Прикладная гидроаэродинамика

1 лекция
11 февраля

Валерий Осипович см3. Зачёт. 3-4 лабы. Дз. 60 б зачет автоматом
Литература Голубев А. Г. Под ред Колугина " Аэродинамика" изд 2017 г. Краснов " Прикладная аэродинамика" тут установки и лабы. В вопросах и ответах. Доп литература Калугин "Аэрогазодинамика органов управления полетом ЛА". Мельников "Аэродинамика больших скоростей". Лебедев Чернобровкин "Динамика полета беспилотных ЛА" . Захарченко В.Ф. "Определение суммарных АДХ различных компоновок ЛА" - метода к дз, там расчет ла в целом, его составляющих, затупленный конус, засостренный конус". Минусы за пропуски и опоздания, плюсы за посещения.

Введение
Дисциплина относится к специальным определяющих подготовку инженеров в области констурирования приборов, систем управления, также для курса автоматы стабилизации системы управления ЛА, а также для инерциальных навигационных комплексов систем управления ЛА.

Прикладная гидроаэродинамика является теоретической подготовкой для спецкурсов. Цель дисциплины - освоение теоритических основ гидроаэродинамики, расчеты АДХ ЛА и гироскопических систем.
2 цель - выработка практических навыков самостоятельной инженерной работы. Объем дисциплины - 2 зачетных еденицы.

Наука гидроаэродинамика- это часть науки аэромеханики изучает законы движения и равновесия жидкостей, а также силовое взаимодействие жидкостей с движущимися в ней телами.

Жидкость - это физическое тело, связь между молекулами которого мала. Под это определение подпадают вода, воздух, масло и прочие.

В основе АГД лежит гипотеза сплошности или континуума или неразрывности движущейся среды. Ввел эту гипотезу сплошности академик Эйлер в 1753 году.

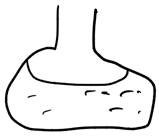
Согласно гипотезе принебрегают в жидкости межмолекулярным движением и молекулярными прмежутками. В этом случае свойства бесконечно малого объёма жидкости будут такими же как и у объёма в целом. Это позволяет
1) расматривать непрерывное изменение параметров потока в пространстве и времени
2) применять интегральные и диференциальные исчисления

Реальные жидкости не обладают свойством континуума

Но в гидроаэродинамике имеют дело не с реальными жидкостями, а с их упрощенными моделями, которые строятся с учётом реальных физических свойств жидкости

Некоторые отличительные свойства реальных жидкостей

Заметимм, что все жидкости условно подразделяют на капельные и газообразные

Капельные жидкости (Вода)	Газообразные (Воздух)
1. Малая сжимаемость	1 Большая сжимаемость
2 Большая вязкость	2 Малая вязкость
3 Почти не работают на растяжение	3 Впринципе на растяжение не работают
4 образуют свободную граничнуъ поверхность 	4 занимает весь объём 

Модели жидкости

1. Несжимаяемая вязкая
2. Сжимаемая идеальная (невязкая) та в которой отсутствует трение
3. Сжимаемая вязка- сложная в расчете
4. Несжимаемая идеальная простая в расчете

Сжимаемость - способность жидкости изменять свой объем под действием сжимающих усилий

β_p — Коэффициент объемного сжатия $\left[\frac{м^3}{Н}\right]$

Вязкость - способность жидкости сопротивляться усилиям сдвига

μ — Коэффициент динамической вязкости $\left[\frac{Н \cdot с}{м^2}\right] \longrightarrow \nu = \frac{\mu}{\rho}$ — ρ - плотность

— Коэффициент кинематической вязкости

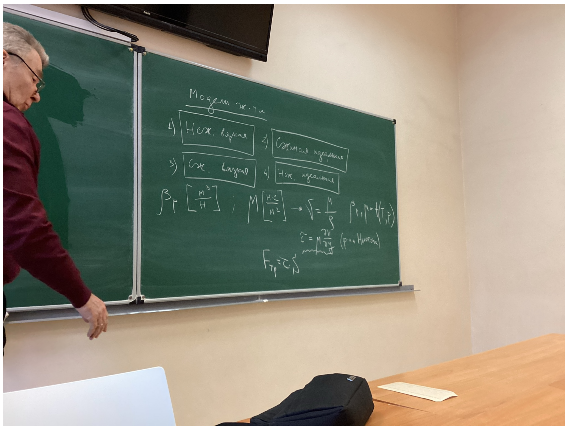
$$\beta_p, \mu = f(\overset{\text{температура}}{T}, \underset{\text{давление}}{p})$$

Касательные Напряжения трения $\tau = \mu \frac{\partial v}{\partial y}$ -формула Ньютона

40 $F_{тр} = \tau \cdot S$

Идеальная жидкость- та в которой отсутствует трение

В гидроаэродинамику составными частями входит ряд самостоятельных наук



Аэрогидромеханика

Аэромеханика

аэродинамика

Газодинамика

аэростатика

Гидромеханика

Гидродинамика

Гидравлика

гидростатика

Динамика плазмы

Электромагнитаня газодинамика (Воздух за скачками уплотнения)

ЭМ гидродинамика (плазма металлов)

Плазма - особая жидкость, состаящая из электрически заряженных частиц

Аэродинамика изучает законы движения газов, а также силовое взаимодействие газов с движущимися телами

Аэроститка изучает законы равновесия и покоя газов

Газодинамика - аэродинамика больших скоростей

Гидродинамика изучает законы движения капельных жидкстей

Гидравлика - прикладаная инженерная наука изучает движение жидкостей по каналам, трубам, гидравлическое сопротивление и расходы

Краткая истоическая справка о гидроаэродинамике вклад совецких и российских учёных

Циолковский создал одну из первых аэродинамических труб. Дал формулу для расчета скорости тела с учетом его переменной массы.
Цандер создатель первых ракет.
Серов. Теория размерности и подобия

2 лекция
18 февраля

Параграф 1

Оснвные задачи решаемые гидроаэродинамикой
1. Определение параметров течения
2. Исследование силового взаимодействия среды на обтекаемые потоком тела, определение подъемной силы, лобового сопротивления, боковой силы, а также моментов тангажа, рыскания, крена
3. Определние безразмерных аэродинамических коэффициентов сил и моментов, необходимых для расчетов
4. Расчёт течения жидкости по каналам, определение расхода и гидравлического сопротивления
5. Определние аэродинамической формы движущегося тела (оптимизация)
6. Обеспечение его [тела] устойчивости и управляемости
7. Выбор и расчёт органов управления (ОУ) ЛА и сопел его двигателей
8. Расчет тепературы обшивки ЛА и обеспечение её теплозащиты

Параграф 2
Критерий подобия течения жидкости
1. Число Маха

$$M = \frac{V}{a}$$

V - скорость потока
a - скорость звука

$$a^2 = \frac{dp}{d\rho} = kRT$$

p - давление, R - газовая постоянная, T - температура, ρ - плотность

отношение $k = \frac{C_p}{C_v}$ - удельные теплоёмкости

a - характеризует сжимаемость

$\rho = const$ для несжимаемой жидкости $\rightarrow dp = 0$.

$\rightarrow a = \infty$ для несжимаемого потока

сжимаемость $\uparrow$, $a \downarrow$

Число Маха также является критерием сжимаемости. С ростом сжимаемости, число Маха увеличивается. При больших числах Маха сжимаемость потока растет
Если M<=0,3, то поток можно считать несжимаемым

M<=1, то дозвуковое течение
M=1, это звуковое течение
M>1, это сверхзвук
M>5=5, это гиперзвук

2. Число Рейнольдса

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu}$$

V – скорость потока
d – характерный размер (калибр, длина)
ν – коэфф. кинематической вязкости $\nu = \frac{\mu}{\rho}$

С помощью числа Рейнольдса - Определяют характер обтекания тела, служит для определения режима течения (ламинарный или турбулентный).

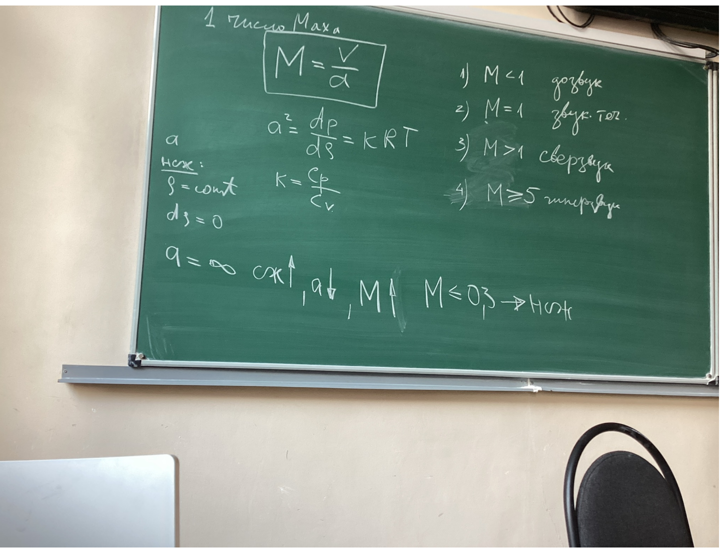
Для воздуха $Re=10^5$ – Ламинарный приграничный слой
Для воздуха $Re>=10^6$ – Турбулентный приграничный слой

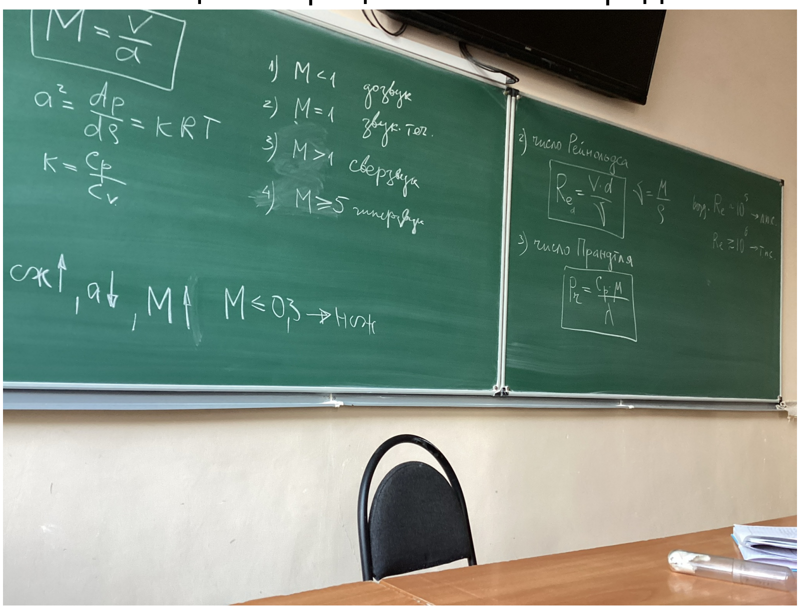
3. Число Прандтля

$$P_r = \frac{C_p \cdot \mu}{\lambda}$$

C_p – удельная теплоёмкость
μ – коэф дин вязкости
λ – коэф. теплопроводности

Число Прайндтля служит для моделирования и оценки процессов теплопередачи.





Это основные критерии подобия, которые используются для можелирования процессов при обтекание тела

Параграф 3
Параметры характеризующие состояние жидкости
1. Гидростатическое давление [Па] или [Н/м^2]
Свойства давления: 1) p действует снаружи и по нормали к поверхности
2) давление - велечина скалярная

Давление - сила проходящаяся на еденицу поверхности
2. Массовая плотность
плотность - это масса в еденице объёма $\left[\frac{кг}{м^3}\right]$

Made with Goodnotes

3. Абсолютная термодинамическая температура T $[K]$

Температура - это мера нагретости тела

4. Вектор скорости $\bar{V}$ $\left[\frac{м}{с}\right]$ характеризует модуль и направление скорости

$\bar{V}$ или V_x, V_y, V_z

В общем случае эти четыре параметра зависят от t (времени)

Вывод: таким образом движение жидкости будет определено если в каждой её точке будут известны во времени значения этих четырёх параметров. Для определения этих параметров необходимо составить и решить систему из четырех уравнений.

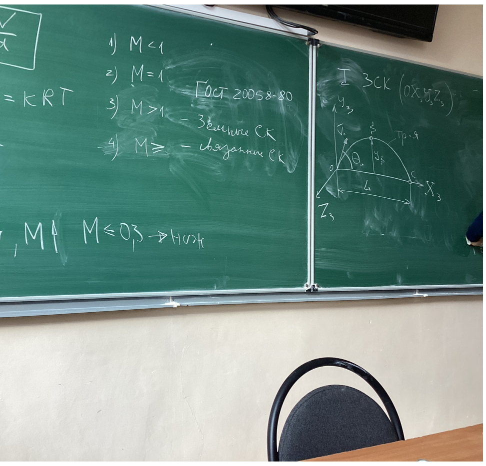
Параграф 4

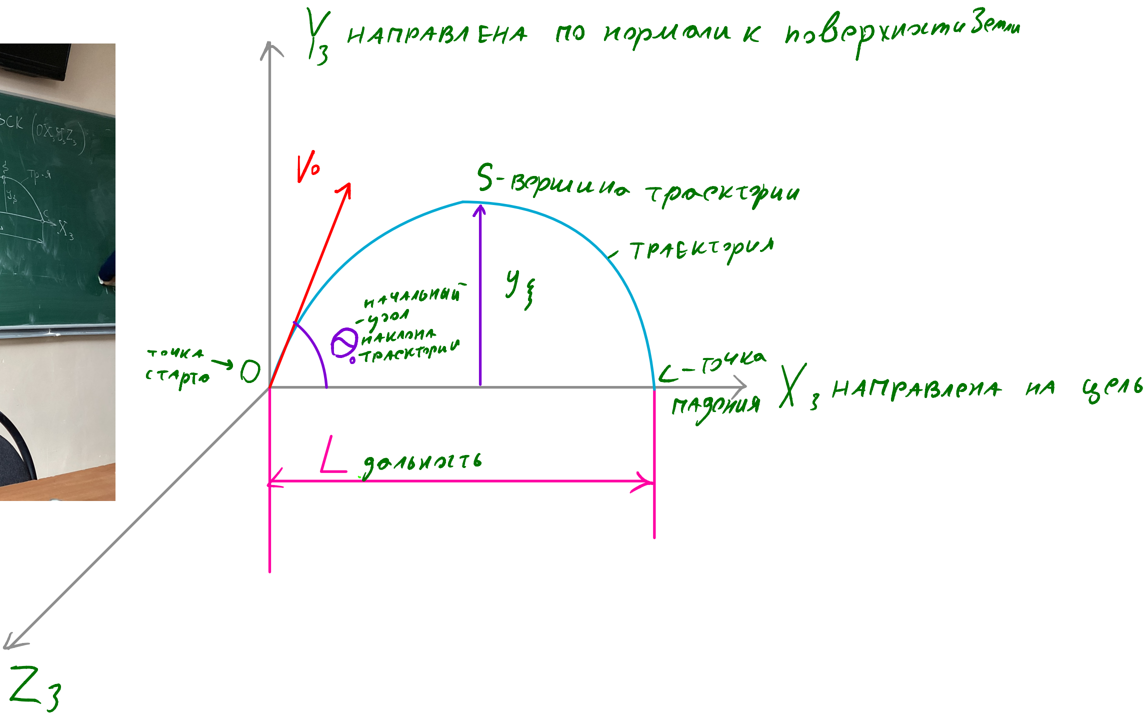
Системы координат и углов, определяющих положение тела в пространстве

