

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ЛУГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ВЛАДИМИРА ДАЛЯ»

Институт транспорта и логистики

Кафедра гидрогазодинамики

УТВЕРЖДАЮ:

Директор института
транспорта и логистики

Быкадоров В.В.



«26» 02 2025 года

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ
по учебной дисциплине

«Динамика вязкого газа»

01.04.03 Механика и математическое моделирование
«Компьютерная аэрогидродинамика»

Разработчик:

канд. техн. наук, доцент сч Мальцев Я.И.

ФОС рассмотрен и одобрен на заседании кафедры гидрогазодинамика

от «14» января 2025г., протокол №3

Заведующий кафедрой сч Мальцев Я.И.

Луганск – 2025 г.

**Комплект оценочных материалов по дисциплине
«Динамика вязкого газа»**

Задания закрытого типа

Задания закрытого типа на выбор правильного ответа

1. Выберите один правильный ответ

Что утверждает обобщенная гипотеза Ньютона:

- А) напряжения в жидкости пропорциональны скорости деформации
- Б) напряжения в жидкости пропорциональны скорости
- В) напряжения в жидкости пропорциональны давлению
- Г) напряжения в жидкости постоянны

Правильный ответ: А

Компетенции (индикаторы): ОПК2, ПК-1

2. Выберите один правильный ответ

Какой критерий подобия характеризует отношение сил инерции к силам вязкости:

- А) число Эйлера
- Б) число Фруда
- В) число Рейнольдса
- Г) число Струхала

Правильный ответ: В

Компетенции (индикаторы): ОПК2, ПК-1

3. Выберите один правильный ответ

Что такое осреднение Рейнольдса:

- А) усреднение уравнений Навье-Стокса по пространству
- Б) усреднение уравнений Навье-Стокса по времени В) объём, заполненный вихревыми линиями
- В) усреднение уравнений Навье-Стокса по скорости
- Г) усреднение уравнений Навье-Стокса по давлению

Правильный ответ: Б

Компетенции (индикаторы): ОПК2, ПК-1

4. Выберите один правильный ответ

Какова основная цель использования гипотез о турбулентных напряжениях:

- А) упростить уравнения Рейнольдса
- Б) замкнуть уравнения Рейнольдса, выразив турбулентные напряжения через известные величины
- В) увеличить точность решения уравнений Рейнольдса
- Г) получить аналитическое решение уравнений Рейнольдса

Правильный ответ: Б

Компетенции (индикаторы): ОПК2, ПК-1

Задания закрытого типа на установление соответствия

1. Установите правильное соответствие. Каждому элементу левого столбца соответствует только один элемент правого столбца.

- | | |
|--------------------------|--|
| 1) Число Рейнольдса (Re) | А) Отношение сил инерции к силам тяжести |
| 2) Число Эйлера (Eu) | Б) Отношение сил инерции к силам давления |
| 3) Число Фруда (Fr) | В) Отношение сил инерции к силам вязкости |
| Число Струхала (St) | Отношение локальной скорости |
| 4) | Г) изменения течения к конвективной скорости |

Правильный ответ:

1	2	3	4
В	Б	А	Г

Компетенции (индикаторы): ОПК2, ПК-1

2. Установите правильное соответствие. Каждому элементу левого столбца соответствует только один элемент правого столбца.

- | | |
|---|---|
| 1) Гипотеза Буссинеска | А) Использует алгебраические соотношения для определения турбулентной вязкости |
| 2) Модель длины перемешивания | Б) Использует два уравнения переноса для турбулентной кинетической энергии и скорости диссипации турбулентной энергии |
| Прандтля | В) Вводит понятие турбулентной вязкости и выражает турбулентные напряжения через градиенты осредненной скорости |
| k-ε модель | Г) Вводит понятие длины перемешивания и выражает турбулентные напряжения через квадрат градиента осредненной скорости |
| 3) | |
| 4) Алгебраические модели турбулентности | |

Правильный ответ:

1	2	3	4
В	Г	Б	А

Компетенции (индикаторы): ОПК2, ПК-1

3. Установите правильное соответствие. Каждому элементу левого столбца соответствует только один элемент правого столбца.

