

УДК 532.526

## УПРАВЛЕНИЕ ТЕЧЕНИЕМ В КАВЕРНЕ С ПОМОЩЬЮ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ВДУВА

Г. А. ВОРОПАЕВ, Н. В. РОЗУМНЮК

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

Получено 15.07.2009

Численно исследуется возможность управления течением вязкой несжимаемой жидкости в окрестности плоской каверны, осуществляемого с помощью периодического вдува с малой скоростью через часть дна каверны. Вдув с частотой, равной собственной частоте колебаний течения при обтекании каверны в режиме сдвигового слоя, приводит к резонансному усилению амплитуды возмущений, увеличивает периодические выбросы жидкости из каверны в пограничный слой ниже каверны, удлиняет зону влияния каверны. Удвоенная частота вдува, наоборот, существенно демпфирует собственные возмущения и подавляет выбросы из каверны. Таким образом, влияние каверны на параметры основного течения существенно уменьшается.

Чисельно досліджується можливість керування потоком в'язкої нестисливої рідини в околі плоскої каверни, впровадженого за допомогою періодичного вдуву з малою швидкістю через частину дна каверни. Вдув з частотою, яка дорівнює власній частоті коливань течії при обтіканні каверни в режимі зсувного шару, призводить до резонансного посилення амплітуди збурень, збільшує періодичні викиди рідини з каверни в прилеглий шар нижче каверни, подовжує зону впливу каверни. Подвоєна частота вдуву, навпаки, суттєво демпфує власні збурення та пригнічує викиди з каверни. Таким чином, вплив каверни на параметри основного потоку зменшується.

Numerical modeling is utilized to analyze a possibility to control the flow of viscous incompressible fluid over a plane cavity by means of periodic blowing at low rate through a part of the cavity bottom. The blowing with the frequency equal to the eigenfrequency of the flow over the cavity oscillations at the shear-layer regime leads to resonant amplification of the disturbance amplitude, increase periodic bursts of fluid from the cavity into the boundary layer and extends the affected zone downstream. Doubled frequency, on the contrary, essentially damps the natural disturbances and suppresses the bursts from the cavity. Thus, the influence of the cavity onto the main flow parameters is much reduced.

### ВВЕДЕНИЕ

При обтекании каверны в плоской поверхности режим потока в окрестности каверны может варьироваться от стационарного к периодическому с преобладанием одной или нескольких частот, и до существенно аperiodического, в зависимости от параметров набегающего течения и размеров каверны [1–7]. Соответственно меняется влияние каверны на интегральные характеристики обтекаемой поверхности. Наложение вынужденного возмущения в виде периодического распределенного вдува жидкости в каверну может повлиять на поведение потока не только внутри каверны, но и в основном течении вниз по потоку.

### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Данная работа представляет результаты численного моделирования вязкого течения в окрестности прямоугольной каверны глубиной  $d = b/2$  (где  $b$  – длина каверны вдоль потока) при умеренных числах Рейнольдса по скорости основного потока и длине каверны ( $Re_b = 6000 \div 20000$ ). На половине дна каверны применяется равномерный распределенный вдув с заданной периодично-

стью. Каверна находится на фиксированном расстоянии от носика пластины, т. е. отношение толщины пограничного слоя перед каверной к длине каверны изменяется при изменении числа Рейнольдса ( $\delta/b = 0.25 \div 0.1$ ).

Предполагается, что ширина канавки (поперек потока) достаточно большая для того, чтобы течение вдали от торцов можно было моделировать в двухмерном приближении. Как было показано в экспериментальной работе [4] (где параметры течения подобны исследуемым здесь), если длина каверны в трансверсальном направлении превышает ее ширину, то влияние ширины на основные частотные характеристики течения в окрестности каверны становится несущественным.

Задача решается в двумерной формулировке, нестационарные уравнения Навье-Стокса записываются в переменных завихренность – функция тока:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} = \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right); \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = \omega, \quad (2)$$

где завихренность  $\omega$  и функция тока  $\psi$  определя-

ются следующим образом:

$$\omega = \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x}; \quad (3)$$

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x}. \quad (4)$$

Граничные условия – это равномерный поток на входе в расчетную область, прилипание жидкости на твердой границе, "мягкие" условия на выходе, подвижная крышка с проскальзыванием на верхней границе потока.

Периодический импульсный вдув применяется на половине дна каверны ( $b/2 < x < b$ ) перпендикулярно ко дну (рис. 1). Т. е. продольная скорость равна нулю, а вертикальная скорость зависит от времени следующим образом:

$$v_{wall} = \begin{cases} v_{blowing}, & t \in [t_{n-1}; t_{n-1} + \Delta t/2], \\ 0, & t \in [t_{n-1} + \Delta t/2; t_n], \end{cases}$$

где  $\Delta t$  – период вдува,  $n$  – номер цикла. Таким образом, в течение первой половины периода происходит вдув со скоростью  $v_{blowing}$ , в течение второй половины периода восстанавливаются условия непротекания.

## 2. ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД

Уравнения (1), (2) решаются численно методами конечных разностей. Подробности численной процедуры описаны в [1, 3].

В расчетной области вводится ортогональная сетка со сгущением шагов в областях сильных изменений физических параметров, т. е. возле поверхности пластины, в районе каверны и кромок пластины.

В качестве вычислительной схемы для уравнения переноса завихренности (1) используется неявная схема метода переменных направлений, а уравнение Пуассона для функции тока (2) решается методом линейного сканирования. Диффузионные члены аппроксимируются конечными разностями 2-го порядка точности, конвективные члены – противопоточными разностями 3-го порядка [9].

На каждом шаге по времени контролируется сходимость расчета как основных уравнений, так и граничных условий для завихренности на твердой стенке. Алгоритм позволяет либо получать стационарное решение, когда все параметры потока остаются неизменными при дальнейшем расчете, либо исследовать поведение течения во времени.

