
doi: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2017.11.030>

УДК 532.517

И.В. Вовк, В.С. Малюга

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

E-mail: v_s_malyuga@ukr.net

Генерация автоколебаний при обтекании цилиндра с плоским сплиттером

Представлено академиком НАН Украины В.Т. Гринченко

Численно решена задача об обтекании потоком вязкой несжимаемой жидкости кругового цилиндра и присоединенного с тыльной стороны плоского сплиттера. Исследован как переходной процесс формирования и начала отрыва вихрей за цилиндром, так и установившиеся автоколебания потока, вызванные периодическим образованием и сбросом вихрей за цилиндром.

Ключевые слова: обтекание цилиндра, сплиттер, вихревая дорожка, автоколебания, метод конечных объемов, OpenFOAM.

Обтекание кругового цилиндра потоком вязкой жидкости было предметом многих расчетных и экспериментальных исследований. История изучения таких течений достаточно подробно изложена, например, в [1, 2]. Популярность данных задач заключается в том, что обтекание цилиндра потоком встречается повсюду в природе и технике. Хорошо известно, что при определенных числах Рейнольдса при обтекании потоком удлиненных тел возникают звуки, именуемые в литературе эоловыми тонами. История изучения эоловых тонов прекрасно изложена в [3, 4]. Поскольку образование и срыв вихрей за цилиндром или любыми другими удлиненными телами может приводить к нежеланным вибрациям обтекаемого тела и даже к разрушению конструкций, необходимо иметь возможность контролировать процесс срыва вихрей, снижать силу сопротивления обтекаемого тела и амплитуду колебания сил, приложенных к нему. Одним из способов контроля потока является расположение плоского сплиттера за цилиндром. Для более детального обзора экспериментальных и расчетных результатов, полученных другими авторами, мы отсылаем читателя к статье [2].

Постановка задачи. Рассмотрим задачу о натекании потока вязкой несжимаемой жидкости на неподвижный круговой цилиндр с плоским сплиттером, расположенным за цилиндром. Сплиттер представляет собой абсолютно жесткую тонкую пластину и может располагаться как вдоль потока, так и под углом к направлению потока. Расчетная область и принятые обозначения представлены на рис. 1. Вся расчетная область занимает прямоуголь-

© И.В. Вовк, В.С. Малюга, 2017

ник $0 < x < L_1$, $0 < y < L_2$. Жидкость подается на левом торце ($x = 0$), где задана постоянная скорость V . Далее поток натекает на круговой цилиндр диаметра d с расположенным за ним тонким сплиттером длины h и покидает расчетную область через правую границу ($x = L_1$).

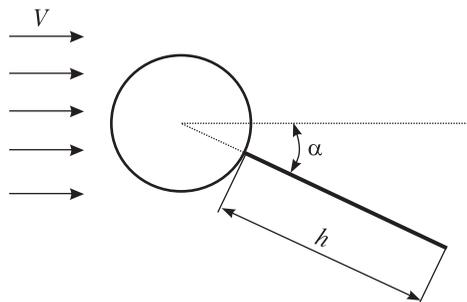


Рис. 1. Геометрия задачи

Задача формулируется в рамках модели вязкой несжимаемой ньютоновской жидкости. Такой процесс описывается нестационарной системой уравнений Навье—Стокса. Для обезразмеривания уравнений движения за масштаб длины принимался диаметр цилиндра d , а за масштаб скорости — скорость равномерного потока V на достаточно большом удалении от цилиндра. Тогда масштабом времени будет величина d/V , а масштабом давления — удвоенный скоростной напор ρV^2 . Основным параметром такой задачи, входящим в уравнения движения, является число Рейнольдса $Re = Vd/\nu$, где ν — кинематическая вязкость среды.

Граничные условия для скорости устанавливали следующим образом: равномерный поток на входе в расчетную область, условие прилипания на твердой поверхности цилиндра и сплиттера, равенство нулю нормального градиента на выходе из расчетной области. Для давления условие равенства нулю нормального градиента формулировалось по всей границе расчетной области за исключением выхода. На выходе задавали постоянное давление.

В данной работе мы проводили численные расчеты для $Re = 200$, а длину сплиттера h варьировали от $0,5d$ до $5,5d$. При этом сплиттер мог располагаться не только вдоль потока, но и под некоторым углом α к направлению потока.