- | | |
|------------------------------|--|
| 1) Пограничный слой | А) Расстояние, на которое необходимо сместить твердую поверхность, чтобы внешний поток испытывал такое же влияние, как и из-за наличия пограничного слоя |
| 2) Толщина пограничного слоя | Б) Тонкий слой жидкости вблизи твердой поверхности, где вязкость играет существенную роль |
| 3) Толщина вытеснения | В) Характеризует потерю импульса в пограничном слое из-за действия вязкости |
| 4) Толщина потери импульса | Г) Расстояние от стенки, на котором скорость достигает некоторого значения, близкого к скорости внешнего потока (например, 99%) |

Правильный ответ:

1	2	3	4
Б	Г	А	В

Компетенции (индикаторы): ОПК2, ПК-1

4. Установите правильное соответствие. Каждому элементу левого столбца соответствует только один элемент правого столбца.

- | | |
|----------------------------|---|
| 1) Функция тока | А) Сумма потенциала скорости и функции тока, представленная в виде функции комплексного переменного |
| 2) Гидродинамическая сетка | Б) Плоский потенциальный поток, характеризующийся расхождением жидкости из одной точки |
| 3) Комплексный потенциал | В) Совокупность линий тока и линий равного потенциала |
| 4) Источник | Г) Скалярная функция, линии уровня которой совпадают с линиями тока |

Правильный ответ:

1	2	3	4
Г	В	А	Б

Компетенции (индикаторы): ОПК2, ПК-1

Задания закрытого типа на установление правильной последовательности

Запишите правильную последовательность действий при решении задачи в буквенном обозначении слева направо.

1. Установите правильную последовательность этапов развития отрыва пограничного слоя при наличии неблагоприятного градиента давления:

А) возникновение обратного течения вблизи стенки

- Б) увеличение толщины пограничного слоя
- В) уменьшение касательного напряжения на стенке
- Г) отделение пограничного слоя от поверхности

Правильный ответ: Б, В, А, Г

Компетенции (индикаторы): ОПК2, ПК-1

2. Установите правильную последовательность слоев турбулентного пограничного слоя в порядке удаления от поверхности стенки:

- А) логарифмическая область
- Б) вязкий подслой (ламинарный подслой)
- В) переходная область (буферный слой)
- Г) внешняя часть пограничного слоя

Правильный ответ: Б, В, А, Г

Компетенции (индикаторы): ОПК2, ПК-1

3. Установите правильную последовательность этапов применения интегрального соотношения Кармана для решения задачи о пограничном слое:

- А) выбор профиля скорости в пограничном слое
- Б) подстановка профиля скорости в интегральное соотношение Кармана
- В) решение полученного дифференциального уравнения относительно толщины пограничного слоя
- Г) определение касательного напряжения на стенке

Правильный ответ: А, Б, В, Г

Компетенции (индикаторы): ОПК2, ПК-1

4. Установите правильную последовательность этапов решения задачи турбулентного течения с использованием k - ϵ модели:

- А) решение уравнений Рейнольдса с учетом турбулентной вязкости
- Б) решение уравнений переноса для турбулентной кинетической энергии (k) и скорости диссипации (ϵ)
- В) определение турбулентной вязкости на основе значений k и ϵ
- Г) постановка граничных условий для k и ϵ

Правильный ответ: Г, Б, В, А

Компетенции (индикаторы): ОПК2, ПК-1

Задания открытого типа

Задания открытого типа на дополнение

1. Напишите пропущенное слово (словосочетание).

Согласно обобщенной гипотезе Ньютона, напряжения в жидкости пропорциональны _____.

Правильный ответ: скорости деформации.