ГОСТ МЕХАНИКА ПОЛЁТОВ В АТМОСФЕРЕ ГОСТ 20058-80

- Земные ск используют для определения траектории ЛА, их иногда называют базовыми ск
- Связанные ск служат для определения сил и моментов, действующих на ЛА

<u>Земная система координат ЗСК</u> $(OX_3Y_3Z_3)$



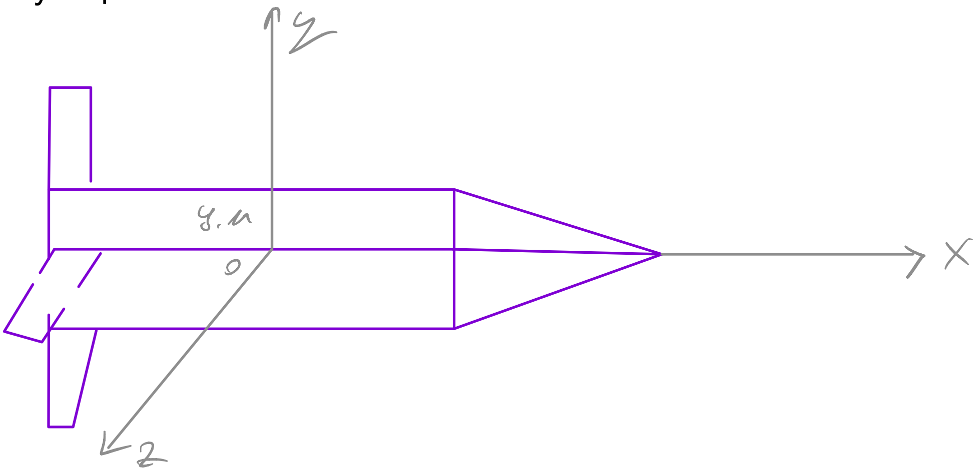


взаимно перпендикулярна и образует правую тройку

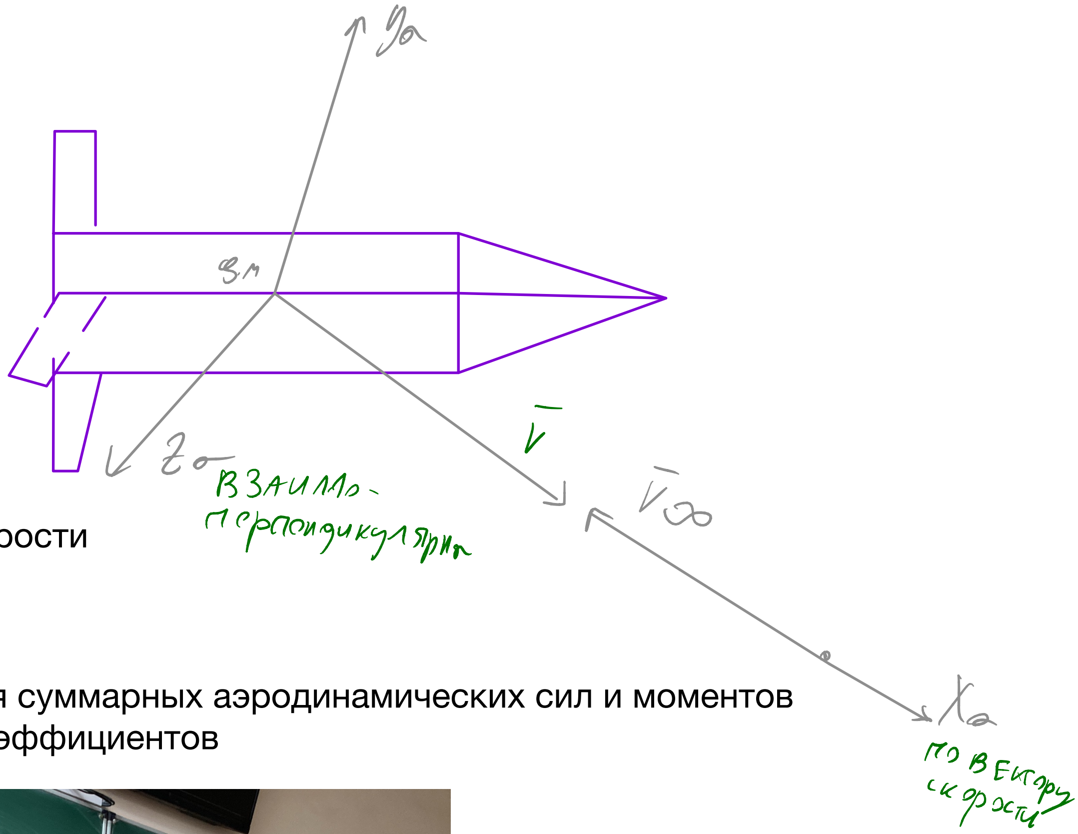
Связанная система координат $(Oxyz)$

Ox по продольной оси ла
О - цм ЛА
У перпендикулярна ОХ (по нормали к продольной осив вертикальной плоскости симметрии)
Z взаимноперпендиклярна первым двум по правому борту ЛА

Эта ск движется вместе с ЛА по траектории движения. Служит для определния нагрузок, действующих на Ла

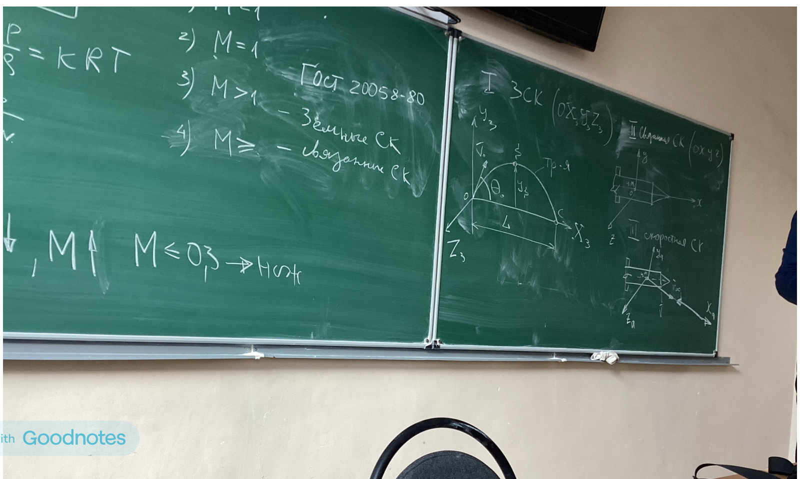


3. Скоростная ск



Ха по вектору скорости

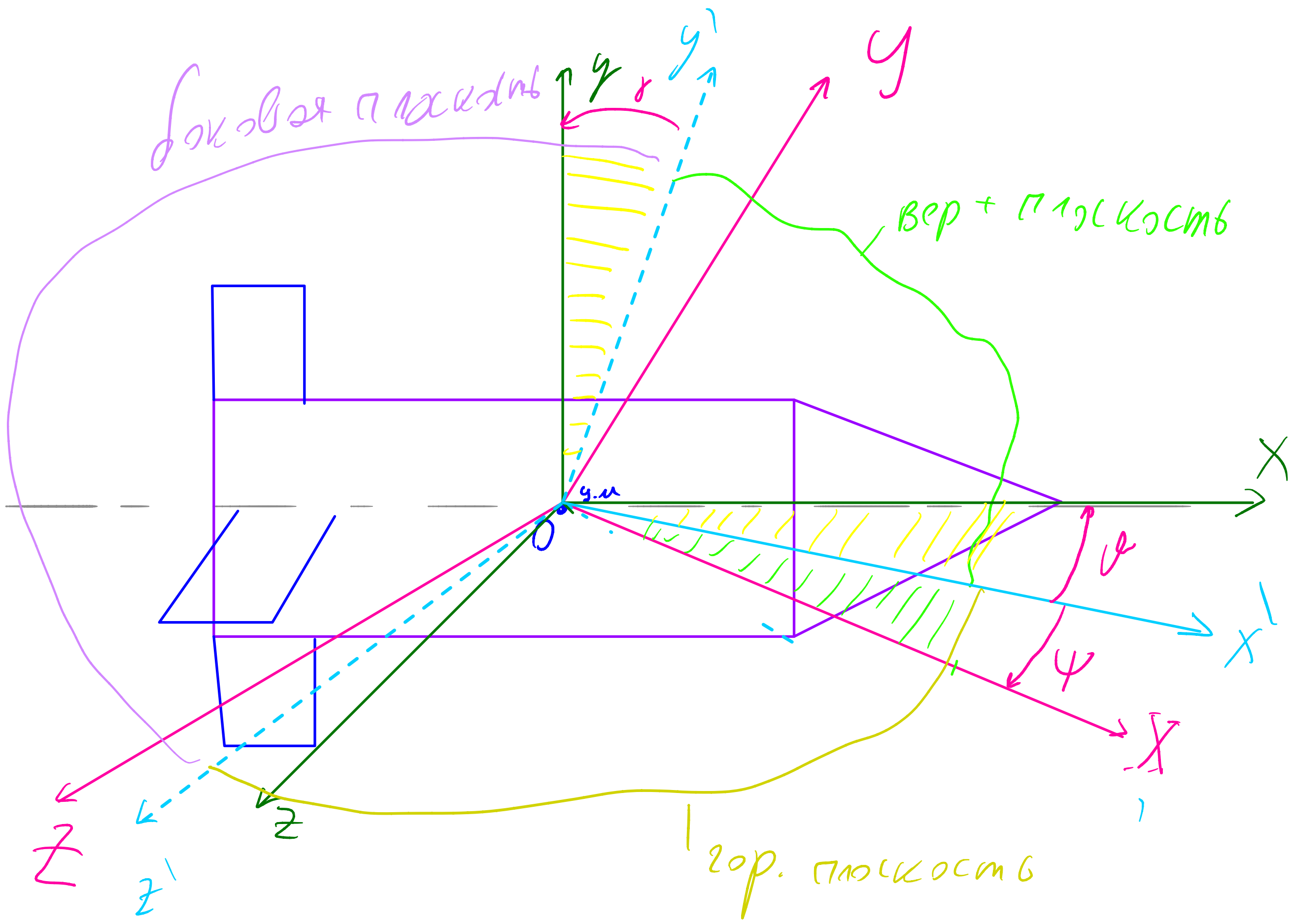
Служит для опредения суммарных аэродинамических сил и моментов и их безразмерных коэффициентов

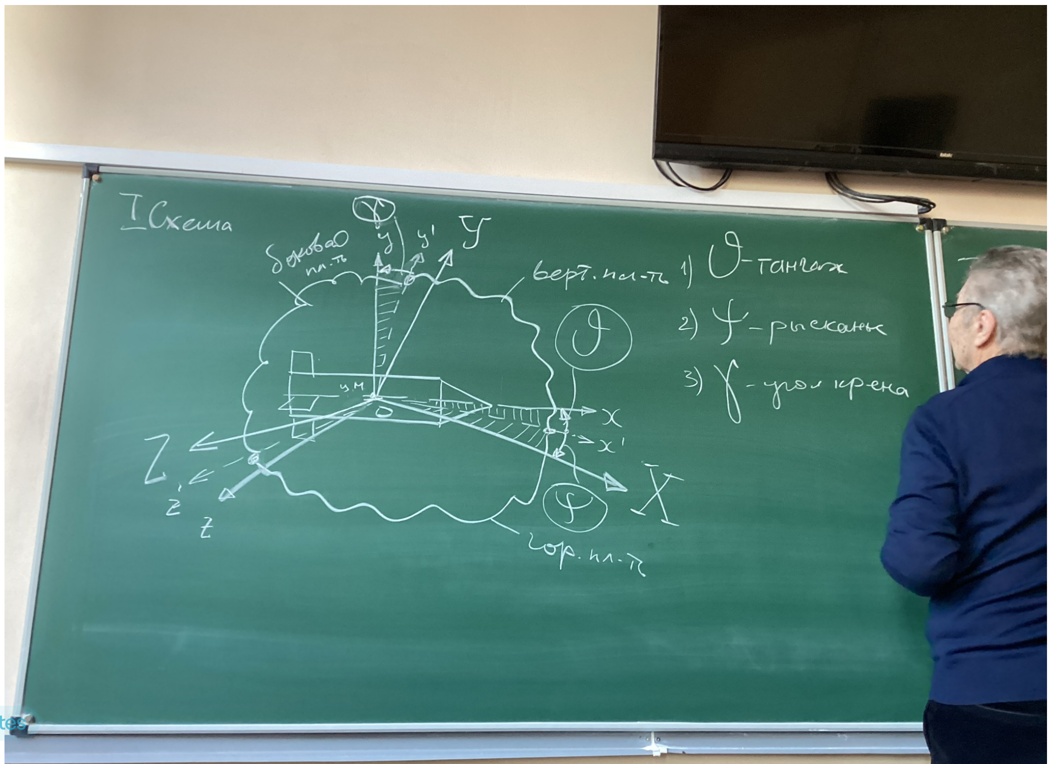


25 февраля
Лекция 3

Схема взаимного расположения связанной и неподвижной систем координат при совмещении их центров