Алгоритм численного решения задачи. Алгоритм численного решения сформулированной задачи детально описан в [5] и применен в [6, 7] для численного решения задачи об обтекании кругового цилиндра. Описанный алгоритм решения основан на использовании метода конечных объемов, который в настоящее время можно считать наиболее популярным численным подходом в задачах механики жидкостей. При расчетах использовались библиотеки тулбокса с открытым кодом OpenFOAM. Пространственная дискретизация выполнялась на структурированной сетке O-типа со сгущением узлов вблизи твердой поверхности обтекаемого цилиндра и сплиттера. Длина стороны контрольного объема в непосредственной близости к поверхности не превышала 10^{-4} . Как для пространственной, так и для временной дискретизации использовались схемы второго порядка, в частности, для дискретизации конвективных членов применена TVD схема, имплементированная в OpenFOAM. В качестве схемы дискретизации производной по времени использовалась неявная трехточечная несимметричная схема второго порядка с разностями назад (backward differencing). С целью верификации численного алгоритма была решена классическая задача о нестационарном отрыве потока при обтекании кругового цилиндра [6, 7]. Полученные результаты сравнивали с расчетными и экспериментальными данными других авторов. Для распараллеливания вычислений применяли технологию MPI и метод распараллеливания, известный как декомпозиция области решения, то есть распараллеливание на основе геометрического параллелизма. Расчеты проводили на кластерном суперкомпьютере Института кибернетики НАН Украины [8].

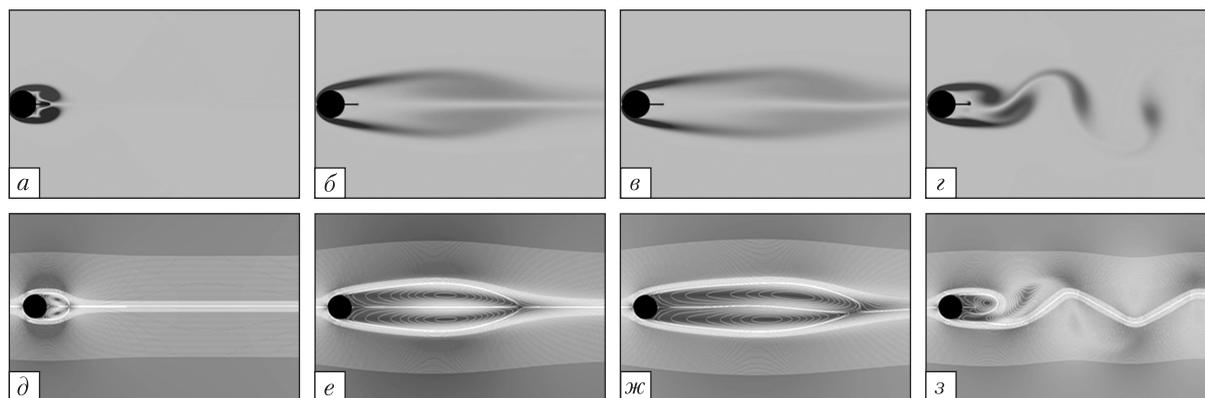


Рис. 2. Поле завихренности ($a-g$) и линии тока ($д-з$) в течение переходного процесса ($Re = 200$, $h = d/2$, $\alpha = 0$): $a, д - t = 2,5$; $б, е - t = 41$; $в, ж - t = 57$; $г, з - t = 140$

Анализ численных результатов. Сначала рассмотрим переходной процесс для случая, когда длина сплиттера равна радиусу обтекаемого цилиндра $h = d/2$ и $\alpha = 0$. Течение развивается во времени из состояния покоя. После начала движения за цилиндром начинает формироваться пара вихрей, имеющих равные по модулю, но противоположные по знаку значения завихренности, то есть два симметричных вихря, закрученные в противоположные стороны. На рис. 2, a и $д$ показан момент, когда вихревая пара за цилиндром только начинает формироваться. Горизонтальный размер вихрей, т.е. расстояние от кормовой точки цилиндра до точки пересечения мгновенных линий тока лишь немного превосходит диаметр цилиндра. Внутри образовавшихся вихрей наблюдаются локальные минимумы давления. Далее, с течением времени размеры вихревой пары за цилиндром продолжают расти и достигают некоторого максимального значения в момент времени примерно $t = 41$. Поле завихренности и картина линий тока в данный момент времени показана на рис. 2, $б$ и $е$. На границе этой все еще стационарной вихревой пары формируется расширяющийся слой смешения, то есть слой сдвигового течения, который характеризуется значительными поперечными (в направлении оси Oy) градиентами завихренности, что, как известно, способствует неустойчивости потока. В силу этого при дальнейшем увеличении вихревой пары за цилиндром нарушается симметрия течения. На рис. 2, $в$ и $ж$ показан момент времени $t = 57$, когда симметрия течения только начинает разрушаться. Далее, со временем симметрия течения за цилиндром полностью разрушается и течение переходит в режим установившегося периодического образования и сброса вихрей. Верхний и нижний вихри сбрасываются в шахматном порядке. Это видно на рис. 2, $г$ и $з$, где показан момент времени $t = 140$. В данный момент уже наблюдаются устойчивые автоколебания течения за цилиндром.