Компетенции (индикаторы): ОПК2, ПК-1

2. Напишите пропущенное слово (словосочетание).

Жидкость, в которой касательные напряжения линейно зависят от скорости сдвига, называется _____.

Правильный ответ: ньютоновской.

Компетенции (индикаторы): ОПК2, ПК-1

3. Напишите пропущенное слово (словосочетание).

Турбулентное движение характеризуется хаотическими _____ скорости и давления.

Правильный ответ: пульсациями.

Компетенции (индикаторы): ОПК2, ПК-1

4. Напишите пропущенное слово (словосочетание).

Осреднение Рейнольдса заключается в усреднении уравнений Навье-Стокса по _____.

Правильный ответ: времени.

Компетенции (индикаторы): ОПК2, ПК-1

Задания открытого типа с кратким свободным ответом

1. Ньютоновская жидкость – это жидкость, в которой касательные напряжения линейно зависят от _____.

Правильный ответ: скорости сдвига / градиента скорости.

Компетенции (индикаторы): ОПК2, ПК-1

2. Число Рейнольдса характеризует отношение сил _____.

Правильный ответ: инерции к силам вязкости.

Компетенции (индикаторы): ОПК2, ПК-1

3. Согласно гипотезе Буссинеска, турбулентные напряжения пропорциональны градиенту осредненной скорости с коэффициентом пропорциональности, называемым _____.

Правильный ответ: турбулентной вязкостью / вихревой вязкостью.

Компетенции (индикаторы): ОПК2, ПК-1

4. Толщина вытеснения характеризует влияние пограничного слоя на _____.

Правильный ответ: внешний поток / ядро потока.

Компетенции (индикаторы): ОПК2, ПК-1

Задания открытого типа с развернутым ответом

1. Уравнения Навье-Стокса в безразмерной форме:

Даны характерные масштабы: длина L , скорость U , давление p .

Требуется представить уравнения Навье-Стокса для несжимаемой ньютоновской жидкости в безразмерной форме.

Привести расширенное решение.

Время выполнения – 45 мин.

Ожидаемый результат:

Запишем уравнения Навье-Стокса для несжимаемой жидкости:

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + (\bar{V} \cdot \bar{\nabla}) \bar{V} = \bar{F} - \frac{1}{\rho} \overline{\text{grad}} p + \nu \nabla^2 \bar{V}.$$

Запишем переменные, входящие в уравнение через безразмерные параметры, обозначая безразмерность волнистой линией сверху:

$$\bar{V} = U \tilde{V}, \quad t = T \tilde{t}, \quad x = L \tilde{x}, \quad y = L \tilde{y}, \quad z = L \tilde{z}, \quad p = p_0 \tilde{p}, \quad \nu = \nu_0 \tilde{\nu}, \quad F = F_0 \tilde{F}, \quad \bar{\nabla} = \frac{1}{L} \tilde{\nabla},$$

$$\overline{\text{grad}} = \bar{\nabla} = \frac{1}{L} \widetilde{\text{grad}}.$$

Подставим в исходное уравнение полученные выражения для переменных:

$$\frac{U}{T} \frac{\partial \tilde{V}}{\partial \tilde{t}} + \frac{U^2}{L} (\tilde{V} \cdot \tilde{\nabla}) \tilde{V} = F_0 \tilde{F} - \frac{p_0}{\rho L} \widetilde{\text{grad}} \tilde{p} + \frac{\nu_0 U}{L^2} \tilde{\nu} \tilde{\nabla}^2 \tilde{V}.$$

Разделим все члены на $\frac{L}{U^2}$:

$$\frac{L}{UT} \frac{\partial \tilde{V}}{\partial \tilde{t}} + (\tilde{V} \cdot \tilde{\nabla}) \tilde{V} = \frac{F_0 L}{U^2} \tilde{F} - \frac{p_0}{\rho U^2} \widetilde{\text{grad}} \tilde{p} + \frac{\nu_0}{UL} \tilde{\nu} \tilde{\nabla}^2 \tilde{V}.$$

