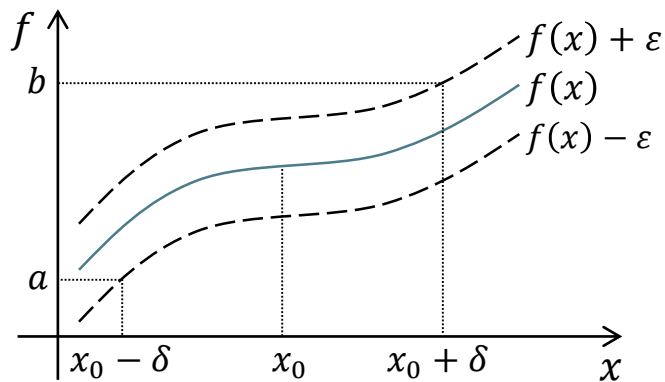


Модуль 1. Введение



Урок 3.2 Надежность метода CFD

Надежность результатов CFD

- Исследование сходимости
- Верификация
- Валидация

ГОСТ Р 57188-2016

«Численное моделирование физических процессов. Термины и определения»

Верификация – подтверждение корректности решения уравнений

Валидация – подтверждение адекватности моделируемому объекту

Верификация ПК CFD

Проверка ПК на соответствие требованиям, предъявляемым к ПК на этапе разработки

- Сравнение результатов расчета согласованных тестовых задач с аналитическими решениями и/или с экспериментальными данными
- Исследование сходимости

Валидация ПК CFD

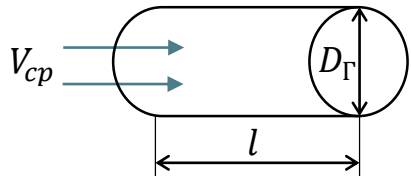
Проверка применимости ПК для решения других задач, соответствующих требованиям к функциональности ПК

- Сравнение результатов расчета с имеющимися надежными экспериментальными данными

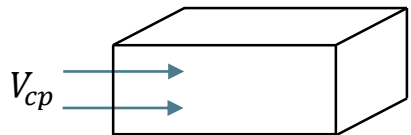
Расчет течения в трубе

ПК для расчетов сопротивления труб

- Верификация (круглое сечение)


$$\Delta P_{\text{выч}}(V_{cp}) = \frac{32\eta l V_{cp}}{D_{\Gamma}^2} \quad (?)$$

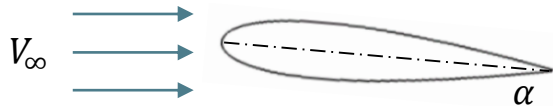
- Валидация (квадратное сечение)


$$\Delta P_{\text{выч}}(V_{cp}) = \Delta P_{\text{эксп}}(V_{cp}) \quad (?)$$

Расчет обтекания крыла

ПК для расчета крыловых профилей

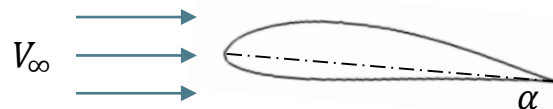
- Верификация (симметричный профиль)



The diagram shows a symmetric airfoil profile in a flow field. Three horizontal arrows on the left represent the free-stream velocity V_∞ . The airfoil is shown with its upper and lower surfaces, and a dashed line indicates the chord line. The angle of attack α is indicated at the trailing edge. To the right of the airfoil, the equation $C_{y, \text{выч}}(V_\infty, \alpha) = C_{y, \text{эксп}} (?)$ is written.

$$C_{y, \text{выч}}(V_\infty, \alpha) = C_{y, \text{эксп}} (?)$$

- Валидация (несимметричный профиль)



The diagram shows an asymmetric airfoil profile in a flow field. Three horizontal arrows on the left represent the free-stream velocity V_∞ . The airfoil is shown with its upper and lower surfaces, and a dashed line indicates the chord line. The angle of attack α is indicated at the trailing edge. To the right of the airfoil, the equation $C_{y, \text{выч}}(V_\infty, \alpha) = C_{y, \text{эксп}} (?)$ is written.

