власною частотою вихора ω_0 (рис. 5) [16, 17, 21]. Коли частота періодичних збурень швидкості потоку наближається до власної частоти вихора, амплітуда рухів вихора навколо стаціонарного положення різко зростає. Низькочастотні пульсації циркуляційної течії за виступами, очевидно, пов'язані саме з резонансним характером взаємодії стоячих вихорів з зовнішніми збуреннями.

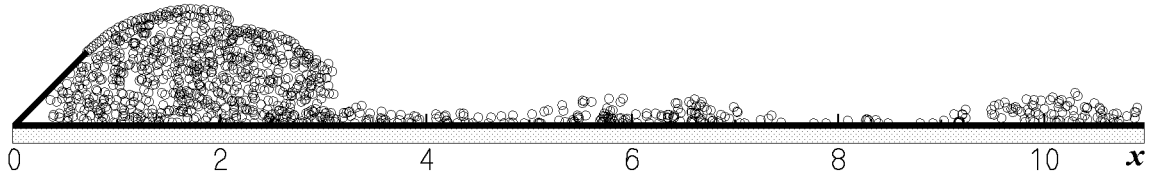


Рис. 1. Чисельна візуалізація течії за нахиленим інтерцептором $\alpha = \pi/4$

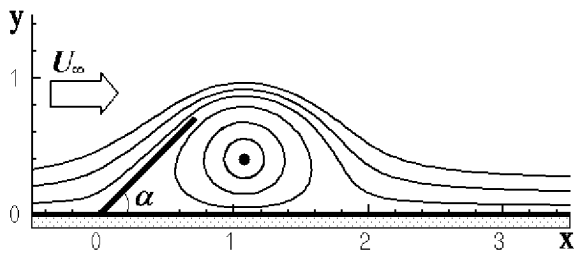


Рис. 2. Локальна відривна зона і стоячий вихор при обтіканні нахиленого інтерцептора $\alpha = \pi/4$



Рис. 3. Візуалізація потоку за інтерцептором $\alpha = \pi/4$ в гідрлоттку [7]

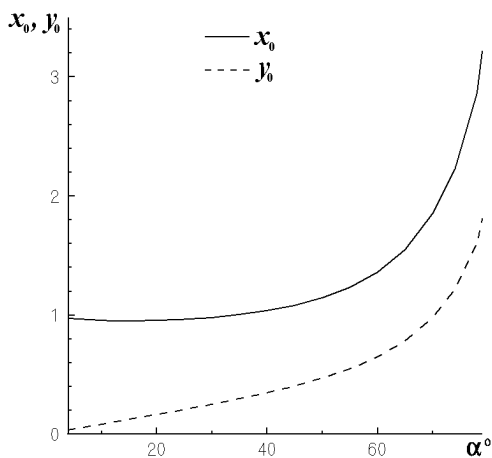


Рис. 4. Залежність координат стоячого вихора x_0, y_0 від кута нахилу інтерцептора α

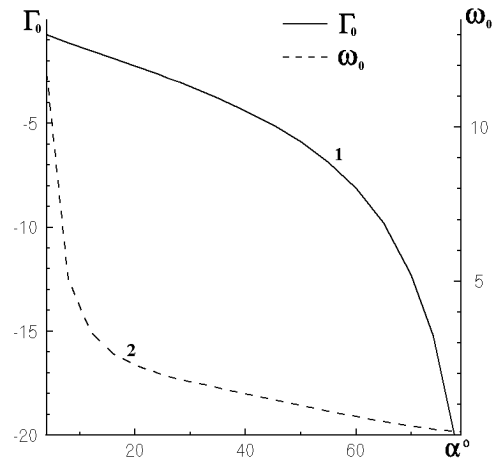


Рис. 5. Залежність циркуляції Γ_0 (крива 1) та власної частоти стоячого вихора ω_0 (крива 2) від кута нахилу інтерцептора α

3. СТАБІЛІЗАЦІЯ СТОЯЧОГО ВИХОРА ЗА ІНТЕРЦЕПТОРОМ ЗА ДОПОМОГОЮ СИСТЕМ ВІДБОРУ РІДИНИ

Відбір рідини в техніці застосовувався досить часто, як правило, з метою поліпшення характеристик пограничного шару та запобігання його відриву. Відбір проводився через пористі ділянки поверхні або через щілини. В даній роботі розвивається концепція керованого відбору рідини із циркуляційної зони для зменшення її розмірів та підвищення стійкості. Такі схеми управління пристінною течією дозволяють зформувати локальні стійкі відривні зони та різко змінити напрямок потоку з мінімальними втратами. Вони можуть застосовуватись для зменшення довжини дифузорів та гідравлічного опору, пов'язаного з інтенсивним нестационарним вихороутворенням, а також для різкого (хоча б тимчасового) збільшення під'ємної сили крила [1, 4, 6, 11].