Перепишем уравнение в критериальной форме:

$$Sh \frac{\partial \tilde{V}}{\partial \tilde{t}} + (\tilde{V} \cdot \tilde{\nabla}) \tilde{V} = Fr^{-1} \tilde{F} - Eu \widetilde{\text{grad}} \tilde{p} + Re^{-1} \tilde{\nu} \tilde{\nabla}^2 \tilde{V}$$

$$\text{Ответ: } Sh \frac{\partial \tilde{V}}{\partial \tilde{t}} + (\tilde{V} \cdot \tilde{\nabla}) \tilde{V} = Fr^{-1} \tilde{F} - Eu \widetilde{\text{grad}} \tilde{p} + Re^{-1} \tilde{\nu} \tilde{\nabla}^2 \tilde{V}.$$

Критерии оценивания:

– нахождение уравнения Навье-Стокса для несжимаемой ньютоновской жидкости в безразмерной форме.

Компетенции (индикаторы): ОПК2, ПК-1

2. Турбулентные напряжения и гипотеза Буссинеска:

Получите уравнения Рейнольдса для течения несжимаемой жидкости. Объясните, почему эти уравнения не замкнуты. Используйте гипотезу Буссинеска, чтобы выразить турбулентные напряжения через осредненные скорости.

Привести расширенное решение.

Время выполнения – 45 мин.

Ожидаемый результат:

Представим мгновенные значения скорости и давления как сумму осредненных и пульсационных составляющих:

$$u = \langle u \rangle + u', \quad v = \langle v \rangle + v', \quad w = \langle w \rangle + w' \\ p = \langle p \rangle + p'$$

Подставим эти выражения в уравнения Навье-Стокса и усредним по времени (или по ансамблю).

В результате усреднения получим уравнения Рейнольдса:

Уравнение неразрывности: $\partial \langle u \rangle / \partial x + \partial \langle v \rangle / \partial y + \partial \langle w \rangle / \partial z = 0$

Уравнения движения (например, для оси x): $\rho(\partial \langle u \rangle / \partial t + \langle u \rangle \partial \langle u \rangle / \partial x + \langle v \rangle \partial \langle u \rangle / \partial y + \langle w \rangle \partial \langle u \rangle / \partial z) = -\partial \langle p \rangle / \partial x + \mu(\partial^2 \langle u \rangle / \partial x^2 + \partial^2 \langle u \rangle / \partial y^2 + \partial^2 \langle u \rangle / \partial z^2) - \rho(\partial \langle u'u' \rangle / \partial x + \partial \langle u'v' \rangle / \partial y + \partial \langle u'w' \rangle / \partial z)$

Члены $-\rho \langle u'u' \rangle$, $-\rho \langle u'v' \rangle$, $-\rho \langle u'w' \rangle$ представляют собой турбулентные напряжения, возникающие из-за пульсаций скорости.

Уравнения Рейнольдса не замкнуты, потому что в них появляются новые неизвестные – турбулентные напряжения. Для их определения требуется ввести дополнительные соотношения.

Согласно гипотезе Буссинеска, турбулентные напряжения пропорциональны градиенту осредненной скорости:

$$-\rho \langle u'v' \rangle = \mu_t (\partial \langle u \rangle / \partial y + \partial \langle v \rangle / \partial x) \\ -\rho \langle u'u' \rangle = 2\mu_t \partial \langle u \rangle / \partial x - (2/3)\rho k \\ -\rho \langle v'v' \rangle = 2\mu_t \partial \langle v \rangle / \partial y - (2/3)\rho k \\ -\rho \langle w'w' \rangle = 2\mu_t \partial \langle w \rangle / \partial z - (2/3)\rho k,$$

где μ_t – турбулентная вязкость, а $k = (1/2)(\langle u'^2 \rangle + \langle v'^2 \rangle + \langle w'^2 \rangle)$ – турбулентная кинетическая энергия.