Рассмотрим установившийся процесс автоколебаний потока за цилиндром. На рис. 3 представлены поля завихренности и распределение давления на поверхностях сплиттера и цилиндра на протяжении одного периода колебаний с шагом в четверть периода ($T/4$). При построении распределения давления по твердой поверхности сплиттера и цилиндра поверхность обходится по часовой стрелке, начиная с конца сплиттера. То есть, точка $l = 0$ соответствует кормовой точке сплиттера. Средняя вертикальная пунктирная линия на рисунке соответствует передней точке обтекаемого цилиндра. А левая и правая пунктирные

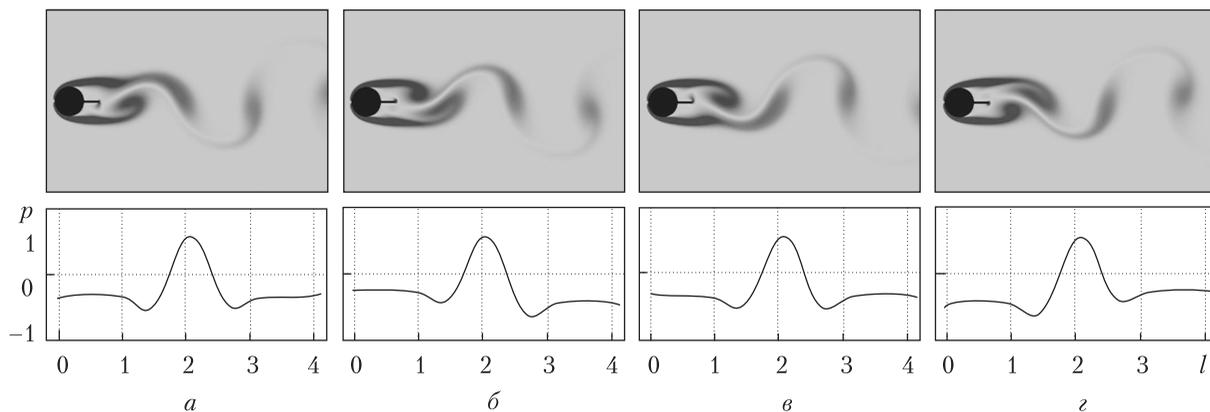


Рис. 3. Поле завихренности в течение периода T установившегося процесса образования и срыва вихрей ($Re = 200$, $h = d/2$, $\alpha = 0$). На нижних рисунках показано распределение давления по поверхности обтекаемого тела: $a - t = 0$; $б - t = T/4$; $в - t = T/2$; $г - t = 3T/4$