1 схема



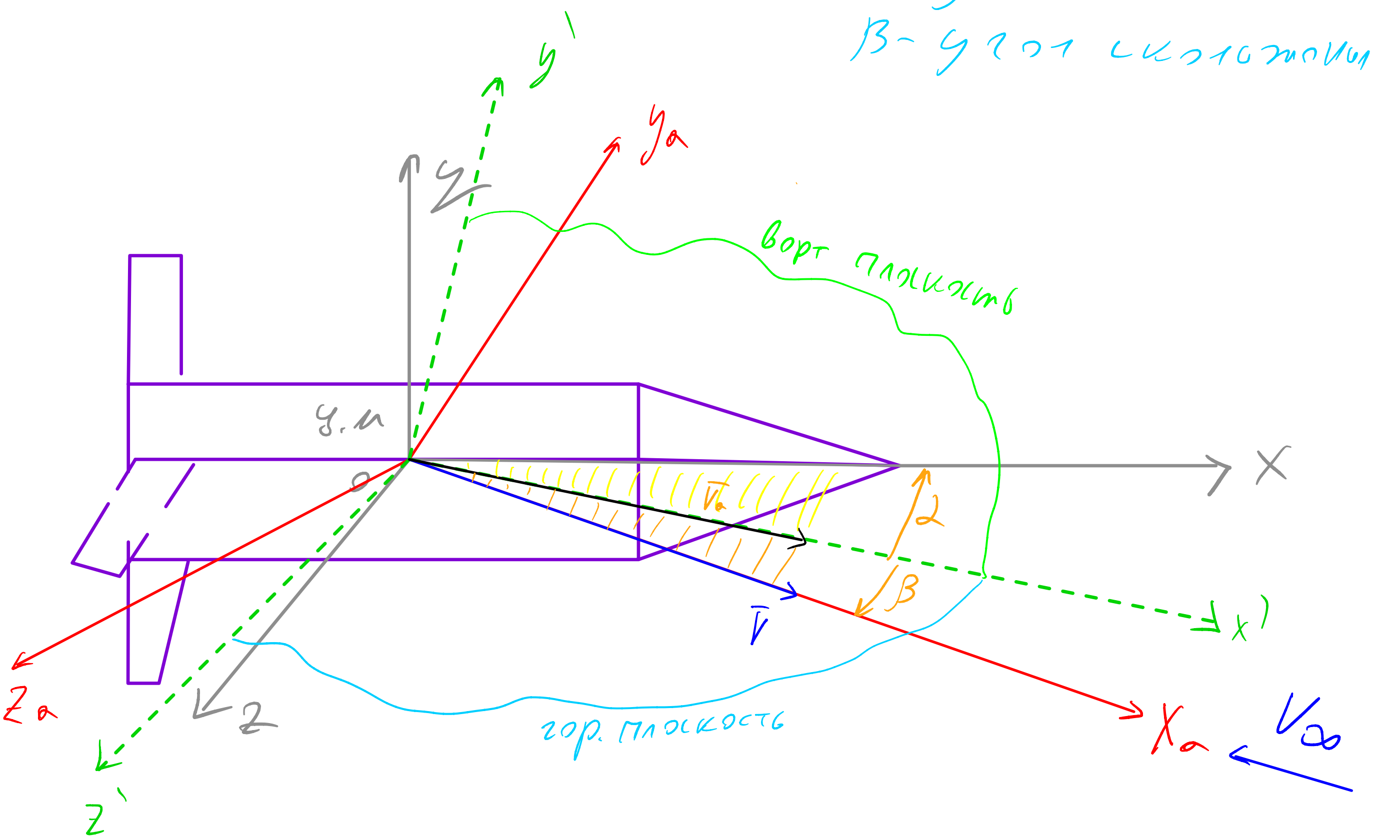


2 схема

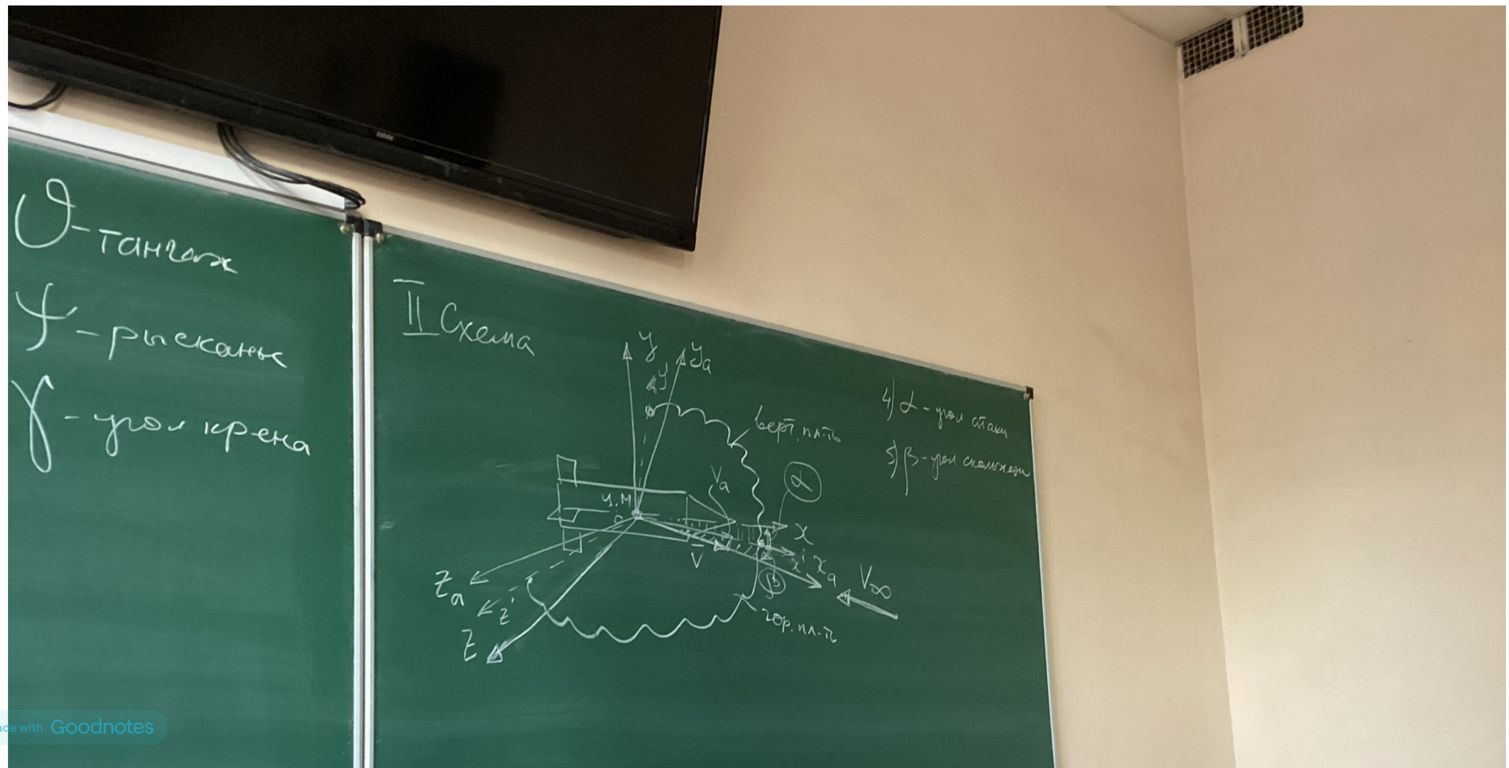
Схема взаимного расположения связанной и скоростной систем координат

14

α - угол с
β - угол скольжения



Эти 5 углов определяют положение ЛА



Основные уравнения гидроаэродинамики:

Параграф 1

Уравнение состояния (уравнение совершенного газа), R - газовая постоянная зависит от рода газа или жидкости

$$p = \rho \cdot R \cdot T \quad (1)$$

$$R = \frac{R_0}{\mu_{cp}}$$

R0 - универсальная газовая постоянная, не зависит от рода газа R0= 8,314 $\left[\frac{Дж}{моль \cdot K}\right]$ - СИ

$$R_{возд} = 287 \left[\frac{Дж}{кг \cdot K}\right]$$

$\mu_{ср}$ - средний молекулярный вес частиц

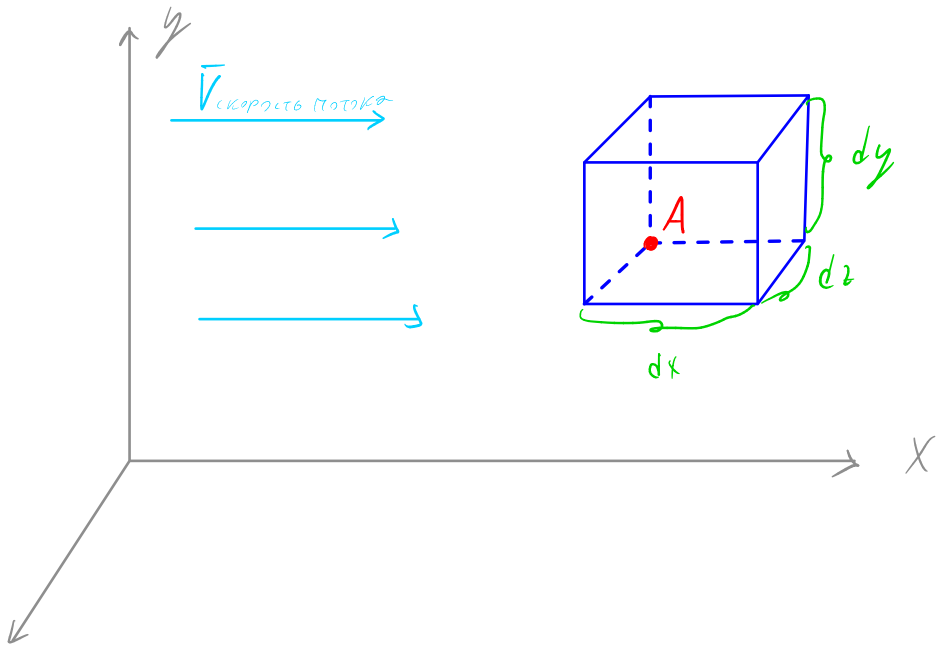
Если T↑ρ↑, T↑P↓, то ур-ие (1) не выполняется

Газовая постоянна R - это работа совершаемая одним килограмом газа при изобарическом нагревании его на один градус

Лабы Калугина дз к лабнице

Последующие 3 уравнения будем выводить на базе основных законов сохранения массы, энергии, импульса

38 Параграф 2 **Уравнение неразрывности (** закон сохранения массы)



Выделим бесконечно малый элементарный объём пространства

$dw = dx\,dy\,dz \qquad dt = 1$

Баланс жидкости: (все что втекает = тому что вытекает)

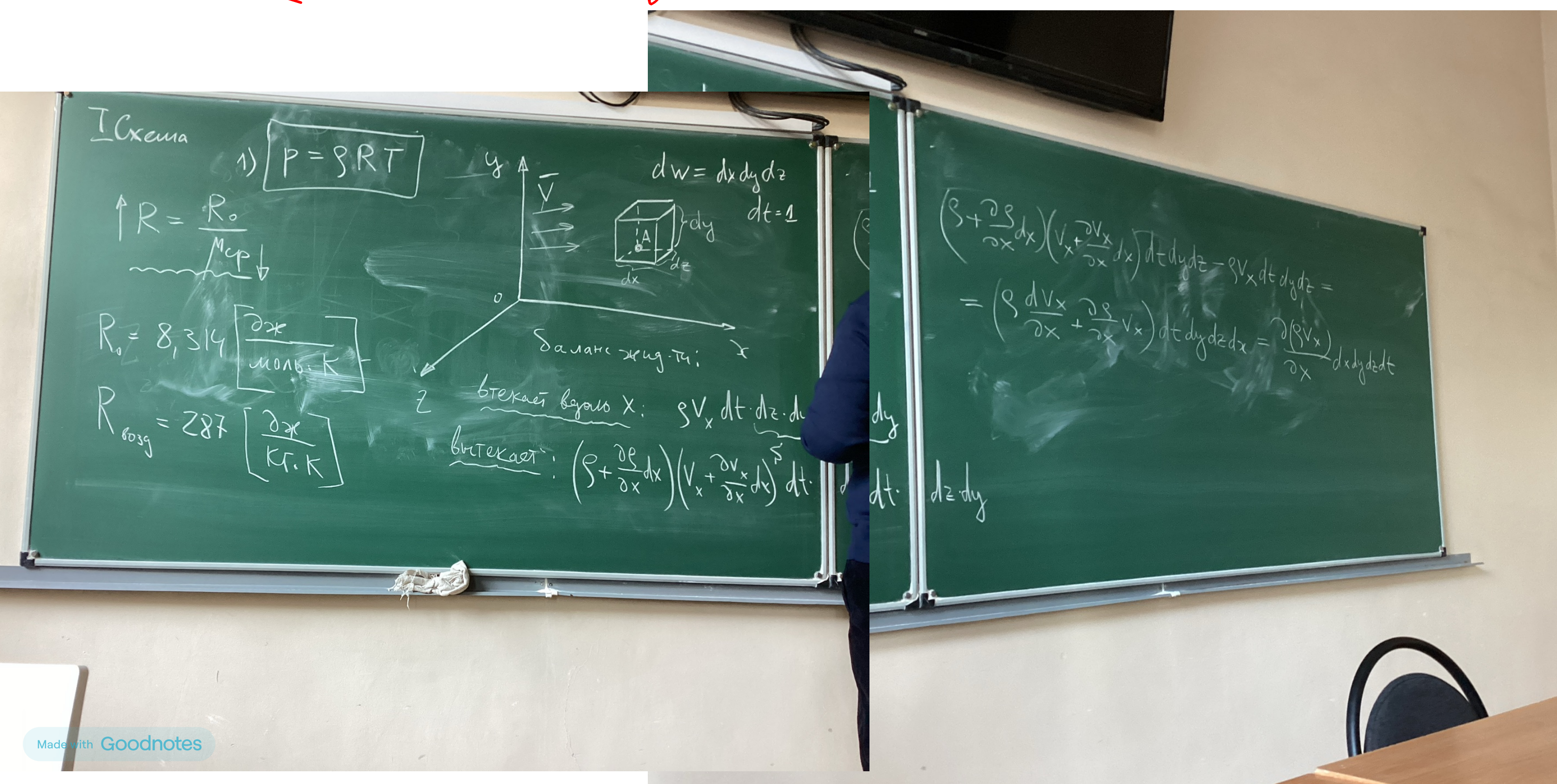
Втекает вдоль оси x: $\rho \cdot V_x \cdot dt \cdot \underbrace{dz \cdot dy}_{S}$

Вытекает: $\left(\rho + \frac{\partial \rho}{\partial x} dx\right)\left(V + \frac{\partial V_x}{\partial x} dx\right) dt \cdot dz \cdot dy$

$$(\rho + \frac{\partial \rho}{\partial x} dx)(v + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx) dt dy dz - \rho v_x dt dy dz =$$

$$= \left(\rho \cdot \frac{dV_x}{dx} + \frac{\partial \rho}{\partial x} V_x\right) dt\,dy\,dz\,dx = \frac{\partial (\rho V_x)}{\partial x} dx\,dy\,dz\,dt$$

В объём $\left[\frac{\partial (\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho V_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho V_z)}{\partial z}\right] dx\,dy\,dz\,dt$

