

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИГОДНОСТИ ППП NUMECA ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ВНЕШНЕГО ОБТЕКАНИЯ

**В.И. Мышенков, А.А. Малашин, Г.Д. Галахов,
А.Д. Орехов, А.С. Пименов, К.Н. Пронин**

МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская область, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

malashin_a@mail.ru

Проведено численное исследование поперечного обтекания круглого цилиндра дозвуковым потоком вязкого несжимаемого газа (воздуха) в рамках уравнений Навье — Стокса посредством пакета прикладных программ NUMECA при различных числах Рейнольдса Re_∞ . Данное исследование выполнялось с целью определения области применимости NUMECA для решения практических задач газодинамики. Поэтому расчеты задачи обтекания цилиндра потоком воздуха проводились при определяющих газодинамических параметрах, например, числах Re_∞ , равных определяющим параметрам классических экспериментов различных авторов, приведенных в монографии Шлихтинга. Результаты расчетов сравниваются с имеющимися экспериментальными данными по вихревой дорожке Кармана, по лобовому сопротивлению цилиндра, числам Струхала срыва вихрей за цилиндром. Проведенное сравнение результатов расчетов поперечного обтекания круглого цилиндра несжимаемой жидкостью с соответствующими экспериментальными данными показало хорошее их согласие в широком диапазоне чисел Рейнольдса и, следовательно, используемый в расчетах пакет прикладных программ NUMECA успешно можно применять для решения соответствующих задач.

Ключевые слова: обтекание, набегающий поток, давление, число Рейнольдса, дорожка Кармана, число Струхала, коэффициент сопротивления

Ссылка для цитирования: Мышенков В.И., Малашин А.А., Галахов Г.Д., Орехов А.Д., Пименов А.С., Пронин К.Н. Исследование пригодности ППП «NUMECA» для численного решения задач внешнего обтекания // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2018. Т. 22. № 6. С. 123–131. DOI: 10.18698/2542-1468-2018-6-123-131

К настоящему времени разработано множество пакетов прикладных программ (ППП) для решения различных научных и инженерно-технических задач в области вычислительной гидродинамики (CFD): NUMECA, ANSYS, COMSOL и другие, которые широко используются для решения практических и научных задач разной степени сложности. К сожалению, в описаниях этих ППП не указываются используемые конкретные разностные алгоритмы аппроксимации решаемых дифференциальных уравнений, а потому трудно определить достоверность получаемых решений без сопоставления их с соответствующими экспериментальными данными. Однако из-за сложности большинства рассматриваемых задач такие экспериментальные данные практически отсутствуют, поэтому достоверность получаемых решений приходится устанавливать какими-либо косвенными способами. Например, путем решения с помощью ППП задач, хорошо и подробно исследованных экспериментальными методами. И таким образом определять диапазоны применимости конкретного ППП.

В настоящей работе используется именно такой подход исследования обоснованности применения ППП NUMECA FINE/Open для решения задач течения вязкой несжимаемой жидкости (газа) при небольших числах Рейнольдса. С этой целью с помощью ППП NUMECA FINE/Open вы-

числяется задача поперечного обтекания круглого цилиндра несжимаемой жидкостью при малых числах Рейнольдса Re_∞ ($Re_\infty = \rho_\infty v_\infty d / \mu_\infty$, где ρ_∞ , v_∞ , μ_∞ — плотность, скорость, вязкость газа набегающего потока соответственно; d — диаметр обтекаемого цилиндра), для которой имеются обширные и подробные экспериментальные данные, приведенные в книге Шлихтинга [1] с соответствующими ссылками на первоисточники.

Подробные исследования поперечного обтекания кругового цилиндра маслом при малых числах Re_∞ провел Хоманн (Homann) [2]. Результаты экспериментов представлены в виде фотографий следа за цилиндром. При малых числах Re_∞ течение в следе является ламинарным, а с увеличением числа Re_∞ в следе возникает структура с правильно расположенными вихрями, которую называют обычно вихревой дорожкой Кармана. При больших числах Re_∞ течение в следе становится нерегулярным и турбулизируется.

Зависимость коэффициента сопротивления круглых цилиндров от числа Re_∞ подробно исследовал Вейсельсбергер (Wieselsberger) в работе [3] на цилиндрах разного диаметра. Он получил зависимость коэффициента сопротивления цилиндра $C_w = f(Re_\infty)$ в диапазоне чисел Re_∞ от 4 до $6 \cdot 10^5$.

Обтекание кругового цилиндра при докритическом и сверхкритическом числах Re_∞ исследовано в работе Флашбарта (Flachsbart) [4, 5].

Были получены соответствующие распределения давления по его поверхности, вызывающие резкое изменение коэффициента сопротивления цилиндра при изменении числа Re_∞ .

В работах [6–9] Карман (Karman) и Науманн (Naumann) подробно исследовали механизм образования сопротивления тела при его движении в воздухе.

Развитие турбулентного следа за цилиндром и вихревой дорожки Кармана исследовал Рошко (Roshko) [1, 10, 11]. Он получил экспериментальную зависимость числа Струхала (St) отрыва вихрей от числа Re_∞ (здесь $St = nd/v_\infty$, где n — частота отрыва вихрей за единицу времени; d — диаметр цилиндра; v_∞ — скорость набегающего потока).

В изданиях [12, 13] исследовалась динамика вихревой дорожки Кармана. А в публикации [14] проведены измерения частоты отрыва вихрей при обтекании цилиндра в зависимости от числа Рейнольдса.

Подробно и глубоко исследовалась теория вихревых дорожек Кармана в трудах [11, 15–23].

Цель работы

Цель настоящей статьи — получение решения задачи поперечного обтекания цилиндра вязкой несжимаемой жидкостью с образованием вихревой дорожки Кармана при небольших числах Re_∞ , определение зависимости частоты срыва вихрей (числа Струхала) от числа Рейнольдса, а также зависимости коэффициента сопротивления цилиндра C_w от числа Re_∞ , и сравнение их с имеющимися экспериментальными данными работ [2–16, 24, 25], приведенными в [1].

