

**Министерство науки и высшего образования Российской
Федерации**

федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа ядерных технологий
Направление – Ядерные физика и технологии
Отделение ядерно-топливного цикла

Отчет

по лабораторной работе № 1 «Изучение закономерности
распределения газов во вращающемся роторе центрифуги»
по дисциплине «Теория газовых центрифуг»

Исполнитель:

Студент, гр. 0А8Д

подпись

дата

А.С. Кузьменко

Проверил:

Доцент ОЯТЦ

подпись

дата

С.Н. Тимченко

Томск – 2022

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: Изучить распределение газов по радиусу и по длине ротора центрифуги, условия образования циркуляционного потока и оценить оптимальную скорость его движения.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.1. Физические закономерности распределения изотопных молекул по радиусу ротора газовой центрифуги

Перемещение газа по ротору центрифуги представляет собой сложный газодинамический процесс. В данном случае мы будем рассматривать равновесную систему, состоящую из смеси двух газов с молекулярными массами M_1 и M_2 , вращающуюся с угловой скоростью ω , рад/с, в цилиндрической емкости с предельным внешним радиусом внутренней стенки a_r . Постороннее движение газа отсутствует и температура во всех точках объема постоянна. Тогда центробежная сила, F_r , действующая на молекулы с массами M_1 и M_2 на расстоянии r от оси вращения

$$F_r = M_{1,2} \cdot v^2 / r = M_{1,2} \cdot r \cdot \omega^2, \quad (1)$$

где v - линейная скорость движения молекул на расстоянии r от оси вращения.

Градиент давления газа в цилиндре вращающегося ротора в зависимости от радиуса характеризуется следующим соотношением:

$$\frac{dp}{dr} = \rho \cdot \omega^2 \cdot r = p \cdot \mu_{cp} \cdot \omega^2 \cdot r / (RT) \quad (2)$$

где R – газовая постоянная, Дж/(град·кмоль); T – температура, К; r – радиус, на котором находится молекула; p – давление газа на радиусе r , Па; μ_{cp} – средний молекулярный вес газа; ρ - плотность газа, кг/м³.

$$\rho = p \cdot \mu_{cp} / (RT) \quad (3)$$

$$\mu_{cp} = \mu_1 \cdot c_1 + \mu_2 \cdot c_2 = \mu_1 \cdot c_1 + \mu_2 \cdot (1 - c_1) \quad (4)$$

Здесь c_1 и c_2 – концентрации, а μ_1 и μ_2 – молекулярные веса легкой и тяжелой компонент смеси, соответственно. Давление газа в роторе центрифуги при высоких скоростях вращения растет с возрастанием радиуса

очень сильно. Так, например, для гексафторида урана давление у стенки ротора больше, чем на оси при линейной скорости 300 м/с почти в 500 раз, а при скорости 400 м/с – в 20 тысяч раз. В этом случае у стенки ротора создается очень тонкий слой плотного газа, но давление его, $p_{га}$, должно быть строго ограничено во избежание конденсации гексафторида на самой стенке.

Используя соотношение (2), распределение давления газа по радиусу ротора, p_r , с учетом осевого коллектора можно записать следующим образом:

$$p_r = p_{r_a} \cdot \exp \left[-\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot \nu^2 \cdot \mu \cdot (r_a^2 - r^2)}{RT} \right], \text{ Па} \quad (5)$$

где ν – число оборотов ротора, с^{-1} ; r – переменный радиус ротора, м; r_a – периферийный радиус ротора, м; $p_{га}$ – давление газа на периферии ротора, Па.

Перенос газа в радиальном направлении в роторе происходит очень быстро, практически со скоростью звука в данной среде, а затем возникает обратный перенос молекул, вызванный градиентом давления. При этом легкие молекулы, как более подвижные и поскольку на них действует меньшая центробежная сила, преимущественно перемещаются к оси ротора, а тяжелые остаются на периферии. Обратный перенос носит диффузионный характер и проходит до установления равновесного состояния по радиусу ротора. Полное время диффузионного перемещения газа, t_D , в этом случае определяется следующим образом

$$t_D = \frac{(r_a - r_i)^2}{2D}, \text{ с} \quad (6)$$

$$r_a - r_i = a \quad (7)$$

где a – радиальный зазор ротора, м.