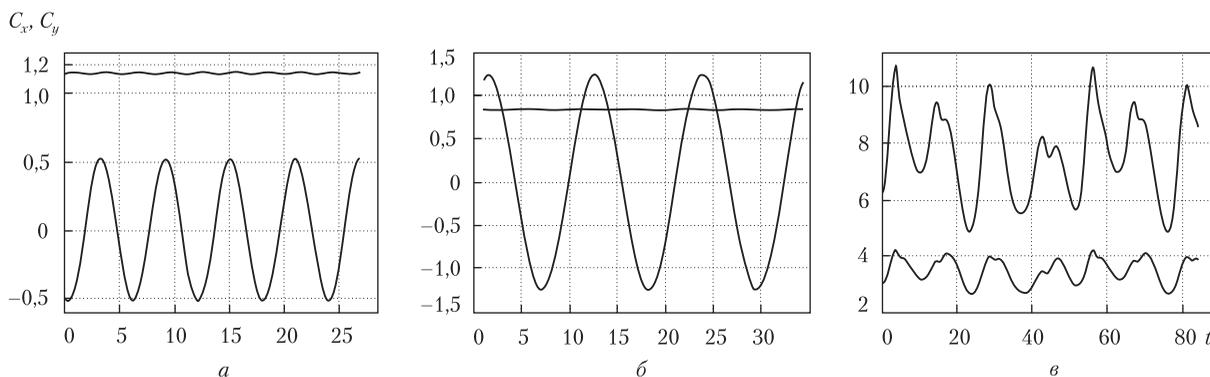


Рис. 4. Периодические колебания во времени коэффициентов сил, приложенных к обтекаемому телу ($Re = 200$): $a -$ при $h = d/2$; $\alpha = 0$, верхняя кривая – коэффициент сопротивления C_x , нижняя кривая – коэффициент подъемной силы C_y ; $б -$ при $h = 11d/2$; $\alpha = 0$, верхняя кривая – C_x , нижняя кривая – C_y , $в -$ при $h = 11d/2$; $\alpha = 20^\circ$, верхняя кривая – C_y , нижняя кривая – C_x

линии отсекают поверхность сплиттера от поверхности цилиндра. За начальный момент времени ($t = 0$) примем момент, когда коэффициент подъемной силы, который, как будет видно ниже, колеблется периодически вокруг нуля, становится равным нулю ($C_y = 0$).

Видно, что вихри уже образуются не сразу за поверхностью цилиндра, как при обтекании кругового цилиндра без сплиттера [6, 7], а за сплиттером. То есть, вихри взаимодействуют уже не столько с цилиндром, но, прежде всего, с кончиком сплиттера. Следует отметить, что также как и при обтекании цилиндра, при котором возникают эоловы тона, в данном течении мы также видим периодическое изменение распределения давления по поверхности, что также может служить источником звуковых колебаний. Так, если в момент $t = T / 4$ минимум давления расположен на верхней части поверхности, то в момент $t = 3T / 4$ он уже находится на нижней части поверхности.

Периодический характер течения в следе за цилиндром приводит к тому, что силы, приложенные к цилиндру, также изменяются периодически во времени, причем взаимодей-

ствие вихрей практически не оказывает влияния на переднюю критическую точку в силу ее удаления от области отрыва вихрей. На рис. 4, а показано изменение во времени коэффициентов лобового сопротивления C_x и подъемной силы C_y при $h = d/2$, $\alpha = 0$. Очевидно, что действие сил изменяется периодически. Причем период изменения лобового сопротивления вдвое меньше, чем период изменения подъемной силы. Иными словами, частота колебания действующей на цилиндр и сплиттер силы в горизонтальном направлении вдвое выше частоты колебания этой силы в вертикальном направлении. Этот же эффект имеет место и при обтекании кругового цилиндра без сплиттера [6, 7]. На рис. 4, б и в показано изменение во времени коэффициентов сил при длине сплиттера $h = 11d/2$. Рис. 4, б соответствует случаю, когда сплиттер расположен вдоль направления потока, а рис. 4, в — случаю, когда сплиттер повернут к направлению потока на угол $\alpha = 20^\circ$. В первом случае в силу симметричной геометрии задачи подъемная сила колеблется около нуля, а частота колебаний силы сопротивления вдвое выше частоты колебаний подъемной силы. Во втором же случае из-за отклонения сплиттера возникает ненулевое среднее значение подъемной силы. Более того, кривая, соответствующая подъемной силе, лежит выше, чем кривая, соответствующая силе сопротивления. Также следует отметить, что изменение во времени сил, приложенных к обтекаемому твердому телу, уже не имеет явно выраженного периодического характера.

Коэффициенты лобового сопротивления и подъемной силы формально могут быть представлены в виде суммы постоянной и осциллирующей частей:

$$C_x = \bar{C}_x + \tilde{C}_x, \quad C_y = \bar{C}_y + \tilde{C}_y,$$

где \bar{C}_x, \bar{C}_y — постоянные составляющие сил, приложенных к цилиндру и сплиттеру (очевидно, что при расположении сплиттера вдоль направления набегающего потока $\bar{C}_y = 0$, а при отклонении сплиттера на некоторый угол α возникает ненулевое среднее значение подъемной силы), а \tilde{C}_x, \tilde{C}_y — осциллирующие составляющие сил. В таблице приведены значения постоянной составляющей \bar{C}_x и амплитуды осциллирующих составляющих \tilde{C}_x, \tilde{C}_y , а также отношение этих амплитуд для различной длины сплиттера. Кроме того, таблица

