

сборник научных статей. – Санкт-Петербург: РГПУ им. А.И. Герцена (2023). – С. 303–307.

5. Кадер, Б.А. Спектры анизотропных турбулентных пульсаций скорости и температуры в пристеночных турбулентных потоках / Б.А. Кадер, А.М. Яглом // Сб.: Проблемы турбулентных течений. – Москва: Наука, 1987. – С. 65–74.

6. Ong, L. The velocity field of the turbulent very near wake of a circular cylinder / L. Ong, J. Wallace // Exp. Fluids. – 1996. – V. 20. – P. 441–453.

УДК 533.6.013.12

Ле Ван Ха, Фролов В.А.

ВЯЗКОЕ ОБТЕКАНИЕ ЦИЛИНДРА С ПЛАСТИНАМИ

В статье решается задача моделирования обтекания изолированного цилиндра и цилиндра с пластинами в двумерном случае. Рассмотрены два режима течения: стационарный (steady) и нестационарный (transient). Моделирование выполнено в вычислительном пакете ANSYS Fluent [1] при числах Рейнольдса $Re=10\div 10^5$. В настройках задачи принимались следующие геометрические характеристики цилиндра и параметры течения: диаметр цилиндра $D=0,0625$ м, скорость потока $V=24$ м/с, термодинамические параметры воздуха принимались при температуре $T=293$ К. Все расчёты для комбинаций цилиндра с дефлекторами и для изолированного цилиндра проводились для размера расчётной области: $10D$ – впереди цилиндра; $15D$ – сзади цилиндра; $5D$ – сверху и снизу цилиндра. Гибридная сетка в соответствии со значением числа Рейнольдса $Re=10^5$ построена с размером первой (ближайшей к поверхности цилиндра) ячейки $0,1$ мм ($y^+=10$). Типы граничных

условий задавались: на входе `velocity_inlet`, на выходе – `pressure_outlet`, а сверху и снизу – `symmetry`. Использовалась модель турбулентности $k-\omega$ SST. Такие настройки размера расчётной области и типы граничных условий применялись в работах [2], [3]. В нестационарной постановке важно определить шаг по времени. Предполагаем, что размер расчётной области порядка 1 м, в этом случае характерное время определяется как

$$t = \frac{1 \text{ м}}{24 \text{ м/с}} \approx 0,042 \text{ с.} \quad (1)$$

Это время, за которое частица движется от входа (`inlet`) до выхода (`outlet`) расчётной области. Шаг по времени тогда можно выбрать $\Delta t = 0,001 \text{ с}$. Результат моделирования показан на рис. 1 для поля скорости и турбулентной кинетической энергии в момент времени $t=0,15 \text{ с}$.

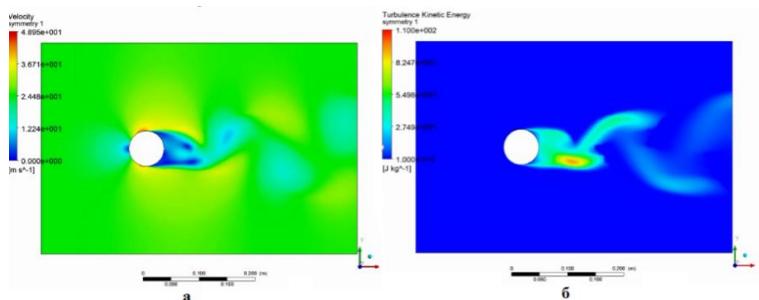


Рис. 1. Поле скорости (а) и турбулентной кинетической энергии (б) в момент времени $t = 0,15 \text{ с}$ при числе Рейнольдса $Re=10^5$

На рис. 2 изображены графики зависимостей значений коэффициентов нормальной силы и силы лобового сопротивления от времени. Из рис. 2 можно определить значение числа Струхала Sh и осреднённое по времени значение коэффициента лобового сопротивления.