$$C_{y, \text{выч}}(V_\infty, \alpha) = C_{y, \text{эксп}} (?)$$

Погрешность метода CFD

Результатом верификационного и
валидационного анализа является
оценка точности метода CFD

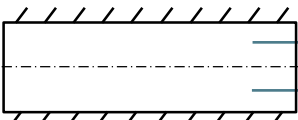
Погрешность

Отклонение вычисленного или измеренного значения величины от её действительного значения

- Неустраняемая
- Вычислительная
- Ошибки округления

Неустраняемая погрешность

Погрешность определения входных данных и результатов эксперимента

$$\Delta P = ? \quad \text{---} \quad V_{cp} = \frac{Q}{S}$$




манометр
($\varepsilon_{изм} \sim \pm 0.5 - 4 \%$)



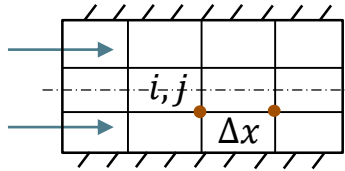
электромагнитный
расходомер ($\varepsilon_{изм} \sim \pm 0.5 - 3 \%$)

+ $\eta_{(эксп)}$ до 10 %

Погрешность эксперимента: $\varepsilon_{эксп}$ до $\pm 7 \%$

Вычислительная погрешность

Погрешность численного метода
решения уравнений модели


$$\boxed{\frac{\partial p}{\partial x}} = \eta \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2}, \quad -\frac{\partial p}{\partial y} = 0$$

Ряд Тейлора: $P_{i+1} = P_i + \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_i \Delta x + \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}\right)_i \frac{\Delta x^2}{2} + \dots$

↓

$$\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_i = \frac{P_{i+1} - P_i}{\Delta x} + \boxed{\left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}\right)_i \frac{\Delta x}{2} + \dots}$$
$$\varepsilon_{\text{выч}} \sim O(\Delta x)$$
$$\boxed{\Delta x \downarrow \Rightarrow \varepsilon_{\text{выч}} \downarrow}$$

Ошибки округления

Погрешности машинного округления при выполнении арифметических операций

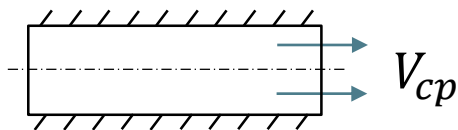
$$\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_i = \frac{P_{i+1} - P_i}{\Delta x} = \frac{9.222222 - 7.111111}{2.000000} = 1.055555\text{X}$$

одинарная точность $\varepsilon_{\text{окр}} = 5e - 7$

- Метод устойчив: $\varepsilon_{\text{окр}} \ll \varepsilon_{\text{выч}}$
- Метод неустойчив: $\varepsilon_{\text{окр}} \uparrow\uparrow$

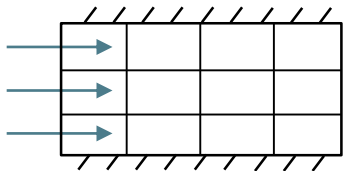
Верификация расчета трубы

Эксперимент



$$\Delta P(V_{cp}) = \Delta P_{\text{ЭКСП}} \pm \varepsilon_{\text{ЭКСП}} = \Delta P_{\text{ЭКСП}} \pm \boxed{7\%}$$

Расчет



$$\Delta P(V_{cp}) = \Delta P_{\text{ВЫЧ}} \pm \boxed{\varepsilon_{\text{ВЫЧ}} \leq 7\%}$$



«Точность, достаточная для инженерных расчетов»

На уроке мы узнали

Точность численного метода
необходимую при проведении
обязательных этапов подтверждения
надежности ПК (верификационного и
валидационного анализа) следует
определять с учетом величин
неустраняемых погрешностей входных
данных и результатов эксперимента

На следующем уроке

Этапы решения задач CFD.

Анализ постановки задачи