Схема управління з відбором рідини за інтерцептором перпендикулярним до вектору швидкості течії була розглянута в роботі [12]. Точка відбору рідини розташовувалась на стінці за

інтерцептором. В рамках нестационарної задачі для етапу розгону була показана принципова можливість формування такого вихора за інтерцептором, який повністю ліквідує генерацію завихреності в гострій кромці шляхом керованого відбору із зворотнім зв'язком.

Запропонована вище одновихрова модель дозволяє провести аналіз можливих алгоритмів відбору рідини для значно ширшого кола схем управління з використанням інтерцепторів. У випадку, коли на поверхні $y = 0$ встановлено m інтерцепторів різної форми, що утворюють r стоячих вихорів, стійкість яких підтримують p пристроїв відбору рідини (точкових стоків), комплексний потенціал течії можна записати у вигляді

$$\Phi(z) = U_{\infty} z + \frac{1}{2\pi i} \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n \Gamma_{ik} \ln \frac{z - z_{ik}}{z - \bar{z}_{ik}} + \frac{1}{2\pi i} \sum_{j=1}^r \Gamma_{0j} \ln \frac{z - z_{0j}}{z - \bar{z}_{0j}} + \sum_{l=1}^p Q_l \ln(z - x_{ql}), \quad (6)$$

де Q_l , x_{ql} – потужність та координата, що визначає положення l -го стоку на площині $y = 0$. Для визначення параметрів стоячих вихорів використовується система рівнянь, що випливають із умов Кутта-Жуковського в гострих кромках інтерцепторів та умов стаціонарності вихорів. Вона є аналогічною системі рівнянь (5).

Виконаний чисельний аналіз показав, що у випадку системи з одного нахиленого інтерцептора і розташованого за ним стоку стійкі стоячі вихори існують (рис. 6). Параметри стоячих вихорів та їх поведінка в околі стаціонарних точок істотно залежать від потужності відбору рідини. На рис. 6, 7 наведено результати розрахунків при $\alpha = \pi/4$, $x_q = 0.15$, зокрема, показано криву, на якій розташовуються стоячі вихори, (рис. 7, а) та залежності циркуляції і потужності стоку від положення вихору в потоці (рис. 7, б, с).

Лінійний аналіз поведінки вихора в околі стаціонарної точки дозволив виділити область, в якій вихори є стійкими відносно малих збурень. Ця область параметрів (з врахуванням умови $Q < 0$) показана на рисунках заштрихованою. Вона є найбільш цікавою з точки зору реалізації даного алгоритму управління.

Структура течії за інтерцептором у випадках, що відповідають цій області параметрів, істотно залежить від потужності відбору рідини Q . Великим значенням $|Q|$ (біля лівої границі області стійкості) відповідає невелика за розмірами циркуляційна зона, що прилягає до пластини-

інтерцептора (рис. 6, а). При зменшенні потужності відбору Q розміри циркуляційної зони зростають і перевищують довжину пластини (рис. 6, б), а відповідні декременти згасання збурених рухів вихора спадають до нуля. Розрахунки показали, що збільшення координати x_Q , тобто зсув точки відбору рідини за потоком, звужує область стійкості циркуляційної течії. Якщо $x_Q > 2$ при $\alpha = \pi/4$, стійкі стоячі вихори відсутні.