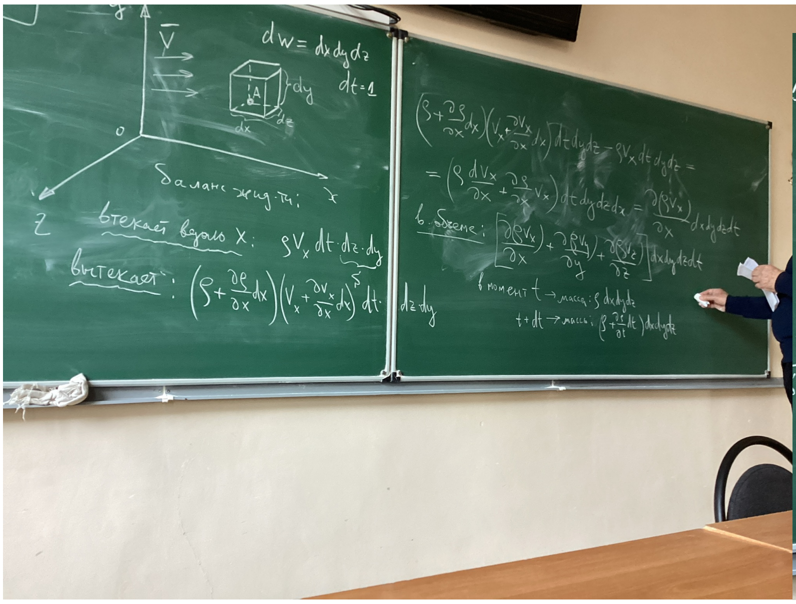


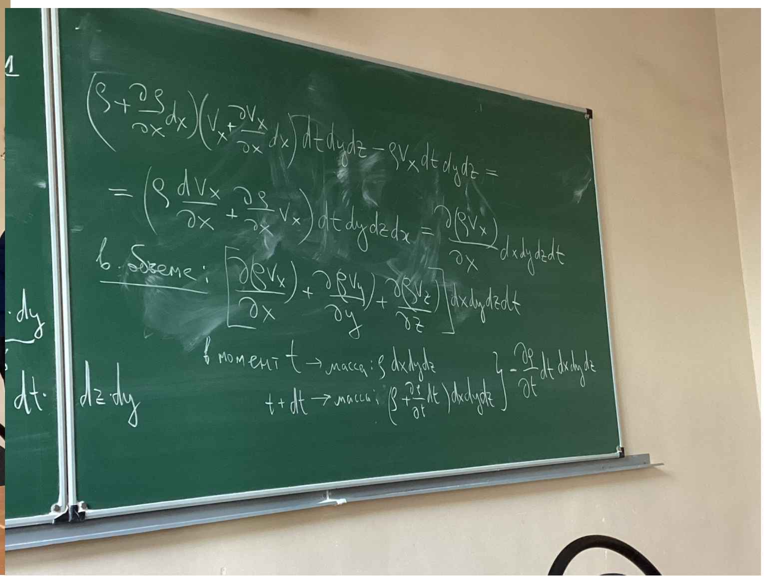
Согласно закону сохранения массы это выражение должно быть приравнено изменению массы в объеме за единицу времени dt

в момент $t \to$ масса: $\rho \, dx \, dy \, dz$

$t+dt \to$ масса: $\left(\rho - \frac{\partial \rho}{\partial t} dt\right) dx \, dy \, dz$

$$\left.\begin{matrix} \rho \, dx \, dy \, dz \\ \left(\rho - \frac{\partial \rho}{\partial t} dt\right) dx \, dy \, dz \end{matrix}\right\} - \frac{\partial \rho}{\partial t} dt \, dx \, dy \, dz$$





В результате получим

$$2)\quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho V_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho V_z)}{\partial z} = 0$$

← это и есть уравнение неразрывности

- это Не танцстанарное трехмерное течение

или $\frac{\partial \rho}{\partial t} + div(\rho \bar{V}) = 0$

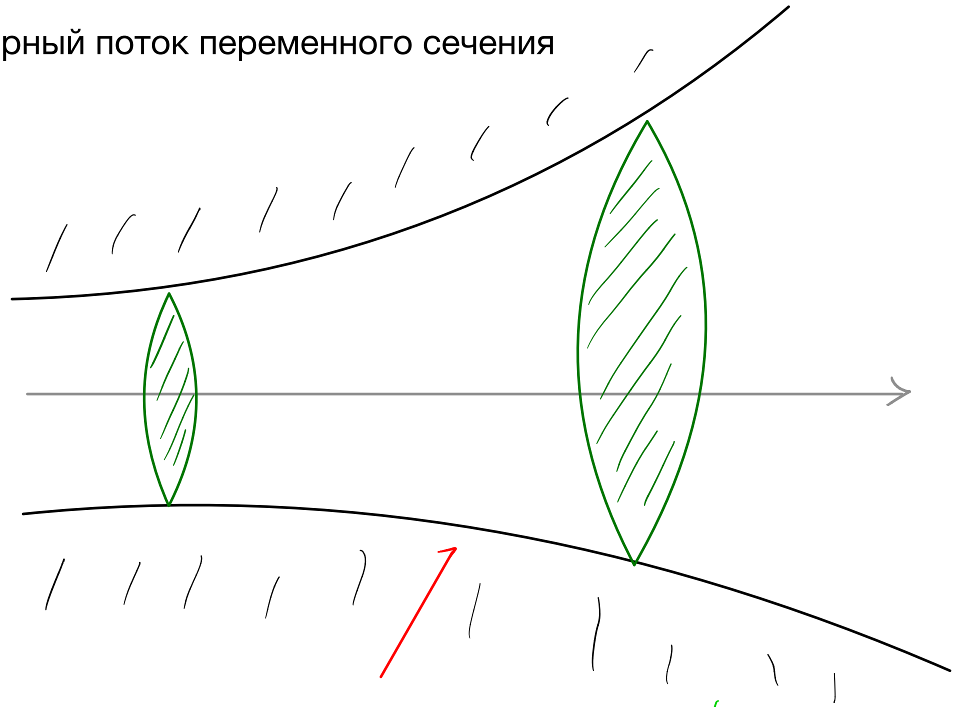
Частные случаи:

а) установившийся поток $div(\rho \bar{V}) = 0$

б) поток несжимаемый $\quad div(\bar{V}) = 0$

$\rho = const$

в) одномерный поток переменного сечения



Может быть "струйка" S (x, t)

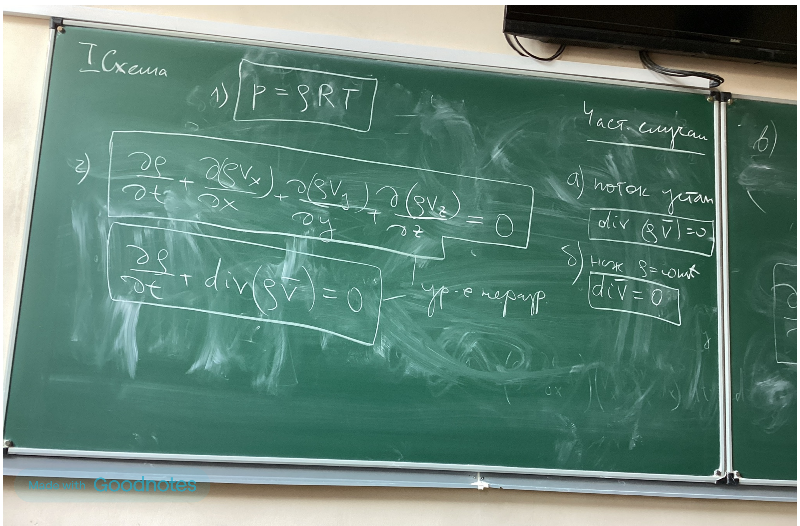
для частного случая в

$$\frac{\partial(\rho S)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V \cdot S)}{\partial x} = 0$$

г) для установившегося потока Уравнение расхода $\quad \rho V S = const$

$$\rho_1 V_1 S_1 = \rho_2 V_2 S_2 = \ldots = m.$$

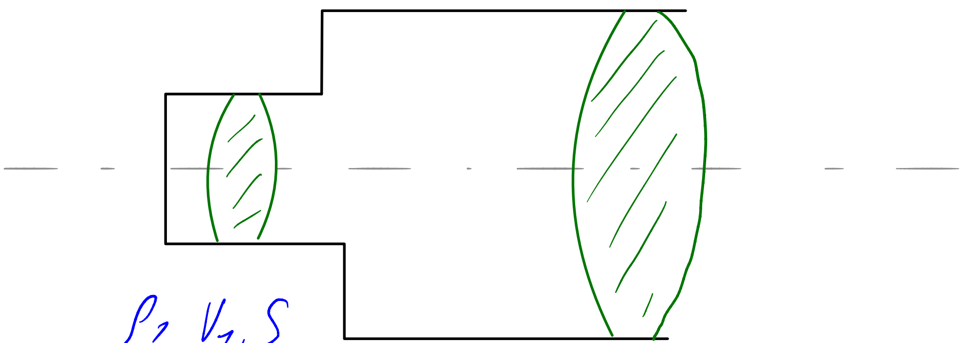
m – массовый расход (расход массы в единицу времени)



д) жидкость не сжимаемая $V \cdot S = const$

$$V_1 \cdot S_1 = V_2 \cdot S_2 = \ldots = Q$$

Q – объемный расход расход в единице объёма за единицу времени



ρ_1, V_1, S_1

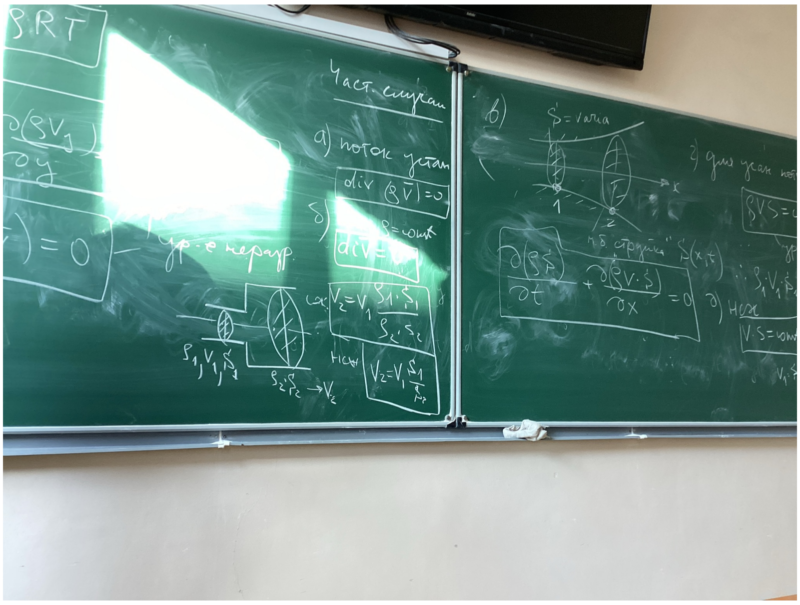
$\rho_2 \cdot S_2 \rightarrow V_2$

$$\text{сж}: \quad V_2 = V_1 \cdot \frac{\rho_1 \cdot S_1}{\rho_2 \cdot S_2}$$

$$\text{Н сж}: \quad V_2 = V_1 \cdot \frac{S_1}{S_2}$$

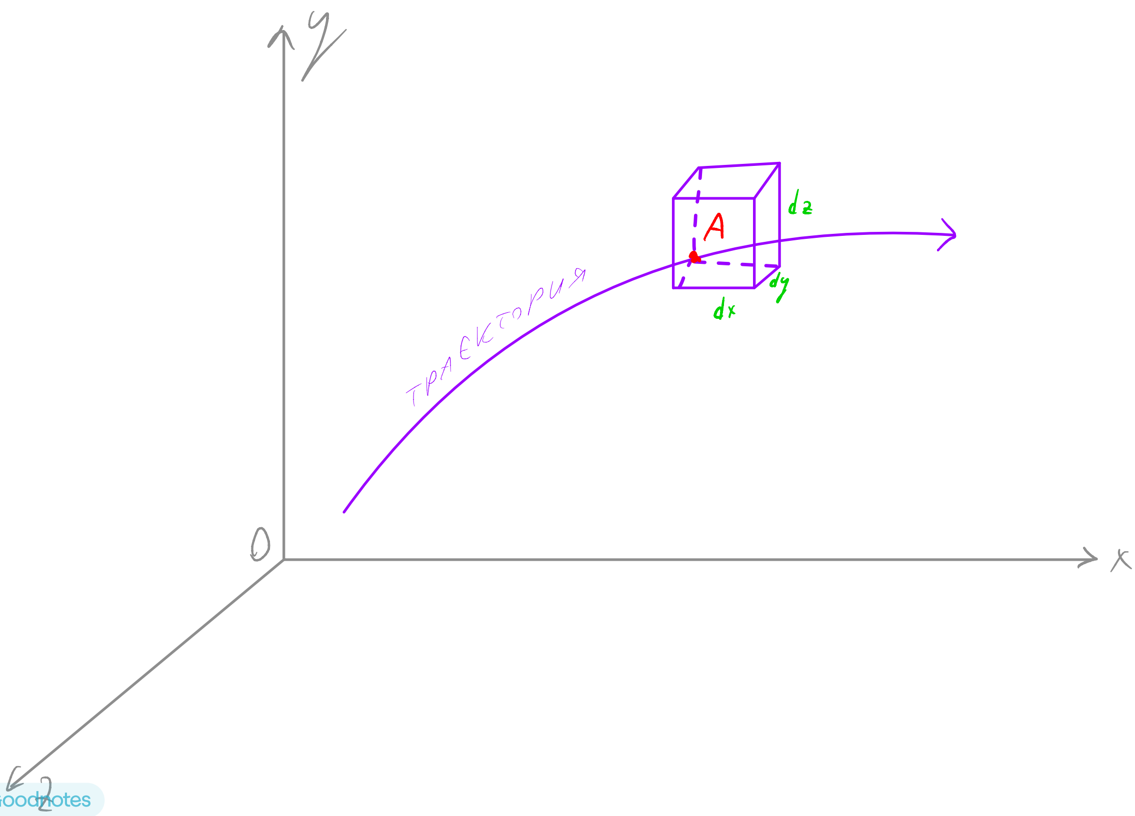
Замечания

1. Уравнение неразрывности мы получили используя метод Эйлера: фиксируется точка пространства или объём и исследуется в нем (ней) изменение параметров во времени
2. Метод Лагранжа: фиксируется чатица жидкости или бесконечно малый объём и двигаются вместе с ней по траектории её движения при этом определяются параметры потока этих частиц



Параграф 3

Уравнение движения



З.С. p

$$d(m\bar{v}) = \bar{F}\cdot dt$$

$m = const \Rightarrow$ II З.Н.