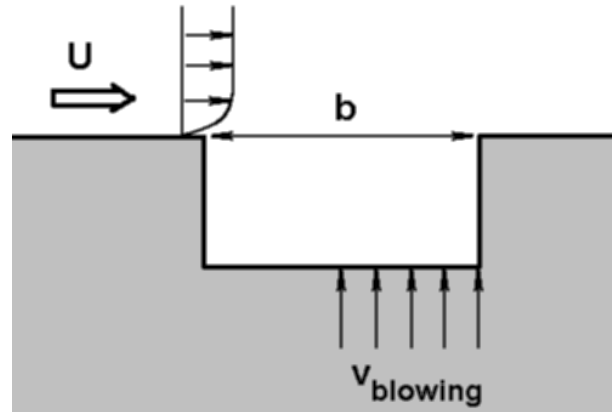


Рис. 1. Схема управления потоком посредством вдува

Начальными условиями для исследования влияния вдува являются результаты моделирования обтекания каверны без вдува [3].

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Течение в каверне без управления может иметь стационарный или нестационарный характер в зависимости от соотношения параметров натекающего пограничного слоя и размеров каверны. Основным механизмом, приводящим к нестационарному режиму, является развитие неустойчивости сдвигового слоя, возникающего в верхней части каверны вследствие взаимодействия внешнего потока и жидкости в каверне. Локальное поведение свободного сдвигового слоя зависит от начального градиента скорости в нем и длины пути развития. В данной задаче первое определяется толщиной потери импульса пограничного слоя перед каверной  $b/\theta_0$ , а второе – длиной каверны  $b$ . Соотношение этих величин является одним из основных параметров задачи.

При низких  $Re_b$  (до  $\cong 7000$ ) отношение  $b/\theta_0$  настолько мало, что на длине каверны сдвиговый слой остается устойчивым, и все течение стационарно. Течение внутри каверны и основной поток разделены нулевой линией тока, через которую не происходит обмен жидкостью между каверной и течением над пластиной. При малых числах Рейнольдса (порядка 1000) весь объем жидкости в каверне, расположенной под сдвиговым слоем, вращается вокруг одного центра, при более высоких – формируется несколько зон с разным направлением вращения (крупномасштабные вихри). Более интенсивный вихрь находится возле правой стенки каверны и занимает почти всю глубину каверны (рис. 2, а).

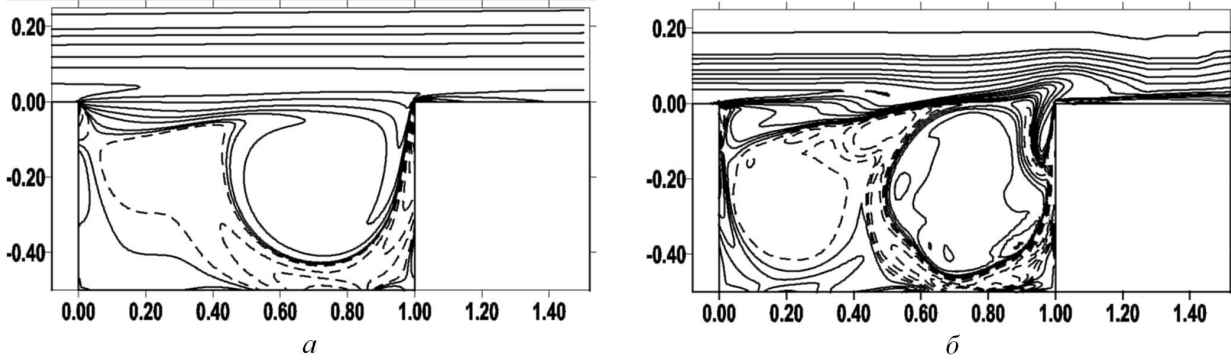


Рис. 2. Изолинии завихренности (а) в камере без вдува при стационарном режиме течения ( $Re_b = 6250$ ) и мгновенные изолинии завихренности (б) при режиме периодических колебаний ( $Re_b = 15625$ )

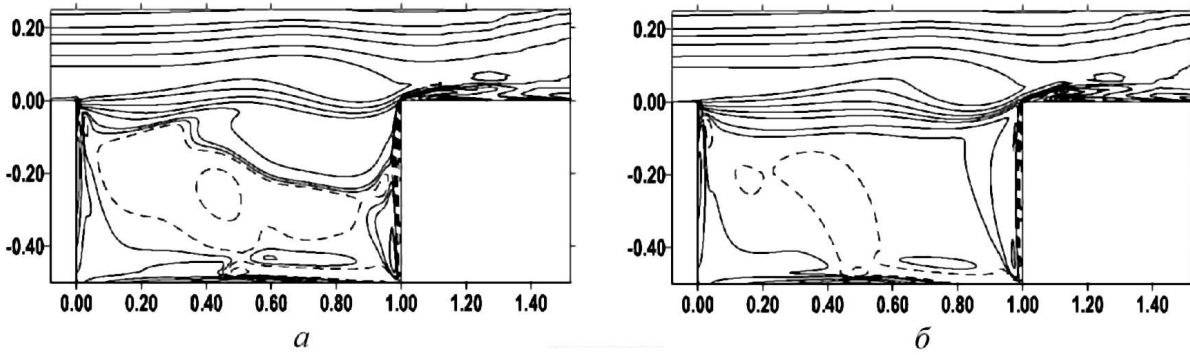


Рис. 3. Мгновенные изолинии завихренности при вдуве с частотой  $f_{blowing} = f_{sl}$  при  $Re_b = 6250$ :  
а -  $t=88$ ; б -  $t=143.84$