Для детальнішого вивчення впливу відбору рідини на характеристики циркуляційної течії з урахуванням нерівномірності розподілу завихреності у відривній зоні були проведені розрахунки з використанням дискретно-вихрової моделі. При цьому потужність відбору рідини $Q = \text{const}$ вибиралась на основі проведених раніше розрахунків за одновихровою моделлю. На рис. 8 наведено результати розрахунків при $\alpha = \pi/4$, $Q = -0.05$, $X_q = 0.5$. Можна бачити, що такий вибір параметрів системи ліквідує вихід завихреності з циркуляційної зони. Результати моделювання показали помітний вплив розташування стоку на характеристики течії, зокрема, вони свідчать про доцільність розташування стоку на стінці під центром вихрової зони. В цьому випадку повної ліквідації "вимивання" вихрових структур із відривної зони вдається досягти при менших значеннях потужності відбору Q .

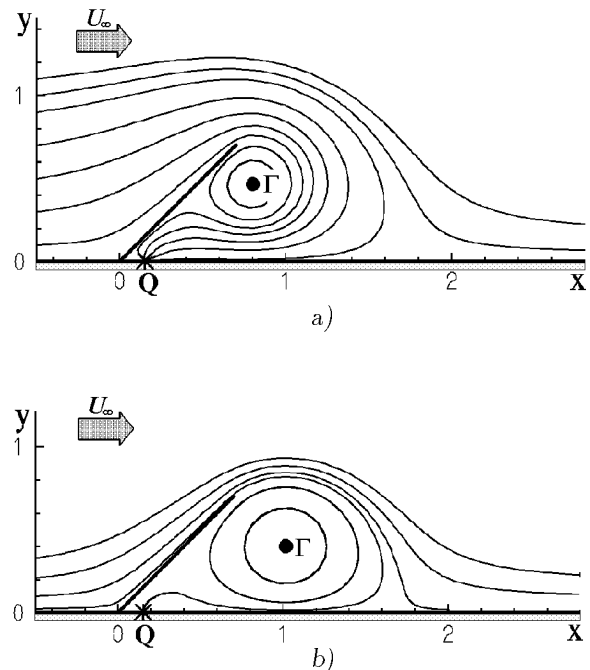


Рис. 6. Картина ліній течії із стоячим вихором і стоком за нахиленим інтерцептором при різних значеннях потужності відбору рідини:
а) – $Q = -0.1$; б) – $Q = -0.025$

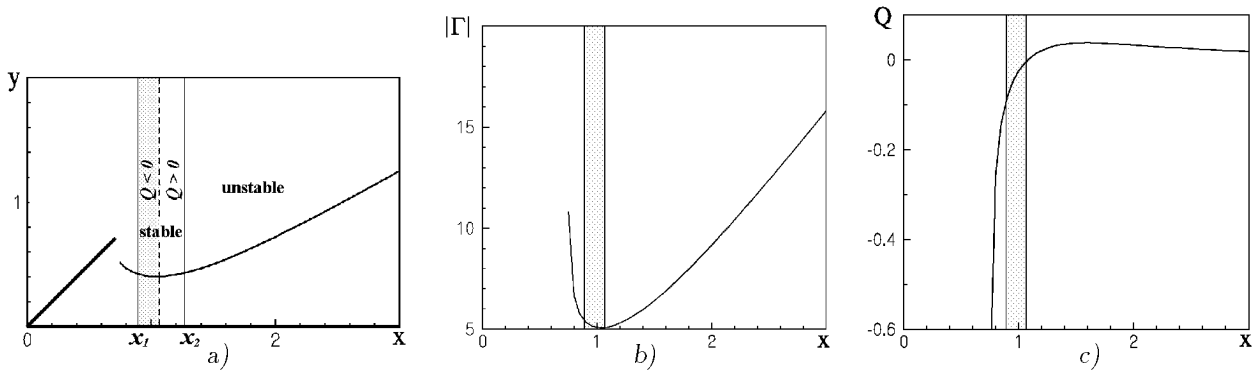


Рис. 7. Положення стаціонарних точок (а), циркуляція стоячого вихора (b) і інтенсивність відбору рідини (c) в потоці за нахиленим інтерцептором, $\alpha = \pi/4$