$$m\frac{dv}{dt} = \bar{F}$$

$$\bar{v} = f(x, y, z, t)$$

$$x, y, z = f_i(t)$$

$$m\frac{dv_x}{dt} = F_x$$

$$\underbrace{\rho\, dx\, dy\, dz}_{m}\,\frac{dV_x}{\underbrace{dt}_{dt}} = \underbrace{\rho\, dx\, dy\, dz}_{m}\cdot \underbrace{g_x}$$

$$-\left(\frac{\partial p}{\partial x}\,\partial x\right)\partial y\, \partial z + F_{тр,x}$$

На ось x: $$m\frac{dV_x}{dt} = g_x - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + N_x$$

4 марта
Лекция 4

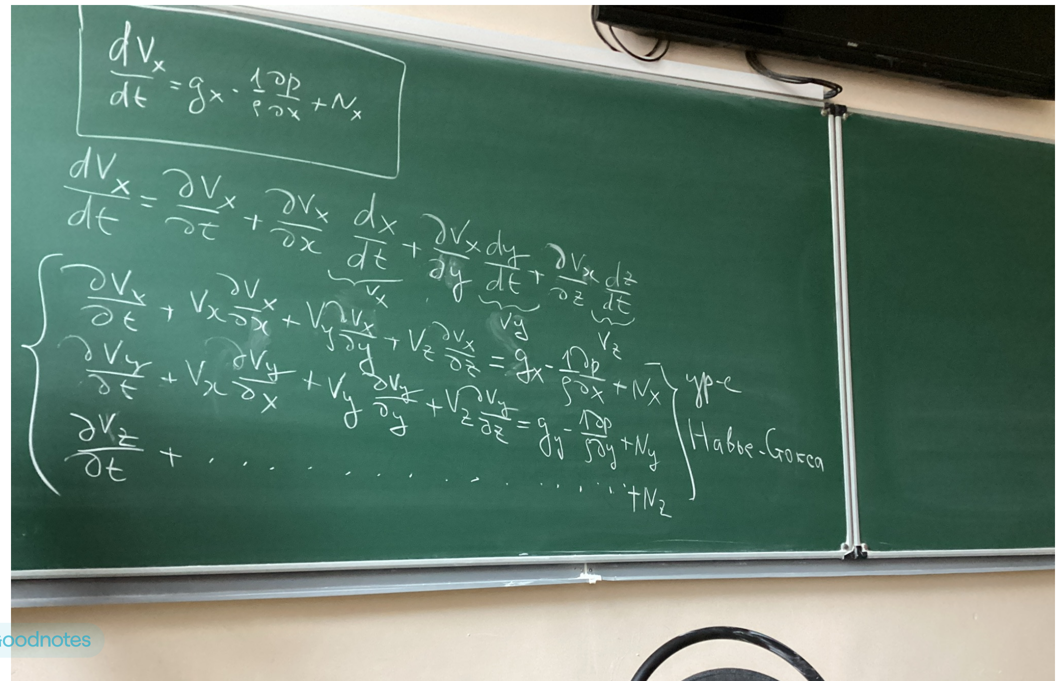
$$\frac{dV_x}{dt} = g_x - \frac{1}{\rho}\frac{dp}{\partial x} + N_x$$ - ускорение

В направлении оси x:

$$\frac{dV_x}{dt} = \frac{\partial V_x}{\partial t} + \frac{\partial V_x}{\partial x}\cdot\underbrace{\frac{dx}{dt}}_{V_x} + \frac{\partial V_x}{\partial x}\cdot\underbrace{\frac{dy}{dt}}_{V_y} + \frac{\partial V_x}{\partial z}\underbrace{\frac{dz}{dt}}_{V_z}$$

$$\begin{cases} \dfrac{\partial V_x}{\partial t} + V_x\dfrac{\partial V_x}{\partial x} + V_y\dfrac{\partial V_x}{\partial y} + V_z\dfrac{\partial V_x}{\partial z} = g_x \cdot \dfrac{1}{\rho}\dfrac{dp}{dx} + N_x \\ \dfrac{dV_y}{dt} + V_x\dfrac{\partial V_y}{\partial x} + V_y\dfrac{\partial V_y}{\partial y} + V_z\partial V = g_y + \dfrac{1}{\rho}\dfrac{dp}{\partial y} + N_y \\ \dfrac{dV_z}{dt} + \ldots = \ldots + N_z \end{cases}$$

Это уравнения Навье-Стокса для вязкой жидкости в случае трёхмерного течения и не установившегося потока



Частные случаи:

а) идеальная жидкость (это невязкая жидкость трение=0 Nx=Ny=Nz=0)

$$\begin{cases} \dfrac{dV_x}{dt} = g_x - \dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial p}{\partial x} \\ \dfrac{dV_y}{dt} = g_y - \dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial p}{\partial y} \\ \dfrac{dV_z}{dt} = g_z - \dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial p}{\partial z} \end{cases}$$

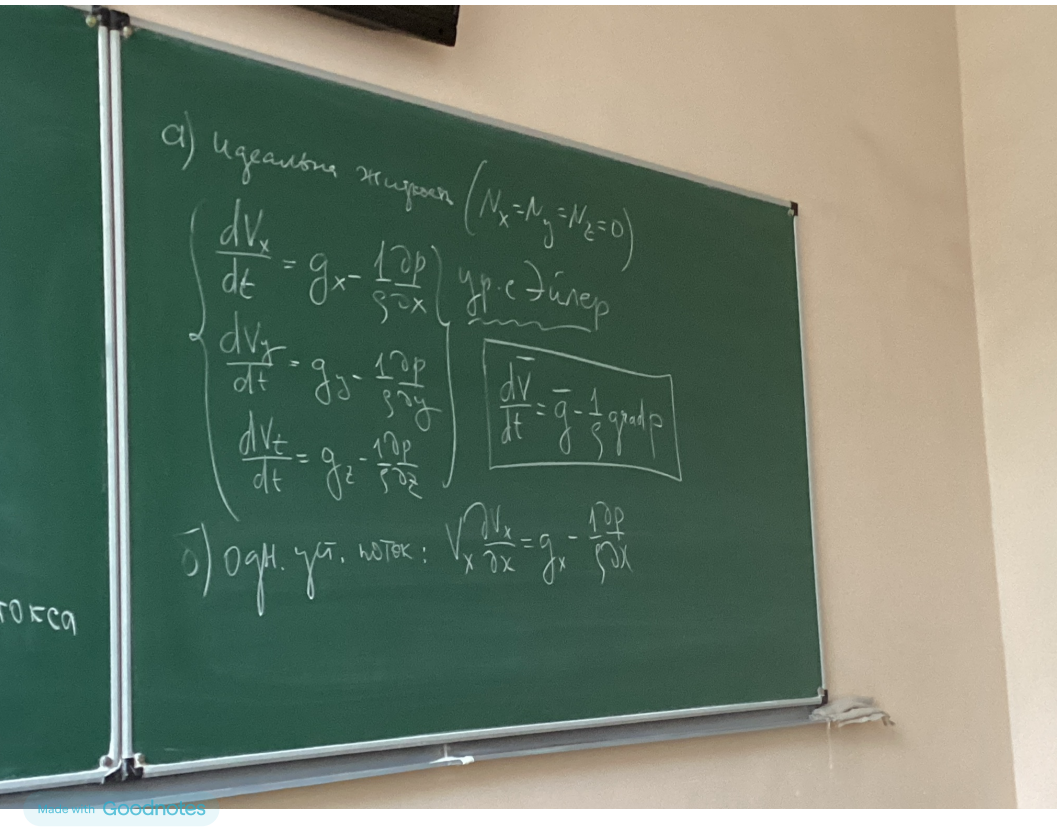
Уравнения Эйлера

или $$\frac{d\bar{V}}{dt} = \bar{g} - \frac{1}{\rho}\,\mathrm{grad}\,p$$

б) Одномерный установившийся поток

$$V_x\frac{\partial V_x}{\partial x} = g_x - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}$$

Замечание: В виду сложности решения системы в частных производных. На практике часто переходят к интегралам уравнения движения.



Уравнения Бернулли (интегральная запись уравнения движения)

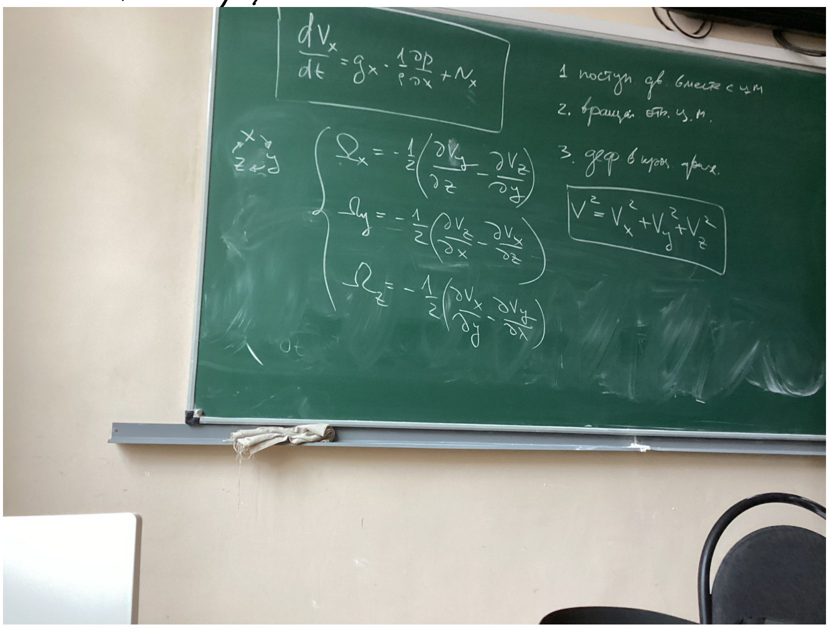
1. Поступательное движение вместе с центром масс
2. Вращательное относительно центра массы
3. Деформирование в процессе движения

Формы связи вращательного и поступательного движения:

$$\begin{cases} \Omega_x = -\frac{1}{2}\left(\frac{\partial V_y}{\partial z} - \frac{\partial V_z}{\partial y}\right) \\ \Omega_y = -\frac{1}{2}\left(\frac{\partial V_z}{\partial x} - \frac{\partial V_x}{\partial z}\right) \\ \Omega_z = -\frac{1}{2}\left(\frac{\partial V_x}{\partial y} - \frac{\partial V_y}{\partial x}\right) \end{cases}$$

Связь вращательной скорости с поступальной

$\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$ – Угловые скорости вращения жидкости вокруг соответствующих осей



$$V^2 = V_x^2 + V_y^2 + V_z^2$$

Дифференциируем это уравнение по x:

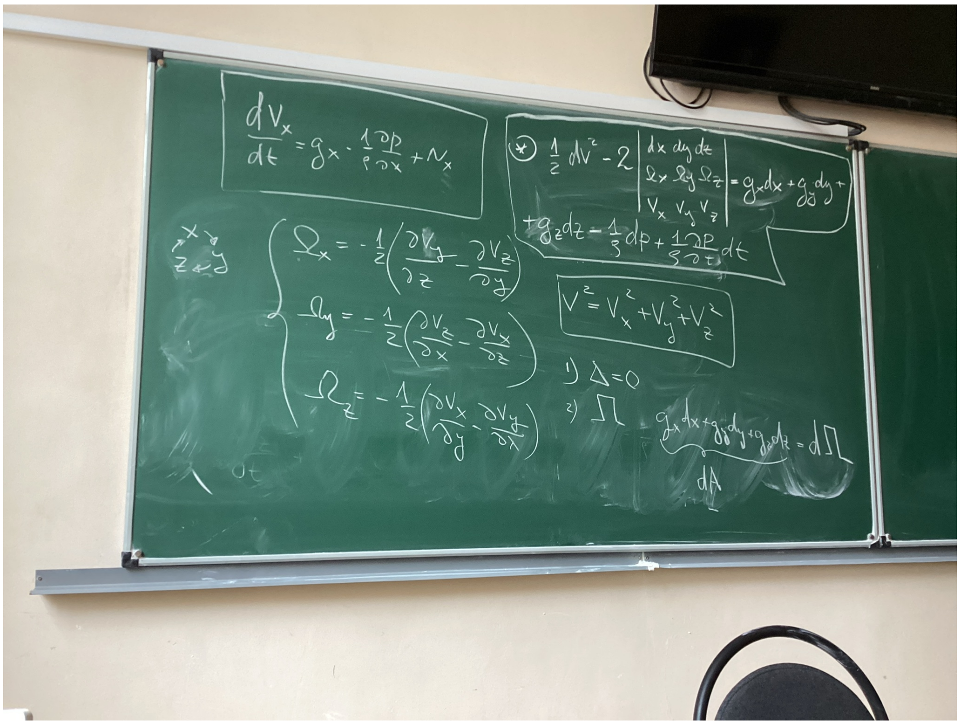
Преобразуем уравнение Эйлера (без трения) заменяя скорости поступательного движения через вращательное, умножаем построчно на dx, dy,dz. И сложим уравнения эйлера заменив частые производные полными дифференциалами. Тогда получим уравнение *

$$(*)\quad \frac{1}{2} dV^2 - 2 \begin{vmatrix} dx & dy & dz \\ \Omega_x & \Omega_y & \Omega_z \\ V_x & V_y & V_z \end{vmatrix} = g_x dx + g_y dy + g_z dz - \frac{1}{\rho} dp + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial t} dt$$

Заменили полным дифференциалом поступальное через вращательное

Введём некоторые допущения чтобы проинтегрировать:
1) определитель = 0
2) положим что массовые силы потенциальны, то есть имеют потениальную функцию p. Тогда их сумма

$$\underbrace{g_x dx + g_y dy + g_z dz}_{dA \text{ (элементарная работа)}} = d\Pi$$



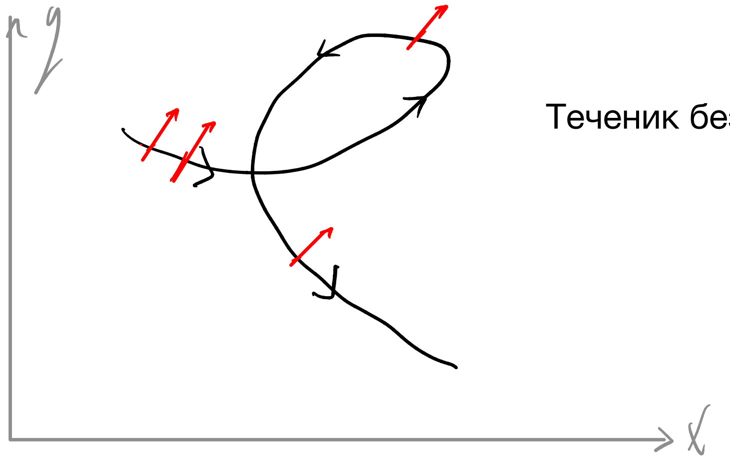
Интегрируем *

$$\frac{V^2}{2} + \int \frac{1}{\rho} dp - \int \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial t} dt - \Pi = \overset{\text{константа}}{c(t)}$$