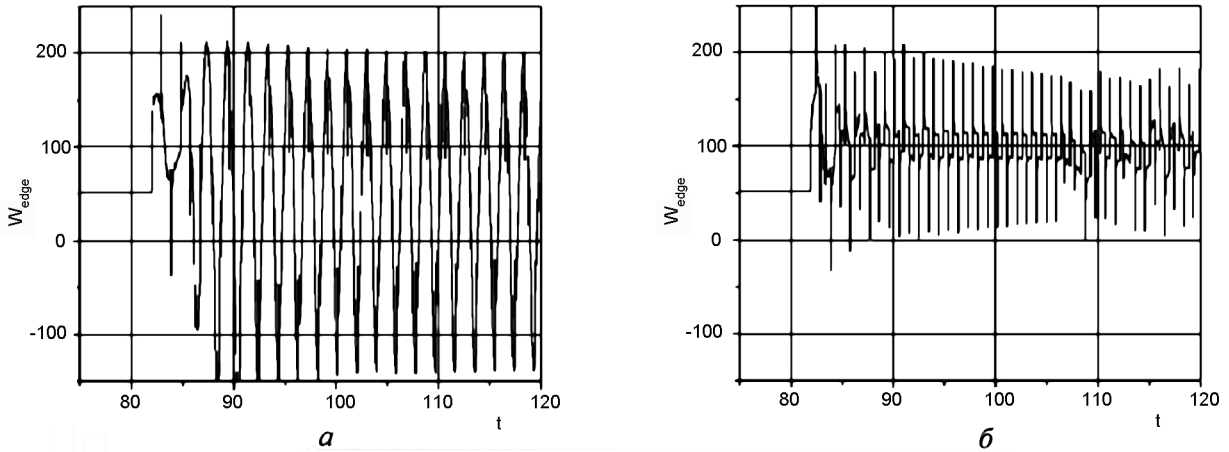


Рис. 4. Завихренность на выходной кромке камеры при вдуве с частотой при  $Re_b = 6250$ :  
а -  $f_{blowing} = f_{sl}$ ; б -  $f_{blowing} = 2f_{sl}$

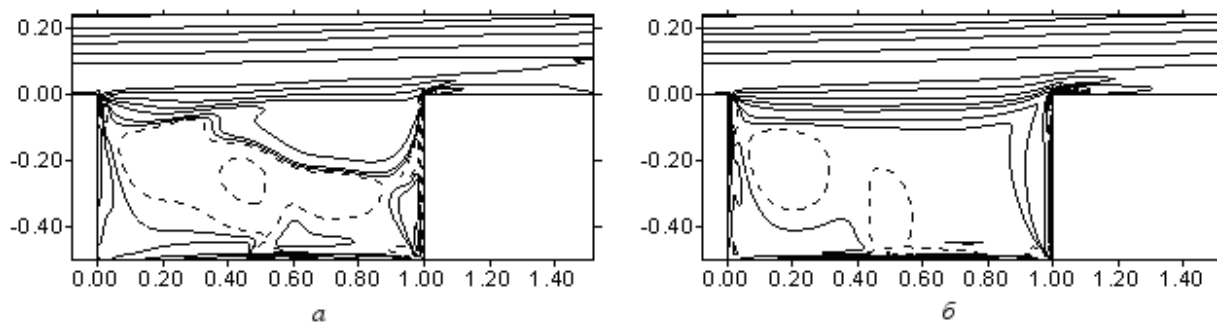


Рис. 5. Мгновенные изолинии завихренности при вдуве с частотой  $f_{blowing} = 2f_{sl}$  при  $Re_b = 6250$ :  $a - t=88$ ;  $b - t=120.48$

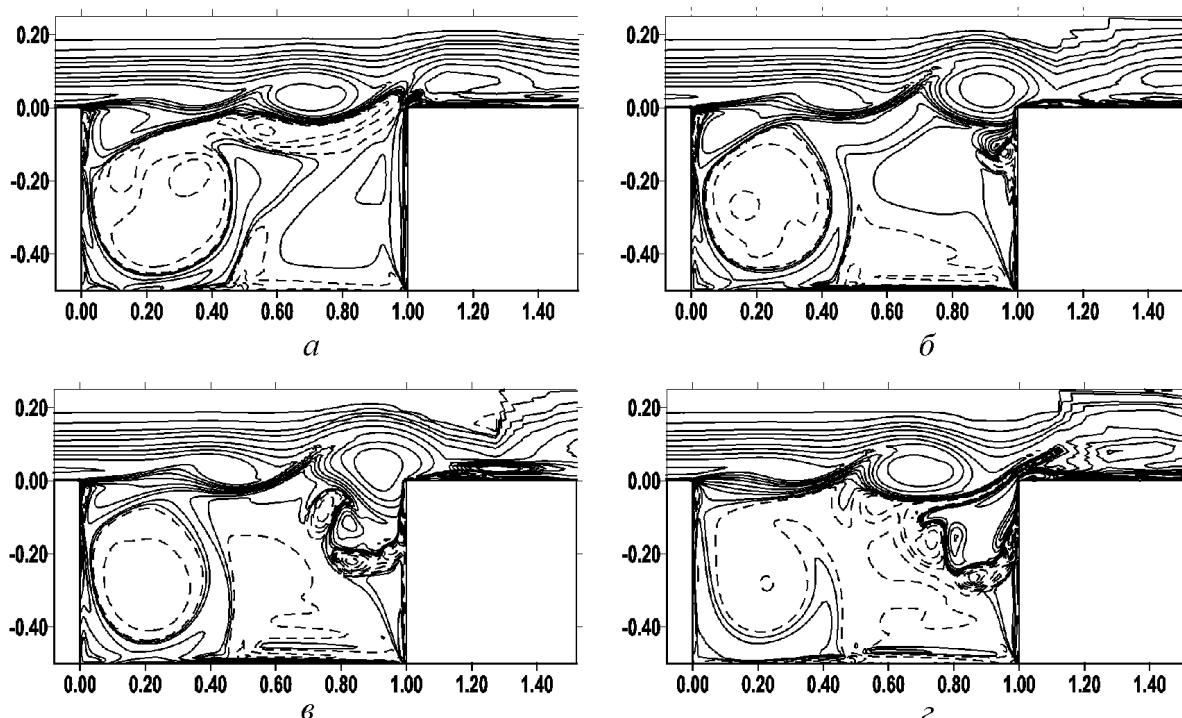


Рис. 6. Мгновенные изолинии завихренности при вдуве с частотой  $f_{blowing} = f_{sl}$  при  $Re_b = 15625$ :  $a - t=144.64$ ;  $б - t=151.68$ ;  $в - t=160$ ;  $г - t=216$