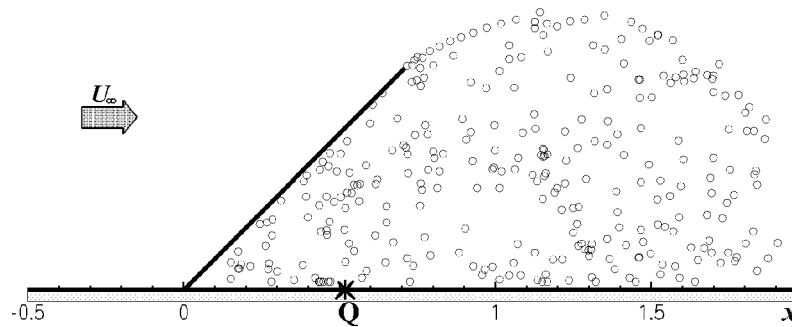


Рис. 8. Картина течії за інтерцептором в потоці з відбором рідини, $Q = -0.05$, $\alpha = \pi/4$

4. ФОРМУВАННЯ СТОЯЧИХ ВИХОРИВ СИСТЕМОЮ ІНТЕРЦЕПТОРІВ

Для практики дуже важливо досягти мети управління (в даному випадку шляхом створення стійких стоячих вихорів) при мінімальних енергетичних витратах, пов'язаних з роботою системи відбору рідини. Експериментальні дослідження свідчать, що ці витрати можна істотно знизити, варіюючи форму границі, зокрема, зменшуючи розміри ділянки лінії течії, що відділяє циркуляційну зону від пристінного потоку [6].

З метою виявлення найбільш ефективних, з точки зору енергетичних витрат, схем управління, в роботі були розглянуті конфігурації, які склались з систем інтерцепторів. Для одержання картини течії в таких областях використовувалась чисельна модель (5). Проведене чисельне моделювання показало, що зменшення необхідної потужності відбору Q можна досягти установкою за основним інтерцептором ще одного додаткового інтерцептора менших розмірів (рис. 9). В цьому випадку умова Кутта-Жуковського виконується в гострих кромках обох інтерцепторів, що дає мож-

ливість однозначно визначити інтенсивність відбору Q при фіксованих висоті другого інтерцептора h та відстані між ними l_x (за характерний лінійний розмір тут вибрано висоту першої пластини). Приведені на рис. 10, 11 результати розрахунків свідчать про існування стійких стоячих вихорів в області, а також про істотний вплив геометричних параметрів системи h та l_x на необхідний рівень відбору рідини з циркуляційної зони. Розрахунки дали можливість оцінити потужність стоку, який забезпечує стійкість стоячого вихора. Одержано, що відповідним вибором параметрів системи потужність стоку можна зменшити більш ніж вдвічі по порівнянню з одним інтерцептором.

Застосовуючи системи інтерцепторів, можна штучно створити картини течії з необхідними параметрами. Одна з розглянутих схем приведена на рис. 12. Ця система нахилених під різними кутами інтерцепторів близька до природних аналогів (розгорнуте крило птаха [19]). Міжгерцепторами розташовані точки відбору рідини (на рисунках вони позначені хрестиками). Розрахун-

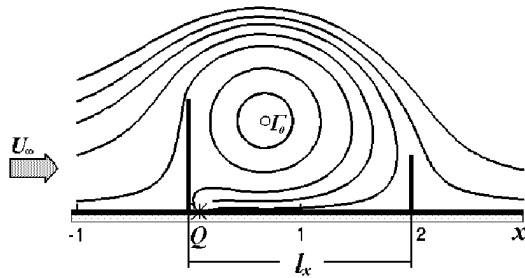


Рис. 9. Картина обтікання системи двох інтерцепторів з відбором рідини

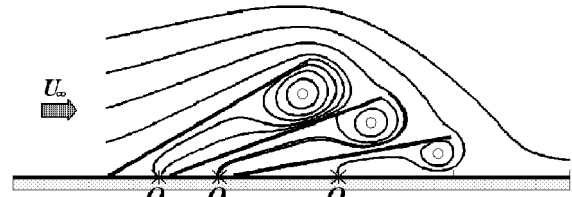


Рис. 12. Картина ліній течії за системою нахилених інтерцепторів

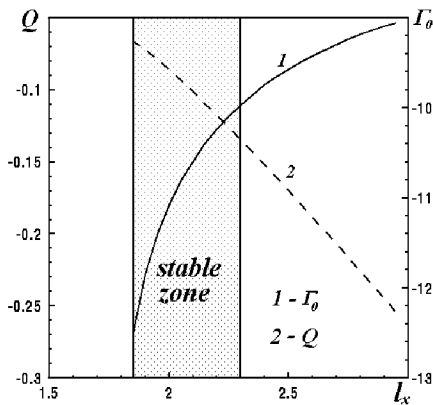


Рис. 10. Залежність потужності відбору рідини Q та циркуляції стоячого вихора Γ_0 від відстані між інтерцепторами ($h_1/h_2 = 0.5$)