Постановка задачи

Рассматриваемая задача решается в плоскости сечения перпендикулярной оси цилиндра в прямоугольной области $ABCD$ (рис. 1), границы которой располагаются на достаточном расстоянии от поверхности цилиндра, чтобы возмущения, возникающие при обтекании цилиндра, не доходя

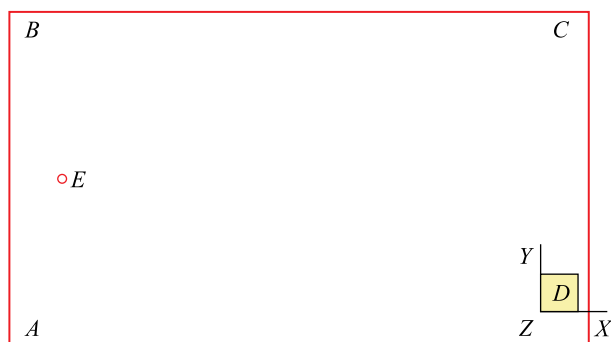


Рис. 1. Геометрия расчетной области
Fig. 1. The geometry of the model cutoff, the computational domain

до них затухали. Правая граница расчетной области удалена от поверхности цилиндра настолько, чтобы на полученной картине течения с вихревой дорожкой Кармана можно было явно наблюдать отрывы вихрей, их движение за телом, определять характер вихревой дорожки и устанавливать различные закономерности.

Размеры расчетной области и обтекаемого тела принимались равными: диаметр цилиндра $d = 0,002$ м, центр цилиндра находится в точке E (высота $0,038$ м, ширина $0,012$ м), при отсчете от нижней левой точки расчетного домена, длина расчетной области (расчетного домена) принималась равной $l = 0,132$ м, высота расчетного домена $h = 0,076$ м.

Параметры набегающего потока воздуха

Температура набегающего потока принималась равной $T_\infty = 293$ К, скорость набегающего невозмущенного потока $v_\infty = 100$ м/с, число Маха $M_\infty = 0,292$ (что соответствует, согласно классификации [1], течению несжимаемой жидкости, так как $M_\infty \leq 0,3$), динамическая вязкость $\mu_\infty = 1,71 \cdot 10^{-5}$ кг/м·с, плотность ρ_∞ определяется из формулы расчета числа Рейнольдса $Re_\infty = \rho_\infty v_\infty d / \mu_\infty$, а давление — из уравнения Менделеева — Клапейрона:

$$P = \frac{\rho}{M_r} RT,$$

где M_r — молярная масса воздуха, показатель адиабаты $\gamma = c_p/c_v = 1,4$ (c_p, c_v — теплоемкости газа при постоянном давлении и объеме соответственно).

Параметры разностной сетки задачи

С помощью пакета NUMECA HEXPRESS была получена структурированная сетка (рис. 2), пригодная для проведения численного расчета. Область решения покрывалась сеткой в соответствии

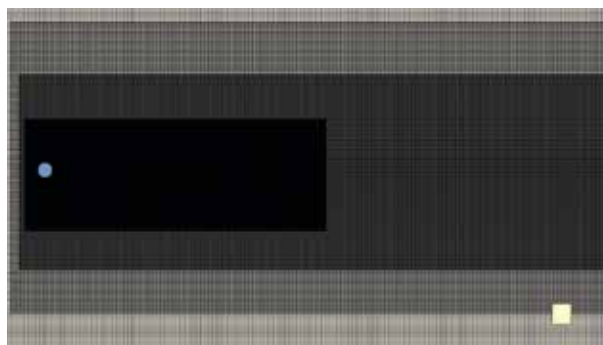


Рис. 2. Расчетная сетка
Fig. 2. Estimated task grid

Таблица значений давления и плотности для расчетных чисел Рейнольдса

Table of pressure and density values for the calculated Reynolds numbers

Re	ρ , кг / м ³	P , Па
32	0,002736	229,836899
45	0,0038475	323,208139
55	0,0047025	395,032170
65	0,0055575	466,856201
71	0,0060705	509,950619
102	0,008721	732,605115
165	0,0137655	1156,36690
225	0,0192375	1616,04069
281	0,0240255	2018,25527

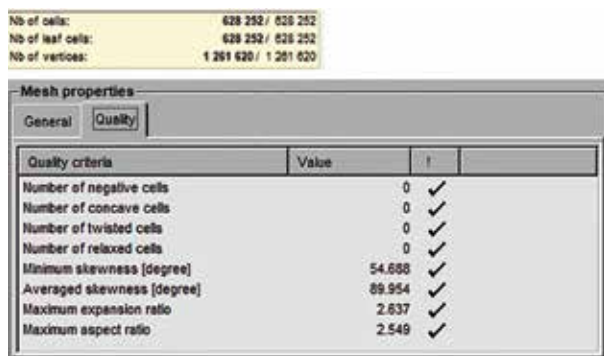


Рис. 3. Количество ячеек сетки и результаты анализа качества

Fig. 3. Number of cells in computational domain and results of quality analysis

с технологией NUMECA HEXPRESS Mesh Wizard, включающей шаги инициализации, адаптацию к геометрии, привязку ячеек, оптимизацию и выдавливание пограничного слоя. Также выполнено три уровня сгущения сетки с разрежением при отдалении от поверхности цилиндра к границам области решения. Сгущение находится в области образования пограничного слоя и в области течения с вихревой дорожкой.

Общее количество ячеек сетки равно 628 252 единицам (рис. 3). Анализ сетки показал отсутствие дефектных ячеек, содержащих отрицательную геометрию, погнутых или скрученных ячеек, или не привязанных к геометрии, т. е. показал пригодность созданной сетки к проведению расчетов.

Пограничный слой вблизи обтекаемого цилиндра создавался под $Re_{\infty} = 281$ и его структура использовалась в расчетах течений для остальных рассматриваемых чисел Рейнольдса. Коэффициент пристеночной функции Y^+ принимался равным 1,2 (коэффициент расширения пограничного слоя). Толщина первого слоя $7,9 \cdot 10^{-5}$ м, количество слоев — 5.