Подставляя эти выражения в уравнения Рейнольдса, можно получить замкнутую систему уравнений. Однако, теперь необходимо определить турбулентную вязкость μ_t , для чего используются различные модели турбулентности (например, k - ϵ модель).

Гипотеза Буссинеска позволяет выразить турбулентные напряжения через осредненные скорости, замыкая уравнения Рейнольдса. Однако, для определения турбулентной вязкости требуются дополнительные модели турбулентности.

Ответ: Проекция на ось x : $\rho(\partial \langle u \rangle / \partial t + \langle u \rangle \partial \langle u \rangle / \partial x + \langle v \rangle \partial \langle u \rangle / \partial y + \langle w \rangle \partial \langle u \rangle / \partial z) = -\partial \langle p \rangle / \partial x + \mu(\partial^2 \langle u \rangle / \partial x^2 + \partial^2 \langle u \rangle / \partial y^2 + \partial^2 \langle u \rangle / \partial z^2) - 2\mu_t \partial \langle u \rangle / \partial x - (2/3)\rho k + \mu_t (\partial \langle u \rangle / \partial y + \partial \langle v \rangle / \partial x) + \mu_t (\partial \langle u \rangle / \partial y + \partial \langle w \rangle / \partial x)$.

Критерии оценивания:

- нахождение уравнения Рейнольдса;
- нахождение выражения для турбулентных напряжений через гипотезу Буссинеска;
- нахождение выражения уравнений Рейнольдса с записью турбулентных напряжений через гипотезу Буссинеска.

Компетенции (индикаторы): ОПК2, ПК-1

3. Ламинарный пограничный слой на плоской пластине:

Выведите уравнения Прандтля для ламинарного пограничного слоя на плоской пластине. Объясните, какие упрощения сделаны по сравнению с уравнениями Навье-Стокса.

Привести расширенное решение.

Время выполнения – 45 мин.

Ожидаемый результат:

Запишем исходные уравнения Навье-Стокса для несжимаемой жидкости и замкнем их при помощи уравнения неразрывности:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0 \\ u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= - (1/\rho) \frac{\partial p}{\partial x} + \nu (\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}) \\ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= - (1/\rho) \frac{\partial p}{\partial y} + \nu (\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}),\end{aligned}$$

где $\nu = \mu/\rho$ - кинематическая вязкость.

Предположим, что толщина пограничного слоя мала: $\delta \ll L$, где L - характерный размер. Поперечная скорость v мала по сравнению с продольной скоростью u . Продольные изменения скорости малы по сравнению с поперечными изменениями.

Используя эти предположения, проводим масштабный анализ членов в уравнениях Навье-Стокса. Например, если $u \sim U$, $x \sim L$, $y \sim \delta$, то $v \sim U\delta/L$.

В результате масштабного анализа и отбрасывания малых членов, получим уравнения Прандтля:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0 \\ u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= - (1/\rho) \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \\ \frac{\partial p}{\partial y} &\approx 0 \Rightarrow p \approx p(x) \text{ (давление постоянно по толщине пограничного слоя)}\end{aligned}$$

Уравнения Прандтля являются упрощением уравнений Навье-Стокса для тонкого пограничного слоя. Основные упрощения: пренебрежение продольной вязкостью ($\partial^2 u / \partial x^2 \ll \partial^2 u / \partial y^2$) и допущение о постоянстве давления по толщине пограничного слоя.

Ответ:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0 \\ u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= - (1/\rho) \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}.\end{aligned}$$

Критерии оценивания:

– нахождение уравнений Прандтля для плоского пограничного слоя.

Компетенции (индикаторы): ОПК2, ПК-1

4. Интегральное соотношение Кармана:

Требуется вывести интегральное соотношение Кармана для ламинарного пограничного слоя.

Привести расширенное решение.

Время выполнения – 45 мин.