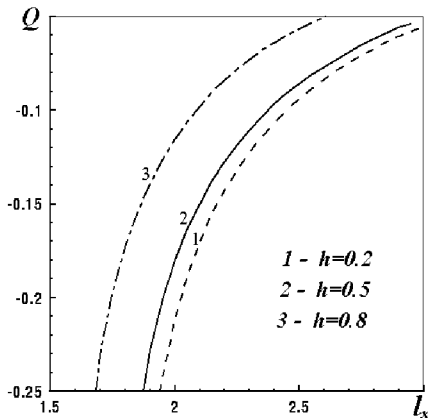


Рис. 11. Вплив висоти другого інтерцептора на потужність відбору рідини Q

ки показали можливість формування стійких стоячих вихорів в такій системі. Причому, сумарна інтенсивність стоків може бути меншою, ніж у випадку одного інтецептора.

Установка аналогічних систем інтерцепторів на крилі дозволяє штучно збільшити його товщину і під'ємну силу. При цьому опір крила зміниться слабо, позаяк додаткова генерація завихреності та її "вимивання" в слід ліквідується дією системи відбору рідини.

Широкі можливості формування необхідної конфігурації пристінної течії з допомогою системи інтерцепторів та відбору рідини дозволяють по новому підійти до реалізації схем "вихрового змащення" [14], тобто створення стійкої періодичної системи стаціонарних чи рухомих вихорів. В рамках розвинених вище моделей був проведений аналіз обтікання рядів прямолінійних та криволінійних інтерцепторів (див. рис. 5). Розрахунки показали, що при збільшенні числа інтерцепторів при $m > 7$ структура пристінної течії стає майже періодичною. Картини ліній течії над поверхнею з системами інтерцепторів приведені на рис. 13. При відповідному виборі геометричних параметрів та потужності відбору рідини можна забезпечити стійкість такої регулярної вихрової структури течії (рис. 14).

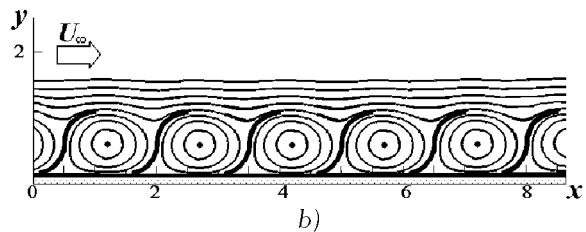
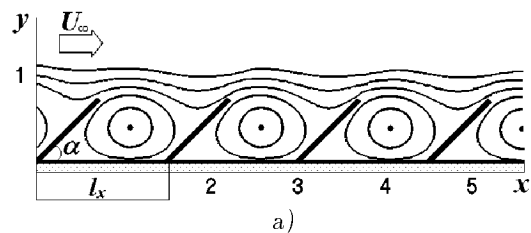


Рис. 13. Картини ліній течії в системах інтерцепторів

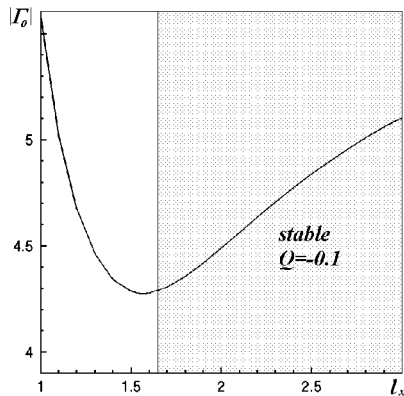


Рис. 14. Залежність циркуляції стоячого вихора Γ_0 від відстані l_x в системі криволінійних інтерцепторів з відбором рідини

5. ВИСНОВКИ

Розвиток техніки вимагає нових підходів до вирішення проблем управління потоками рідини чи газу. Одна із принципів можливостей на цьому шляху полягає в трансформації вихрової структури течії. Проведені дослідження розвивають концепцію формування локальних відривних зон в пристінній області. Використовуючи чисельні вихрові методи в рамках моделі ідеальної нестисливої рідини проведено аналіз можливих схем управління течією з допомогою одного, двох чи ряду інтерцепторів та системи відбору рідини із відривних зон. Отримані залежності дозволяють оцінити необхідну інтенсивність відбору рідини, яка забезпечує локалізацію відриву та стійкість відповідних циркуляційних зон.