-уравнение Бернулли для неустановившегося течения идеальной сжимаемой жидкости

Когда определитель =0, то есть когда мы можем применять этот интеграл:

а) $\Omega_x = \Omega_y = \Omega_z = 0 \quad (\bar{\Omega} = 0)$ Это случай безвихревого потока

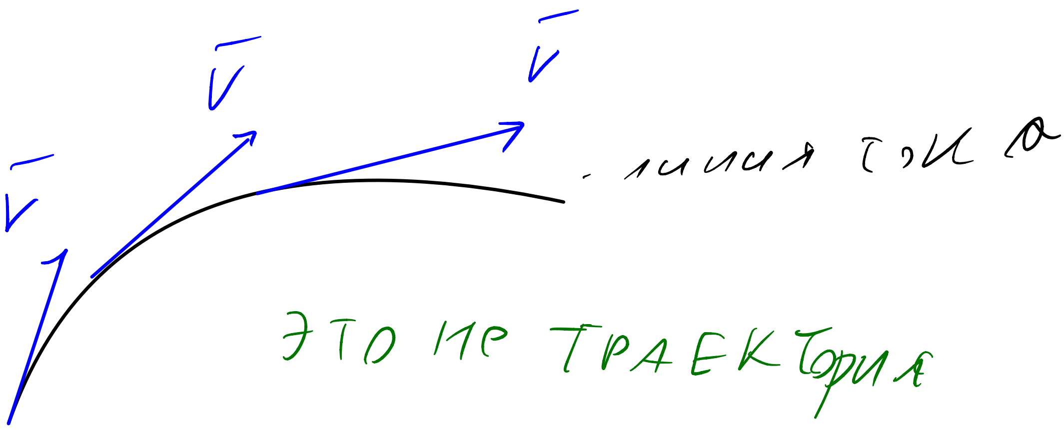


Теченик безвихревое, а складываются 2 движения

б) Определитель равен 0 когда строки пропорциональны

$$\frac{dx}{V_x} = \frac{dy}{V_y} = \frac{dz}{V_z} = \frac{1}{\lambda} \text{ – не зависит от } t$$

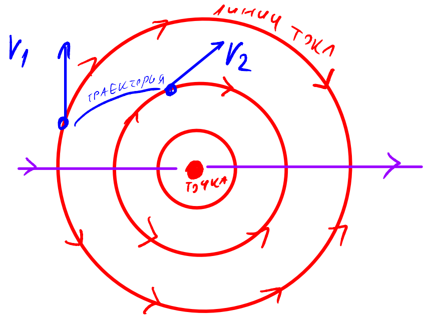
Условие б выполняется на линии тока. Линия тока - это гмт (геометрическое место точек) потока жидкости в данный момент времени, для которого справедливо следующее условие: вектор скорости потока в любой точке касателен к данной линии тока.

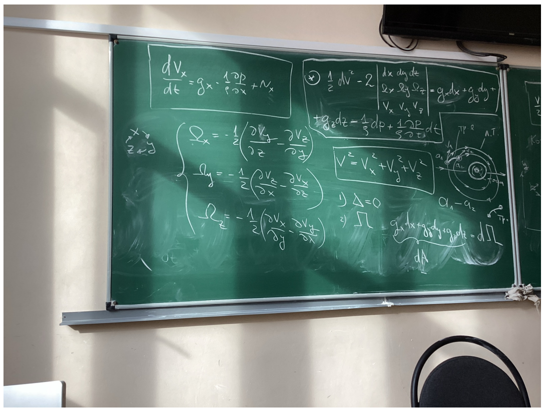


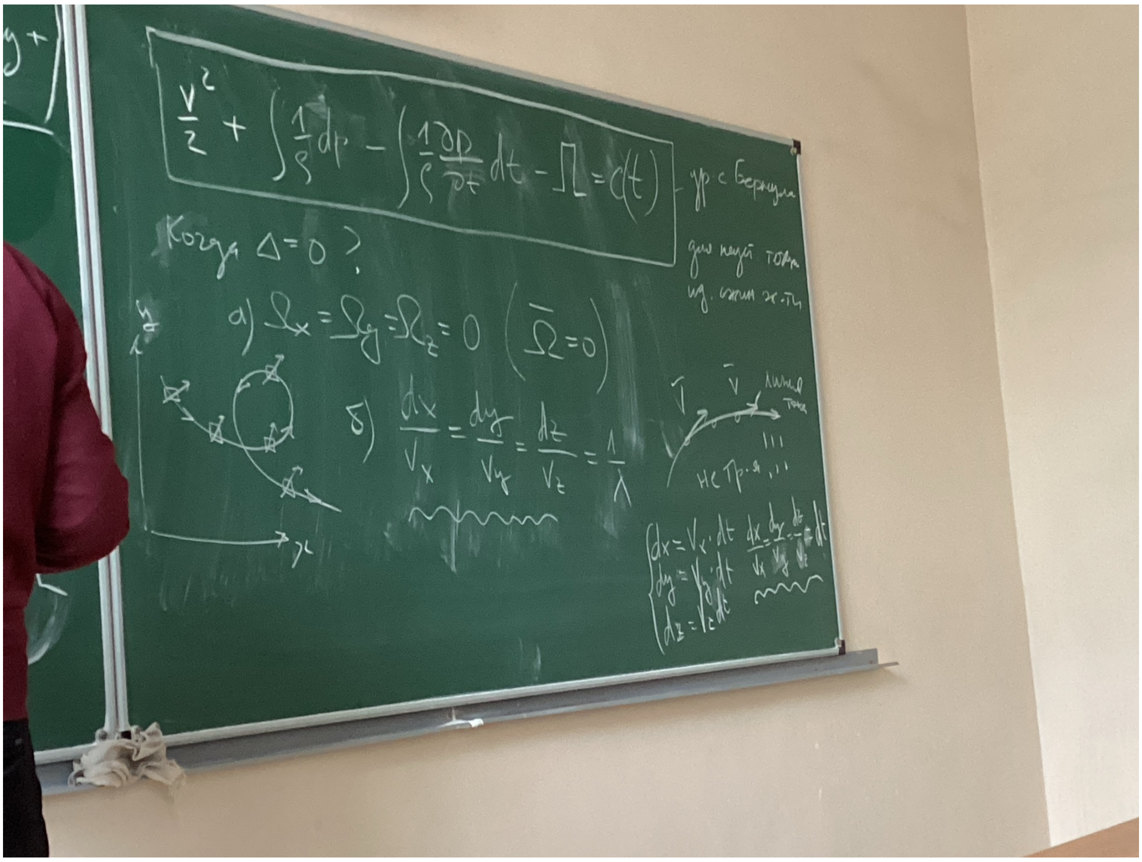
$$\begin{cases} dx = V_x\,dt \\ dy = V_y\,dt \\ dz = V_z\,dt \end{cases}$$

$$\frac{dx}{V_x} = \frac{dy}{V_y} = \frac{dz}{V_z} = dt \leftarrow \text{зависит от } t$$

Отличие траектории от линии тока. В траекторию в явной виде входит время и в разные моменты времени будут другие линии







Это в случае неустановившегося течения. В случае установившегося линия тока и траектории совпадают

в) Вихревая линия

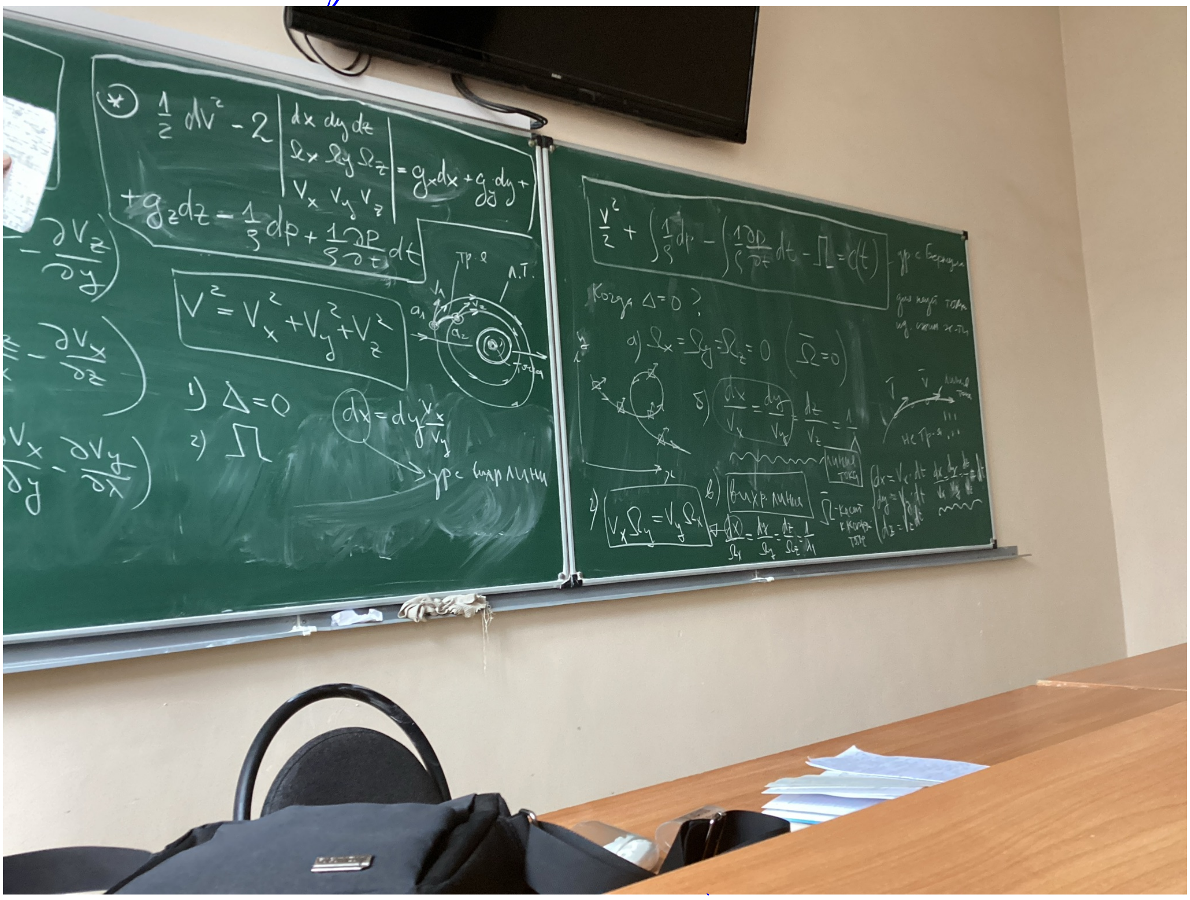
вектор Ω - касательный в каждой точке $dx\,\Omega_y = V_y\,\Omega_x$

г) уравнение справедливо когда вихревая линия и линия тока совпадают:
Учловия:

$$V_x \Omega_y = V_y \Omega_x$$

$$\frac{dx}{\Omega_x} = \frac{dy}{\Omega_z} = \frac{dz}{\Omega_z} = \frac{1}{\lambda_1}$$ -уравнение для вихревой линии

$$dx = dy\frac{V_x}{V_y}$$



Частные случаи уравнения Бернулли:

1. Установившийся поток

$$\frac{V^2}{2}+\int\frac{dp}{\rho}-\Pi=const$$

2. Массовыми силами можно принебречь $\frac{V^2}{2}+\int\frac{dp}{\rho}-\Pi=const$, $\Pi=0$

Если: $$\frac{V^2}{2}+\int\frac{dp}{\rho}=const$$

- Вроздух в рабочей часии аэродинамической трубы.
- движение газа по сверхзвуковой части сопла, а также в реактивной струе газа и стекающей из сопла
- Движение газа в канале ствола.

3. баротропный поток - это поток в котором давление и плотность связаны одной функцией и от температуры не зависят и тогда уравнение примет вид:

$$\frac{V^2}{2}+f(p)=const$$

4. Поток несжимаемый $\frac{V^2}{2} + \frac{P}{\rho} = const$

Это уравнение можно использовать для измерения скорсоти трубками Пито.

11 марта
Лекция 5

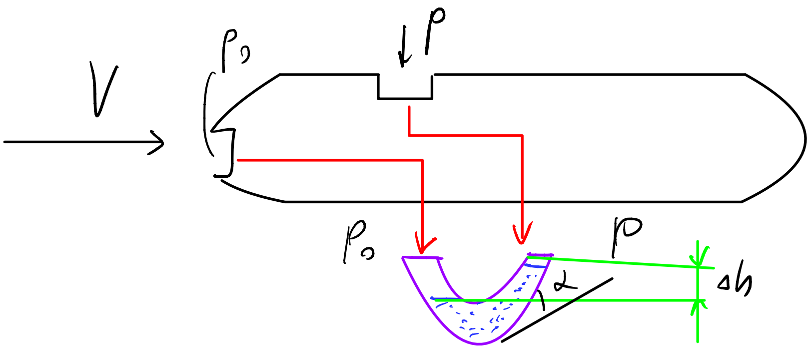
На след лекцции на 2 половине рк. 3 вопроса например "основные уравнения вывод", письменно. Система координат и углов. Конспектами пользоваться нельзя.

$$\frac{V^2}{2} + \frac{P}{\rho} = \frac{P_0}{\rho}$$ - для несжимаемой жидкости

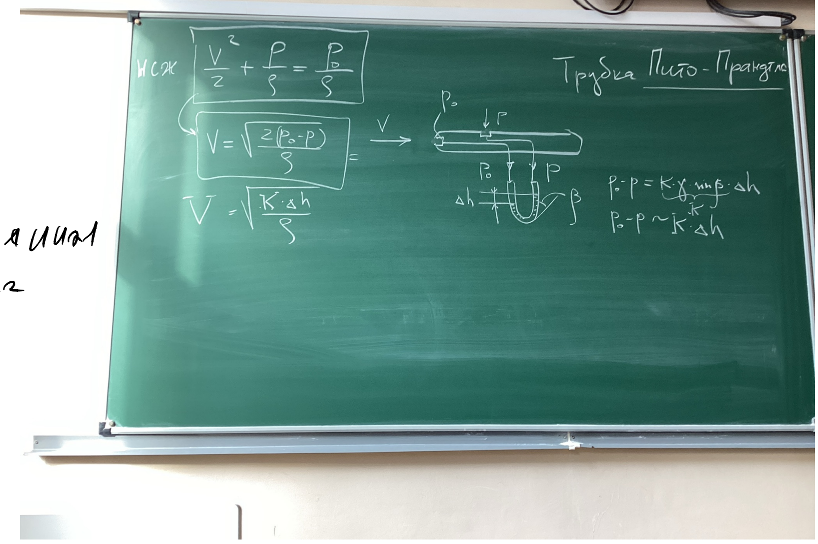
P_0 - давление торможения.