Или

$$t_D = \frac{a^2}{2D} \quad (8)$$

Коэффициент диффузии, D , определяется следующим образом

$$D = \frac{33,25 \cdot 10^{-2}}{p_{r_a}} \cdot \sqrt{\frac{T}{\mu_{cp}}}, \frac{m^2}{c} \quad (9)$$

По истечении времени t_D реализуется первичный эффект разделения, обусловленный действием поля центробежных сил. Одновременно с радиальным происходит и осевое перемещение газа, связанное с возникновением циркуляционного потока в роторе центрифуги.

1.2. Физические закономерности возникновения циркуляционного потока в роторе центрифуги

Осевой циркуляционный поток в роторе центрифуги возникает автоматически при наличии быстровращающегося газа и обусловлен перепадом температур, а следовательно, и его плотностей между верхним и нижним торцами ротора, а также геометрией точек отбора, отвала и питания. Отборники легкой и тяжелой фракций расположены на разных расстояниях по радиусу ротора, но отборник тяжелой фракции находится ближе к внутренней стенке, а следовательно, в более плотных слоях вращающегося газа. Набегающие потоки разогревают его до более высоких температур, чем отборник легкой фракции, который расположен в менее плотной области того же газа. Там, где выше температура, плотность газа меньше и наоборот.

Возникающая разность плотностей приводит к перемещению газа у оси ротора снизу вверх, а на периферии ротора-сверху вниз, образуя замкнутый циркуляционный поток газа в осевом направлении.

Перепад давления по длине ротора, Δp , оценивается следующим образом:

$$\Delta p_r = p_{r_a} \cdot \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot v^2 \cdot \mu \cdot (r_a^2 - r^2)}{RT} \cdot \frac{\Delta T}{T} \quad (10)$$

где ΔT – перепад температур между торцами ротора, К.

Возникающий циркуляционный поток приводит к тому, что в нижней части ротора преимущественно скапливается тяжелая компонента, а в верхней-легкая. При замене расположения, отборников легкой и тяжелой

фракций на противоположное картина циркуляционного потока также меняется на противоположную, но характер всех физических закономерностей при этом остается одинаковым.

Таким образом, как в том, так и в другом случае возникает градиент концентраций по длине ротора и обратная диффузия преимущественно легких молекул, как более подвижных. Такой диффузионный перенос происходит до установления стационарного состояния по длине ротора центрифуги. Время установления стационарного состояния, t_0 , определяется как

$$t_0 = \frac{L^2}{2D} \quad (11)$$

где L – длина ротора, м. Наличие циркуляционного потока приводит к появлению вторичного эффекта разделения. Однако для обеспечения максимального эффекта разделения бинарной изотопной газовой смеси в роторе центрифуги должна соблюдаться оптимальная скорость циркуляции, $U_{оп}$.

$$U_{оп} = \frac{2D}{a} \quad (12)$$

При совместном действии поля центробежных сил и потока циркуляции реализуется полный коэффициент разделения в газовой центрифуге, α_p .

2. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Для исходной смеси Хе необходимо определить поведение изотопов $^{129}\text{Xe} - ^{132}\text{Xe}$, при следующих исходных данных: $R = 8,32 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{град} \cdot \text{кмоль}}$;
 $T = 300 \text{ К}$; $\Delta T = 3 \text{ К}$; $\nu = 1500 \text{ с}^{-1}$; $r_a = 0,06 \text{ м}$; $r_i = 0,001 \text{ м}$; $L = 0,6 \text{ м}$;
 $p_{r_a} = 13300 \text{ Па}$; $c_1 = 0,264$; $c_2 = 0,269$.