Проведений аналіз поглиблює розуміння фізичних закономірностей генерації та руху вихрових структур в пристінних потоках. Одержані результати можуть бути корисними для подальшого розвитку алгоритмів управління пристінними течіями.

1. Белов И.А., Исаев С.А., Коробков В.А. Задачи и методы расчета отрывных течений несжимаемой жидкости.– Л.: Судостроение, 1989.– 166 с.
2. Лифанов И.К. Метод сингулярных интегральных уравнений и численный эксперимент.– М.: Янус, 1995.– 520 с.
3. Петров К.П. Аэродинамика элементов летательных аппаратов.– М.: Машиностроение, 1985.– 272 с.
4. Гад-ель-Хак, Бушнелл Управление отрывом пограничного слоя // Тр. Американского общества инж.-механиков. Современное машиностроение.– 1991, N 7.– С. 2-35.
5. Чжен П. Управление отрывом потока.– М.: Мир, 1979.– 552 с.
6. Адкинс Короткий диффузор с низкими потерями давления // Теоретические основы инженерных расчетов.– 1975.– N 3.– С. 113.
7. Белоцерковский С.М., Ништ М.И. Отрывное и безотрывное обтекание тонких крыльев идеальной жидкостью.– М.: Наука, 1978.– 352 с.
8. Белоцерковский С.М., Гиневский А.С. Моделирование турбулентных струй и следов на основе метода дискретных вихрей.– М.: Физ.-мат. литература, 1995.– 366 с.
9. Ringleb F.O. Two-Dimensional Flow with standing Vortexes in Ducts and Diffusers // Trans. of the ASME. J. of Basic Engineering.– 1960.– N 10.– P. 921-927.
10. Смирных Е.А. Численное моделирование методом дискретных вихрей структуры отрывного течения за интерцептором // Труды ЦАГИ.– 1989.– N 2420.– С. 78-86.
11. Карр Л.В. Прогресс в исследовании и методах расчета динамического срыва // Аэрокосмическая техника.– 1988.– N 12.– P. 59-73.
12. Cortelezzi L. Nonlinear feedback control of the wake past a plate with a suction point on the downstream wall // Journal of Fluid Mechanics.– 1996.– 327.– P. 303-324.
13. Cortelezzi L., Leonard A., Doyle J.C. An example of active circulation control of the unsteady separated flow past a semi-infinite plate // Journal of Fluid Mechanics.– 1994.– 260.– P. 127-154.
14. Меркулов В.И. Управление движением жидкости.– Новосибирск: Наука. СО, 1981.– 172 с.
15. Салганов Н.В., Горбань В.А. Вихревые структуры в жидкости: аналитические и численные решения.– К.: Наук. думка, 1993.– 242 с.
16. Горбань В.О., Горбань И.М. Резонансні властивості вихорів за нерівностями границі // Доповіді НАН України.– 1996.– N 2.– С. 44-47.
17. Горбань В.А., Горбань И.Н. Исследование взаимодействия вихрей с неровностями обтекаемой поверхности // Бионика.– 1998.– N 27-28.– С. 109-114.
18. Schecter D.A., Dubin D.H.E., Fine K.S., Driscoll C.F. Vortex crystals from 2D Euler flow: Experiment and simulation // Physics of Fluids.– 1999.– 11, N 4.– P. 905-914.
19. Bappert R., Benner S., Hacker B., Kern U. Bionik, Zukunfts-Technik lernt von den Natur.– Manheim: 1998, 136.– с.
20. Chernyshenko S.I. Stabilization of trapped vortices by alternating blowing suction // Physics of Fluid.– 1995.– 7, N 4.– P. 802-807.
21. Gorban V., Gorban I. Dynamics of vortices in near-wall flows: eigenfrequencies, resonant properties, algorithms of control // AGARD Report.– 1998.– N 827.– P. 15-1-15-11.