КУРС • 10 ЛЕКЦИЙ

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

ЛЕКЦИЯ 05

Моделирование гидромеханических процессов



ГАЗОВЫЙ ПОТОК

Гидродинамика • аэродинамические силы • движение частиц

Что изучает гидромеханика?

Гидромеханические процессы определяются движением жидкостей, газов и включённых в поток частиц.

1 ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ

Перемещение жидкостей и газов

2 ОСАЖДЕНИЕ

Разделение под действием силы тяжести

3 ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЕ

Разделение в поле центробежных сил

4 ФИЛЬТРОВАНИЕ

Течение через пористый слой под перепадом давления

ЦЕНТРАЛЬНАЯ ЗАДАЧА

Определить поля скорости, давления и траектории частиц — затем выбрать эффективные параметры аппарата.

ПОТОК → СИЛЫ → РАЗДЕЛЕНИЕ

Примеры из материала: осевой газовый поток, кольцевой зазор мельницы и закрученный поток циклона.

Уравнения, лежащие в основе модели

Вводные соотношения гидромеханики связывают сохранение массы, импульса и энергии.

01 **НЕРАЗРЫВНОСТЬ**

Сохранение массы движущегося потока

$$\partial \rho / \partial t + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

02 **НАВЬЕ–СТОКС**

Баланс импульса с действием давления и сил

$$\rho \, D\mathbf{u}/Dt = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho \mathbf{g}$$

03 **ЭНЕРГИЯ**

Упрощённая форма уравнения для теплопереноса

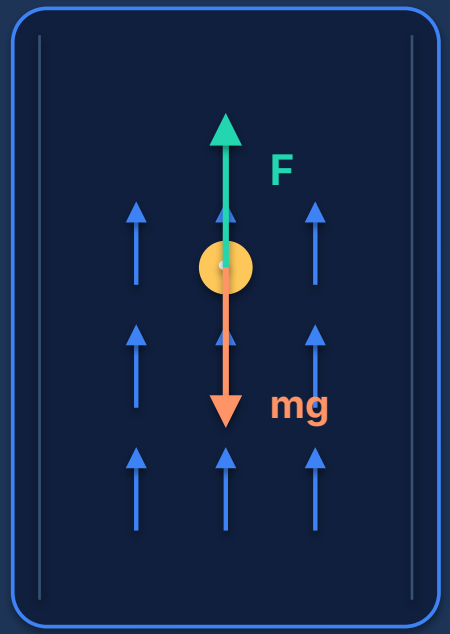
$$\rho \, c_p \, DT/Dt = \nabla \cdot (k \nabla T) + S$$

Обозначения: ρ — плотность; u — скорость; p — давление; τ — вязкие напряжения; T — температура.

Движение частицы в восходящем газе

В одномерной модели учитывают преимущественно тяжесть и аэродинамическое воздействие потока.

СХЕМА СИЛ



W ↑ — скорость газа

ОДНОМЕРНАЯ МОДЕЛЬ

$$m \cdot du_y/dt = F - mg$$

$$F = \tfrac{1}{2}\, c\, \rho\, S\, v_{otn}^{2}$$

$v_{отн} = W - u_y$ · S — площадь сечения частицы

F направлена по относительному движению газа.

ПРИКЛАДНОЙ ПРИМЕР

Частица в кольцевом зазоре мельницы

При расчёте учитывают скорость и угол отрыва частицы с вращающейся размольной тарелки.

РАСЧЁТНАЯ СХЕМА

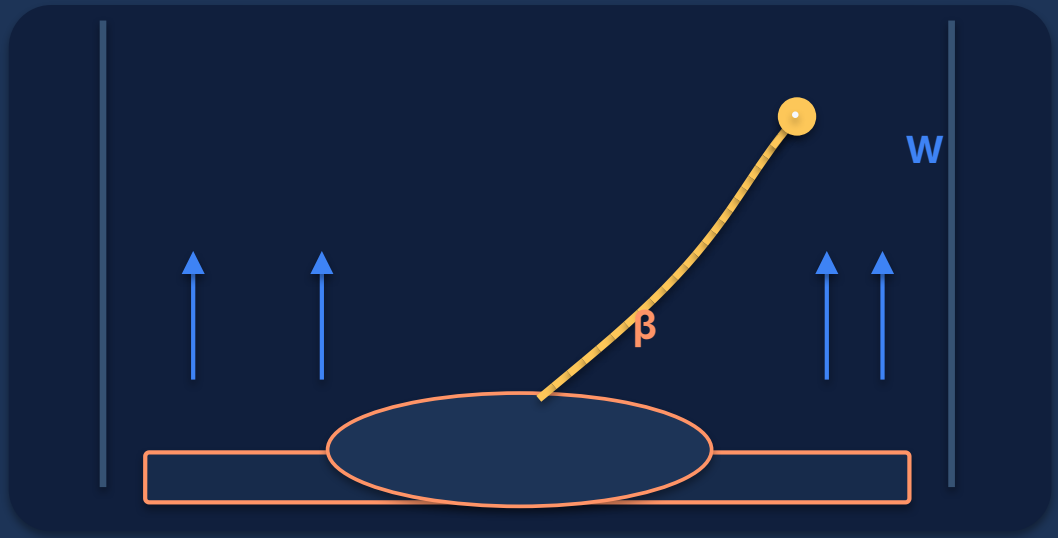


Схема качественная — не расчётная траектория

УСЛОВИЯ МОДЕЛИ

НАЧАЛО	скорость после схода с тарелки
УГОЛ	угол отрыва β
СИЛЫ	сила тяжести, сопротивление, инерция
РЕЗУЛЬТАТ	траектория и U_x, U_y

Сопротивление, Re и сила инерции

В лекции использованы коэффициент формы k и эмпирическая формула Клячко для c(Re).

АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

$$F = k\, c\, \pi d^2 \rho\, (W - U_y)^2 / 8$$

$$Re = d\, |W - U_y| / \nu$$

k — коэффициент формы; d — диаметр; ν — кинематическая вязкость газа.

Эмпирическая корреляция применяется в области её допустимости.

КОЭФФИЦИЕНТ КЛЯЧКО И ИНЕРЦИЯ

$$c = 24/Re + 4/Re^{1/3}$$

$$F_и = m \cdot v_\tau^2 / R$$

R — текущий радиус; vτ — тангенциальная скорость после схода с тарелки.

От уравнений к траектории частицы

Система дифференциальных уравнений решается с заданными начальными условиями.

01

ГЕОМЕТРИЯ

d, R, зазор

→

02

РЕЖИМ ПОТОКА

W, ρ, ν, vτ

→

03

СИЛЫ

F, Fи, G

→

04

ИНТЕГРИРОВАНИЕ

$U_x(t)$, $U_y(t)$

ВЫХОДНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

$$U = \sqrt{(U_x^2 + U_y^2)}$$

По скоростям и координатам определяют характер переноса и возможный контакт со стенкой.

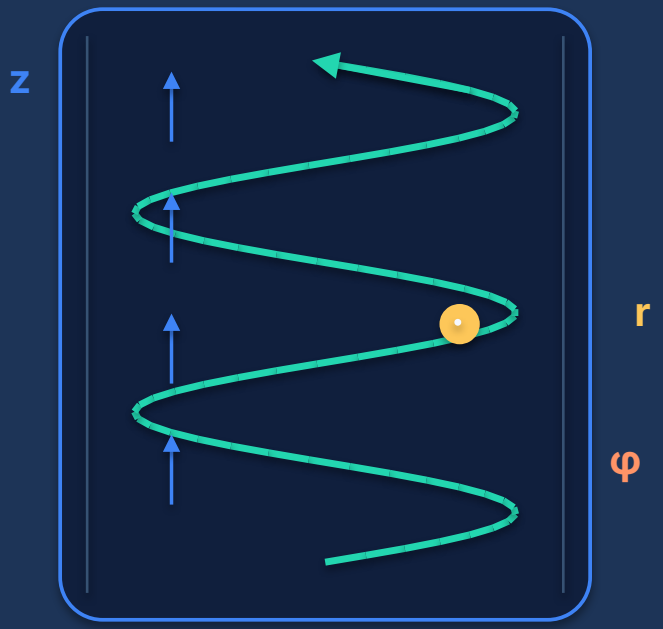
ЧТО ПРОВЕРЯЮТ?

- корректность начальных условий
- применимость c(Re)
- устойчивость шага расчёта
- согласие с измерениями

Трёхмерное движение частиц

В циклоне или прямоточном элементе частицы движутся по спиральным траекториям.

СПИРАЛЬНАЯ ТРАЕКТОРИЯ



Схематичный вид движения в цилиндре

ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ КООРДИНАТЫ

$$(r, \varphi, z)$$

$$u = (u_r, u\varphi, u_z)$$

Для расчёта составляют связанные уравнения движения в трёх проекциях с учётом взаимодействия частицы и потока.

Как использовать результаты моделирования?

По траекториям, скоростям и воздействующим силам оценивают работу инженерных аппаратов.

1

ЦИКЛОН / СЕПАРАТОР

Разделение фракций, унос частиц

2

ПНЕВМОКЛАССИФИКАТОР

Скорость уноса и граничный размер

3

МЕЛЬНИЦА

Вынос продукта через кольцевой зазор

ЦЕЛЕВАЯ ПОСТАНОВКА

Повысить эффективность разделения или транспорта при допустимых потерях давления и энергозатратах.

Это направление применения результатов модели; для количественного вывода нужны исходные данные конкретной установки.

От гидродинамики — к параметрам аппарата

Математическое описание связывает движение потока, силы, траектории частиц и результат процесса.

ЧТО ВАЖНО ЗАПОМНИТЬ

ЗАКОНЫ

Масса, импульс и энергия сохраняются

ОСЕВОЙ ПОТОК

Главные силы: тяжесть и сопротивление

Re И c

Свойства газа определяют сопротивление

ЗАКРУТКА

Нужны три составляющие скорости

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какую роль играет уравнение неразрывности?
2. От чего зависит сила сопротивления частицы?
3. Как вычисляется число Рейнольдса частицы?
4. Какие составляющие есть у скорости в циклоне?

Источник: лекция 5 «Моделирование гидромеханических процессов».