При  $Re_b > 7000$  на фоне этой крупномасштабной структуры течения происходят периодические колебания, возникающие вследствие того, что в сдвиговом слое при подходе к кромке уже образовались отдельные вихри, которые периодически ударяются о стенку каверны возле кромки (рис. 2, б). Таким образом, частота этих колебаний равна частоте неустойчивости слоя сдвига  $f_{sl}$ , образуемого из сходящего с левой кромки пограничного слоя, с учетом влияния длины его развития, т.е. длины каверны  $b$ .

Верхняя часть вихрей, образованных сдвиговым

слоем, срезается правой кромкой каверны и уносится вдоль пластины, вызывая колебания в пограничном слое ниже каверны, что определяет основную частоту возмущений в пограничном слое. Остальная часть вихревого образования сдвигового слоя попадает внутрь каверны и взаимодействует с элементами структуры течения в каверне. Это, в свою очередь, воздействует на сдвиговый слой – происходит некоторое вертикальное смещение положения сдвигового слоя относительно кромки, появляются более низкие частоты.

Чем больше число Рейнольдса, тем сильнее про-

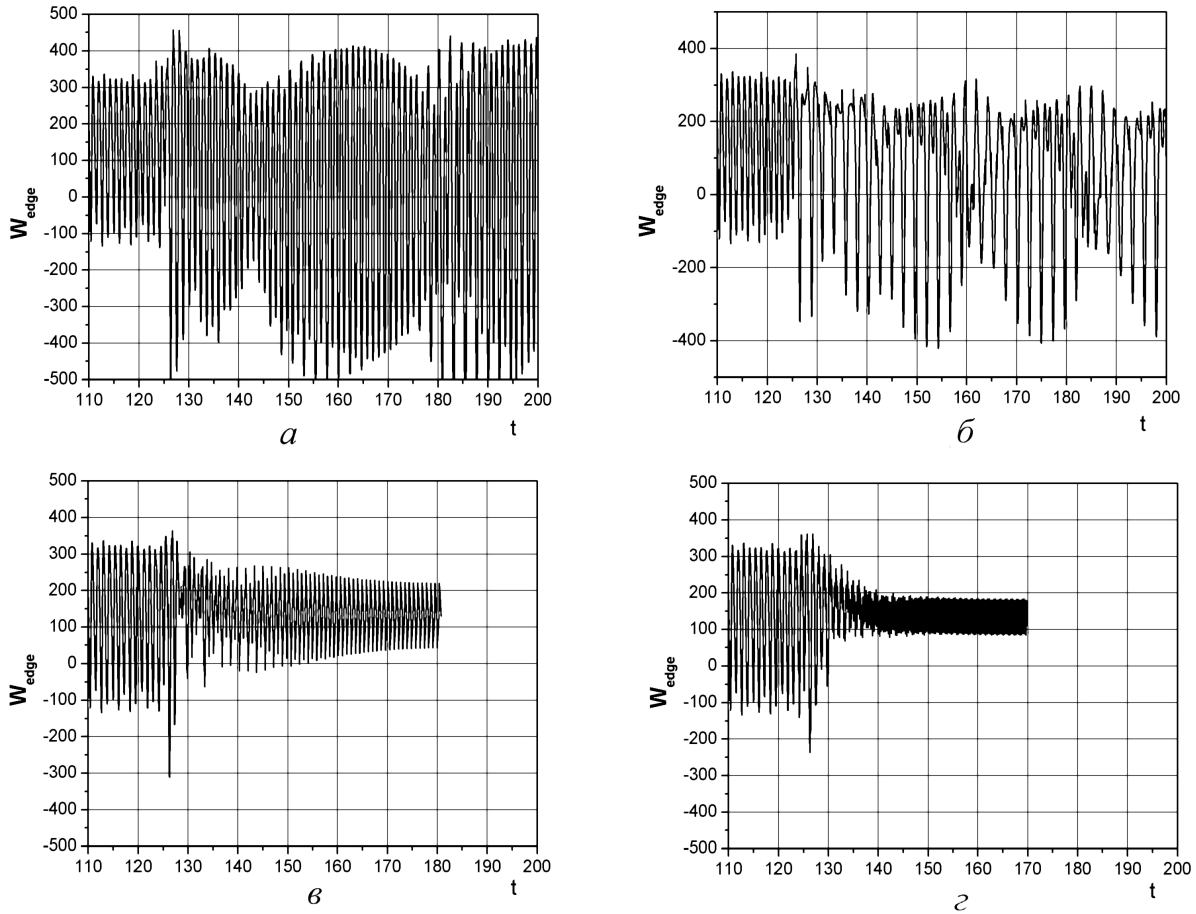


Рис. 7. Завихренність на вихідній кромці каверни при вдюві з частотою ( $Re_b = 15625$ )  
 $a - f_{blowing} = f_{sl}$ ;  $б - f_{blowing} = 0.5f_{sl}$ ;  $в - f_{blowing} = 1.33f_{sl}$ ;  $г - f_{blowing} = 4f_{sl}$

являється вплив неустойчивості течення всередині каверни на зовнішній потік. Взаємодія з зовнішнім потоком починає відбуватися на всій довжині каверни, великі порції рідини вишлюккуються вгору, в деякі моменти швидкісний шар в верхній частині каверни взагалі не прослідковується. Пограничний шар на пластині нижче каверни відчуває сильне вплив як від цих вишлюккують з каверни, так і внаслідок відокремлення потоку, виникаючого на кромці каверни. Тим не менше, в спектрі частот коливань частота швидкісного шару  $f_{sl}$  є домінуючою. Виходячи з цього, перша власна мода швидкісного шару для каверни в природних умовах взята як визначальний параметр управління. Нижче наводяться результати чисельного експерименту з дослідження імпульсного вдюву з частотами, кратними цій частоті.