Часто используется для измерении скорости потока в несжимаемом дозвуковом потоке

Трубка Пито-Прандля использвется для измерени скорости потока



$$p - p_0 = \underbrace{k \cdot \gamma \cdot \sin\beta}_{k} \cdot \Delta h$$



$$p - p_0 \sim k \cdot \Delta h$$

к – постоянная величина

$$V = \sqrt{\frac{2(p - p_0)}{\rho}}$$

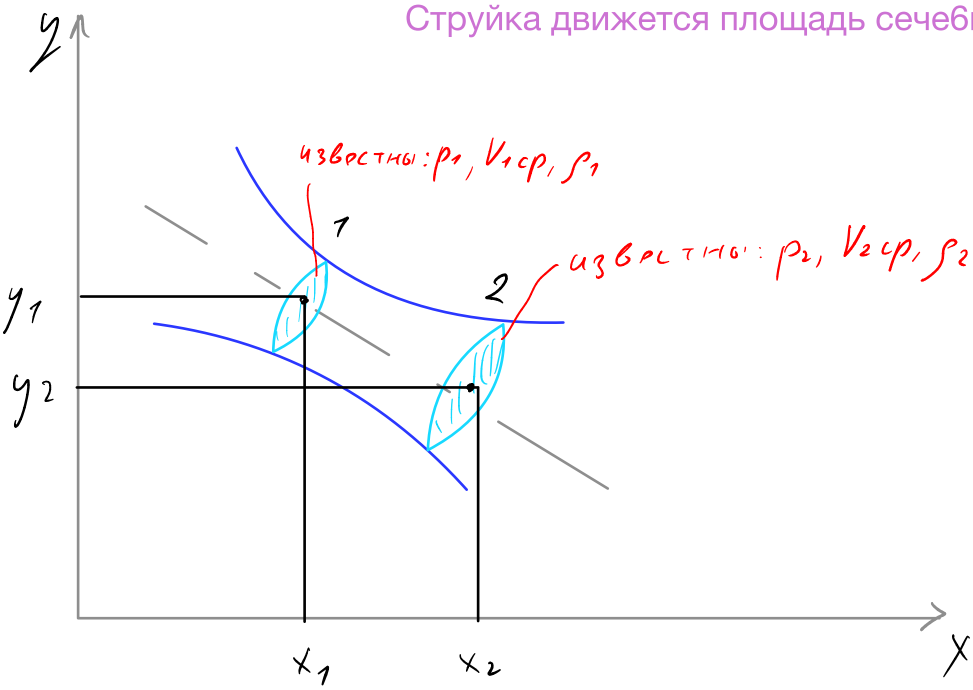
„2" в к

$$V = \sqrt{\frac{k \cdot \Delta h}{\rho}}$$

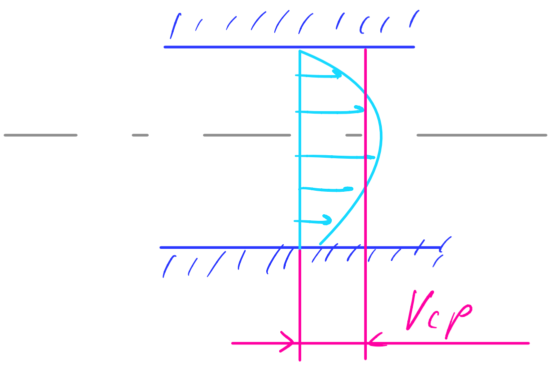
13

Уравнение движения для вязких несжимаемых жидкостях (основное уравнение гидроаэродинамики)

Струйка движется площадь сечебия меняется

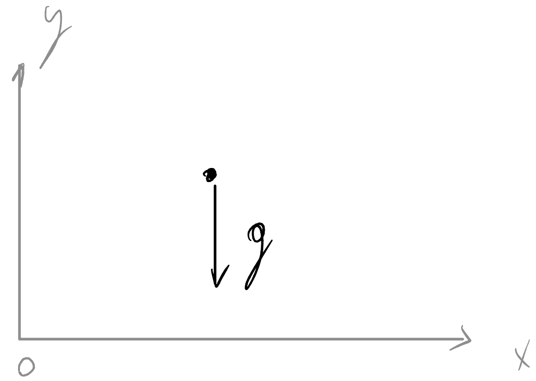


профиль скорости



осреднили прямоугольником

$$V_{ср} = \frac{Q}{S}$$



$$d\Pi = g_x dx + g_y dy + g_z dz$$ – общий случай

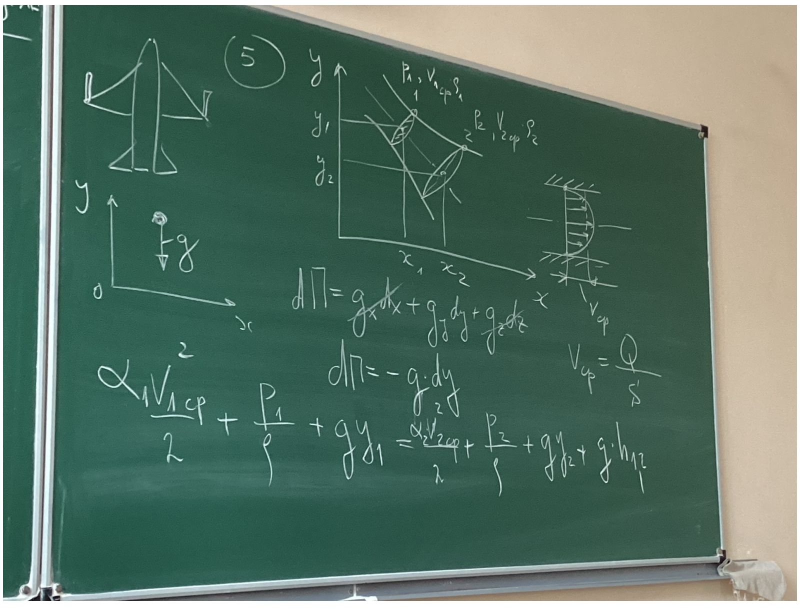
Если учитывать только g: $d\Pi = -g\,dy$

В результате получим:

$$\alpha_1 \cdot \frac{V_{1\,ср}^2}{2} + \frac{P_1}{\rho} + g y_1 = \frac{\alpha_2 V_{2\,ср}^2}{2} + \frac{P_2}{\rho} + g y_2 + g h_{12}$$

h_{12} – Потери при движении жидксти от сечения 1 до сечения 2

$\left.\begin{matrix}\alpha_1\\ \alpha_2\end{matrix}\right\}$ – Учитывают режим течения в сечениях 1 и 2



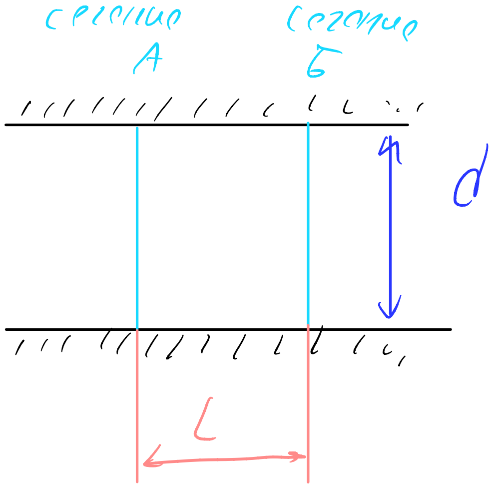
тут суммарно

$$\boxed{\frac{\alpha_1 V_{ср}^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + y_1 = \frac{\alpha_2 V_{2ср}^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + y_2 + h_{1,2}}$$

Основное уравнение гидроаэродинамики

$\alpha_{лам} = 2$

$\alpha_{турб} = 1{,}045$



$h_{1,2}$ — потери на трение

$$h_{1,2} = \lambda \frac{L}{d} \frac{V_{cp}^2}{2g}$$

λ — Безразмерный коэффициент потерь

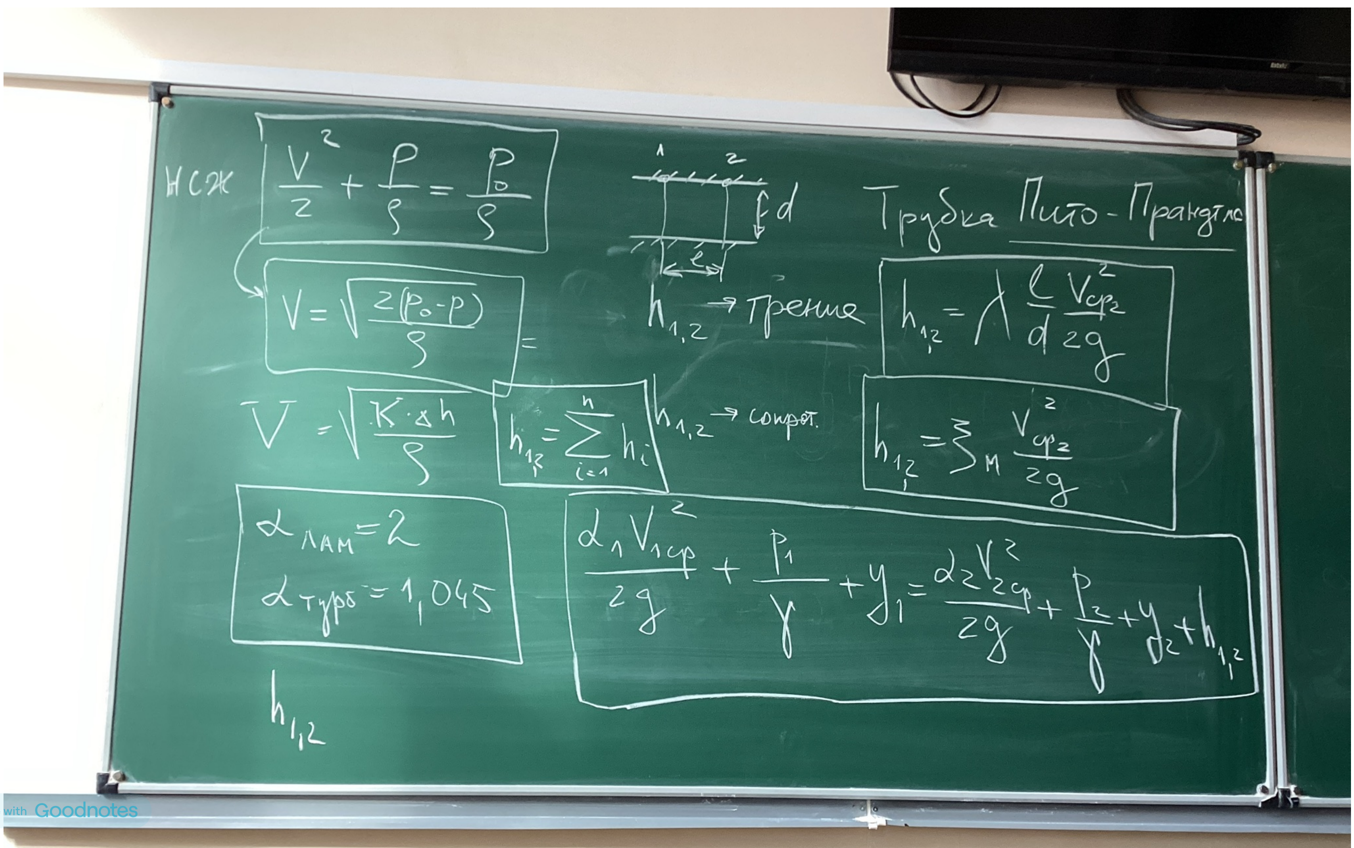
$h_{1,2}$ — Потери на сопротивление прямых и фасонных участков трубопровода

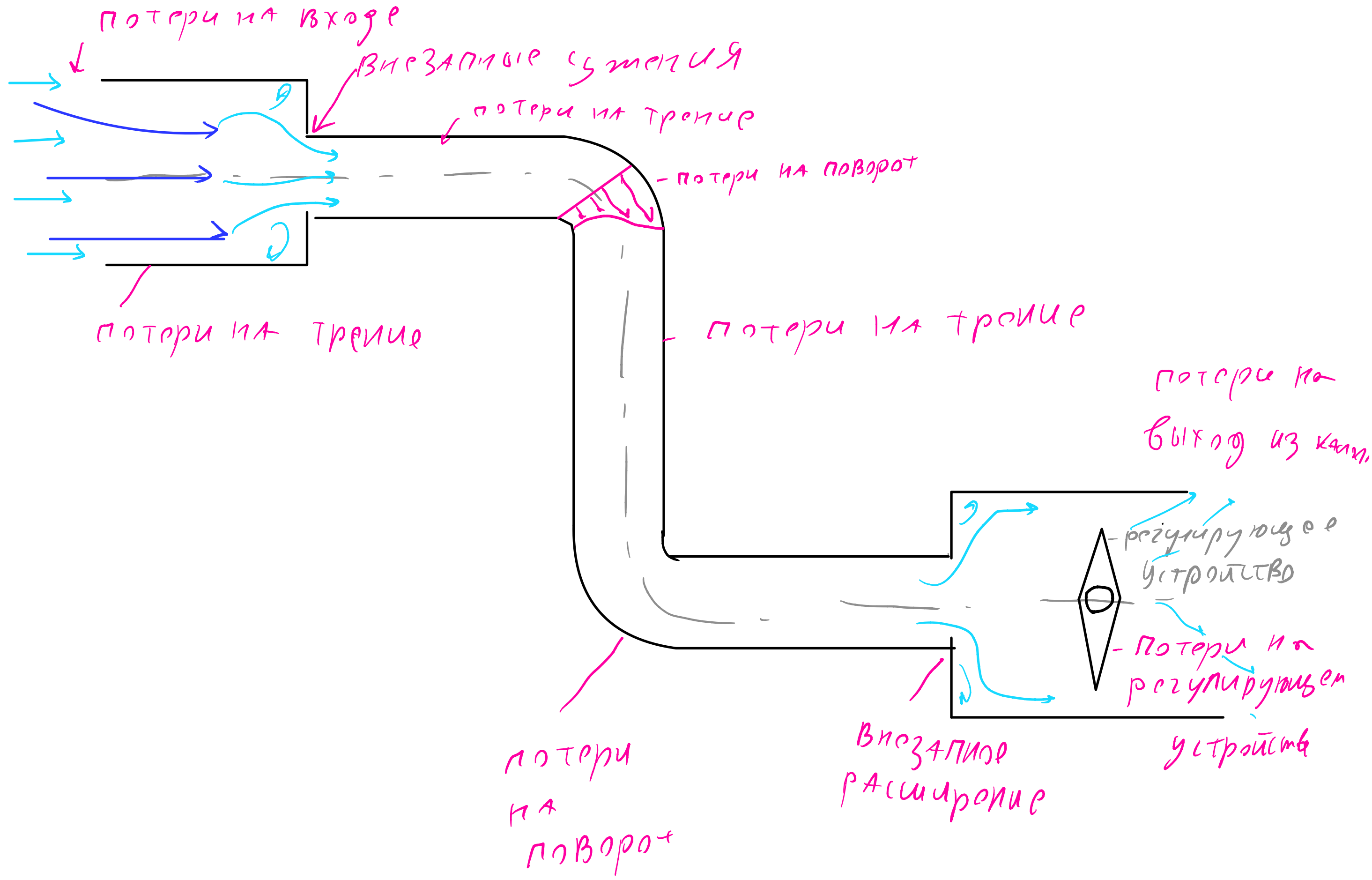
$$h_{1,2} = \xi_м \frac{V_{cp\,2}^2}{2g}$$