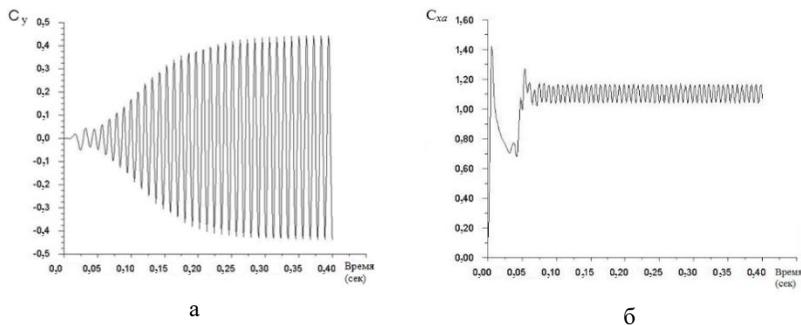


Рис. 2. Зависимость коэффициентов подъёмной силы (а) и силы лобового сопротивления (б) при числе $Re=10^5$

Число Струхалия, характеризующее периодичность отрыва вихрей, периодичность сил и пульсаций скоростей в следе, образующих вихревую дорожку, определяется следующим образом:

$$Sh = \frac{fD}{V_\infty} = \frac{90 \cdot 0,0625}{24} = 0,23. \quad (2)$$

Полученное значение числа Струхалия при моделировании хорошо согласуется с теоретическим значением $Sh=0,2$ [4], а осреднённое по времени значение коэффициента лобового сопротивления (рис.2 б) $C_{xa} = 1,12$ примерно совпадает с экспериментом [5], что говорит о правильности выбора шага по времени, в частности, и настроек метода вычисления в целом.

Сравнение результатов моделирования в стационарной постановке для разных чисел Рейнольдса и эксперимента представлено в табл. 1.

Из табл. 1 и рис. 2б следует, что в случае числа Рейнольдса $Re=10^5$, значение C_{xa} в нестационарной постановке задачи хорошо согласуется с расчётным значением в стационарной постановке и с экспериментальным значением [5]. Отсюда можно сделать вывод о том, что для вычисления значения коэффициента

лобового сопротивления с высокой точностью достаточно решить задачу в стационарной постановке, чтобы сэкономить ресурсы компьютера и время расчёта. Подобный вывод сделан в работе [6].

Таблица 1. Результаты моделирования с разными числами Re

Re	V , м/с	C_{xa} (модел.) стационарное решение	C_{xa} (эксп.) [5, с.30, рис.1.4]	Относительная погрешность (%)
10	0,0024	3,45	3,22	7
100	0,024	1,40	1,40	0
1000	0,24	0,95	1,00	5
10000	2,4	1,10	1,15	4
100000	24	1,23	1,20	2,5

На основании полученного заключения в задачах обтекания системы цилиндр с задней пластиной и передними дефлекторами (рис. 3) будем использовать стационарную постановку. Решение задачи обтекания цилиндра с одной задней пластиной было получено в работе авторов [7], а задача с дефлекторами спереди исследована в работе [8].

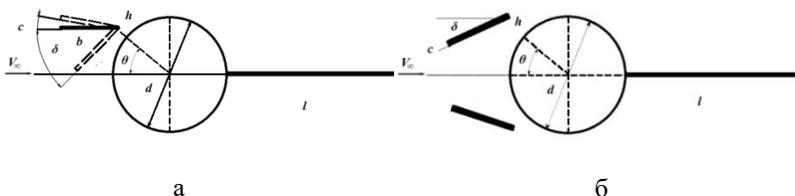


Рис. 3. Схема системы цилиндр с задней пластиной и одним (а) и двумя (б) дефлекторами спереди

Использовались модели со следующими геометрическими размерами: относительная длина хорды дефлекторов $\bar{b} = 0,5$, их

толщина 2 мм, относительная щель между дефлекторами и поверхностью цилиндра $\bar{h}=0,1$, относительная длина задней пластины $\bar{l}=3$, меридиональный угол установки дефлекторов $\theta=40^\circ$. Все безразмерные величины отнесены к диаметру цилиндра.

Зависимость коэффициента лобового сопротивления от угла установки передних дефлекторов показана на рис. 4. Для случая одного дефлектора минимальный коэффициент лобового сопротивления комбинации цилиндр-дефлектор равен 0,45 при $\delta=20^\circ$ (рис. 4,а), для случая с двумя дефлекторами он равен 0,50 (рис. 4,б). Небольшое возрастание коэффициента сопротивления на величину 0,05 связано с добавлением собственного сопротивления второго дефлектора.