Представлені результати для двох характерних випадків. В першому вдюві застосовується на фоні

стаціонарного течення в каверні ( $Re_b = 6250$ ), во второму – на фоні автоколибательного течення в режимі швидкісного шару ( $Re_b = 15625$ ).

Стаціонарний режим при  $Re_b = 6250$  був отриманий в результаті встановлення, а на початковій стадії також відбуваються коливання, пов'язані з розвитком шару швидкості в верхній частині каверни, які з часом затухають [3]. Частота цих коливань  $f_{sl}$  і використовується для періодичного вдюву.

На рис. 3 показані лінії завихренності в деякі моменти часу після початку періодичного вдюву з частотою  $f_{blowing} = f_{sl}$ . По цих рисунках видно, що поступаюча в каверну рідину поступово витісняє великий вихор, знаходившийся поруч з правою стінкою каверни в природних умовах без вдюву. В той же час, накладувані вдювом збурення течення в каверні призводять до неустойчивості збіваючого з лівої кромки пограничного шару і розви-

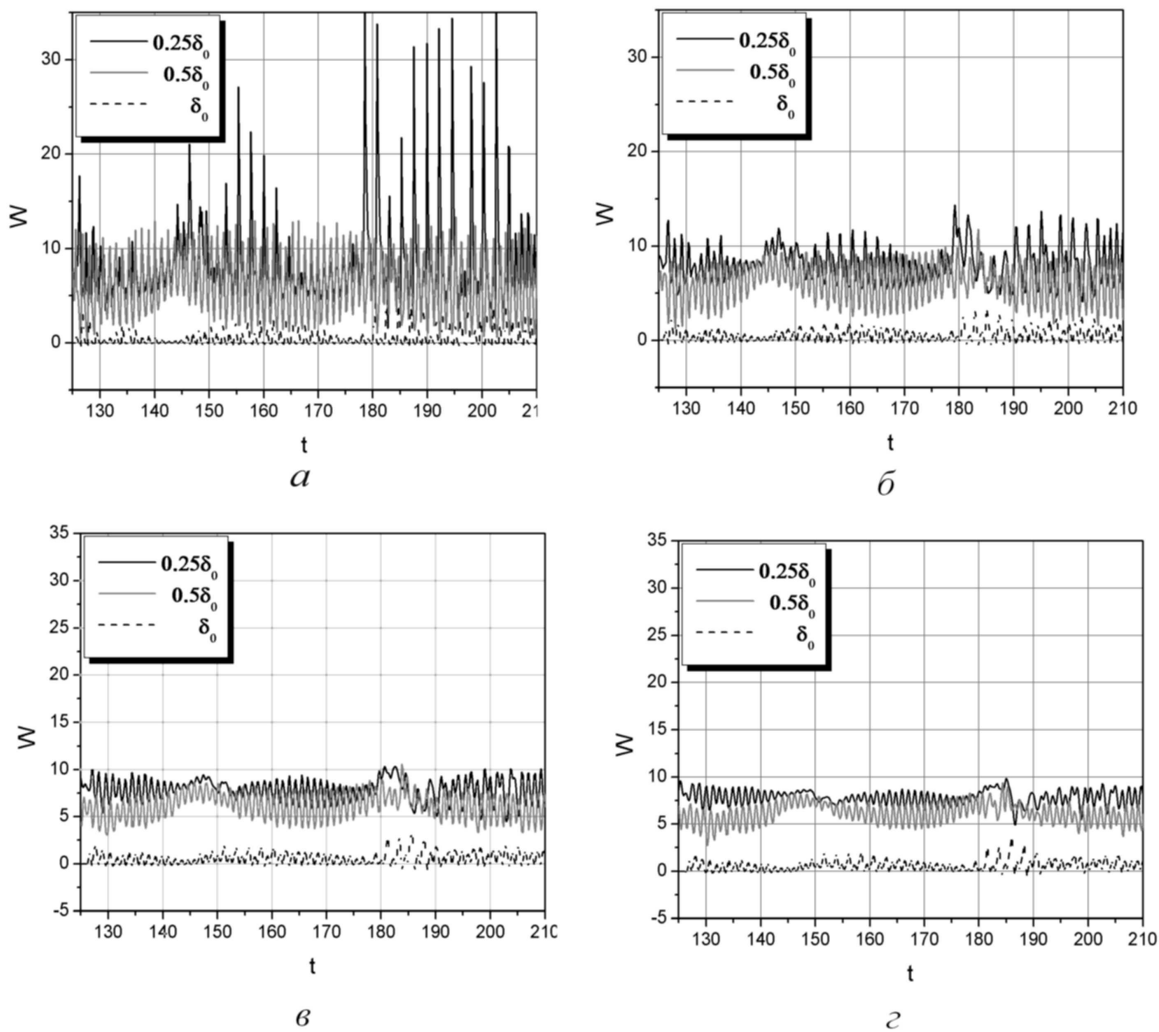


Рис. 8. Завихренность в потоке на расстоянии  $x$  ниже каверны при вдуве с частотой  $f_{blowing} = f_{sl}$  ( $Re_b = 15625$ )