Расчетные значения характеристик периодического течения для различных значений длины сплиттера h ($Re = 200$, $\alpha = 0$). Используются следующие обозначения: T — период колебаний, St — число Струхала, \bar{C}_x — среднее значение коэффициента сопротивления, $\max|\tilde{C}_x|$ — амплитуда колебаний коэффициента сопротивления, $\max|\tilde{C}_y|$ — амплитуда колебаний коэффициента подъемной силы

h	r	$2r$	$3r$	$5r$	$7r$	$9r$	$11r$	0
T	5,89	6,30	5,72	5,78	7,22	9,11	11,2	5,082
St	0,170	0,159	0,175	0,173	0,139	0,110	0,089	0,197
\bar{C}_x	1,1461	1,0441	1,0389	0,9967	0,9271	0,8751	0,8402	1,343
$\max \tilde{C}_x $	0,0072	0,0024	0,0062	0,0110	0,0052	0,0044	0,0049	0,05
$\max \tilde{C}_y $	0,5180	0,3333	0,4162	0,9493	1,1498	1,2412	1,2491	0,686
$ \tilde{C}_x / \tilde{C}_y $	$1,39 \cdot 10^{-2}$	$0,72 \cdot 10^{-2}$	$1,49 \cdot 10^{-2}$	$1,16 \cdot 10^{-2}$	$0,45 \cdot 10^{-2}$	$0,35 \cdot 10^{-2}$	$0,39 \cdot 10^{-2}$	$7,3 \cdot 10^{-2}$

содержит значения периода колебаний и числа Струхала. Во всех рассмотренных случаях сплиттер располагался вдоль направления потока ($\alpha = 0$), а число Рейнольдса $Re = 200$.

Видно, что наличие сплиттера за цилиндром существенно уменьшает среднее значение сопротивления обтекаемого тела. Причем с увеличением длины сплиттера коэффициент сопротивления продолжает уменьшаться. Это, по-видимому, связано с тем, что между цилиндром и сплиттером образуются вихри, что обуславливает появление вблизи поверхности обтекаемого тела зон обратного движения, а это уменьшает сопротивление. Также следует отметить, что при наличии сплиттера значительно уменьшается амплитуда колебаний коэффициента сопротивления. Так, при обтекании цилиндра без сплиттера ($h = 0$) амплитуда колебаний коэффициента сопротивления равна $5 \cdot 10^{-2}$. А при наличии даже небольшого сплиттера, длина которого равна радиусу цилиндра, амплитуда колебаний коэффициента сопротивления уже уменьшается до $0,72 \cdot 10^{-2}$. При дальнейшем удлинении сплиттера амплитуда колебаний \tilde{C}_x ведет себя немонотонно. Сначала она уменьшается вплоть до $h = d$, затем увеличивается вплоть до $h = 5d/2$, затем снова уменьшается вплоть до $h = 9d/2$ и затем снова растет. Это, по-видимому, зависит от того сколько сорвавшихся с поверхности цилиндра вихрей уместится вдоль сплиттера. Также следует отметить, что при наличии сплиттера значительно увеличивается период колебаний, то есть время между образованием и сбросом вихрей. При дальнейшем увеличении длины сплиттера период вихреобразования также растет. Однако это процесс немонотонный. Так, при переходе от $h = d$ к $h = 3d/2$ этот период резко сокращается.

Таким образом, нами численно решена задача об обтекании кругового цилиндра с плоским сплиттером, присоединенным с тыльной стороны цилиндра. Описано изменение полей завихренности и картины линий тока в течение переходного процесса формирования и начала отрыва вихрей за цилиндром. Также рассмотрен процесс установившихся автоколебаний потока, вызванный периодическим срывом вихрей. Гидродинамический канал обратной связи формируется за счет разности давлений на верхней и нижней поверхностях цилиндра и сплиттера и периодической смены ее знака, что и вызывает периодический процесс образования и срыва вихрей. Приведены расчетные данные основных характеристик течения для различных длин сплиттера. Показано, что наличие сплиттера, расположенного вдоль потока, значительно снижает сопротивление обтекаемого цилиндра и амплитуду колебания сил, приложенных к нему. В заключение также следует сказать, что периодическое изменение давления на сторонах цилиндра и сплиттера является источником звуковых колебаний дипольного типа, который неоднократно экспериментально наблюдался многими исследователями.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Приходько А.А., Редчиц Д.А. Численное моделирование нестационарного течения в следе за цилиндром на основе уравнений Навье-Стокса. *Прикл. гидромех.* 2005. 7, № 1. С. 56–71.
2. Vu H.C., Ahn, J., Hwang, J.H. Numerical investigation of flow around circular cylinder with splitter plate. *KSCE J. Civ. Eng.* 2016. 20. P. 2559–2568. doi: <https://doi.org/10.1007/s12205-015-0209-3>
3. Вовк И.В. Физический взгляд на природу эоловых тонов. *Акуст. вісн.* 2007. 10, № 2. С. 22–32.
4. Вовк И.В., Гринченко В.Т. Звук, рожденный потоком. Киев: Наук. думка, 2010. 221 с.
5. Малюга В.С. Численное исследование течения в канале с двумя последовательно расположенными стенозами. Алгоритм решения. *Прикл. гидромех.* 2010. 12, № 4. С. 45–62.