Определен средний молекулярный вес изотопной газовой смеси:

$$\mu_{cp} = 0,129 \frac{\text{кг}}{\text{моль}} \cdot 0,264 + 0,132 \frac{\text{кг}}{\text{моль}} \cdot 0,269 = 0,069564 \frac{\text{кг}}{\text{моль}} \quad (13)$$

Определен коэффициент диффузии:

$$D = \frac{33,25 \cdot 10^{-2}}{13300 \text{ Па}} \cdot \sqrt{\frac{300 \text{ К}}{0,069564}} \approx 1,64 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^2}{\text{с}} \quad (14)$$

Парциальные давления изотопов ксенона в смеси:

$$p_{r_a}({}^{129}\text{Xe}) = 13300 \text{ Па} \cdot 0,264 = 3511,2 \text{ Па} \quad (15)$$

$$p_{r_a}({}^{132}\text{Xe}) = 13300 \text{ Па} \cdot 0,269 = 3577,7 \text{ Па} \quad (16)$$

При значениях $r = 0,06 \text{ м}$; $0,05 \text{ м}$; $0,04 \text{ м}$; $0,03 \text{ м}$ определено изменение давления по радиусу ротора.

$$p_r({}^{129}\text{Xe})\Big|_{r=0,06} = 3511,2 \cdot \exp\left[-\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot 1500^2 \cdot 0,129}{8,31 \cdot 300} \cdot (0,06^2 - 0,06^2)\right] = 3511,2 \text{ Па} \quad (17)$$

$$p_r({}^{129}\text{Xe})\Big|_{r=0,05} = 3511,2 \cdot \exp\left[-\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot 1500^2 \cdot 0,129}{8,31 \cdot 300} \cdot (0,06^2 - 0,05^2)\right] = 281,12 \text{ Па} \quad (18)$$

$$p_r({}^{129}\text{Xe})\Big|_{r=0,04} = 3511,2 \cdot \exp\left[-\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot 1500^2 \cdot 0,129}{8,31 \cdot 300} \cdot (0,06^2 - 0,04^2)\right] = 35,62 \text{ Па} \quad (19)$$

$$p_r({}^{129}\text{Xe})\Big|_{r=0,03} = 3511,2 \cdot \exp\left[-\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot 1500^2 \cdot 0,129}{8,31 \cdot 300} \cdot (0,06^2 - 0,03^2)\right] = 7,14 \text{ Па} \quad (20)$$

$$p_r({}^{132}\text{Xe})\Big|_{r=0,06} = 3577,7 \cdot \exp\left[-\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot 1500^2 \cdot 0,132}{8,31 \cdot 300} \cdot (0,06^2 - 0,06^2)\right] = 3577,7 \text{ Па} \quad (21)$$

$$p_r({}^{132}\text{Xe})\Big|_{r=0,05} = 3577,7 \cdot \exp\left[-\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot 1500^2 \cdot 0,132}{8,31 \cdot 300} \cdot (0,06^2 - 0,05^2)\right] = 270,11 \text{ Па} \quad (22)$$

$$p_r(^{132}\text{Xe})\Big|_{r=0,04} = 3577,7 \cdot \exp \left[-\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot 1500^2 \cdot 0,132}{8,31 \cdot 300 \cdot (0,06^2 - 0,04^2)} \right] = 32,62 \text{ Па} \quad (23)$$

$$p_r(^{132}\text{Xe})\Big|_{r=0,03} = 3577,7 \cdot \exp \left[-\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot 1500^2 \cdot 0,132}{8,31 \cdot 300 \cdot (0,06^2 - 0,03^2)} \right] = 6,30 \text{ Па} \quad (24)$$

Построена зависимость $p_r = f(r)$:

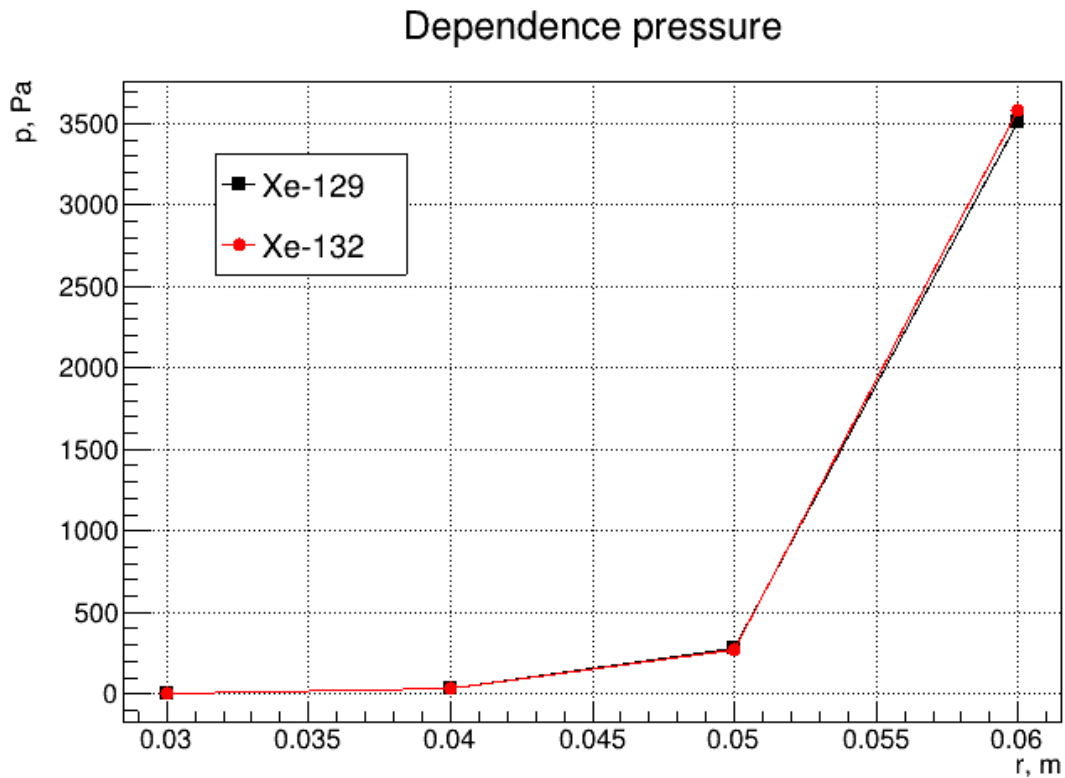


Рисунок 1 – Зависимость давления от расстояния

Определено время установления стационарного состояния по радиусу и по длине ротора t_D и t_0 :

$$t_D = \frac{(0,06 \text{ м} - 0,001 \text{ м})^2}{2 \cdot 1,64 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\text{М}^2}{\text{с}}} \approx 1,06 \text{ с} \quad (25)$$

$$t_0 = \frac{0,6^2 \text{ м}^2}{2 \cdot 1,64 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\text{М}^2}{\text{с}}} \approx 109,64 \text{ с} \approx 1,83 \text{ мин} \quad (26)$$

Исследован характер перемещения изотопных молекул в роторе газовой центрифуги:

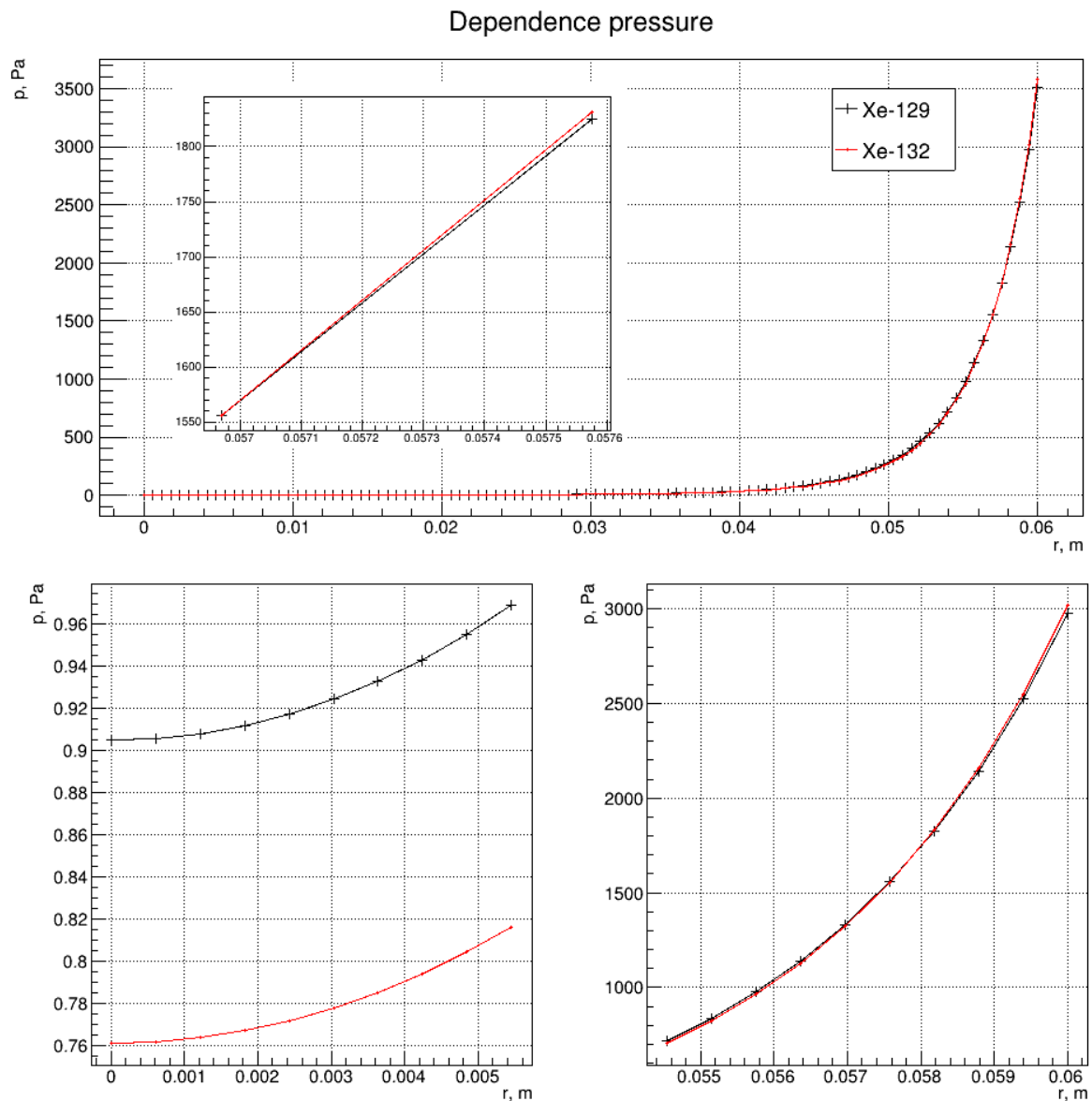


Рисунок 2 – Изменение давления изотопов смеси от центра к периферии ротора

Из рисунка 2 видно, что у стенки ротора парциальное давление более тяжелого изотопа больше, а в центре ротора – более легкого изотопа. Кривые легкого и тяжелого изотопа пересекаются в точке $r=0,057$ м.

Определен перепад давлений по длине ротора:

$$\Delta p = 13300 \cdot \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot 1500^2 \cdot (0,06^2 - 0,03^2)}{8,31 \cdot 300} \cdot \frac{3}{300} \approx 8517,28 \text{ Па} \quad (27)$$

Определена оптимальная скорость циркуляции:

$$U_{on} = \frac{2 \cdot 1,64 \cdot 10^{-3} \frac{м^2}{с}}{0,06 м - 0,001 м} \approx 0,056 \frac{м}{с} \quad (28)$$

ВЫВОД

1. Изучено распределение газов по радиусу и по длине ротора центрифуги, условия образования циркуляционного потока.
2. Построена зависимость $p_r = f(r)$.
3. Определено время установления стационарного состояния по радиусу – 1,06 с – и по длине ротора – 1,83 мин.
4. Перепад давлений по длине ротора составит 8517,28 Па.
5. Показано, что оптимальная скорость циркуляции 0,056 м/с.
6. Установлено, что у стенки ротора парциальное давление более тяжелого изотопа больше, а в центре ротора – более легкого изотопа.