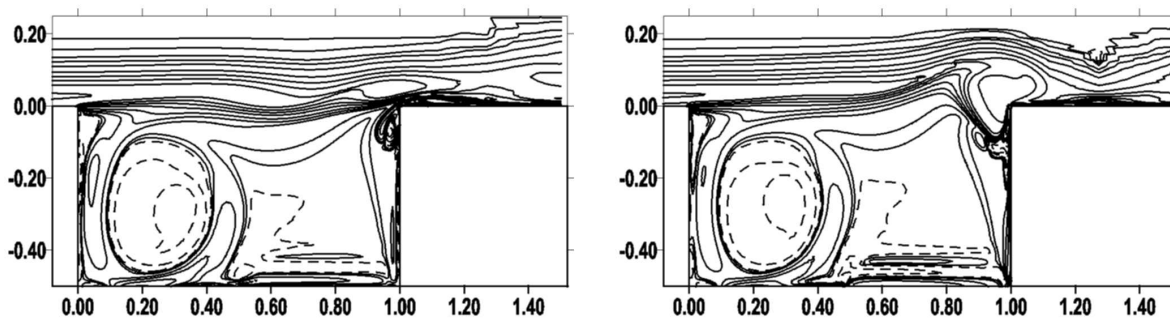


Рис. 9. Мгновенные изолинии завихренности при вдуве с частотой  $f_{blowing} = 0.5f_{sl}$  при  $Re_b = 15625$ :  
 $a - t = 153.28$ ;  $б - t = 154.4$

ваючого з нього слоя сдвига. В результаті в районі правої кромки спостерігаються коливання завихренності, середній рівень завихренності також підвищується (рис. 4, а).

При вдуді з удвоєною частотою сдвигового слоя  $f_{blowing} = 2f_{sl}$  також виникають коливання, але менш інтенсивні. Слой сдвига не змінюється так сильно за період вдуду, як в попередньому випадку (рис. 5). Відповідно коливання завихренності біля правої кромки мають меншу амплітуду (рис. 4, б).

В випадку більш високого числа Рейнольдса вдуду накладається на періодичне течення ( $Re_b = 15625$ ). Якщо частота вдуду дорівнює частоті власних коливань, відбувається суттєве посилення інтенсивності вихревого течення в каверні. Це особливо помітно в верхній частині каверни, де в слое сдвига розвиваються досить інтенсивні вихри (рис. 6). При зіткненні з нижньою кромкою вони руйнуються, і верхні частини цих вихрей сносяться вниз по потоку вздовж поверхності пластини. Нижні частини потрапляють всередину каверни і разом з плямами завихренності протилежного знаку, генерованими взаємодією на нижній кромці, переміщуються на фоні великих вихрей, існуючих в каверні до початку вдуду. Великий вихрь біля правої кромки поступово витісняється вдудуваною рідиною (рис. 6, б). Однак нижні частини руйнованих вихрей сдвигового слоя через деякий час утворюють нову вихревую систему, що складається з кількох плям з різним знаком завихренності (рис. 6, в). Далі і ця структура витісняється з каверни і процес повторюється. Таким чином, поряд з коливаннями течення на частоті вдуду/сдвигового слоя і дрібними частотами, пов'язаними з зміною положення слоя сдвига відносно правої кромки, спостерігаються зміни течення, тривалість яких набагато перевищує період вдуду (рис. 7, а).

Такі ж частоти прослідковуються і в приграничному слое нижче каверни. На рис. 8 представлені графіки завихренності в кількох точках по висоті на різній відстані від каверни. По зміні величини амплітуди коливань на різній висоті видно, що сгенеровані каверною і переносимі теченням вихреві утворення зміщуються то вище, то нижче по відношенню до пластини. Наприклад, в моменти часу  $t \sim 150$  і  $t \sim 180$  рівень завихренності поблизу поверхності ( $y \approx 0.1\delta$ ) стає менше, ніж на відстані  $0.25\delta$  і  $0.5\delta$ , т. є. вихри проходять на більшій висоті, ніж в решту часу спостережень. Це приблизно відповідає тим моментам, коли в каверні

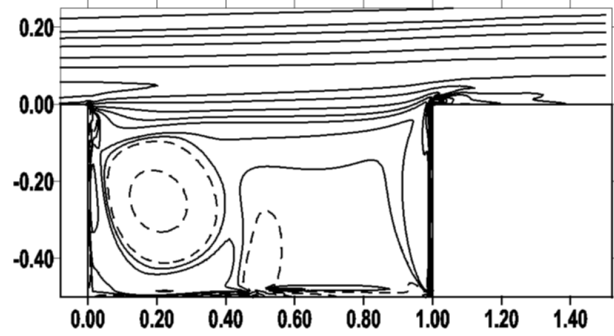


Рис. 11. Ізолінії завихренності при вдуді з частотою  $3f_{blowing} = f_{sl}$

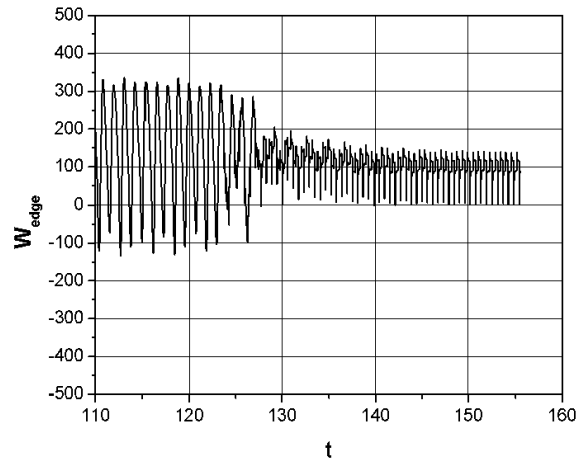


Рис. 12. Завихренність на нижній кромці каверни при вдуді з  $f_{blowing} = f_{sl}$

не біля правої стінки тимчасово відсутні розвинуті вихреві утворення, витіснені вдудуваною рідиною, а положення слоя сдвига таке, що більша частина утворених в ньому вихрей проходить вище правої кромки каверни.