6. Вовк И.В., Малюга В.С. Об одном методе оценки звукового поля эоловых тонов. *Акуст. вісн.* 2010. **13**, № 2. С. 3–19.
7. Малюга В.С. Численный расчет акустического поля эоловых тонов. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2011. № 9. С. 56–61.
8. Головинський А.Л., Маленко А.Л., Сергієнко І.В., Тульчинський В.Г. Енергоєфективний суперкомп'ютер СКІТ-4. *Вісн. Нац. акад. наук Укр.* 2013. № 2. С. 50–59.

Поступило в редакцію 31.05.2017

REFERENCES

1. Prikhodko, A. A. & Redchits, D. A. (2005) Numerical simulation of unsteady flow in the wake past a cylinder on basis of Navier-Stokes equations. *Prikladna Hidromehanika*, 7, No. 1, pp. 56-71 (in Russian).
2. Vu, H. C., Ahn, J. & Hwang, J. H. (2016) Numerical investigation of flow around circular cylinder with splitter plate. *KSCE J. Civ. Eng.*, 20, pp. 2559-2568. doi: <https://doi.org/10.1007/s12205-015-0209-3>
3. Vovk, I. V. (2007) Physical view of aeolian tone nature. *Akustychny visnyk*, 10, No. 2, pp. 22-32 (in Russian).
4. Vovk, I. V. & Grinchenko, V. T. (2010). *Sound born by a flow*. Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
5. Malyuga, V. S. (2010) Numerical investigation of the flow in a duct with two serial stenoses. Solution algorithm. *Prikladna Hidromehanika*, 12, No. 4, pp. 45-62 (in Russian).
6. Vovk, I. V. & Malyuga, V. S. (2010). On a new method of aerodynamic sound evaluation for Aeolian tones. *Acustychny Visnyk*, 13, No. 2, pp. 3-19 (in Russian).
7. Malyuga, V. S. (2011). Numerical calculation of the acoustic field of Aeolian tones. *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.*, No. 9, pp. 56-61 (in Russian).
8. Golovinsky, A. L., Malenko, A. L., Sergienko, I. V. & Tulchinsky, V. G. (2013). Energy-efficient supercomputer SCIT-4, *Visnyk Nac. akad. nauk Ukr.*, No. 2, pp. 50-59 (in Ukrainian).

Received 31.05.2017

I.V. Vovk, V.S. Malyuga

Інститут гідромеханіки НАН України, Київ
E-mail: v_s_malyuga@ukr.net

ГЕНЕРАЦІЯ АВТОКОЛИВАНЬ ПРИ ОБТІКАННІ ЦИЛІНДРА З ПЛОСКИМ СПЛІТТЕРОМ

Чисельно розв'язано задачу про обтікання потоком в'язкої нестисливої рідини кругового циліндра і приєднаного з тильного боку плоского спліттера. Досліджено як перехідний процес формування і початок відриву вихорів за циліндром, так і усталені автоколивання потоку, що спричинені періодичним утворенням і скиданням вихорів за циліндром.

Ключові слова: обтікання циліндра, спліттер, вихрова доріжка, автоколивання, метод скінченних об'ємів, OpenFOAM.

I.V. Vovk, V.S. Malyuga

Institute of Hydromechanics of the NAS of Ukraine, Kiev
E-mail: v_s_malyuga@ukr.net

GENERATION OF SELF-EXCITED OSCILLATIONS OF THE FLOW PAST A CYLINDER WITH SPLITTER PLATE

The problem of viscous incompressible fluid flow past a circular cylinder and a splitter plate attached to the cylinder backside is studied numerically. First, we consider the transient process of vortex formation and the beginning of vortex shedding. Then we describe the sustained self-excited flow oscillations caused by the periodic vortex shedding behind the body.

Keywords: flow past cylinder, splitter, vortex street, self-excited oscillations, finite volume method, OpenFOAM.