

Волгоградский государственный университет
Институт математики и информационных технологий
Кафедра информационных систем и компьютерного моделирования

Работа допущена к защите

Заведующий кафедрой ИСКМ

_____ А. В. Хоперсков

«_____» _____ 2025 г.

Щетина Сергей Александрович

**Программный комплекс для моделирования
аэродинамических течений**

Выпускная квалификационная работа

по направлению

09.03.04 Программная инженерия

Студент

С. А. Щетина

(подпись)

Руководитель выпускной
квалификационной работы

С. С. Храпов
к.ф.-м.н., доцент каф. ИСКМ

(подпись)

Рецензент

М. А. Еремин
к.ф.-м.н., доцент каф. ТФВП

Волгоград 2025

Содержание

Список иллюстративного материала	3
Список таблиц	4
Введение	5
Глава 1. Теоретические основы моделирования аэродинамиче- ских течений	7
1.1 Основные понятия ламинарных и турбулентных течений	7
1.2 Число Рейнольдса как характеристика отношения инерцион- ных и вязких сил	9
1.3 Основные законы аэродинамики и их применение	9
1.3.1 Закон сохранения массы — уравнение неразрывности . .	9
1.3.2 Закон сохранения энергии — уравнение Бернулли	11

Список иллюстративного материала

- 1.1 Ламинарный (а) и турбулентный (б) потоки. В ламинарном потоке (а) слои жидкости или газа движутся без перемешивания и пульсаций. В турбулентном потоке (б) слои хаотично перемешиваются друг с другом 8

Список таблиц

- 1.1 Пример файла с результатами вычислений, полученного из вычислительного модуля (значения выбраны случайным образом) 11

Введение

В процессе проектирования программного комплекса была сделана ставка на создание инструмента, который отличается простотой использования, узкой специализацией и модульной архитектурой. Существующие программные решения для моделирования аэродинамических течений, такие как «COMSOL Multiphysics», «ANSYS Fluent», «OpenFOAM» и другие, представляют собой мощные универсальные платформы, способные решать широкий спектр задач. Однако такие системы зачастую требуют глубоких знаний в области численных методов и программирования, высоких вычислительных мощностей и сложного процесса настройки, включающего десятки параметров, которые необходимо задавать вручную. Проектируемое приложение отличается от существующих решений следующими ключевыми особенностями.

1. Возможность интеграции с разными вычислительными модулями, у которых отсутствует удобный пользовательский интерфейс.
2. Простота использования. Программный комплекс разрабатывается с учетом пользователей, которые не являются экспертами в программировании или численных методах. Интерфейс интуитивно понятен, а процесс ввода данных сведен к минимально необходимым параметрам.
3. Узкая специализация. Комплекс ориентирован исключительно на моделирование аэродинамических течений для ограниченного числа типовых задач (например, обтекание профиля крыла или трубы). Это позволяет сосредоточиться на предоставлении качественного функционала именно для данных сценариев, не перегружая систему лишними возможностями.
4. Модульная архитектура. Программа разделена на три независимых модуля (ввод данных, вычисления и визуализация), что позволяет легко обновлять или изменять отдельные части комплекса. Пользователь может использовать каждый модуль по отдельности или в рамках общего рабочего

процесса.

Глава 1

Теоретические основы моделирования аэродинамических течений

1.1 Основные понятия ламинарных и турбулентных течений

Ламинарное течение является наиболее простым и понятным для человека. Ламинарное течение — это течение жидкости или газа, при котором вещество перемещается «слоями», которые не перемешиваются друг с другом и движутся параллельно основному потоку. Данный вид течения наблюдается либо в очень вязких жидкостях, либо в очень медленных течениях, либо в очень узких трубках, таких как, например, капилляры в теле человека [lam_flow].

Турбулентное течение является намного более сложным и труднообъяснимым явлением, но оно встречается намного чаще в природе. Движение называют турбулентным, если его характеристики (скорость, давление и т.д.) хаотично изменяются и пульсируют в пространстве и во времени. На рисунке 1.1 схематично изображено отличие ламинарного и турбулентного течения. Явление турбулентности до сих пор полностью не изучено, но известно, что одной из причин появления турбулентности является неустойчивость течения.

Часто турбулентность определяют как совокупность разномасштабных вихрей. Максимальный размер вихрей близок к характерному линейному масштабу задачи L , например, длине хорды профиля крыла или диаметру трубы. Минимальный размер вихрей характеризуется так называемым колмогоровским масштабом $\eta_k = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{4}}$, где ε — диссипация энергии, а ν — кинематиче-

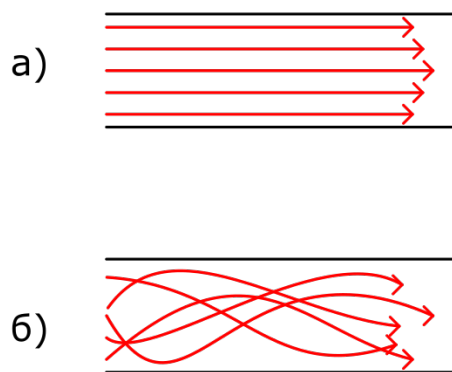


Рисунок 1.1 — Ламинарный (а) и турбулентный (б) потоки. В ламинарном потоке (а) слои жидкости или газа движутся без перемешивания и пульсаций. В турбулентном потоке (б) слои хаотично перемешиваются друг с другом

ская вязкость. Масштаб η_k характеризует линейные размеры структур, на которые вязкость еще оказывает существенное влияние. Такие вихри рассеиваются в тепло. Основная часть энергии переносится с помощью вихрей среднего размера.