По результатам качественной оценки сетки (см. рис. 3) встроенным инструментом NUMECA HEXPRESS минимальная скошенность ячейки равна $54,688^{\circ}$. Если скошенность ячейки стремится к 90° , это означает, что она представляет собой правильный гексаэдр. Средняя по домену скошенность — $89,954^{\circ}$. Максимальный коэффициент растяжения ячеек от обтекаемого тела к границам домена — 2,637. Таким образом, рост ячеек от пограничного слоя и далее сбалансирован. Максимальное соотношение сторон для ячейки равно 2,549, эту цифру дает отношение длины ячейки первого слоя в пограничном слое к ее ширине.

Граничные условия в расчетной области задавались следующим образом: в терминологии NUMECA на левой границе домена — Inlet, на остальных — Outlet, на поверхности цилиндра — Solid Wall.

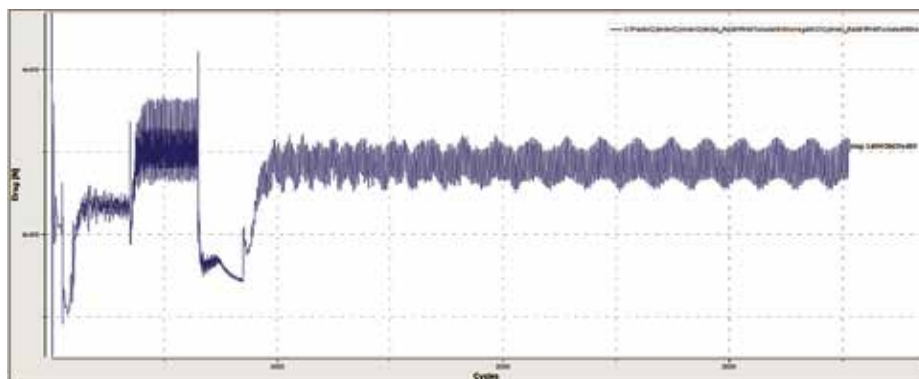
Указанные граничные условия соответствуют следующим физическим условиям: на входной границе AB и передней части граней BC и AD определялись параметры течения, равные параметрам набегающего потока, то есть задавался вектор $F = (\rho, u, v, T)^T$, где ρ — плотность, u, v — продольная и поперечная компоненты скорости, T — температура газа. А на остальной (большей) части граней BC и AD задавались условия мягкого сопряжения течения $\partial F / \partial y = 0$. На грани CD — условия мягкого сопряжения решения $\partial F / \partial x = 0$. На поверхности цилиндра — условия прилипания потока, т. е. равенство нулю вектора скорости и условие теплоизоляции стенки (поверхности цилиндра).

В качестве рабочей среды рассматривался воздух, который в обычных условиях принято считать газом, т. е. сжимаемой средой. Однако, как это установлено в газовой динамике [1], при числах Маха потока $M_{\infty} \leq 0,3$ его следует рассматривать как несжимаемую среду, пренебрегая возникающими малыми изменениями плотности под воздействием изменяющегося поля давления. Поэтому данная задача рассматривается как задача обтекания цилиндра несжимаемой жидкостью.

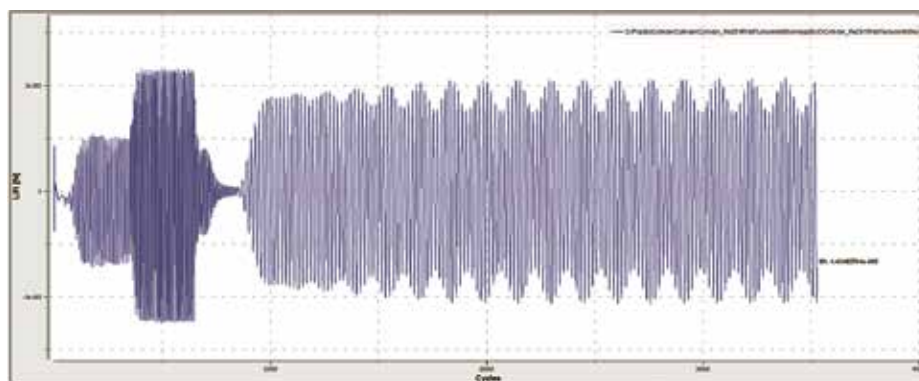
Задача решалась методом установления до получения поля потока с некоторой сформированной структурой течения в следе за телом. В качестве начальных данных задавались значения переменных, равные значениям параметров набегающего потока $F = (\rho, u, v, T)^T$.

Результаты исследований и сравнение с экспериментальными данными

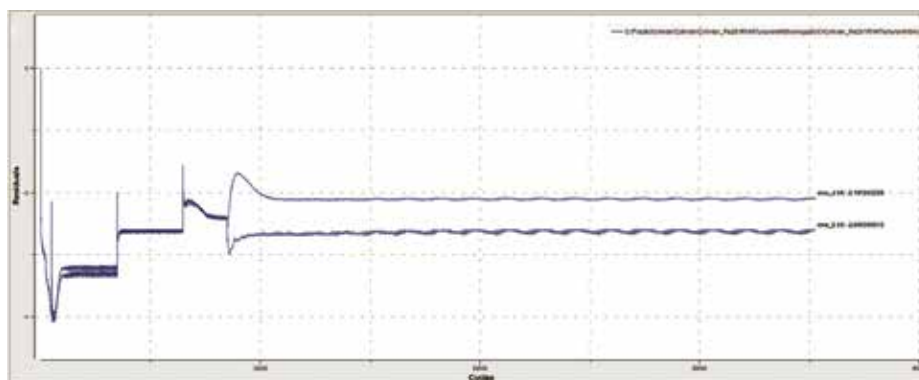
Согласно имеющимся экспериментальным данным [1], вихревая дорожка Кармана при дозвуковом обтекании кругового цилиндра несжимаемой жидкостью (газом) образуется при числах Рейнольдса Re_{∞} в диапазоне примерно от $Re_{\infty} = 60$ до $Re_{\infty} = 5000$. При $Re_{\infty} < 60$ течение в следе чисто