Ожидаемый результат:

Запишем уравнения Прандтля:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0 \\ u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= - (1/\rho) \frac{dp}{dx} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\end{aligned}$$

Проинтегрируем оба уравнения по координате y от стенки ($y=0$) до внешней границы пограничного слоя ($y=\delta$).

$$\int_0^\delta (\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}) dy = \int_0^\delta \frac{\partial u}{\partial x} dy + \int_0^\delta \frac{\partial v}{\partial y} dy = 0$$

$$d/dx \int_0^\delta u \, dy - u\delta \, d\delta/dx + v(\delta) - v(0) = 0$$

Учитывая, что $v(0) = 0$ и $u(\delta) = U(x)$ (скорость внешнего потока), получаем:

$$v(\delta) = -d/dx \int_0^\delta u \, dy + U(x) \, d\delta/dx$$

$$\int_0^\delta (u\partial u/\partial x + v\partial u/\partial y) \, dy = - (1/\rho) \int_0^\delta (dp/dx) \, dy + v \int_0^\delta \partial^2 u/\partial y^2 \, dy \int_0^\delta u\partial u/\partial x \, dy + \int_0^\delta v\partial u/\partial y \, dy = - (\delta/\rho) \, dp/dx + v (\partial u/\partial y|_\delta - \partial u/\partial y|_0)$$

После преобразований с использованием интегрирования по частям, уравнения неразрывности и граничных условий, получим:

$$d/dx \int_0^\delta u^2 \, dy - U(x) \, d/dx \int_0^\delta u \, dy = - (\delta/\rho) \, dp/dx - v (\partial u/\partial y|_0)$$

$$\text{Обозначим касательное напряжение на стенке как } \tau_w = \mu (\partial u/\partial y|_0) = \rho\nu (\partial u/\partial y|_0)$$

$$\text{Толщина потери импульса: } \delta^{**} = \int_0^\infty (u/U)(1 - u/U) \, dy \approx \int_0^\delta (u/U)(1 - u/U) \, dy$$

$$\text{Толщина вытеснения: } \delta^* = \int_0^\infty (1 - u/U) \, dy \approx \int_0^\delta (1 - u/U) \, dy$$

Подставляя эти определения в полученное уравнение, получим интегральное соотношение Кармана: $d/dx (U^2\delta^{**}) + \delta^*U \, dU/dx = \tau_w/\rho$

Интегральное соотношение Кармана связывает интегральные характеристики пограничного слоя (толщину потери импульса, толщину вытеснения) с касательным напряжением на стенке и градиентом давления. Оно является приближенным, но полезным инструментом для анализа пограничного слоя.

$$\text{Ответ: } d/dx (U^2\delta^{**}) + \delta^*U \, dU/dx = \tau_w/\rho$$

Критерии оценивания:

– нахождение выражения для интегрального соотношения Кармана.

Компетенции (индикаторы): ОПК2, ПК-1

Экспертное заключение

Представленный фонд оценочных средств (далее - ФОС) по дисциплине «Динамика вязкого газа» соответствует требованиям ГОС ВО.

Предлагаемые формы и средства текущего и промежуточного контроля адекватны целям и задачам реализации основной образовательной программы по направлению подготовки 01.04.03 Механика и математическое моделирование.

Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающегося представлены в полном объеме.

Виды оценочных средств, включенные в представленный фонд, отвечают основным принципам формирования ФОС.

Разработанный и представленный для экспертизы фонд оценочных средств рекомендуется к использованию в процессе подготовки магистров, по указанному направлению.

Председатель учебно-методической
комиссии института транспорта и логистики



Е.И. Иванова

Лист изменений и дополнений

№ п/п	Виды дополнений и изменений	Дата и номер протокола заседания кафедры (кафедр), на котором были рассмотрены и одобрены изменения и дополнения	Подпись (с расшифровкой) заведующего кафедрой (заведующих кафедрами)