Половинна частота вдуду призводить до інтенсифікації кожного другого вихря, формуючогося в слое сдвига (рис. 9). Малі порції завихреної рідини, що потрапляють всередину каверни після взаємодії цих вихрей з нижньою кромкою, не проникають глибоко всередину каверни і швидко виносяться во зовнішнє течення. Але деякі довготривалі зміни амплітуди коливань все-таки присутні (рис. 7, б). Коливання прослідковуються і вниз по потоку (рис. 10).

Якщо вдуду виконується з частотою, помітно перевищує власну частоту сдвигового слоя, течення стабілізується. Розвиток вихрей в сдвиговому слое придувається (рис. 11), амплітуда коливань завихренності біля нижньої кромки каверни

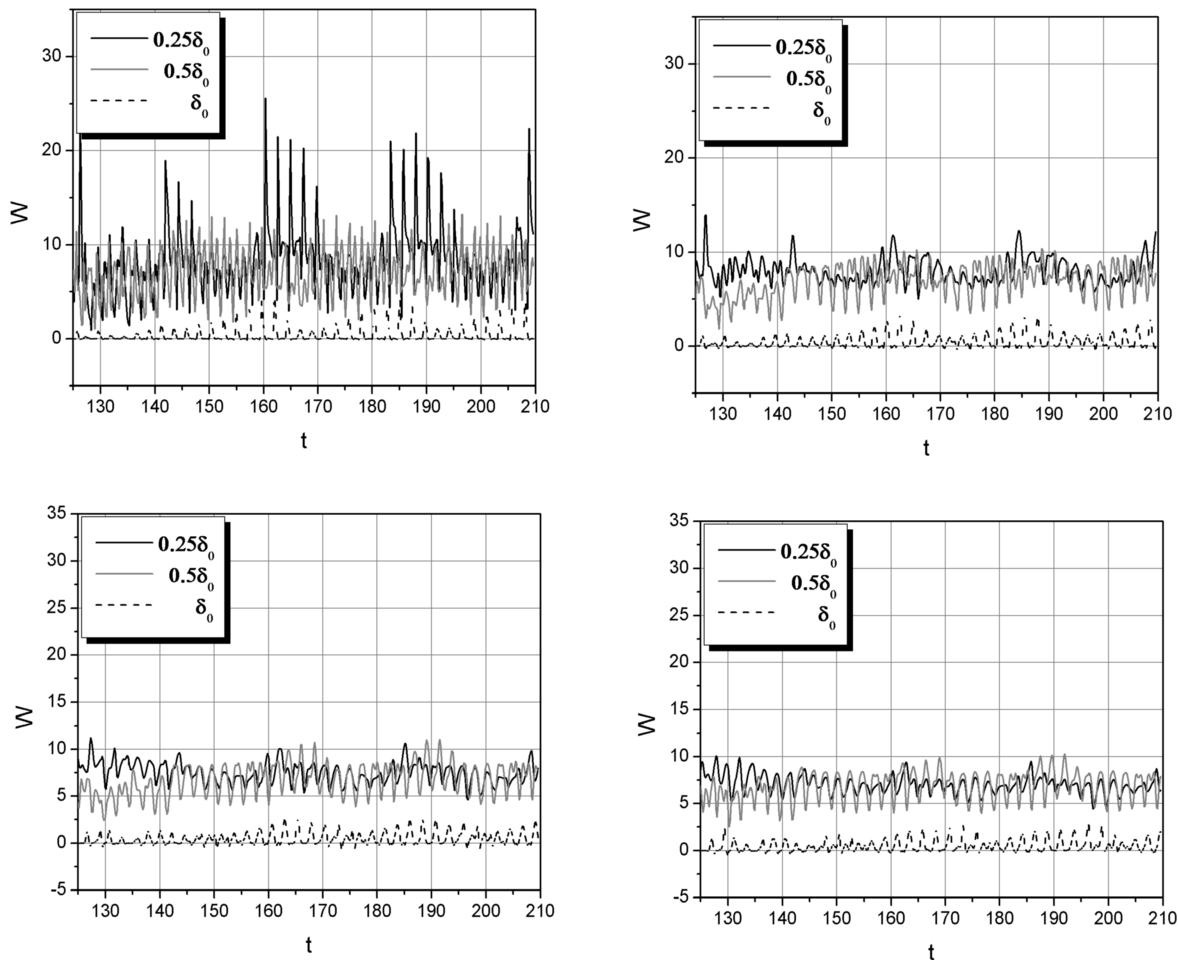


Рис. 10. Завихренність в потоці на відстані  $x$  нижче каверни при вдюві з частотою  $f_{blowing} = 0.5 f_{sl}$  при  $Re_b = 15625$ :  
 $a - x = 0.25b$ ;  $b - x = 0.5b$ ;  $c - x = 0.75b$  и  $d - x = b$

ни падає (рис. 12).

Нижче каверни коливання швидко затухають і на відстані довжини каверни вниз по потоку практично зникають (рис. 8, 10). Максимальне впливання спостерігається при частоті вдюва, близькій до удвоєної частоти неустійливості сдвигового шару (рис. 12).

При естественному обтекании каверны колебания течения в окрестности каверны определяются сочетанием двух факторов: степенью развития неустойчивости слоя сдвига на длине каверны и взаимодействием этого слоя с нижней кромкой каверны. Так как максимальная завихренность в слое находится в ядрах вихрей, образованных в слое сдвига, интенсивность взаимодействия с кромкой зависит от положения слоя относительно кромки.