а



б



в

Рис. 4. Оценка сходимости решения: *а* — по лобовому сопротивлению; *б* — по подъемной силе; *в* — по невязкам для энергии и плотности
Fig. 4. An estimate of the convergence of the solution: *a* — by drag; *б* — by lift; *в* — by residuals for energy and density

ламинарное, а при $Re_{\infty} > 5000$ после цилиндра в следе происходит полное турбулентное перемешивание течения. Как показывают эксперименты Хоманна [2] при $Re_{\infty} < 150$ позади круглого цилиндра наблюдается ламинарная вихревая дорожка, а при $150 < Re_{\infty} < 300$ в вихревой дорожке при локальных числах Рейнольдса больше критического $Re_{крит}$ наблюдается переход от ламинарного в начале к переходному, а затем к турбулентному режиму течения. Именно эти два диапазона чисел Рейнольдса являются основным направлением исследования данной работы. Проблема заключается в том, что в данном случае для ряда

течений, характеризуемых числами Рейнольдса свыше 150, течение является смешанным, или ламинарным, и выбор решаемых систем уравнений не однозначен.

В настоящей работе расчеты обтекания цилиндра при $Re_{\infty} = \{32, 45, 55, 65, 71, 102\}$ проводились только для случая ламинарного течения, а расчеты при числах $Re_{\infty} = \{165, 225, 281\}$ выполнялись как для ламинарного, так и турбулентного режима, причем турбулентность учитывалась с помощью модели турбулентности $k-\omega$ (M-SST), выбранной на основе рекомендаций NUMECA для низкорейнольдсовых течений [26, 27].

Решение считалось установившемся после стабилизации периодов осцилляций лобового сопротивления (рис. 4, *a*), подъемной силы (рис. 4, *б*), а также невязок для энергии и плотности (рис. 4, *в*).

В данной работе для тестирования ППП NUMECA и сравнения результатов численных решений задачи с имеющимися экспериментальными данными проведены расчеты обтекания круглого цилиндра для чисел Рейнольдса в диапазоне от $Re_\infty = 32$ до $Re_\infty = 281$ с целью определения перехода режима течения от ламинарного к смешанному, получения вихревой дорожки Кармана в следе за цилиндром и, наконец, вычисление аэродинамических характеристик цилиндра при указанных числах Рейнольдса.

При решении задачи обтекания цилиндра для рассматриваемого диапазона чисел Re_∞ , вычислены его коэффициенты сопротивления:

$$C_w = W / (S_c \rho_\infty v_\infty^2 / 2),$$

где W — общая сила давления и трения, действующая на цилиндр; S_c — площадь поперечного сечения цилиндра единичной длины (за единичную длину принимается толщина одной ячейки расчетной сетки, равная 0,0001); $\rho_\infty v_\infty^2 / 2$ — скоростной напор набегающего потока.

Сопоставление результатов численного моделирования (рис. 5, синяя линия) с имеющимися экспериментальными данными Вейсельсбергера [1, 3] (рис. 5, оранжевая линия) показывает их полное совпадение при $Re_\infty \leq 170$, а при $Re_\infty = 281$ расхождение составляет менее 2,5 %.

Для подтверждения успешной верификации расчетных данных, получаемых при численном моделировании задач низкорейнольдсовых течений посредством ППП NUMECA, были посчитаны также числа Струхала $St = nd / v_\infty$ для рассматриваемого диапазона чисел Рейнольдса. Здесь n — частота срывов вихрей в секунду; d — диаметр цилиндра; v_∞ — скорость набегающего потока. Период снятия расчетных данных равен 0,01 секунды. Их сопоставление (рис. 6, синяя линия) с экспериментальными данными Рошко [1, 10], (рис. 6, оранжевая линия) также дает неплохое их согласие. Максимальное расхождение расчетных и экспериментальных данных по числу St составляет около 8 %.

Картины течения воздуха позади круглого цилиндра без образования и с образованием вихревой дорожки Кармана, полученные численно в настоящей работе для Re_∞ от 32 до 281 (рис. 7), при сравнении с экспериментальными данными Хоманна [1, 2] (рис. 8), полученными при тех же числах Рейнольдса, но для случая обтекания цилиндра маслом, визуально довольно схожи.

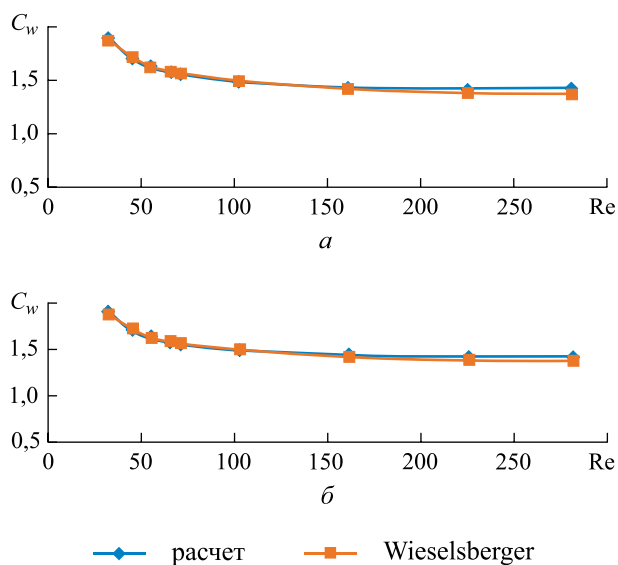


Рис. 5. Сравнение расчетных коэффициентов сопротивления цилиндра (синяя линия) с экспериментальными данными Вейсельсбергера (оранжевая линия): *a* — течение ламинарное для всех чисел Re_∞ ; *б* — течение переходное (ламинарно-турбулентное) для $Re_\infty > 150$

Fig. 5. Comparison of the calculated coefficients of resistance of the cylinder with the Wieselsberger's experimental data; *a* — laminar flow for all Re_∞ ; *б* — mixed (laminar-turbulent) flow for $Re_\infty > 150$