Турбулентным течениям присущи признаки **[turb_reasons]**:

- нерегулярность — течение нерегулярно, случайно и хаотично;
- диффузионность — в турбулентном течении диффузия выше чем в ламинарном;
- высокое число Рейнольдса;
- трехмерность — турбулентность всегда трехмерная;
- диссипативность — энергия наиболее мелких вихрей рассеивается в тепло.

1.2 Число Рейнольдса как характеристика отношения инерционных и вязких сил

Число Рейнольдса (Re) — безразмерная величина, которая является соотношением сил инерции, дестабилизирующих течение, и сил вязкости, стабилизирующих течение. Вычисляется по формуле

$$Re = \frac{v d}{\nu} = \frac{\rho v d}{\mu}, \quad (1.1)$$

где v — скорость потока, d — характерный размер (например, диаметр трубы или длина хорды крыла), μ — динамическая вязкость среды, $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ — кинематическая вязкость среды.

Число Рейнольдса характеризует режим течения жидкостей и газов. При малых числах Рейнольдса большее влияние на поток оказывают вязкостные силы, а при больших — инерционные. Существует, так называемое, критическое значение Re_{cr} , при превышении которого ламинарный поток теряет свою устойчивость и становится турбулентным. Критическое число Рейнольдса устанавливается опытным путем для различных течений. Например, при течении в круглых трубах критическое значение $Re_{cr} \approx 2300$, а при обтекании профилей крыльев $Re_{cr} \sim 10^6$ [re_crit]. Если Re меньше значения Re_{cr} , то сопротивление крыла велико, а подъемная сила мала; если выше, то сопротивление в несколько раз падает, а подъемная сила в несколько раз возрастает [re_crit_gadetskiy].

1.3 Основные законы аэродинамики и их применение

1.3.1 Закон сохранения массы — уравнение неразрывности

Уравнение неразрывности является математическим описанием закона сохранения массы для потока идеального сжимаемого газа. Рассмотрим элементарную струйку воздуха. Поскольку поверхность трубки тока непроница-

ема для частиц воздуха, то при установившемся течении через каждое поперечное сечение элементарной струйки в единицу времени будет протекать одна и та же масса воздуха. За одну секунду через сечение струйки F_1 пройдет воздух объемом $m_1 = \rho_1 v_1 F_1$, где ρ — плотность воздуха, F_1 — площадь поперечного сечения трубки на входе, v_1 — скорость потока газа на входе в сечение. Если принять, что трубка тока не имеет разрывов, через которые может поступать или уходить воздух, то через сечение струйки F_2 за секунду должна выйти масса воздуха $m_2 = \rho_2 v_2 F_2$, равная массе m_1 , вошедшей в трубку [uravnenie-nerazryvnosti]. Таким образом, секундный массовый перенос воздуха или другого газа через любое сечение струи есть величина постоянная, рассчитываемая по формуле:

$$\rho v F = \text{const.} \quad (1.2)$$

Уравнение (1.2) называется уравнением неразрывности. При маленьких скоростях ($M < 0.3$) воздух почти не сжимается, поэтому плотность воздуха ρ можно считать постоянной. В этом случае уравнение (1.2) примет следующий вид:

$$v F = \text{const.} \quad (1.3)$$

Из уравнения (1.3) можно сделать вывод, что при уменьшении площади поперечного сечения струйки скорость течения воздуха в ней возрастает, а при увеличении — падает. Но это справедливо только для скоростей течения, меньших скорости звука ($M < 1$). При $M > 1$ все происходит наоборот, так как важную роль играет сжимаемость воздуха. При уменьшении площади поперечного сечения плотность воздуха увеличивается настолько, что множитель ρF уравнения (1.2) тоже увеличивается, что приводит к уменьшению скорости потока v . Поэтому для сверхзвуковых потоков для увеличения скорости v необходимо увеличивать площадь сечения F .

1.3.2 Закон сохранения энергии — уравнение Бернулли

Важное место в аэродинамике занимает закон Бернулли, который связывает давление и скорость воздуха в струе.

Уравнение Бернулли является математическим описанием закона сохранения энергии для струйки идеального несжимаемого газа. Закон сохранения энергии описывается формулой

$$E_1 + E_2 + \dots = \text{const.} \quad (1.4)$$

Учитывая только кинетическую энергию и энергию силы давления в струе, уравнение (1.4) можно записать в виде

$$E = E_k + E_p, \quad (1.5)$$

где E — полная энергия в сечении струи, E_k — кинетическая энергия движущегося газа, E_p — энергия силы давления газа.

Кинетическая энергия характеризует способность движущегося газа производить работу и рассчитывается по формуле

$$E_k = \frac{m v^2}{2}. \quad (1.6)$$

Таблица 1.1 — Пример файла с результатами вычислений, полученного из вычислительного модуля (значения выбраны случайным образом)

x	y	U (скорость)	u (пр. U на ось x)	v (пр. U на ось y)	p (давление)
0	0	50	10	15	15
0	1	49	11	15	14
1	0	51	12	10	13

Книги: [pres], [en_book].

Онлайн-источники: [aero], [bernuli_and_newton].

Гиперссылки ¹

¹ <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=n0012-il>