Структура течения при естественном обтекании такова, что середина сдвигового слоя (т. е. ядра вихрей) находится примерно на уровне кромки. С началом вдюва через дно каверны вдюваемая жидкость захватывается крупным вихрем возле правой стенки и отклоняется влево. Но после нескольких циклов вдюва этот вихрь вытесняется и возле правой кромки формируется выходящий из каверны поток, который оттесняет сдвиговый слой выше кромки. Поэтому амплитуда колебаний на кромке уменьшается, соответственно уменьшается амплитуда вблизи поверхности пластины ниже каверны. Основная часть сдвигового слоя с более высокой завихренностью проходит на расстоянии порядка половины толщины пограничного слоя, поэтому на рис. 12 уровень завихренности на этом



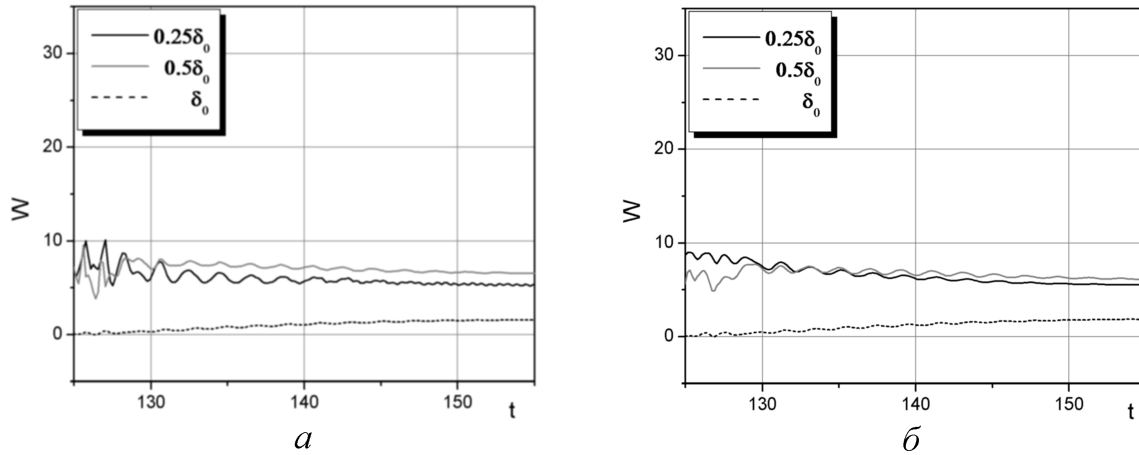


Рис. 13. Завихренность в потоке на расстоянии  $x$  ниже каверны при вдуве с частотой  $f_{blowing} = f_{sl}$  при  $Re_b = 15625$  :  
 $a - x = 0.25b$ ;  $b - x = 0.5b$

расстоянии от стенки становится больше, чем возле поверхности.

## ВЫВОДЫ

- Наложение малых, но конечных возмущений скорости на структуру вихревого течения внутри каверны приводит к качественному и количественному изменению структуры вихревого течения внутри каверны и в следе за ней.
- При частотах вдува, больших собственной частоты сдвигового слоя, течение в каверне регулируется, низкочастотные выбросы из каверны вырождаются, вниз по потоку прослеживаются высокочастотные возмущения с частотой вдува.
- При частоте вдува, равной частоте первой моды собственных колебаний сдвигового слоя, формирующегося на границе каверны, интенсифицируется низкочастотный выброс жидкости из каверны. За каверной формируется пульсирующая зона возвратного течения, имеющая протяженность, сравнимую с длиной каверны. Вниз по потоку прослеживаются нестационарные возмущения скорости и давления с несущей частотой вдува, модулированные частотой выбросов.
- При частотах вдува, равных половине частоты первой моды собственных колебаний сдвигового слоя, существенно интенсифицируется

каждый второй выброс. Вниз по потоку наблюдаются интенсивные нестационарные возмущения.

1. Воропаев Г. А., Розумнюк Н. В. Численное моделирование вязкого течения над поверхностью с углублением // Прикладна гідромеханіка. – 2004. – **6(78)**, N 4. – С. 17–23.
2. Воскобийник А. В., Воскобийник В. А. Кінематика вихревого руху на обтічній поверхні з напівциліндричною канавкою // Акустичний вісник. – 2007. – **10**, N 3. – С. 30–41.
3. Розумнюк Н. В. Мгновенные и осредненные характеристики вязкого потока около прямоугольной каверны // Прикладна гідромеханіка. – 2007. – **9(81)**, N 4. – С. 49–58.
4. Disimile P. J., Toy N., Savory E. Effect of planform aspect ratio on flow oscillations in rectangular cavities // J. of Fluids Engineering. – 2000. – **122**. – P. 32–38.
5. Faure T. M., Adrianos P., Lusseyran F., Pastur L. Visualisation of the flow inside an open cavity at medium range Reynolds numbers // Experiments in Fluids. – 2007. – **42**. – P. 169–184.
6. Grace S. M., Dewar W. G., Wroblewski D. E. Experimental investigation of the flow characteristics within a shallow wall cavity for both laminar and turbulent boundary layers // Experiments in Fluids. – 2004. – **36**. – P. 791–804.
7. Lin J.-C., Rockwell D. Organized oscillation of initially turbulent flow past a cavity // AIAA Journal. – 2001. – **39**, N 6. – P. 1139–1151.
8. Ukeiley L., Murray N. Velocity and surface pressure measurements in an open cavity // Experiments in Fluids. – 2005. – **38**. – P. 656–671.
9. Shirayama S. Construction of modified third-order schemes for stretched meshes // AIAA Journal. – 1992. – **30**, N 5. – P. 1237–1242.