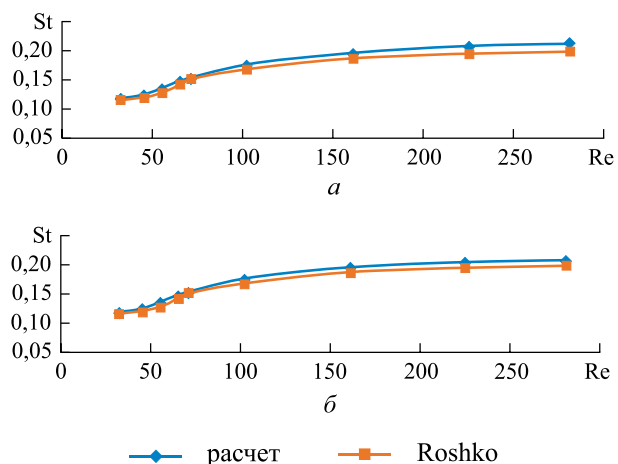


Рис. 6. Сравнение расчетных значений числа Струхала при обтекании цилиндра (синяя линия) с экспериментальными данными Рошко (оранжевая линия): *a* — течение ламинарное для всех чисел Re_∞ ; *б* — течение переходное (ламинарно-турбулентное) для $Re_\infty > 150$

Fig. 6. Comparison of the calculated values of the number of Strouhal for flow past a cylinder with the Roshko's experimental data; *a* — laminar flow for all Re_∞ ; *б* — mixed (laminar-turbulent) flow for $Re_\infty > 150$

Согласование расчетной и экспериментальной структур вихревых дорожек Кармана оказывается также хорошим, несмотря на существенное различие обтекающих цилиндров сред, что лишний раз подтверждает теорию подобия и размерности Рейнольдса.

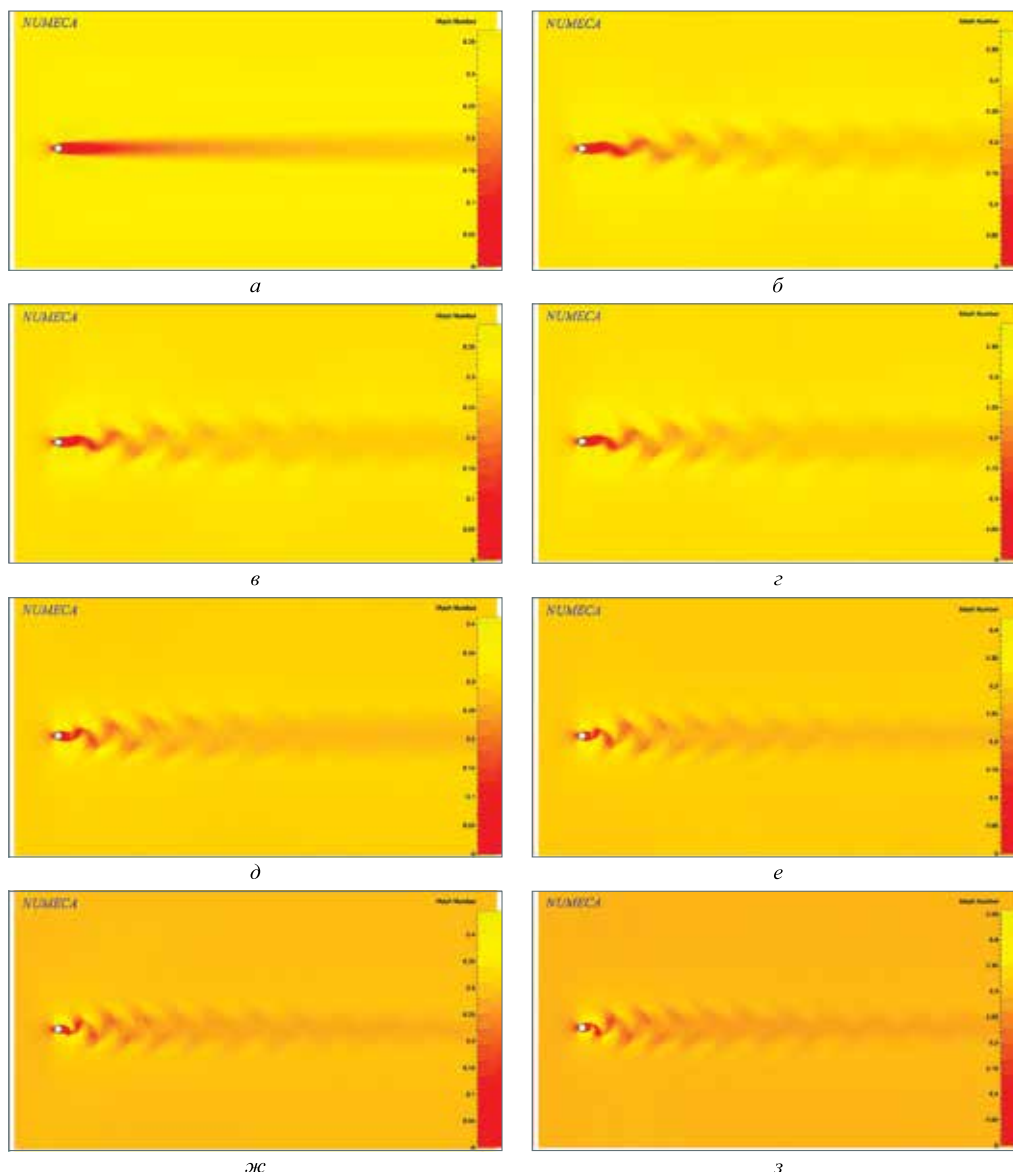


Рис. 7. Течение воздуха вокруг круглого цилиндра при различных числах Рейнольдса. Численный расчет: *a* — $Re = 32$; *б* — $Re = 55$; *в* — $Re = 65$; *г* — $Re = 71$; *д* — $Re = 102$; *е* — $Re = 161$; *ж* — $Re = 225$; *з* — $Re = 281$

Fig. 7. The air flow around a circular cylinder at a different Reynolds numbers. Numerical calculation: *a* — $Re = 32$; *б* — $Re = 55$; *в* — $Re = 65$; *г* — $Re = 71$; *д* — $Re = 102$; *е* — $Re = 161$; *ж* — $Re = 225$; *з* — $Re = 281$

Выводы

1. На основе уравнений Навье — Стокса с помощью ППП NUMECA проведено исследование обтекания круглого цилиндра несжимаемой жидкостью (газом) при ламинарном и турбулентном режимах течений (с использованием $k-\omega$ модели турбулентности). Расчеты проводились при малых числах Рейнольдса в диапазоне $32 \leq Re_{\infty} \leq 281$.