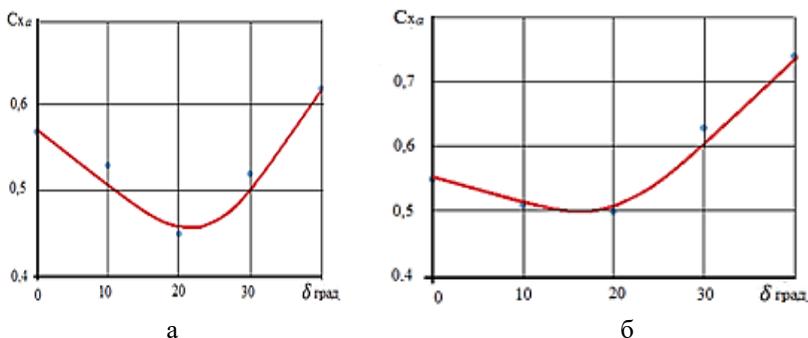


Рис. 4. Зависимость коэффициента лобового сопротивления (при относительной хорде дефлекторов $\bar{b}=0,5$) от угла установки дефлекторов (а – 1 дефлектор, б – 2 дефлектора)

Варьирование относительной хорды дефлекторов ($\bar{b}=0,01; 0,25; 0,75$) показало, что с увеличением размера хорды эффект конфузора возрастает, лобовое сопротивление цилиндра снижается, однако, из-за увеличения длины хорды растёт лобовое сопротивление самих дефлекторов, что приводит к возрастанию сопротивления

всей системы (рис. 5), поэтому существует рациональное значение $\bar{b}=0,25$, при котором минимальный коэффициент сопротивления равен $C_{xa} = 0,48$.

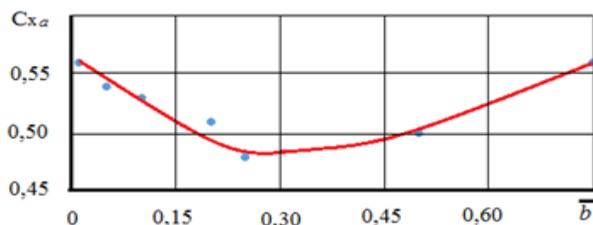


Рис. 5. Зависимость коэффициента лобового сопротивления от длины хорды дефлекторов при $\theta = 40^{\circ}$, $\delta = 20^{\circ}$

Итак, в работе было показано, что для сопротивления цилиндра при числе $Re=10^5$ вполне допустимо использовать стационарную постановку задачи, что экономит компьютерные ресурсы по сравнению с нестационарной постановкой. Выявлена закономерность между количеством, хордой дефлекторов, их расположением и коэффициентом лобового сопротивления системы «цилиндр- задняя пластина» с передними дефлекторами.

Установлено, что коэффициент сопротивления комбинации цилиндра с одним плоским дефлектором, установленным спереди с углом установки $\delta=20^{\circ}$ с относительной хордой $\bar{b}=0,5$ и с установкой дополнительной задней горизонтальной пластины, расположенной в плоскости симметрии может достигать минимального значения $C_{xa}=0,45$, что является меньшим значением, чем это было получено при использовании только передних дефлекторов [7, 8].

Библиографический список

1. ANSYS FLUENT, Theory Guide (Release 16.2). ANSYS, Inc., 2015.

2. Basohbatnovinzad, M. Experimental and numerical investigation of flow around an inline square cylinder array at a high Reynolds number / M. Basohbatnovinzad, M. Shams, S.G. Pouryoussefi [et al.]. – Arch Appl Mech 92, 3433–3446 (2022).

3. Dewanshu, D. POD analysis of the wake behind a circular cylinder with splitter plate / D. Dewanshu, S. Ashwin, Senthilkumar // European Journal of Mechanics – B/Fluids, Volume 93, 2022. – P. 1–12.

4. Чжен, П. Отрывные течения / П. Чжен. – Москва: Мир, 1972. – 298 с.

5. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – Москва: Наука, 1974. – 712 с.

6. Козлова, А.С. Сравнение стационарного и нестационарного решений для задач обтекания эллиптических цилиндров в программе FLOW SIMULATION / А.С. Козлова // Сб. тр. XXI Всероссийского семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов: Часть II. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2019. – С. 46–49

7. Frolov, V.A. Reducing Drag of Cylinder by Positioning Flat Plate Back / V.A. Frolov, V.H. Le // 21 international conference on the methods of aerophysical research (ICMAR 2022), Novosibirsk, 8–14 Aug. 2022. – Novosibirsk, 2022. – Part. II. – P. 51–52.

8. Frolov, V.A. Reducing cylinder drag by adding a plate / V.A. Frolov, A.S. Kozlova // AIP Conference Proceeding, U.S.A (1893). – 2017. – 030074.