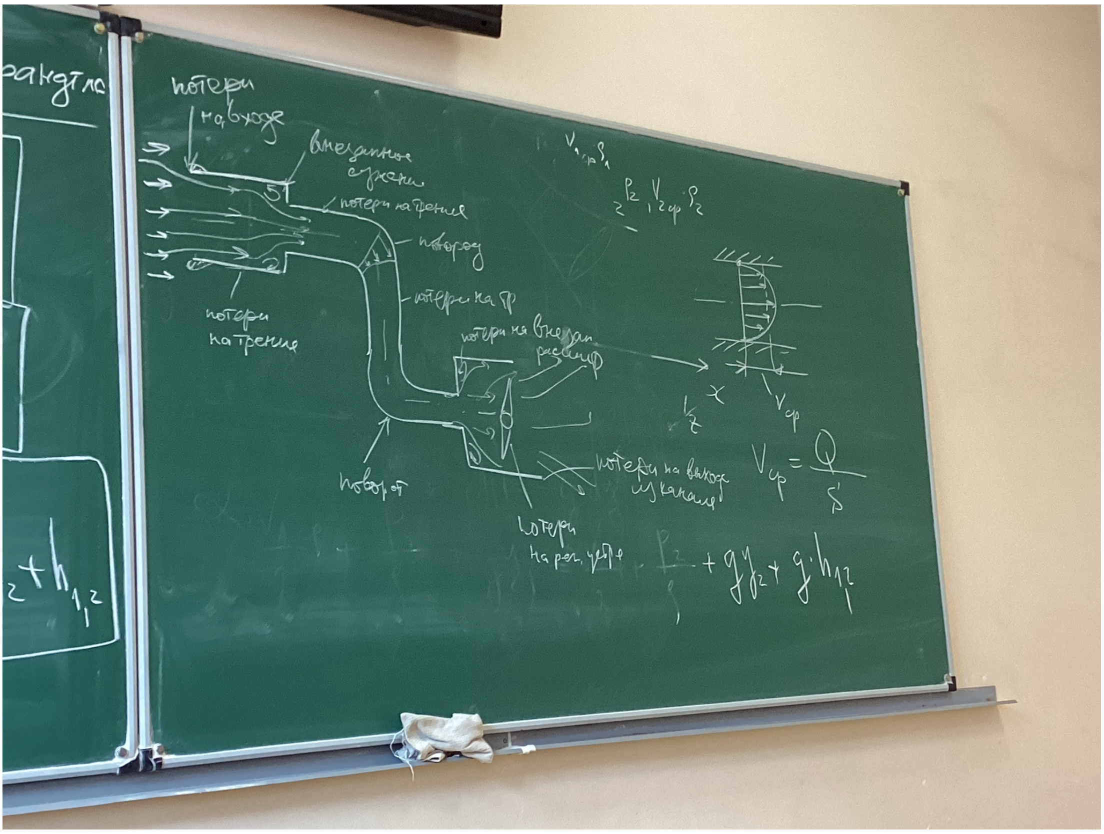
$\xi_м$ — коэффициент потерь на сопротивления

И Дельчик справочник по гидросопротивлегиям прямых и фасонных участков трубопроводов $(\xi_м, h)$

$$h_{12} = \sum_{i=1}^{n} h_i$$





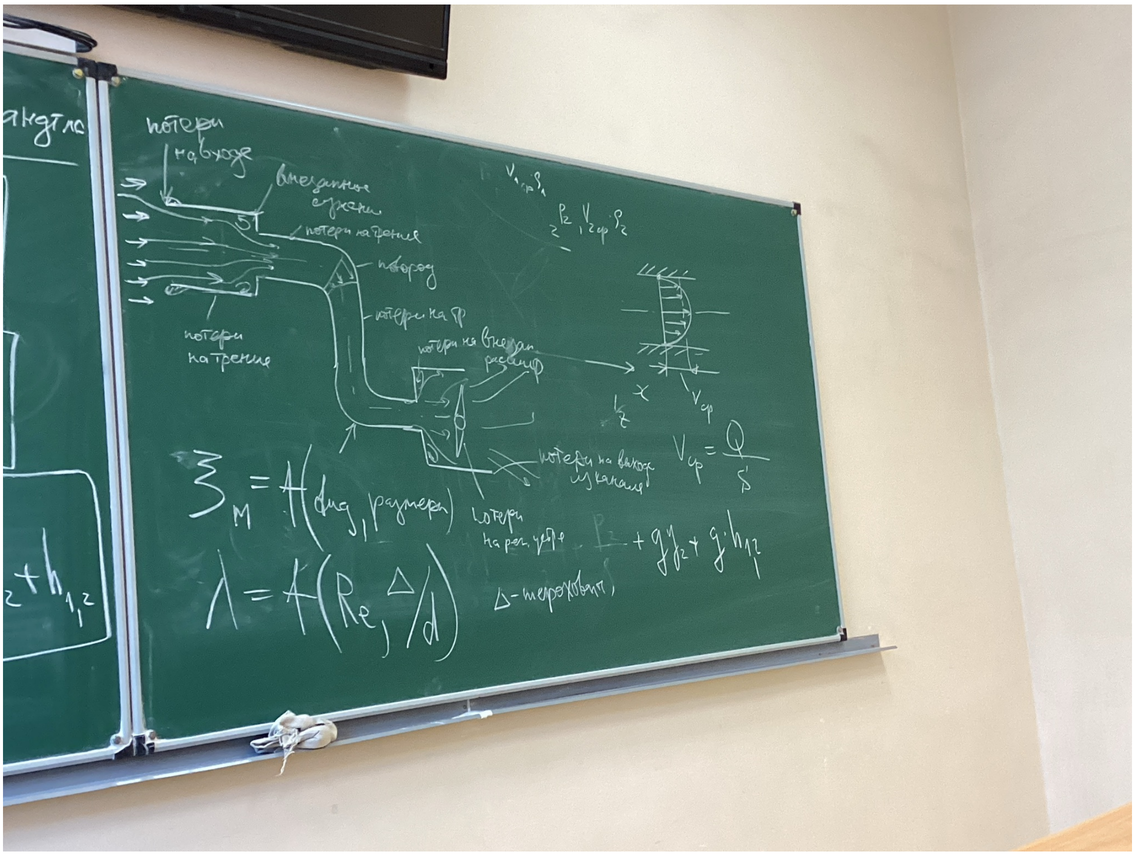


Приницип суперпозиции может применятся если расстояние между ближайшими сопротивлениями 5-6 L/d калибр. Если
Это расстояние меньше, то потери на поворот начинаются влиять.

рег устройство, внезапное расширение и т.д)

$\zeta_м = f($вид, размер$)$

$\lambda = f(Re, \Delta/d)$ Δ - шероховатость



52 **Уравнение энергии**

В изолированной системе полный запас энергии не изменяется. При этом один вид энергии может переходить в другой.

Частный случай уравнения. Первый закон термрдинамики.

$$\boxed{dq = dU + dL}$$

q - кол-во подводимого извне тепла

U - внутренняя энергия

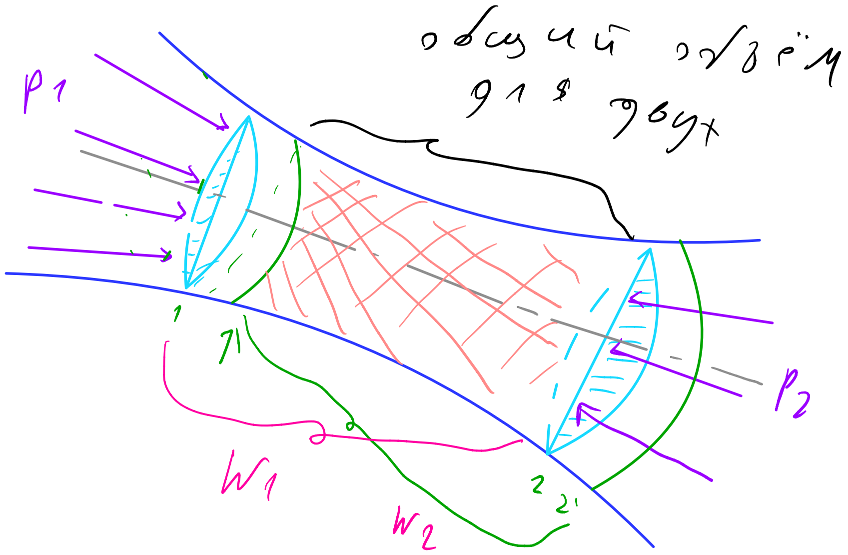
L - вся работа совершаемая телом

$$dL = dL_{техническая} + dL_{трения}$$

Правило знаков dq положительны, если тепло подводится
положительны dL если газ расширяется

Рассмаотрим Баланс энергии

Струйка



Изменение энергии в общем объеме не учитываем, тогда изменение энергии определяется разностью энергии в двух бесконечно малых объемах

1. Для единичной массы за единичное время dt изменение киниэнергии будет равняться

$dE_k = d\left(\frac{V^2}{2}\right)$ если единичная масса, то без m

2. Внутренния энергия $dU = C_v \cdot dT$

C_v - уд теплоёмкость при $V = const$

$\boxed{R = C_p - C_v}$ Уравнение майера

3. Потенциальная энергия (без учета знака) $d\Pi = g\,dy$

4. Работа сил давления $dL_{доб} = d(p \cdot w) = d(RT)$

где W объём

5. Во время движения к стройке может подводится или отводиться внешнее тепло

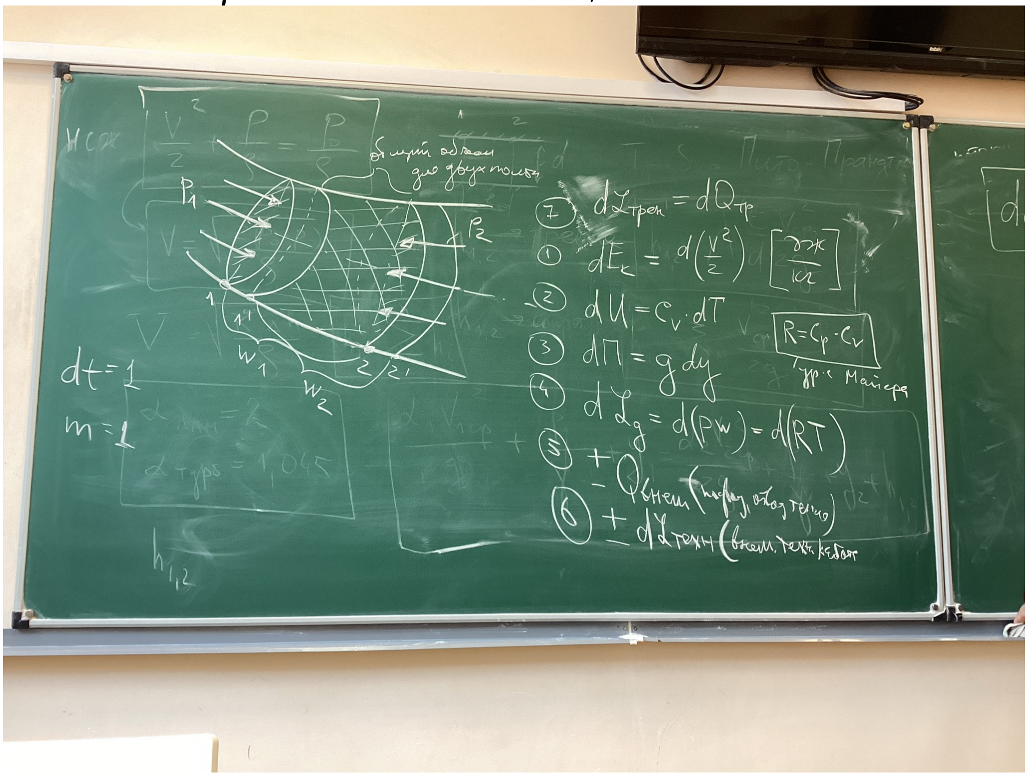
$\pm Q_{внеш}$ отвод тепла

6. Может совершаться положительная и отрицательная внешняя техническая работа

$$\pm dL_{техн}$$

7. Внутренняя работа - работа сил трения

$$dL_{трен} = dQ_{тр}$$



1:20 Баланс: расход энергии должен быть равен её приходу

$$d\left(\frac{V^2}{2}\right) + d(C_v T) + d\Pi + d(RT) + \underbrace{dQ_{внеш}}_{\text{(расход - отвод тепла)}} + \underbrace{dL_{техн}}_{\text{(турбина)}} + dL_{тр} = \underbrace{dQ_{внеш}}_{\text{подвод - приход}} +$$

$$+ \underbrace{dL_{техн}}_{\text{компрессор}} + dQ_{трен}$$

интегрируем

$$\frac{V_2^2}{2} - \frac{V_1^2}{2} + C_v(T_2 - T_1) + g(y_2 - y_1) + R(T_2 - T_1) + \underbrace{Q_{внеш}}_{\text{расход}} + \underbrace{L_{техн}}_{\text{турбина}} +$$

$$+ \cancel{L_{трение}} = Q_{внеш} + \underbrace{L_{техн}}_{\text{компрессор}} + Q_{тр}$$

$$C_p(T_2 - T_1)$$

полная энергия работа тепло

$$\boxed{\frac{V^2}{2} + C_p T \pm L_{техн} \mp Q_{внеш} = const}$$

Сумма полной энергии, работы и тепла, подведенных или отведенных от газа велечина постоянная.

Частные случаи: