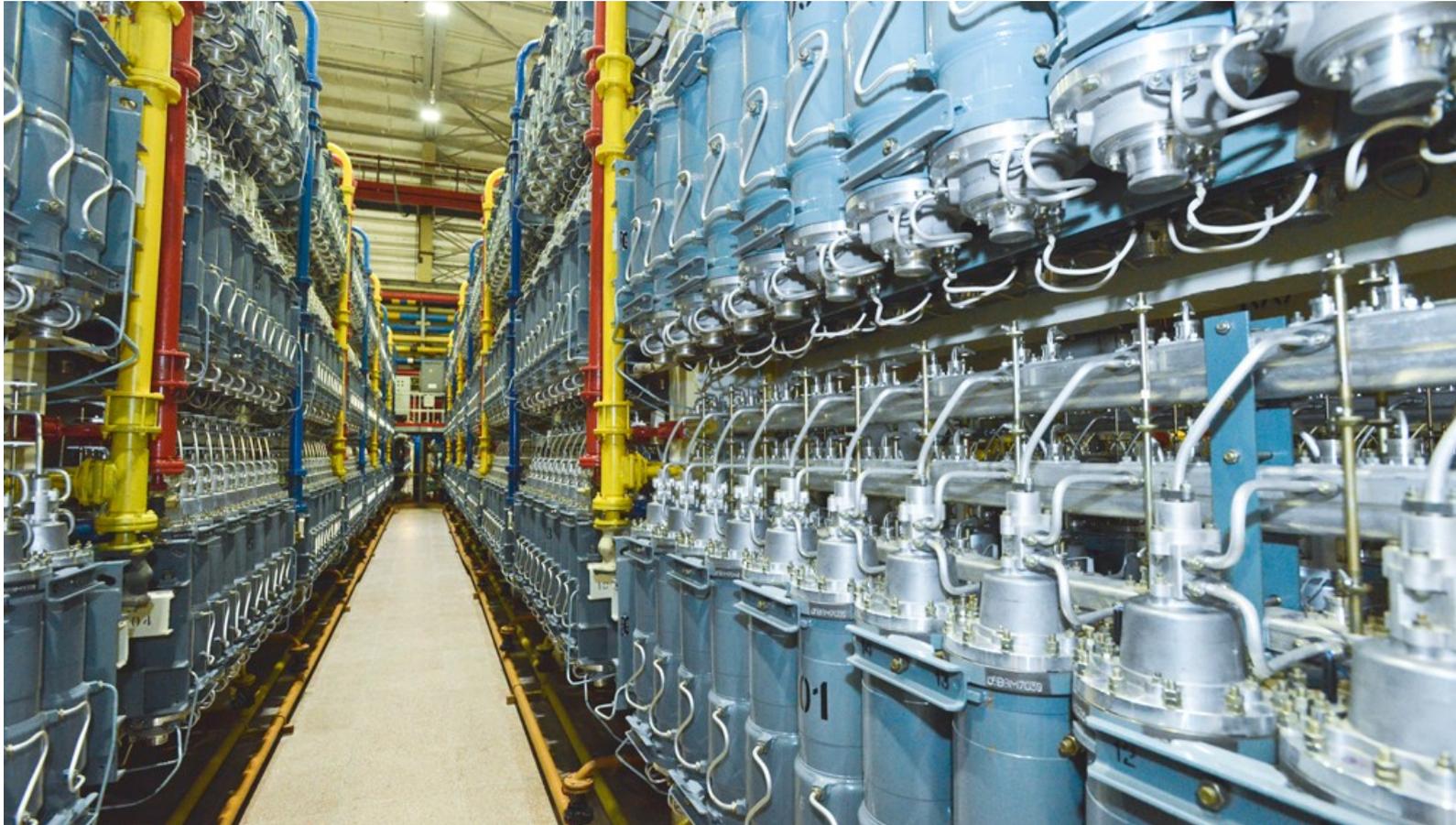


Волны в сверхсильных центробежных полях $\sim 10^6$ g.

С.В.Боговалов

Национальный исследовательский ядерный
университет (МИФИ)

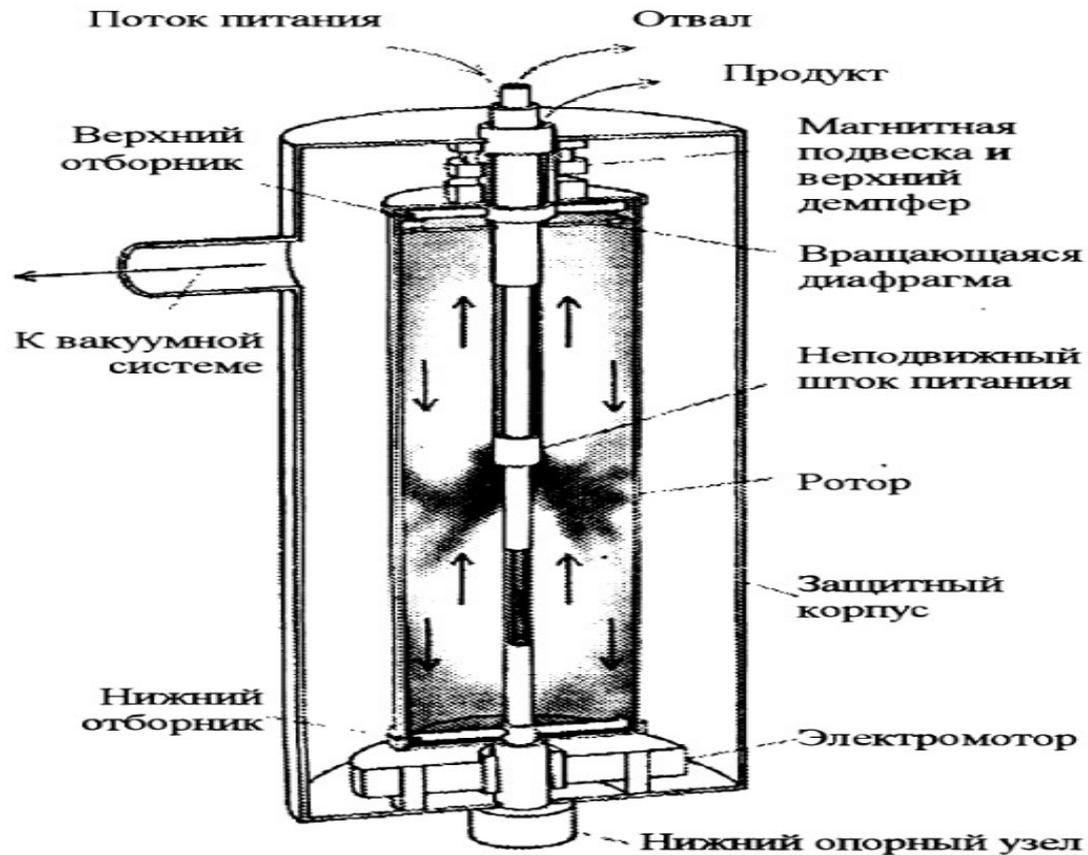
Происхождение полей 10^6 g



<https://strana-rosatom.ru/2022/04/19/na-ehz-dosrochno-vveli-v-ekspluataciju-g/>

Детский день в родде 2024

Конструкция газовой центрифуги



Свойства течения газа в газовой центрифуге

- Скорость вращения ротора ~ 800 м/с. Радиус ротора ~ 6 см. Скорость звука в $UF^6 \sim 87$ м/с. Число Маха > 9
- Газ сосредоточен в слое ~ 3 мм около стенки ротора. Остальное вакуум
- Центробежное ускорение $\sim 10^6$ g.
- Газ в ГЦ представляет собой классическую стратифицированную среду

$$p = p_w \exp\left(\frac{\gamma V^2}{2c^2} \left(\frac{r^2}{a^2} - 1\right)\right) \quad \rho = \rho_w \exp\left(\frac{\gamma V^2}{2c^2} \left(\frac{r^2}{a^2} - 1\right)\right)$$

Сравнение с известными гравитационными полями

Земля — $1g$

Солнце — $28g$

Белый Карлик (ближайший к нам) — $4 \times 10^5 g$.

Центрифуга — $10^6 g$

История создания центрифуг для обогащения урана

В 1919 г. Ф.Линдеман и Ф.Астон высказали идею разделения изотопов в центробежном поле.

В 1934 разделение изотопов хлора

Начало 1940 - ых годов. Группа В.Грота впервые использовала аксиальную циркуляцию для умножения радиального эффекта разделения.

Перспектива создания атомного оружия – работы в Германии, США (Манхэттенский проект), СССР.

Основным методом обогащения урана в США и СССР в это время стал термодиффузионный. Недостатком является высокое энергопотребление.

С 1936 г. Разработкой центрифуги для разделения изотопов урана занималась группа Ф.Ланге, но в 1952 г. испытания горизонтальной ГЦ были прекращены как бесперспективные.

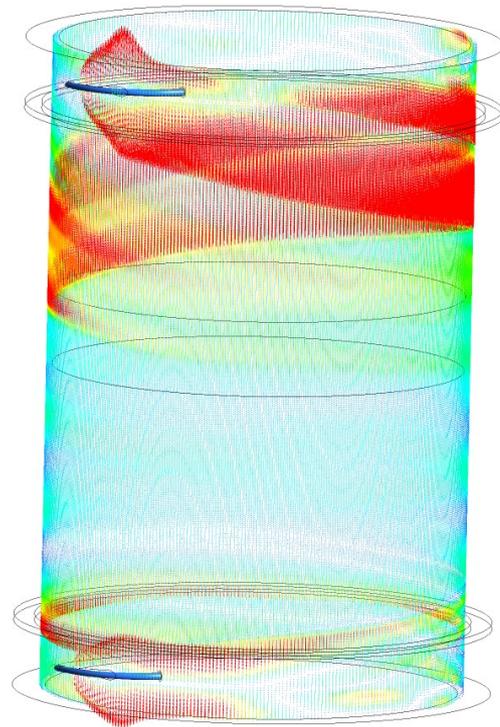
После войны к работам в Сухумском физико-техническом институте привлечены М.Штенбек, Г.Циппе, Р.Шеффель. Вертикальная центрифуга. 10 Звеньев, соединенных сильфонами. Конструкция непригодна для промышленного производства и эксплуатации.

Тем не менее работы были продолжены. В 1953 . в ОКБ Ленинградского Кировского завода создана успешная короткая центрифуга. С тех пор создано много поколений ГЦ. В 1992 в СССР полностью отказались термодиффузионного метода обогащения урана. В настоящее время РФ является лидером в технологии центробежного обогащения урана.

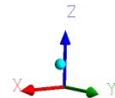
В США последний завод термодиффузионного обогащения урана сломан в 2010 г. Собственной технологии обогащения урана нет. Только завод URENCO на территории США.

Численное моделирование течения газа в ГЦ.

Velocity (Projection)
Vector 1
4.000e+01
3.000e+01
2.000e+01
1.000e+01
0.000e+00
[m s⁻¹]



*Borman V.D., Bogovalov S.V.,
Borisevich V.D., Tronin I.V., Tronin V.N.*
The computer simulation of 3d gas
dynamics in a gas centrifuge//
Journal of Physics: Conference Series
2016, V. 751 P. 012017



Мотивация исследования волн в газовой центрифуге.

Газоотборники создают ударные волны, переходящие в спиральные волны малой амплитуды.

- Вопрос

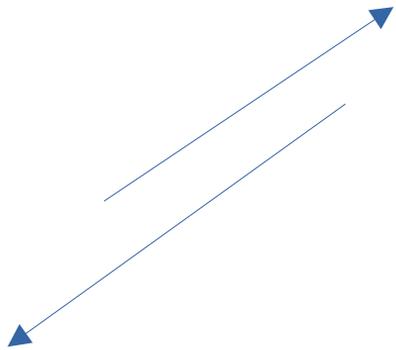
1. Как эти волны влияют на работу ГЦ.

Каковы свойства этих волн?

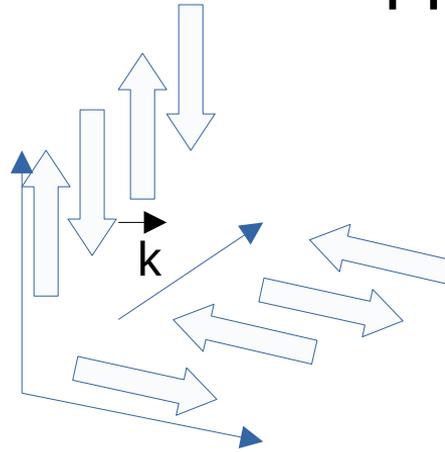
Как они влияют на разделение?

Волны в идеальном газе.

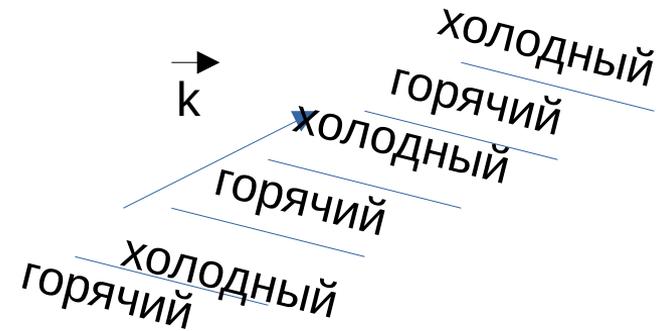
5 типов волн в обычном идеальном газе



Две продольные
Звуковые волны
 $\omega = kc$



Две поперечные
вихревые волны
 $\omega = 0$



1 Энтропийная волна
 $\omega = 0$

Число типов волн равно числу уравнений
Нелинейные волны - 2024

Система линеаризованных уравнений

$$1 \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho_0 \vec{v} = 0$$

$$3 \quad \frac{\partial \rho_0 v_i}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x_i}$$

$$1 \quad \rho_0 C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} = 0$$

$$\frac{p}{p_0} = \frac{\rho}{\rho_0} + \frac{T}{T_0}$$

$$p = \rho c^2$$

c – скорость звука

Волны в гравитационном поле

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho_0 \vec{v} = 0$$

$$\rho_0 \frac{\partial v_i}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} - \rho g$$

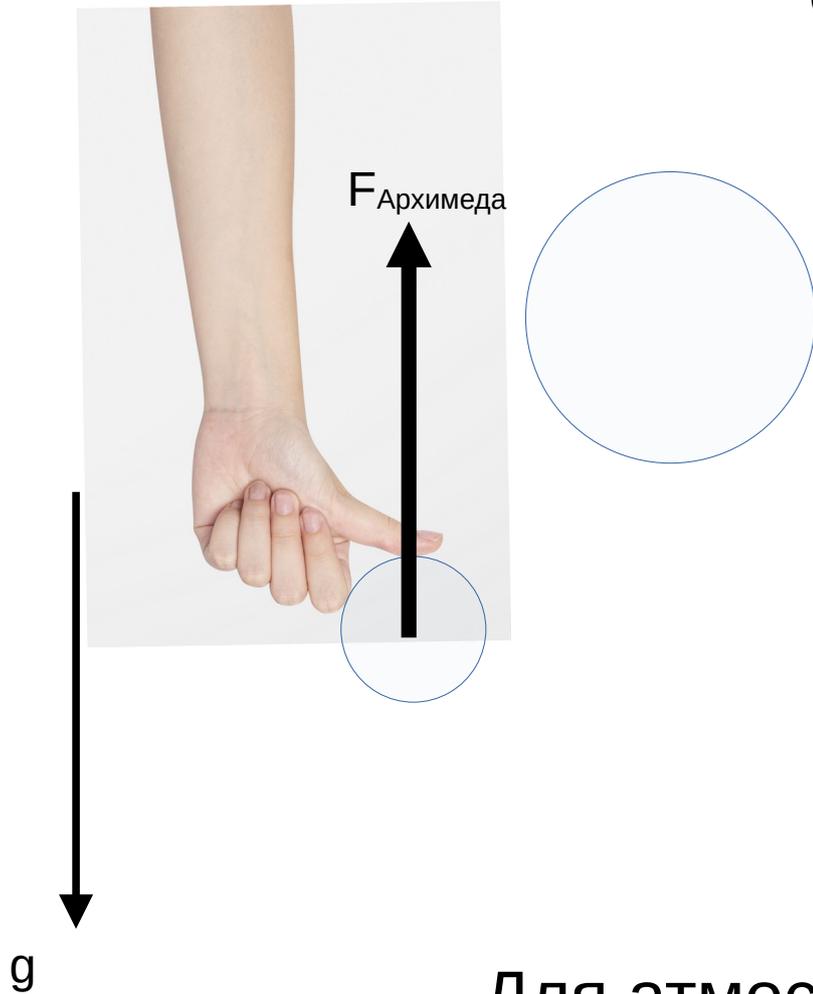
$$\rho_0 C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \rho_0 v_z g = 0$$

$$\frac{p}{p_0} = \frac{\rho}{\rho_0} + \frac{T}{T_0}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = c^2 \frac{\partial \rho}{\partial t} - \rho_0 v_z g (\gamma - 1)$$

Энтропия газа меняется по высоте

Частота плавучести (Брента - Вяйсяля)

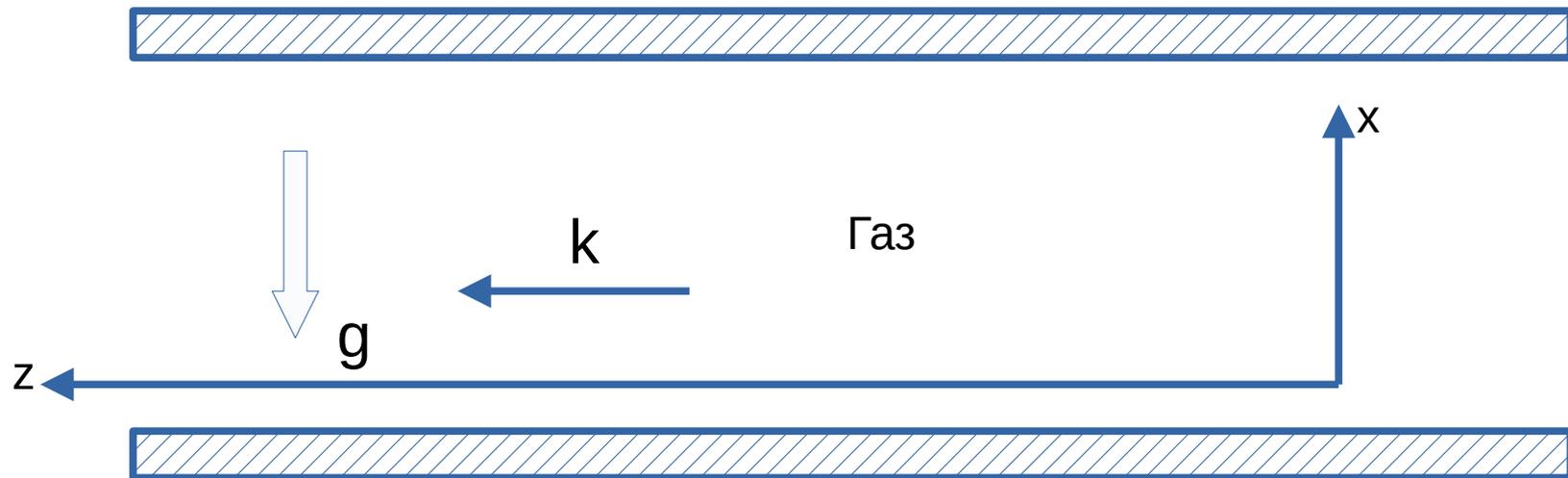


$$N^2 = \frac{g^2 (\gamma - 1)}{c^2}$$

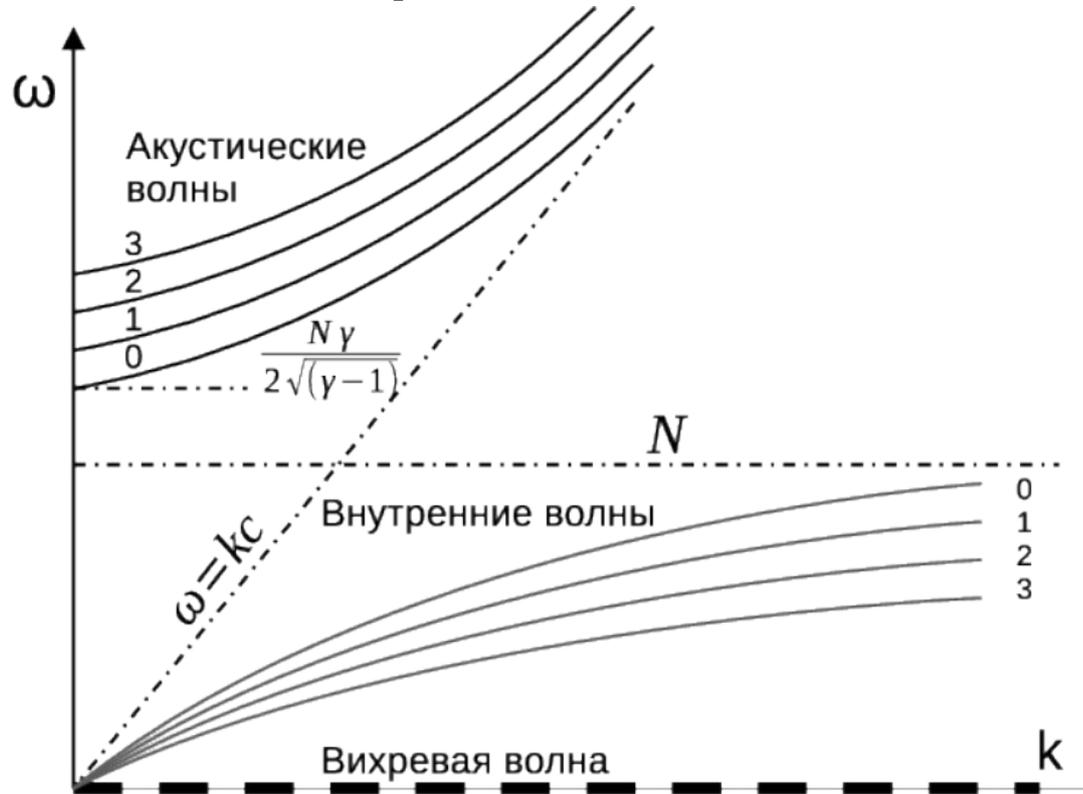
$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

Для атмосферы период колебаний
на частоте плавучести $T=5.6$ мин.

Постановка задачи



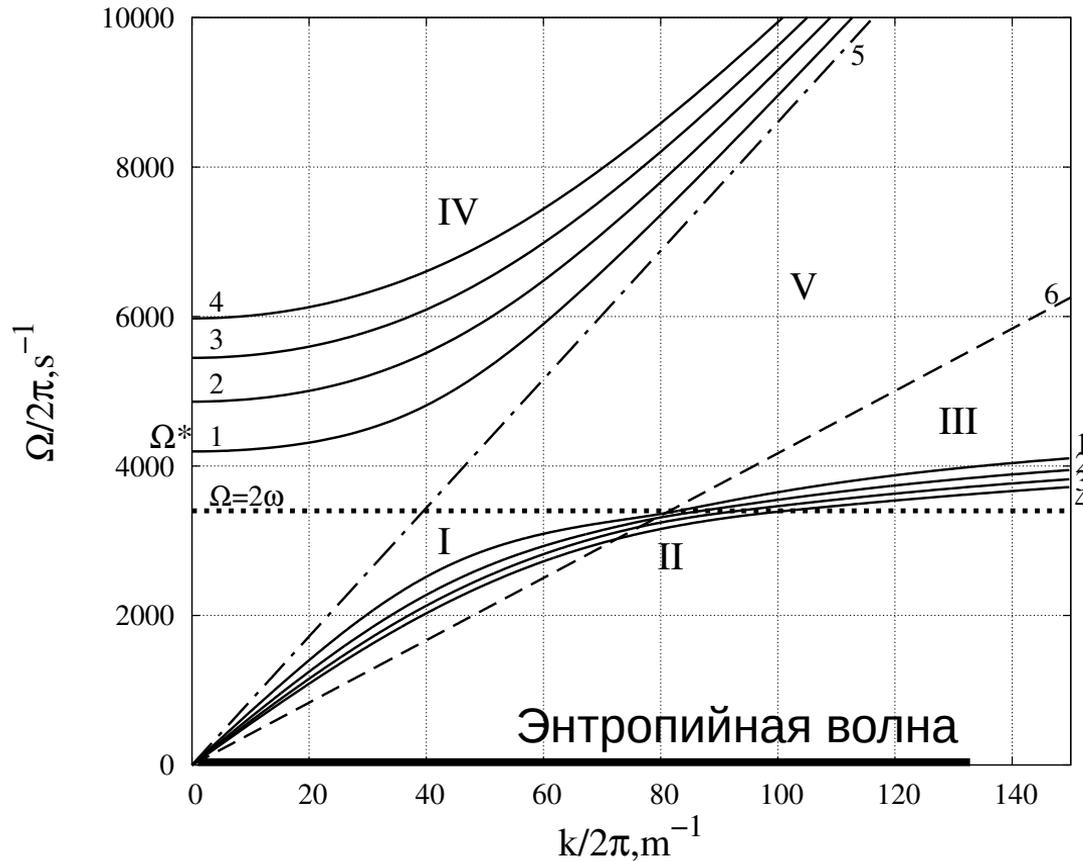
Закон дисперсии волн в гравитационном поле.



Очевидные отличия волн в центробежном поле от волн в гравитационном поле

- Появляется сила Кориолиса. Новые собственные частоты 2Ω (инерционные волны)
- Центробежное ускорение меняется с радиусом (g постоянна в гравитационном поле)

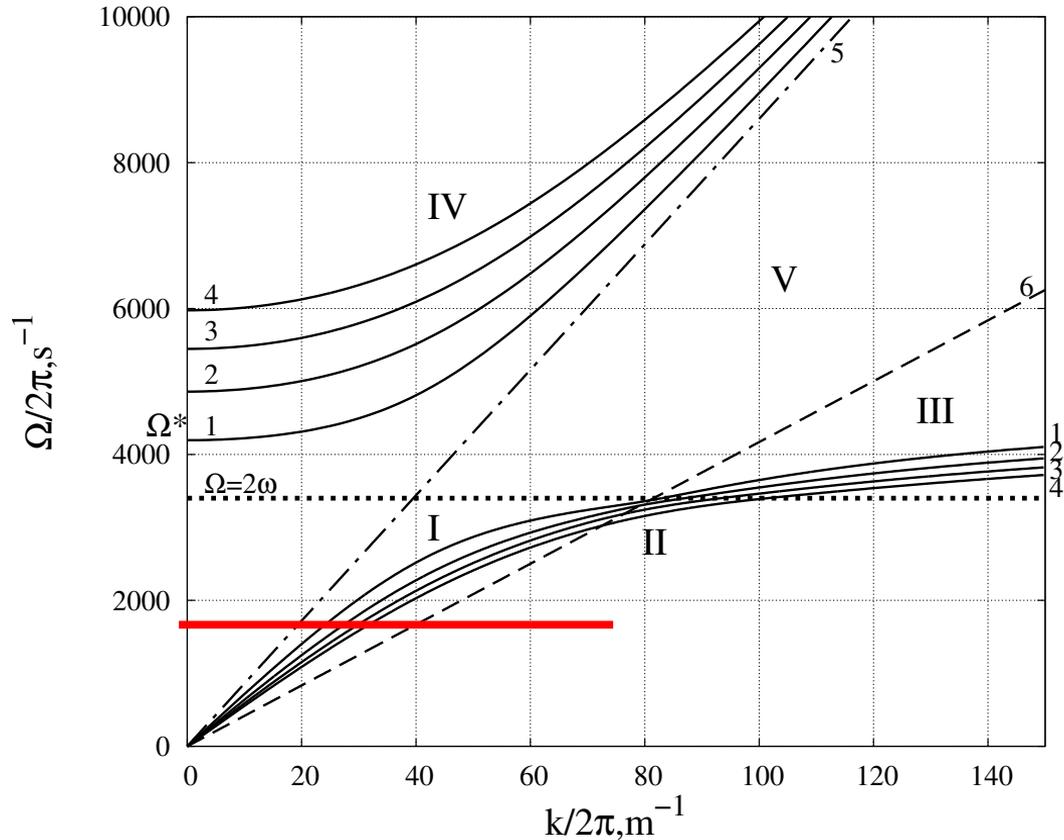
Закон дисперсии волн в центробежном поле



Моделирование волн во вращающемся цилиндре

- Rolik1.gif
- Rolik2.gif

Сравнение



линейные волны - $\omega \ll \Omega$

Скорость волн в численной модели оказалась точно равной скорости Звуча!!

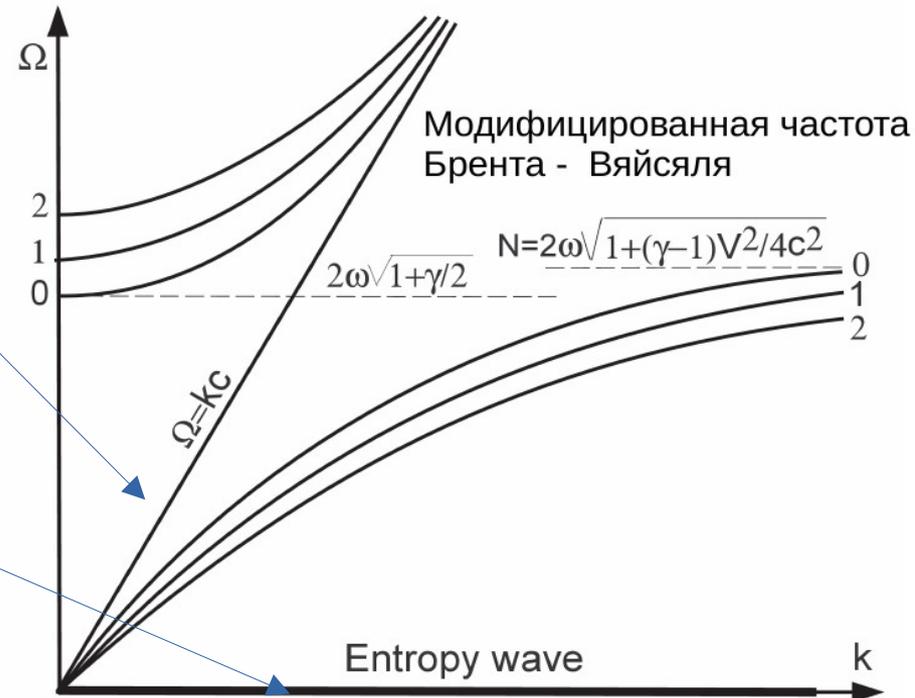
Что за волны у нас бегают?

Обнаружена дополнительная, пропущенная нами, ветвь волн

- Продольные акустические волны, распространяющиеся строго вдоль оси вращения с законом дисперсии $\Omega = kc$

Закон дисперсии волн во вращающемся газе

- Все множество мод состоит из верхнего (в асимптотике звуковые) и нижнего (аналог внутренних грав. волн) семейств .
- Мы обнаружили, что плюс к этому существуют акустические волны, продольно поляризованные строго вдоль оси вращения (Bogovalov, Kislov, Tronin. Theor. & Comput. Fluid Dyn. 2015, V.29, Theor. Comput. Fluid Dyn. 2019, V.33)
- Существуют также энтропийные волны с нулевой частотой.



Почему это интересно и потенциально важно ?

Интересно, потому что казалось таких волн не должно быть

Важно, потому что это единственная волна, которая может во вращающемся газе распространяться на большие расстояния.

Акустические волны в центробежном поле – это не тривиально

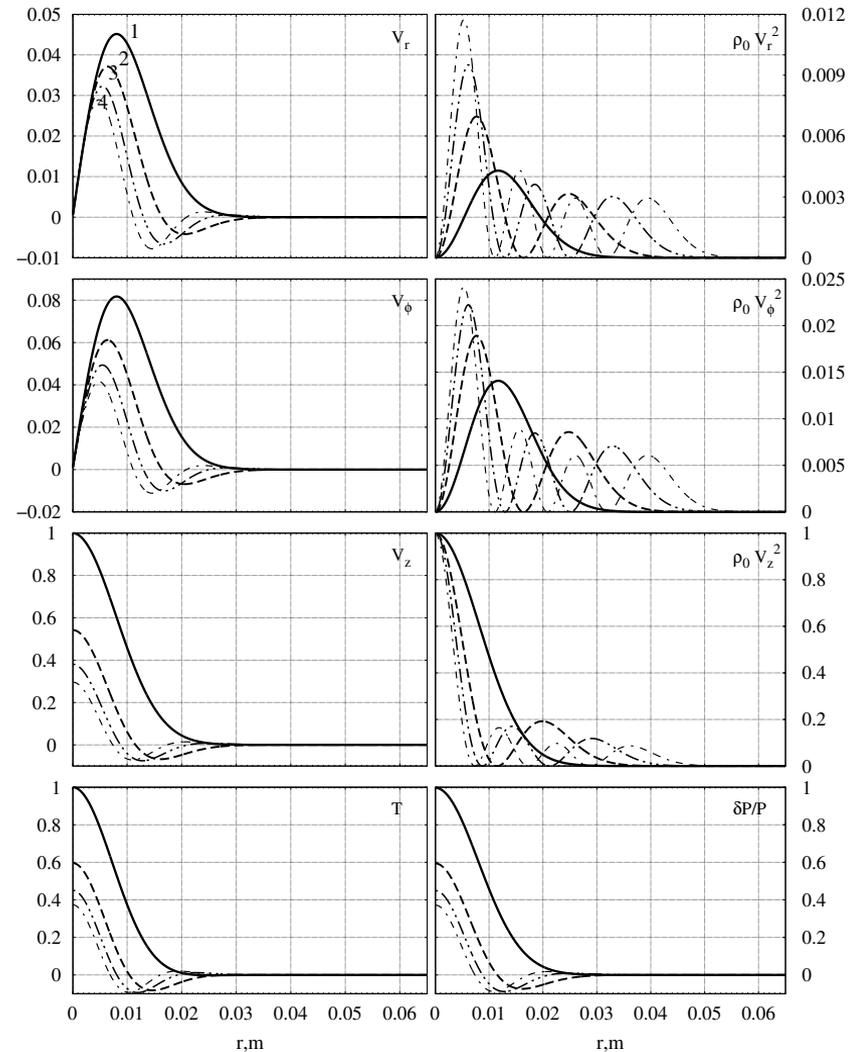
- Все волны в гравитационных или центробежных полях всегда имеют поперечную компоненту поляризации. Это естественно.
- Распространение строго продольной волны $V_r=0$ в центробежном поле кажется не естественным .

Процесс сжатия газа всегда разбалансирует радиальные силы.

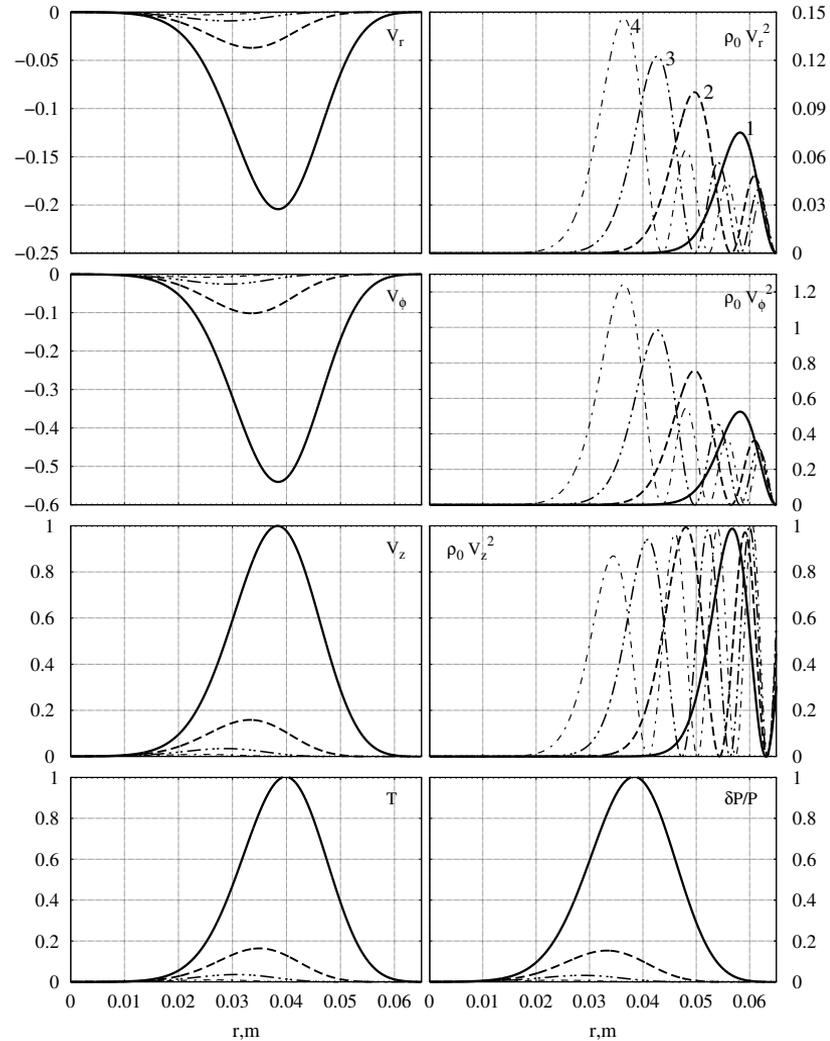
В акустической волне все радиальные силы в каждый момент времени строго скомпенсированы

$$(\rho_0 + \delta\rho) \omega^2 r = -\frac{\partial(P_0 + \delta P)}{\partial r}; \quad P_0 = \frac{R}{\mu} \rho_0 T_0 = \frac{c^2}{\gamma} \rho_0; \quad \delta P = c^2 \delta\rho$$

Волны верхнего семейства



Волны нижнего семейства



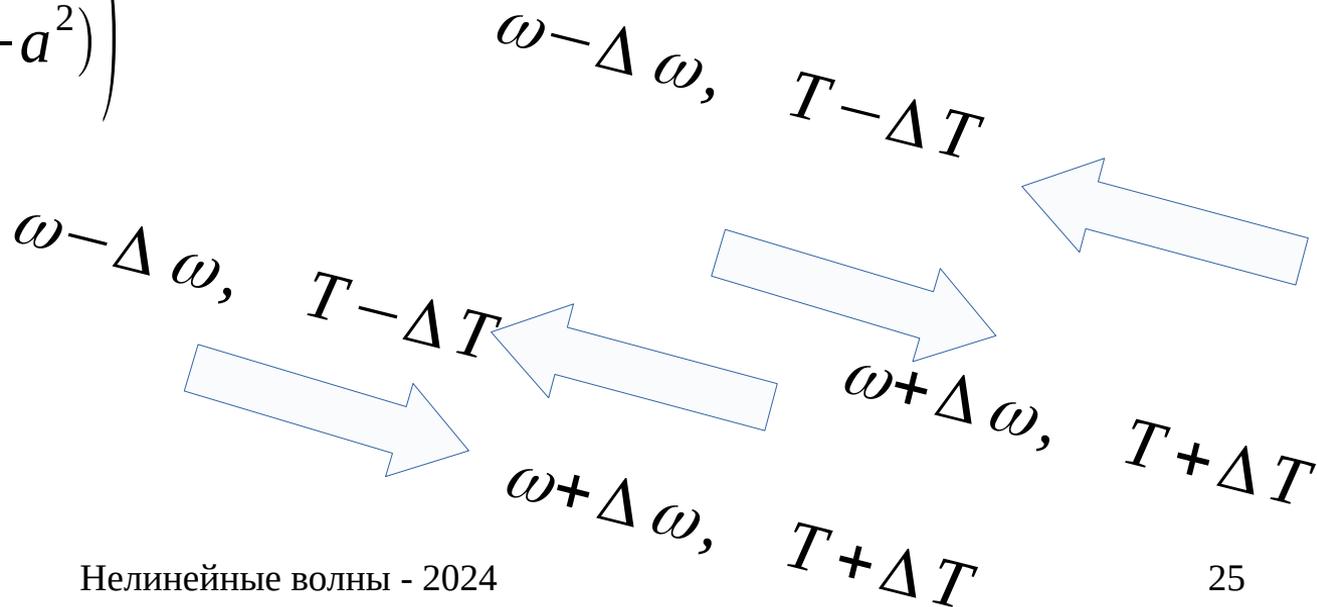
Энтропийная волна

Равновесие в радиальном направлении определяется распределением давления

$$p = p_w \exp\left(\frac{M \omega^2}{2RT} (r^2 - a^2)\right)$$

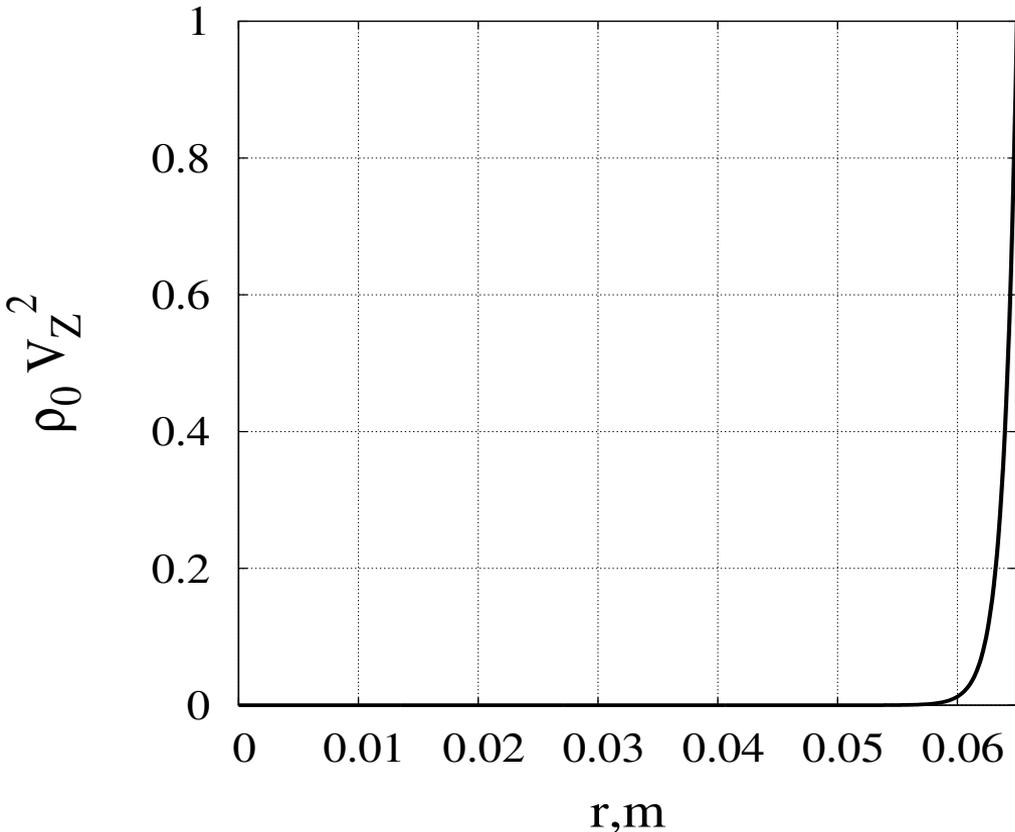
В энтропийной волне

$$\frac{\omega^2}{T} - \text{постоянна}$$



Акустическая волна

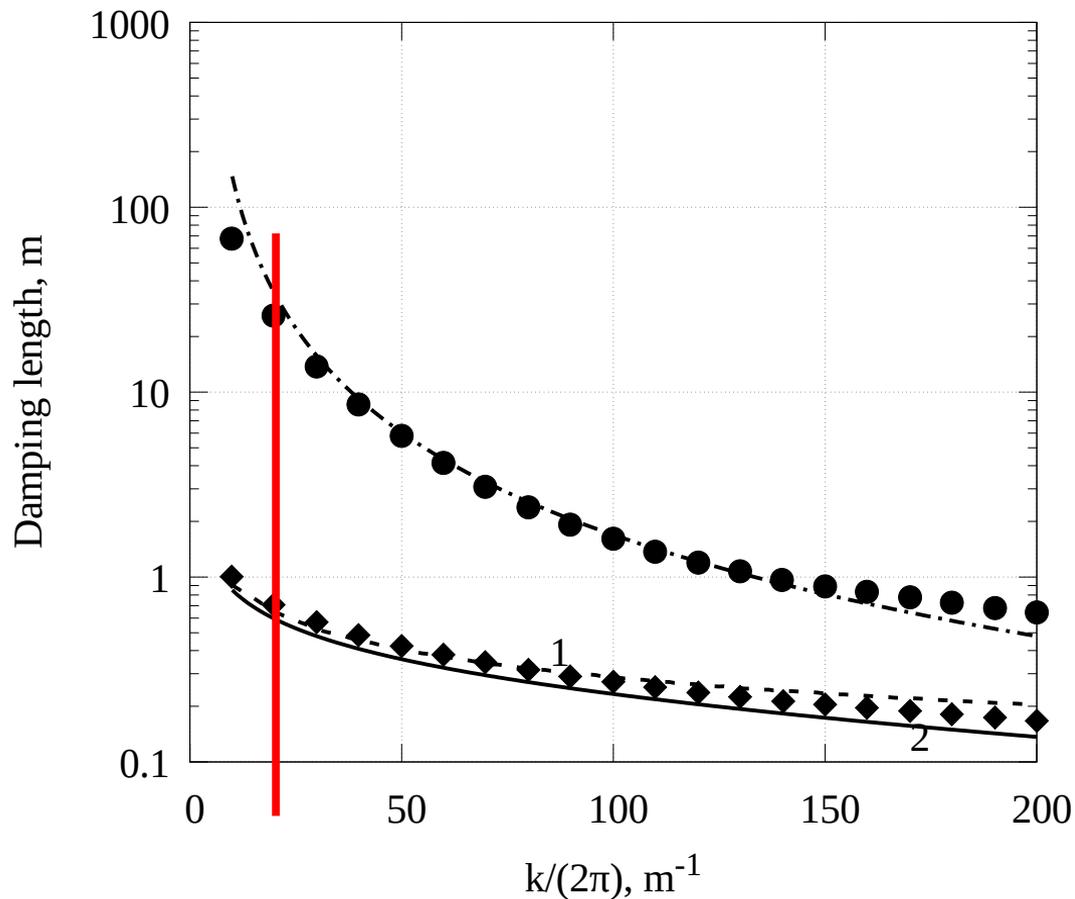
Энергия волн концентрируется вблизи стенки ротора



Bogovalov S.V., Kislov V.A., Tronin I.V.
Waves in strong centrifugal fields:
dissipationless gas
Theor. Comput. Fluid Dyn. 2015, V.29,
Issue
1-2, PP.111 - 125

Стенка ротора

Затухание акустической волн



Bogovalov S.V., Kislov V.A.,
Tronin I.V.

Waves in strong centrifugal field:
dissipative gas.

Theor. Comput. Fluid Dyn. 2019,
V.33, Issue 1, PP. 21 - 35.

При $\nu = 1700$ Гц,
 $1/\lambda = 20$

Влияние волн на разделение изотопов (нелинейность)

Уравнение на концентрацию легкого компонента имеет вид

$$\rho_0 \frac{\partial \delta C}{\partial t} + \underbrace{\rho_0 v_r \frac{dC_0}{dr}}_{\text{новый}} = \rho_0 D \left(\nabla^2 \delta C + \underbrace{\nabla \frac{k_T}{T_0} \nabla \delta T}_{\text{Лос-Аламос}} + \underbrace{\frac{k_P}{\rho_0} \nabla_z^2 \delta p}_{\text{ТРИНИТИ}} + \underbrace{\nabla_r k_P \nabla_r \ln \left[\rho_0 \left(1 + \frac{\delta p}{\rho_0} \right) \right]}_{\text{новый}} \right)$$

Возникает 2 новых механизма разделения изотопов в звуковой волне

Поток легкого компонента за счет наличия бегущей волны

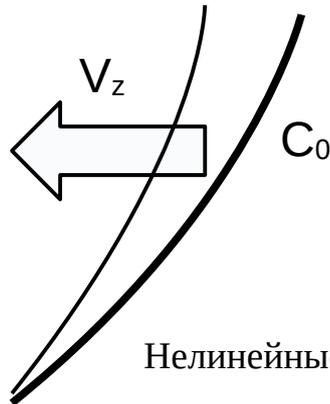
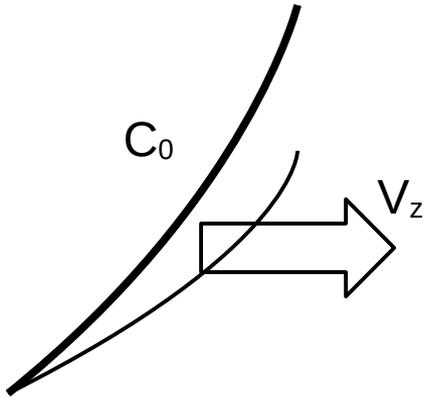
$$J_z = \langle \rho_0 v_z \delta C \rangle$$

Вклад бародиффузионного механизма

Распределение давления при твердотельном вращении

$$p = p_w \exp\left(\frac{\gamma V^2}{2c^2} \left(\frac{r^2}{a^2} - 1\right)\right)$$

Распределение давления в волне $\delta p = \delta p_w \exp\left(\frac{V^2}{2c^2} \left(\frac{r^2}{a^2} - 1\right)\right)$



Результат действия бародиффузионного механизма

$d \ln C/dz, \text{ м}^{-1}$

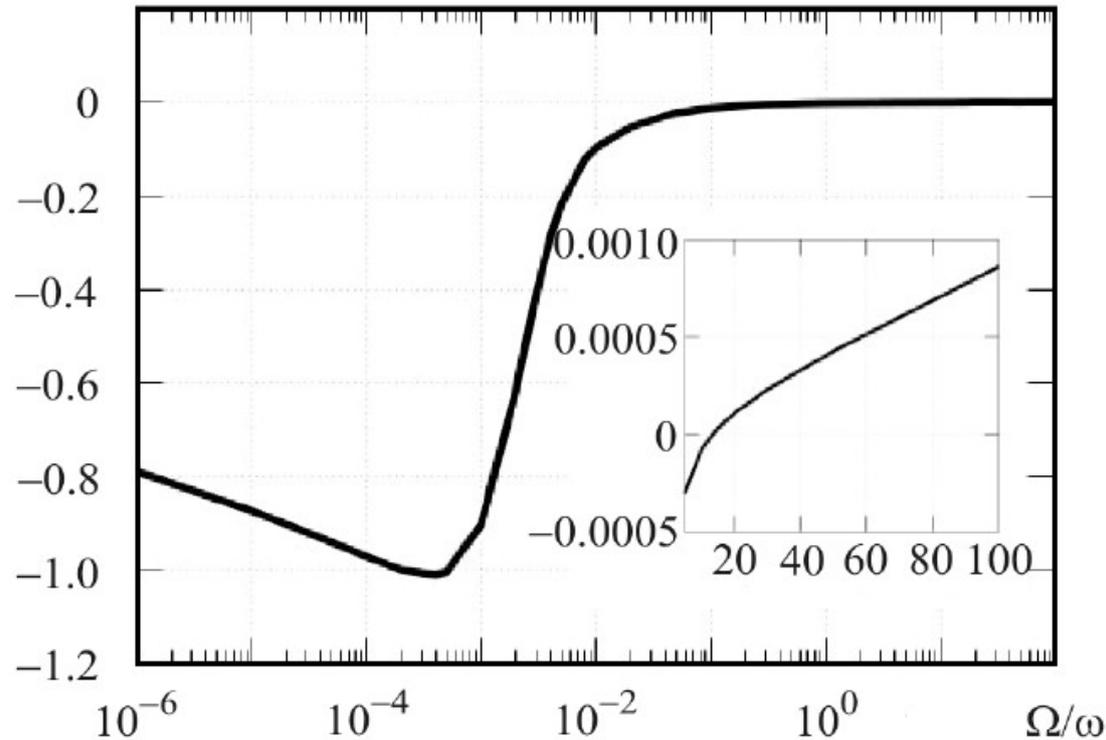
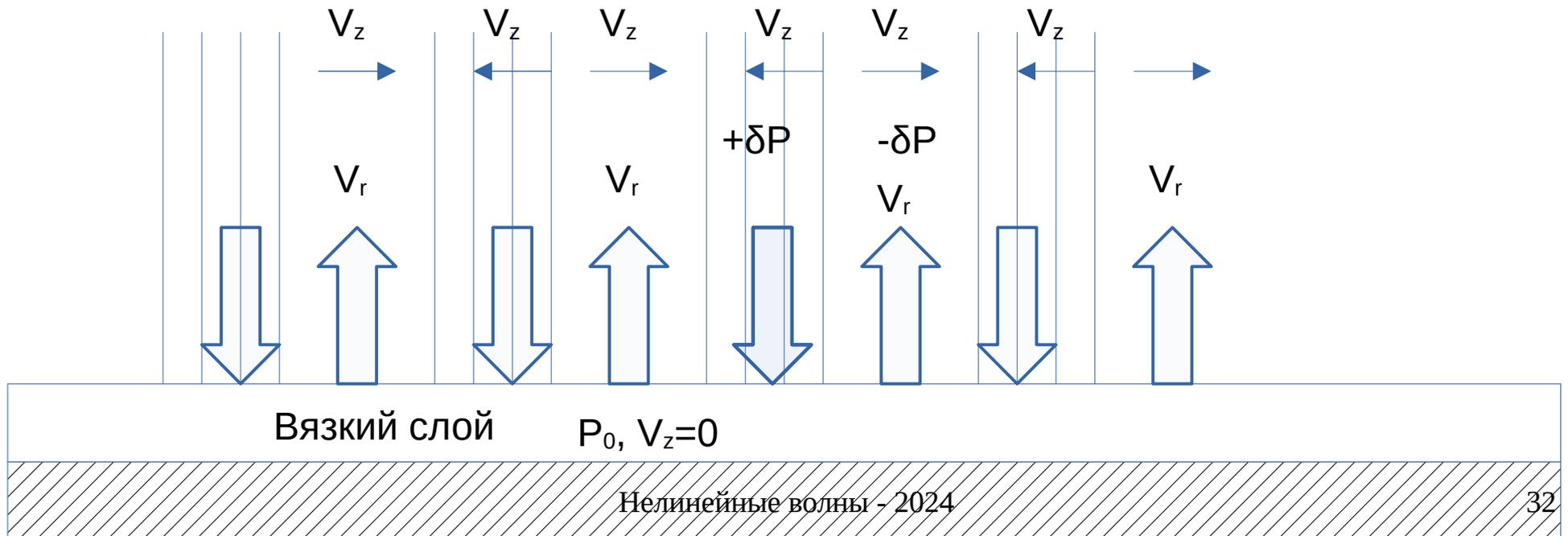


Рис. 5. Зависимость аксиального градиента концентрации легкого компонента газовой смеси UF_6 от частоты волны Ω при частоте вращения ГЦ Игуасу $\omega/2\pi = 1700$ Гц при амплитуде колебаний $u_0/c = 0.1$ и $C_0 = 0.7\%$

Конвекционный механизм

Возникновение радиальной скорости



Эта задача пока не решена

Заключение

- Благодаря численному моделированию в сильных центробежных полях обнаружен новый тип волн, который не обнаруживался аналитически.
- Эти волны обладают уникальной особенностью. Они распространяются вдоль ротора на относительно большие расстояния.
- Обнаружены новые механизмы разделения в больших центробежных полях при прохождении акустической волны вдоль ротора.

Задача для слушателей

Центрифуги с центробежным полем $10^6 g$ являются уникальной лабораторией

- Что нового и интересного можно делать в таких полях?