2. Получены распределения газодинамических параметров у поверхности тела и в следе за телом при рассмотренных числах Re_{∞} . Установлено, что при $Re_{\infty} = 32$ след является чисто ламинарным, а с увеличением числа Рейнольдса набегающего

потока при $Re_{\infty} \geq 55$ в следе образуется вихревая дорожка, состоящая из отдельных вихрей, что хорошо согласуется с экспериментальными данными Хоманна [1, 2].

3. Определенные в расчетах коэффициенты лобового сопротивления цилиндра C_w в зависимости от числа Рейнольдса Re_{∞} хорошо согласуются с экспериментальными данными Вейсельсбергера [1, 3].

4. Полученная расчетная зависимость числа Струхала St срывов вихрей за цилиндром от числа Рейнольдса также хорошо согласуются с соответствующей экспериментальной зависимостью Рошко [1, 10].

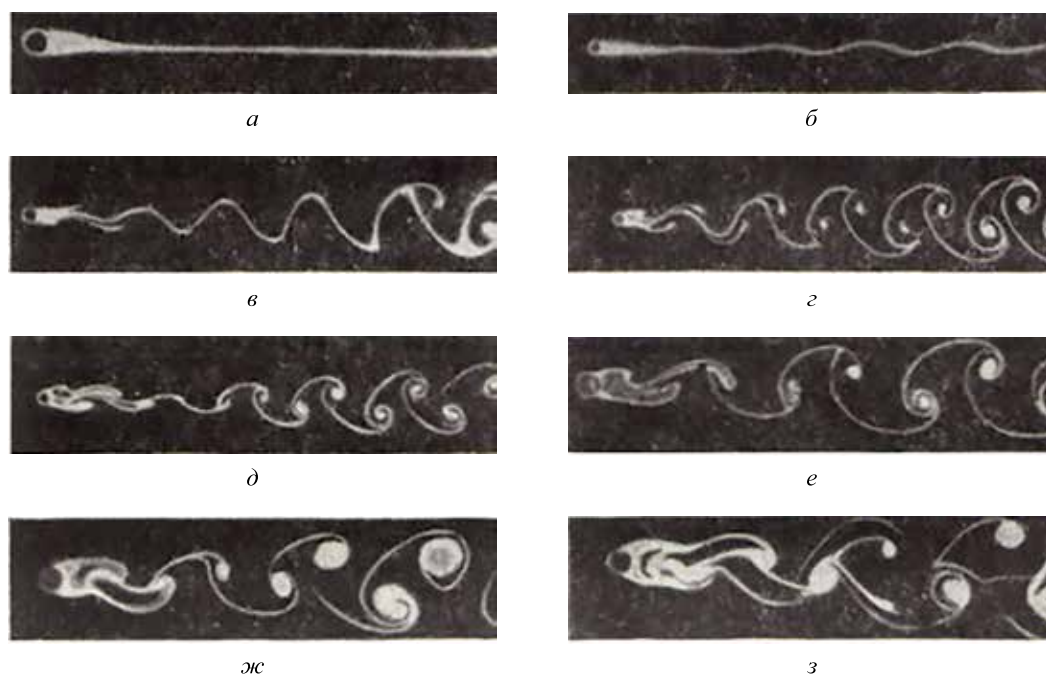


Рис. 8. Течение масла вокруг круглого цилиндра при различных числах Рейнольдса по Хоманну: *а* — $Re = 32$; *б* — $Re = 55$; *в* — $Re = 65$; *г* — $Re = 71$; *д* — $Re = 102$; *е* — $Re = 161$; *ж* — $Re = 225$; *з* — $Re = 281$

Fig. 8. The oil flow around a circular cylinder at a different Reynolds numbers. By Homann's data: *а* — $Re = 32$; *б* — $Re = 55$; *в* — $Re = 65$; *г* — $Re = 71$; *д* — $Re = 102$; *е* — $Re = 161$; *ж* — $Re = 225$; *з* — $Re = 281$

5. Учитывая изложенное выше по сопоставлению результатов численного моделирования задачи обтекания цилиндра вязкой несжимаемой жидкостью с образованием вихревой дорожки в следе за телом с экспериментальными данными, можно утверждать о пригодности ППП NUMECA для расчетов течений вязкой жидкости при малых числах Рейнольдса.

Список литературы

- [1] Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 712 с.
- [2] Homann F. Einfluss grosser Zähigkeit bei Stromung um Zylinder // *Forsch. Ing.-Wes.*, 1936, no. 7, pp. 1–10.
- [3] Wieselsberger C. Der Luftwiderstand von Kugeln // *ZFM*, 1914, no. 5, pp. 140–144.
- [4] Flachsbarth O. Neuere Untersuchungen über den Luftwiderstand von Kugeln // *Phys. Z.*, 1927, v. 28, pp. 461–469.
- [5] Flachsbarth O. Winddruck auf Gasbehälter // *Reports of the AVA in Göttingen*, 1932, v. IV, pp. 134–138.
- [6] Kármán Th. von. Über den Mechanismus des Widerstandes, den ein bewegter Körper in einer Flüssigkeit erzeugt / *Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, Math. Phys. Klasse*, 1911, pp. 509–517; 1912, pp. 547–556.
- [7] Kármán, Th. von, Rubach H. Über den Mechanismus des Flüssigkeits und Luftwiderstandes // *Phys. Z.*, 1912, v. 13, pp. 49–59.
- [8] Naumann A. Luftwiderstand von Kugeln bei hohen Unterschallgeschwindigkeiten. *Allgem. Wärmetechnik*, 1953, v. 4, pp. 217–221.
- [9] Naumann A., Pfeifer H. Über die Grenzschichtströmung am Zylinder bei hohen Geschwindigkeiten // *Advances in Aeronautical Sciences* (Ed. Th. v. Karman'a), 1962, v. 3, pp. 185–206.
- [10] Roshko A. On the development of turbulent wakes from vortex streets // *NACA Rep.*, 1954, p. 1191.
- [11] Strouhal V. Über eine besondere Art der Tonerregung // *Ann. Phys. und Chemie. Neue Folge*, 1878, v. 5, pp. 216–251.
- [12] *Proceedings of the First International Congress for Applied Mechanics* / ed. by B. Biezeno, J.M. Burgers. Delft, 1924, pp. 113.
- [13] Frimberger R. Experimentelle Untersuchungen an Karmanischen Wirbelstrassen // *ZFW*, 1957, v. 5, pp. 355–359.
- [14] Blenk H., Fuchs D., Liebers L. Über die Messung von Wirbelfrequenzen // *Luftfahrtforschung*, 1935, v. 12, pp. 38–41.
- [15] Domm U. Ein Beitrag zur Stabilitätstheorie der Wirbelstrassen unter Berücksichtigung endlicher und zeitlicher anwachsender Wirbelkerndurchmesser // *Ing.-Arch.*, 1954, v. 22, pp. 400–410.
- [16] Lin C.C. On periodically oscillating wakes in the Oseen approximation. *Mises Anniversary «Studies in Mathematics and Mechanics»*. New York: Academic Press, 1950, pp. 170–176.
- [17] Möller E. Luftwiderstandsmessungen am Volkswagen-Lieferwagen // *Automobil-technische Z.* 53, Nein., 1951, v. 6, pp. 1–4.
- [18] Prandtl L. Der Luftwiderstand von Kugeln // *Nachr. Ges. Wiss. Göttingen. Math. Phys. Klasse*, 1914, pp. 177–190.
- [19] Tietjens O. *Hydro- und Aeromechanik nach Vorlesungen von L. Prandtl. Band 1. Gleichgewicht und reibungslose Bewegung*. Berlin: Springer, 1929, 238 p.
- [20] Rubach H. Über die Entstehung und Fortbewegung des Wirbelpaares bei zylindrischen Körpern. *Diplomarbeit*, Göttingen 1914 // *VDI-Forschungsheft*, 1916, pp. 185.

- [21] Schlichting H. Aerodynamische Untersuchungen an Kraftfahrzeugen // *Berichtsband der Technischen Hochschule Braunschweig*, 1954, pp. 130–139.
- [22] Schrenk O. Versuche mit Absaugeflügeln // *Luftfahrtforschung*, 1935, v. XII, pp. 10–27.
- [23] Timme A. Über die Geschwindigkeitsverteilung in Wirbeln // *Ing.-Arch.*, 1957, v. 25, pp. 205–225.
- [24] Poiseuille J. Recherches experimentelles sur le mouvement des liquides dans les tubes de tres petits diameters // *Gomptes Rendus*, 1840, v. 11, pp. 961–967, 1041–1048; 1841, v. 12, pp. 112–115.
- [25] Blasius H. Grenzschichten in Flüssigkeiten mit kleiner Reibung. Diplomarbeit, Göttingen 1907 // *Z. Math. u. Phys.*, 1908, v. 56, pp. 1–37.
- [26] User Manual FINE™/Open v2.12 Documentation v2.12c. URL: https://sanet.st/blogs/downloaddownload/numeca_fine_opentm_v_windows_llinux_ssq.1217550.html (дата обращения 15.09.2018).
- [27] Theoretical Manual FINE™/Open v 2.12 (Including Open-Labs) Flow Integrated Environment.

Сведения об авторах

Мышенков Виталий Иванович — д-р физ.-мат. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), myshenkov.@mgul.ac.ru

Малашин Алексей Анатольевич — д-р физ.-мат. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), malashin_a@mail.ru

Галахов Георгий Дмитриевич — студент 4-го курса МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал)

Орехов Аркадий Дмитриевич — студент 3-го курса МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал)

Пименов Александр Сергеевич — студент 4-го курса МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал)

Пронин Кирилл Николаевич — студент 3-го курса МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал)

Поступила в редакцию 20.09.2018.

Принята к публикации 23.10.2018.

RESEARCH OF THE SUITABILITY OF THE NUMECA APP TO THE NUMEROUS SOLUTION OF EXTERNAL OBJECTION

V.I. Myshenkov, A.A. Malashin, G.D. Galakhov,
A.D. Orekhov, A.S. Pimenov, K.N. Pronin

BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

malashin_a@mail.ru

A numerical investigation of the transverse flow of a viscous incompressible gas (air) by a subsonic flow of viscous incompressible gas (air) is carried out within the framework of the Navier — Stokes equations by means of the Numeca software package for various Reynolds numbers Re_∞ . This study was carried out with the purpose of determining the range of applicability of the said RFP for solving practical problems of gas dynamics. Therefore, calculations of the problem of flow past a cylinder by a stream of air were carried out at determining gas dynamic parameters, for example, the numbers Re_∞ , which are equal to the defining parameters of the classical experiments of various authors [2–25], given in Schlichting's monograph [1]. The results of the calculations are compared with the available experimental data on the Karman vortex path, the drag of the cylinder, the Strouhal numbers of vortex stripping behind the cylinder. The comparison of the results of calculations of the transverse flow past a circular cylinder by an incompressible fluid with the corresponding experimental data [1–25] showed good agreement between them in a wide range of Reynolds numbers and, consequently, the «Numeca» package used in calculations can be successfully applied to solve corresponding problems.

Keywords: flow, incoming flow, pressure, Reynolds number, Karman vortex street., Strouhal number, resistance coefficient

Suggested citation: Myshenkov V.I., Malashin A.A., Galakhov G.D., Orekhov A.D., Pimenov A.S., Pronin K.N. *Issledovanie prigodnosti PPP «NUMECA» dlya chislenogo resheniya zadach vneshnego obtekaniya* [Research of the suitability of the NUMECA APP to the numerous solution of external objection]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2018, vol. 22, no. 6, pp. 123–131. DOI: 10.18698/2542-1468-2018-6-123-131

References

- [1] Shlikhting G. *Teoriya pogranichnogo sloya* [The theory of the boundary layer]. Moscow: Nauka [Science], 1974, 712 p.
- [2] Homann F. Einfluss grosser Zahigkeit bei Stromung um Zylinder. *Forsch. Ing.-Wes.*, 1936, no. 7, pp. 1–10.
- [3] Wieselsberger C. Der Luftwiderstand von Kugeln. *ZFM*, 1914, no. 5, pp. 140–144.
- [4] Flachsbarth O. Neuere Untersuchungen über den Luftwiderstand von Kugeln. *Phys. Z.*, 1927, v. 28, pp. 461–469.

- [5] Flachsbart O. Winddruck auf Gasbehälter. Reports of the AVA in Göttingen, 1932, v. IV, pp. 134–138.
- [6] Kármán, Th. von. Über den Mechanismus des Widerstandes, den ein bewegter Körper in einer Flüssigkeit erzeugt. Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, Math. Phys. Klasse, 1911, pp. 509–517; 1912, pp. 547–556.
- [7] Kármán, Th. von, Rubach H. Über den Mechanismus des Flüssigkeits und Luftwiderstandes. Phys. Z., 1912, v. 13, pp. 49–59.
- [8] Naumann A. Luftwiderstand von Kugeln bei hohen Unterschallgeschwindigkeiten. Allgem. Wärmetechnik, 1953, v. 4, pp. 217–221.
- [9] Naumann A., Pfeifer H. Über die Grenzschichtströmung am Zylinder bei hohen Geschwindigkeiten. Advances in Aeronautical Sciences (Ed. Th. v. Karman'a), 1962, t. 3, pp. 185–206.
- [10] Roshko A. On the development of turbulent wakes from vortex streets. NACA Rep., 1954, p. 1191.
- [11] Strouhal V. Über eine besondere Art der Tonerregung. Ann. Phys. und Chemie. Neue Folge, 1878, v. 5, pp. 216–251.
- [12] Proceedings of the First International Congress for Applied Mechanics, ed. by B. Biezeno and J. M. Burgers, Delft, 1924, pp. 113.
- [13] Frimberger R. Experimentelle Untersuchungen an Karmanschen Wirbelstrassen. ZFW, 1957, v. 5, pp. 355–359.
- [14] Blenk H., Fuchs D., Liebers L. Über die Messung von Wirbelfrequenzen. Luftfahrtforschung, 1935, v. 12, pp. 38–41.
- [15] Domm U. Ein Beitrag zur Stabilitätstheorie der Wirbelstrassen unter Berücksichtigung endlicher und zeitlicher anwachsender Wirbelkerndurchmesser. Ing.-Arch., 1954, v. 22, pp. 400–410.
- [16] Lin C.C. On periodically oscillating wakes in the Oseen approximation. Mises Anniversary «Studies in Mathematics and Mechanics». New York: Academic Press, 1950, pp. 170–176.
- [17] Möller E. Luftwiderstandsmessungen am Volkswagen-Lieferwagen. Automobil- technische Z. 53, Nein., 1951, v. 6, pp. 1–4.
- [18] Prandtl L. Der Luftwiderstand von Kugeln. Nachr. Ges. Wiss. Göttingen. Math. Phys. Klasse, 1914, pp. 177–190.
- [19] Tietjens O. Hydro- und Aeromechanik nach Vorlesungen von L. Prandtl. Band 1. Gleichgewicht und reibungslose Bewegung. Berlin: Springer, 1929, 238 p.
- [20] Rubach H. Über die Entstehung und Fortbewegung des Wirbelpaares bei zylindrischen Körpern. Diplomarbeit, Göttingen 1914. VDI-Forschungsheft, 1916, pp. 185.
- [21] Schlichting H. Aerodynamische Untersuchungen an Kraftfahrzeugen. Berichtsband der Technischen Hochschule Braunschweig, 1954, pp. 130–139.
- [22] Schrenk O. Versuche mit Absaugeflügeln. Luftfahrtforschung, 1935, v. XII, pp. 10–27.
- [23] Timme A. Über die Geschwindigkeitsverteilung in Wirbeln. Ing.-Arch., 1957, v. 25, pp. 205–225.
- [24] Poiseuille J. Recherches experimentelles sur le mouvement des liquides dans les tubes de tres petits diameters. Comptes Rendus, 1840, v. 11, pp. 961–967, 1041–1048; 1841, v. 12, pp. 112–115.
- [25] Blasius H. Grenzschichten in Flüssigkeiten mit kleiner Reibung. Diplomarbeit, Göttingen 1907. Z. Math. u. Phys., 1908, v. 56, pp. 1–37.
- [26] User Manual FINE™/Open v2.12 Documentation v2.12c. URL: https://sanet.st/blogs/downloaddownload/numeca_fine_opentm_v_windows_linux_ssq.1217550.html
- [27] Theoretical Manual FINE™/Open v 2.12 (Including OpenLabs) Flow Integrated Environment.

Authors' information

Myshenkov Vitaly Ivanovich — Dr. Sci. (Phis.-math.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), myshenkov.@mgul.ac.ru

Malashin Alexey Anatolyevich — Dr. Sci. (Phis.-math.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), malashin_a@mail.ru

Galakhov George Dmitrievich — student of the BMSTU (Mytishchi branch)

Orekhov Arkady Dmitrievich — student of the BMSTU (Mytishchi branch)

Pimenov Alexander Sergeevich — student of the BMSTU (Mytishchi branch)

Pronin Kirill Nikolaevich — student of the BMSTU (Mytishchi branch)

Received 20.09.2018.

Accepted for publication 23.10.2018.