

**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 № 4 «Изучение взаимосвязи рабочих
параметров газовой центрифуги с параметрами разделительного каскада»
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 взаимосвязь рабочих параметров газовой центрифуги с параметрами разделительного каскада.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Введение

Используемые каскады из газовых центрифуг для изотопного обогащения урана представляют собой типичный прямоугольный каскад с циркуляцией, схема которого приведена на рисунке 1. Ступени такого каскада состоят из i газовых центрифуг, параллельно соединенных на общие потоки отбора, отвала и питания. Каждая центрифуга выполняет здесь роль разделительного элемента и если каждая из них имеет оптимальные рабочие характеристики и работает в оптимальном режиме, то и сам каскад будет иметь оптимальные рабочие параметры.

К рабочим параметрам каскада относятся

1. Производительность ступеней
2. Мощность разделения каскада
3. Число ступеней в регенеративной, обогажительной части и для всего каскада в целом.
4. Внешние параметры каскада поток питания F , с концентрацией легкого изотопа c_F , поток отбора P , с концентрацией легкого изотопа c_P и поток отвала W , с концентрацией легкого изотопа c_W .
5. Внутренние переменные каскада потоки и их концентрации по ступеням. В регенеративной части потоки питания Q_j , с концентрацией легкого изотопа c_j , потоки отбора Q'_j , с концентрацией легкого изотопа c'_j , потоки отвала Q''_j , с концентрацией легкого изотопа c''_j , где j – текущий номер ступени в регенеративной части каскада. В обогажительной части потоки питания Q_i , с концентрацией легкого изотопа c_i , потоки отбора Q'_i с концентрацией легкого изотопа c'_i , потоки отвала Q''_i с концентрацией легкого изотопа c''_i , где i – текущий номер ступени обогажительной части каскада.

6. Общий поток вещества в каскаде, J .

7. Время установления стационарного состояния в каскаде, $t_{ст}$

Все указанные параметры имеют свои математические зависимости.

Мы рассмотрим на примере идеального каскада.

1.2. Основные соотношения для рабочих параметров идеального каскада

Графическая форма идеального каскада, представляющая собой изменение производительности ступени $Q_{i,j}$ или нагрузки на ступень, от 3 номера ступени n представлена на рисунке 2. Для такого каскада можно записать следующие основные соотношения.

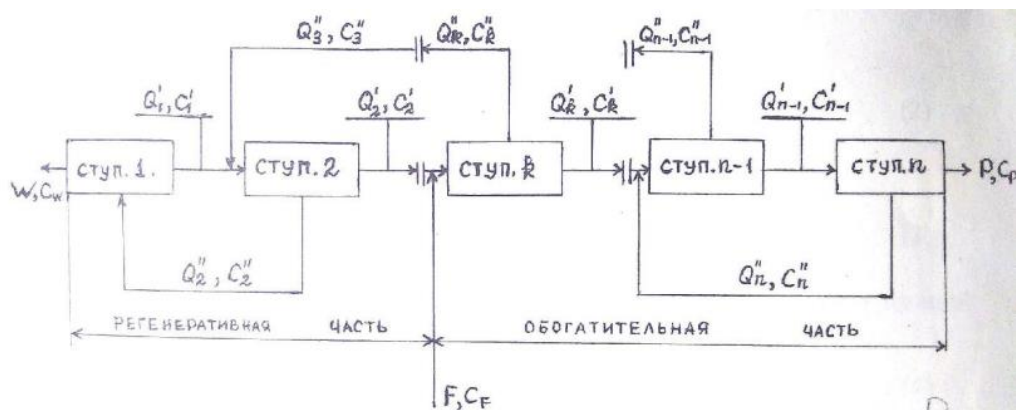


Рисунок 1 – Схема каскада

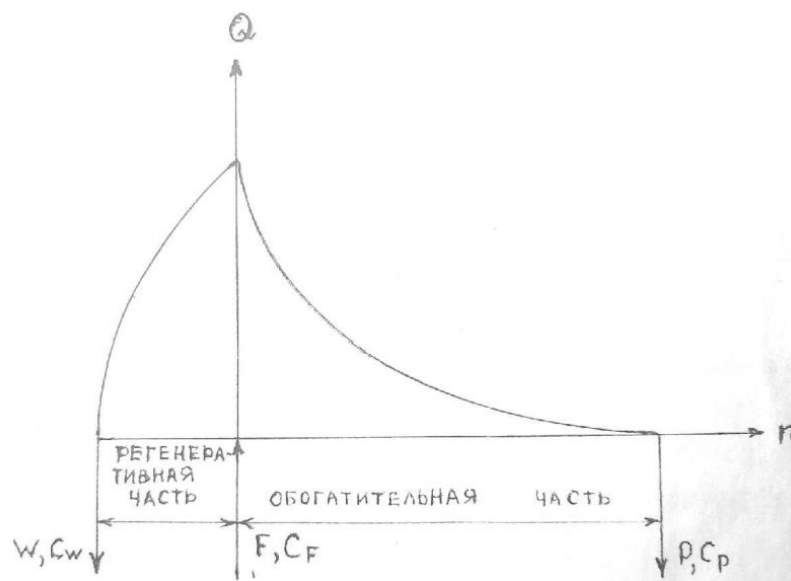


Рисунок 2 – Схема формы каскада

Число ступеней в регенеративной части каскада, n_w .

$$n_w = \ln \left(\frac{c_F (1 - c_W)}{(1 - c_F) \cdot c_W} \right) / \ln(a_{\Pi}) \quad (1)$$

где a_{Π} – полный коэффициент разделения для газовой центрифуги.

Число ступеней в обогатительной части каскада, n_p .

$$n_p = \ln \left(\frac{c_P (1 - c_F)}{(1 - c_P) \cdot c_F} \right) / \ln(a_{\Pi}) \quad (2)$$

Общее число ступеней в каскаде, n

$$n = n_p + n_w = n_p = \ln \left(\frac{c_P (1 - c_W)}{(1 - c_P) \cdot c_W} \right) / \ln(a_{\Pi}) \quad (3)$$

Концентрация легкого изотопа в питании для ступеней регенеративной части каскада

$$c_j = \frac{1}{1 + \frac{1 - c_W}{c_W} \cdot \frac{1}{\exp(\ln(a_{\Pi}) \cdot n_j)}} \quad (4)$$

где n_j – номер ступени в сторону отвала.

$$c_i = \frac{1}{1 + \frac{1 - c_F}{c_F} \cdot \frac{1}{\exp(\ln(a_{\Pi}) \cdot n_i)}} \quad (5)$$

где n_i – номер ступени в сторону отвала.

Производительность отдельной ступени в регенеративной части каскада, Q_j

$$Q_j = \frac{a_{ff} + 1}{a_{ff} - 1} \cdot W \cdot c_W \cdot \left(\frac{1 - c_F}{c_F} \right) \cdot (a_{ff}^{n_w+1} - a_{ff}^j) \cdot \left[1 + \left(\frac{c_F}{1 - c_F} \right) \cdot a_{ff}^{-j} \right], \text{ кг/с} \quad (6)$$

где a_{ff} – эффективный коэффициент разделения газовой центрифуги.

$$a_{ff} = \sqrt{a_{\Pi}} \quad (7)$$

Производительность отдельной ступени в обогатительной части каскада, Q_i

$$Q_i = \frac{a_{ff} + 1}{a_{ff} - 1} \cdot P \cdot c_P \cdot \left(\frac{1 - c_F}{c_F} \right) \cdot \left(a_{ff}^{-i} - a_{ff}^{-(np+1)} \right) \cdot \left[1 + \left(\frac{c_F}{1 - c_F} \right) \cdot a_{ff}^j \right], \text{ кг/с} \quad (8)$$

где i – номер ступени, куда подается питание, n_p – количество ступеней в отборе.

Внешние потоки вещества в каскаде W и F рассчитываются через параметры, которые обычно задаются заранее: p , c_P , c_F , c_W .

$$W = P \cdot \frac{c_P - c_F}{c_F - c_W}, \text{ кг/с} \quad (9)$$

$$F = W + P = P \cdot \frac{c_P - c_W}{c_F - c_W}, \text{ кг/с} \quad (10)$$

При этом для каскада всегда должно выполняться условие материального баланса по веществу

$$F = W + P \quad (11)$$

и по легкому изотопу

$$F \cdot c_F = W \cdot c_W + P \cdot c_P \quad (12)$$

Суммарный поток вещества в каскаде

$$J = \frac{a_{ff} + 1}{(a_{ff} - 1) \cdot \ln(a_{ff})} \cdot \left[\begin{aligned} &W \cdot (2 \cdot c_W - 1) \cdot \ln\left(\frac{c_W}{1 - c_W}\right) + \\ &+ P \cdot (2 \cdot c_P - 1) \cdot \ln\left(\frac{c_P}{1 - c_P}\right) - \\ &- F \cdot (2 \cdot c_F - 1) \cdot \ln\left(\frac{c_F}{1 - c_F}\right) \end{aligned} \right], \text{ кг/с} \quad (13)$$

Мощность разделения каскада

$$\begin{aligned} D = &W \cdot (2 \cdot c_W - 1) \cdot \ln\left(\frac{c_W}{1 - c_W}\right) + P \cdot (2 \cdot c_P - 1) \cdot \ln\left(\frac{c_P}{1 - c_P}\right) - \\ &- F \cdot (2 \cdot c_F - 1) \cdot \ln\left(\frac{c_F}{1 - c_F}\right), \text{ кг/с} \end{aligned} \quad (14)$$

Количество газовых центрифуг по ступеням каскада

В регенеративной части:

$$N_j = \frac{Q_j}{\dot{G}}, \quad (15)$$

В обогатительной части:

$$N_i = \frac{Q_i}{\dot{G}}, \quad (16)$$

где \dot{G} – весовая производительность газовой центрифуги

$$\dot{G} = 2\pi\eta \cdot \left(\frac{r_a^2 - r_i^2}{L} \right), \text{ кг/с} \quad (17)$$

Здесь L – длина ротора, м; r_a – периферийный радиус, м;
 r_i – внутренний радиус ротора, м; η – коэффициент вязкости, $\frac{\text{кг}\cdot\text{с}}{\text{м}}$.

$$\eta = 4 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{\frac{\mu_{\text{сред}}}{T}}, \quad (18)$$

где T – температура изотопной газовой смеси, К; $\mu_{\text{сред}}$ – средний молекулярный вес изотопной смеси

$$\mu_{\text{сред}} = \mu_1 \cdot c_1 + \mu_2 \cdot c_2 \quad (19)$$

Здесь μ_1, c_1, μ_2, c_2 – молекулярные веса и дольные концентрации легкого и тяжелого изотопов, соответственно.

Время установления стационарного состояния в каскаде, $t_{\text{ст}}$. Если $a_{\Pi} < 2$,
 то

$$t_{\text{ст}} = 2 \cdot \frac{t_{\min}}{\varepsilon_{\Pi}^2} \cdot Y_{\text{н.л.}}, \text{ с} \quad (20)$$

При полном коэффициенте разделения $a_{\Pi} \geq 2$,

$$t_{\text{ст}} = 2 \cdot t_{\min} \cdot n, \text{ с} \quad (21)$$

Здесь ε_{Π} – полный коэффициент обогащения

$$\varepsilon_{\Pi} = a_{\Pi} - 1 \quad (22)$$

$Y_{\text{н.л.}}$ – функция наполнения каскада легким изотопом

$$Y_{\text{н.л.}} = \left(\frac{c_F + c_P - 2 \cdot c_F}{c_P - c_W} \right) \cdot \ln \left[\frac{c_P}{1 - c_P} \cdot \frac{1 - c_W}{c_W} - \frac{c_F + c_W}{c_W (1 - c_W)} \right] \quad (23)$$

t_{\min} – минимальное время установления стационарного состояния в роторе газовой центрифуги

$$t_{\min} = \frac{L^2}{2D}, \text{ с} \quad (24)$$

В данном случае D – коэффициент диффузии

$$D = \frac{0,3325}{p_{ra}} \cdot \sqrt{\frac{T}{\mu_{\text{сред}}}}, \frac{\text{м}^2}{\text{с}} \quad (25)$$

где p_{ra} – давления газа на периферии ротора, Па.

Используя полученные соотношения, можно определить форму идеального каскада для любой изотопной газовой смеси при заданных значениях p , c_p , c_w , c_F .

В общем виде типичная форма идеального каскада из газовых центрифуг представлена на рисунке 3. Для прямоугольного каскада, когда $Q_j=Q_i=Q$, число центрифуг в каскаде определяется как

$$N = Q \cdot \frac{n}{\dot{G}} \quad (26)$$

Графическая форма такого каскада представлена на рисунке 4. Здесь при постоянной концентрации легкого изотопа в питании: а-пониженные концентрации легкого изотопа в отвале и в отборе, б-повышенные концентрации легкого изотопа в отвале и в отборе.

Кроме того, из приведенных соотношений следует, что рабочие параметры газовой центрифуги непосредственно влияют на рабочие параметры каскада.

1.3. Характер влияния рабочих параметров газовой центрифуги на рабочие параметры каскада

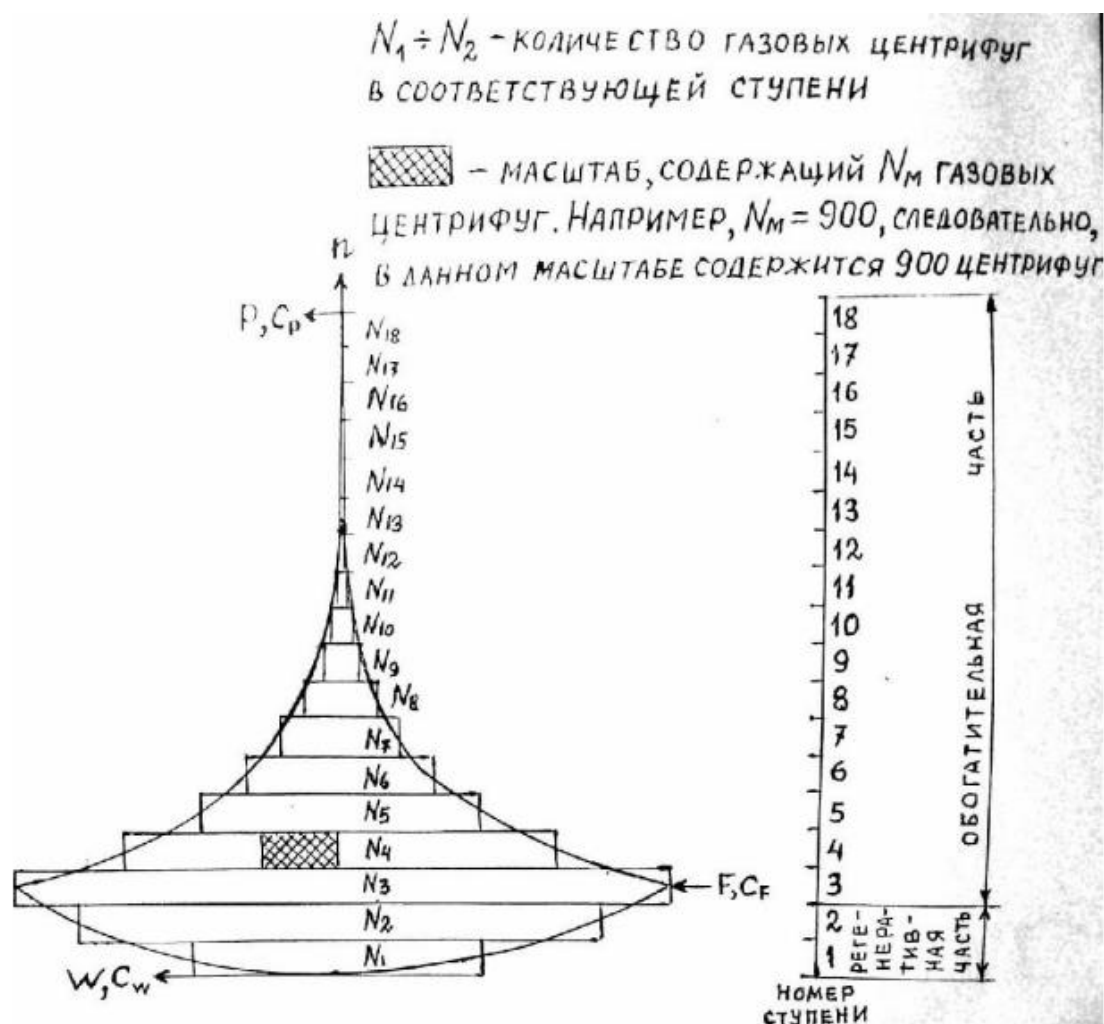


Рисунок 3 – Типичная форма идеального каскада из ГЦ

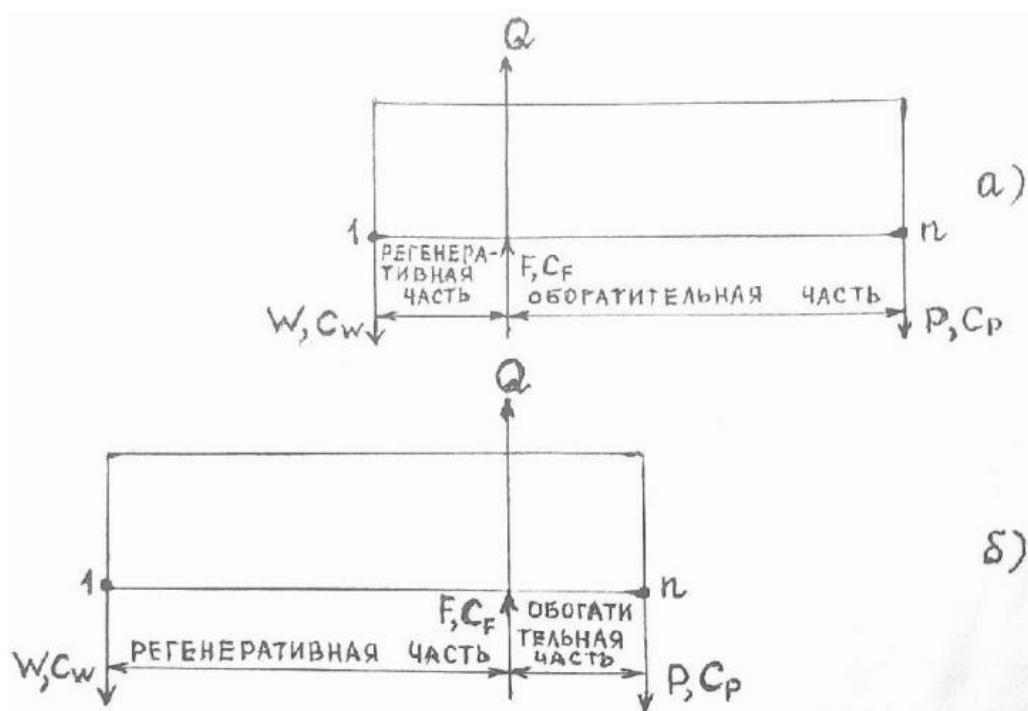


Рисунок 4 – Графическая форма такого каскада

Из формул (1÷3) следует, что чем больше полный коэффициент разделения газовой центрифуги, тем меньше число ступеней в каскаде и тем меньше время установления стационарного состояния (формулы 3, 21, 22). С уменьшением эффективного коэффициента разделения, α_{ff} , возрастает поток разделяемого продукта по ступеням и общий поток вещества в каскаде (формулы 6, 8, 14), а, следовательно, при постоянной производительности газовых центрифуг (формула 18) будет увеличиваться их общее количество в каскаде. При этом возрастает объем оборудования, капитальные и энергетические затраты. С другой стороны, с возрастанием производительности используемых газовых центрифуг сокращается их количество по ступеням и по всему каскаду в целом, исходя из этого, более предпочтительными являются надкритические центрифуги. Очень важным фактором является также выбор оптимального режима работы самой центрифуги, когда улучшается ее разделительная способность и повышается выход обогащенного продукта.

2. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Определить рабочие параметры каскада для газовой изотопной смеси, $^{80}\text{Kr} - ^{83}\text{Kr}$, при следующих исходных данных: $P_{га} = 13300$ Па; $L = 0,5$ м; $r_a = 0,05$ м; $r_i = 0,025$ м; $T = 300$ К; $R = 8,32 \cdot 10^{-3}$ град/кмоль·дж; $c_F = 0,007$; $c_W = 0,003$; $c_P = 0,9$; $c_F = c_1$; $c_2 = 1 - c_1$; $\alpha_{П1} = 1,56$; $P = 2,22 \cdot 10^{-6}$ кг/с, ($^{84}\text{Kr} - ^{86}\text{Kr}$, $\alpha_{П1} = 1,3225$ - дополнительно сделать расчет для данной смеси изотопов при указанном полном коэффициенте разделения).

Газовая изотопная смесь $^{80}\text{Kr} - ^{83}\text{Kr}$.

Определено число ступеней в регенеративной, обогатительной частях и во всем каскаде:

$$n_w = \ln \left(\frac{0,007 \cdot (1 - 0,003)}{(1 - 0,007) \cdot 0,003} \right) / \ln(1,56) \approx 2 \quad (27)$$

$$n_p = \ln \left(\frac{0,9 \cdot (1 - 0,007)}{(1 - 0,9) \cdot 0,007} \right) / \ln(1,56) \approx 17 \quad (28)$$

$$n = 2 + 17 = 19 \quad (29)$$

Определена весовая производительность газовой центрифуги:

$$\eta = 4 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{\frac{0,08 \cdot 0,007 + 0,083 \cdot (1 - 0,007)}{300}} \approx 6,65 \cdot 10^{-7} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}} \quad (30)$$

$$\dot{G} = 2\pi \cdot 6,65 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{0,05^2 - 0,025^2}{0,5} \right) \approx 1,57 \cdot 10^{-8} \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad (31)$$

По формулам (4) и (5) определены концентрации по ступеням в регенеративной и обогатительной частях каскада. По формулам (6) и (8) определены потоки по ступеням в регенеративной и обогатительной частях каскада. По формулам (15) и (16) определено число газовых центрифуг в ступенях каскада. Результаты расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета параметров каскада для изотопной смеси ^{80}Kr - ^{83}Kr

	n	c	Q	N
Регенеративная часть	1	0,00300	$1,34 \cdot 10^{-3}$	47424
	2	0,00467	$0,74 \cdot 10^{-3}$	85489
Обогатительная часть	3	0,00700	$2,02 \cdot 10^{-3}$	128902
	4	0,01088	$1,61 \cdot 10^{-3}$	102827
	5	0,01687	$1,28 \cdot 10^{-3}$	81948
	6	0,02606	$1,02 \cdot 10^{-3}$	65227
	7	0,04008	$8,12 \cdot 10^{-4}$	51835
	8	0,06115	$6,44 \cdot 10^{-4}$	41107
	9	0,09223	$5,10 \cdot 10^{-4}$	32511
	10	0,13681	$4,02 \cdot 10^{-4}$	25619
	11	0,19824	$3,15 \cdot 10^{-4}$	20090
	12	0,27835	$2,45 \cdot 10^{-4}$	15650
	13	0,37567	$1,89 \cdot 10^{-4}$	12077
	14	0,48419	$1,44 \cdot 10^{-4}$	9195
	15	0,59421	$1,08 \cdot 10^{-4}$	6861
	16	0,69553	$7,77 \cdot 10^{-5}$	4958
	17	0,78088	$5,32 \cdot 10^{-5}$	3392
	18	0,84754	$3,27 \cdot 10^{-5}$	2085
	19	0,89661	$1,52 \cdot 10^{-5}$	973

На рисунке 5 представлена рассчитанная графическая форма каскада.

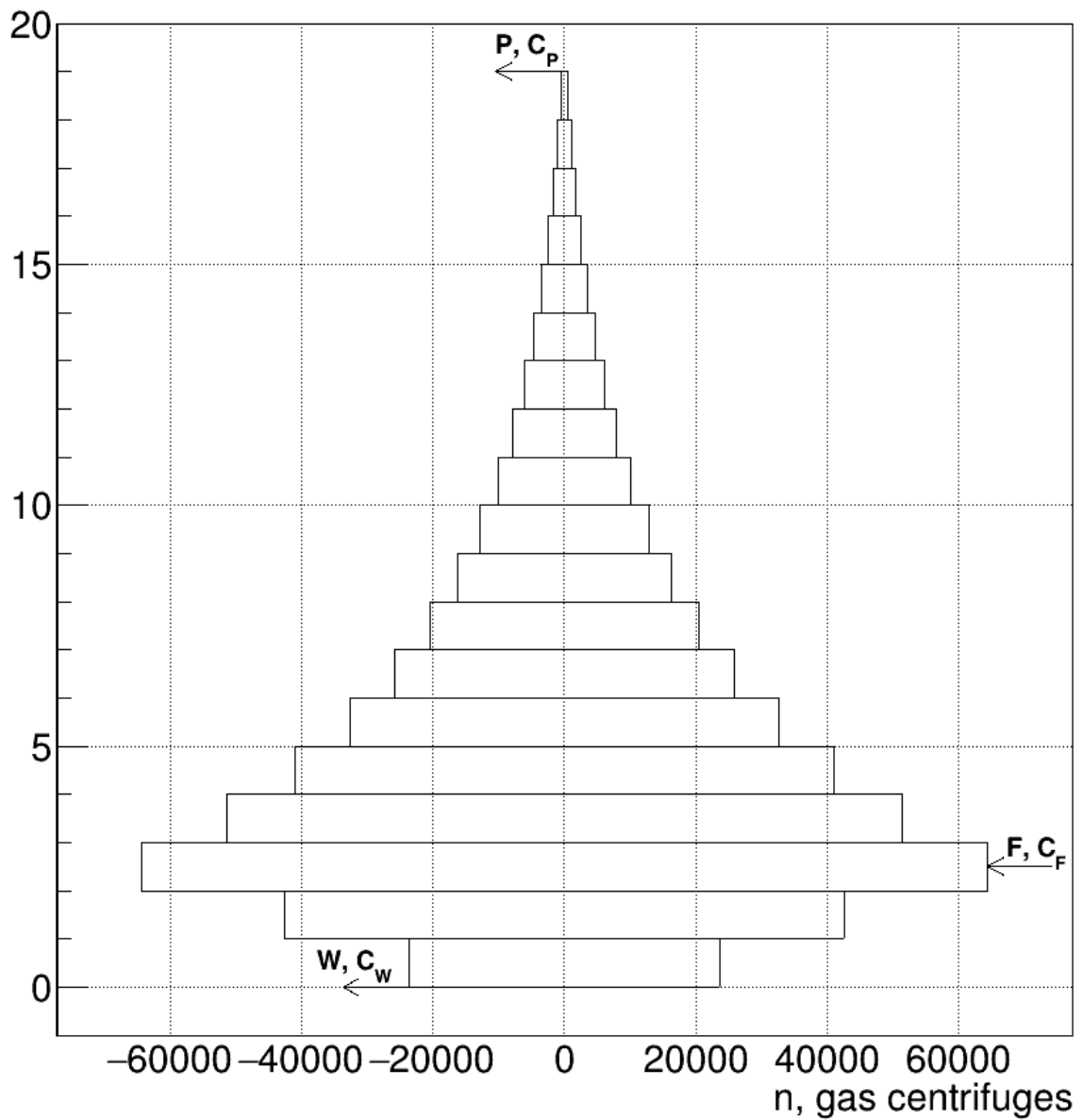


Рисунок 5 – Графическая форма каскада для смеси ^{80}Kr - ^{83}Kr

Газовая изотопная смесь ^{84}Kr - ^{86}Kr .

Определено число ступеней в регенеративной, обогащательной частях
и во всем каскаде:

$$n_w = \ln \left(\frac{0,007 \cdot (1 - 0,003)}{(1 - 0,007) \cdot 0,003} \right) / \ln(1,3225) \approx 4 \quad (32)$$

$$n_p = \ln \left(\frac{0,9 \cdot (1 - 0,007)}{(1 - 0,9) \cdot 0,007} \right) / \ln(1,3225) \approx 26 \quad (33)$$

$$n = 4 + 26 = 30 \quad (34)$$

Определена весовая производительность газовой центрифуги:

$$\eta = 4 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{\frac{0,084 \cdot 0,007 + 0,086 \cdot (1 - 0,007)}{300}} \approx 6,77 \cdot 10^{-7} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}} \quad (35)$$

$$\dot{G} = 2\pi \cdot 6,77 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{0,05^2 - 0,025^2}{0,5} \right) \approx 1,60 \cdot 10^{-8} \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad (36)$$

Результаты расчета концентраций, потоков и числа газовых центрифуг приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчета параметров каскада для изотопной смеси ^{84}Kr - ^{86}Kr

	n	c	Q , кг/с	N
	1	0,00300	$2,62 \cdot 10^{-3}$	49908
	2	0,00396	$2,09 \cdot 10^{-3}$	93363
Регенеративная часть	3	0,00524	$1,49 \cdot 10^{-3}$	131214
	4	0,00691	$7,96 \cdot 10^{-4}$	164202
Обогатительная часть	5	0,00700	$3,47 \cdot 10^{-3}$	217297
	6	0,00924	$3,01 \cdot 10^{-3}$	188412
	7	0,01218	$2,61 \cdot 10^{-3}$	163292
	8	0,01604	$2,26 \cdot 10^{-3}$	141447
	9	0,02111	$1,95 \cdot 10^{-3}$	122449
	10	0,02773	$1,69 \cdot 10^{-3}$	105925
	11	0,03635	$1,46 \cdot 10^{-3}$	91553
	12	0,04751	$1,26 \cdot 10^{-3}$	79052
	13	0,06188	$1,09 \cdot 10^{-3}$	68177
	14	0,08024	$9,37 \cdot 10^{-4}$	58715
	15	0,10344	$8,05 \cdot 10^{-4}$	50481
	16	0,13238	$6,91 \cdot 10^{-4}$	43314
	17	0,16791	$5,92 \cdot 10^{-4}$	37074
	18	0,21065	$5,05 \cdot 10^{-4}$	31639
	19	0,26086	$4,29 \cdot 10^{-4}$	26901
	20	0,31822	$3,63 \cdot 10^{-4}$	22770
	21	0,38168	$3,06 \cdot 10^{-4}$	19163
	22	0,44945	$2,55 \cdot 10^{-4}$	16010
	23	0,51914	$2,11 \cdot 10^{-4}$	13250
	24	0,58810	$1,73 \cdot 10^{-4}$	10829
	25	0,65377	$1,39 \cdot 10^{-4}$	8699
	26	0,71406	$1,09 \cdot 10^{-4}$	6818
	27	0,76758	$8,22 \cdot 10^{-5}$	5150
	28	0,81370	$5,84 \cdot 10^{-5}$	3661

	29	0,85243	$3,71 \cdot 10^{-5}$	2324
	30	0,88425	$1,77 \cdot 10^{-5}$	1112

На рисунке 6 представлена рассчитанная графическая форма каскада.

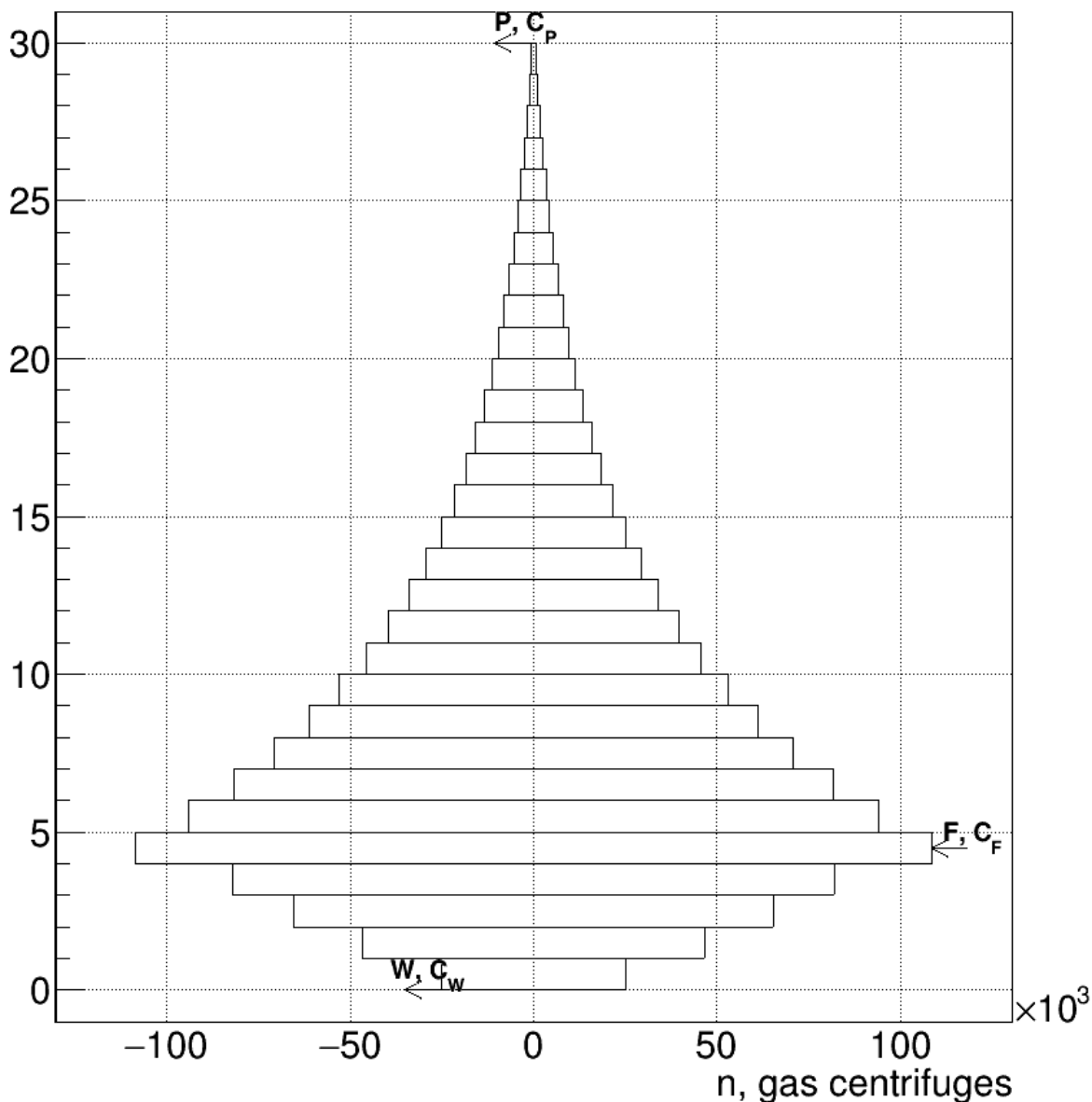


Рисунок 6 – Графическая форма каскада для смеси ^{84}Kr - ^{86}Kr

Из рисунков 5 и 6 видно, что для разделения изотопной смеси ^{84}Kr - ^{86}Kr при полном коэффициенте разделения 1,3225 требуется больше газовых центрифуг в каскаде и большее число ступеней, чем для разделения изотопной смеси ^{80}Kr - ^{83}Kr при полном коэффициенте разделения 1,56.

На рисунке 7 приведены рассчитанные графические формы каскадов для разделения различных изотопных смесей Kr при одинаковых параметрах.

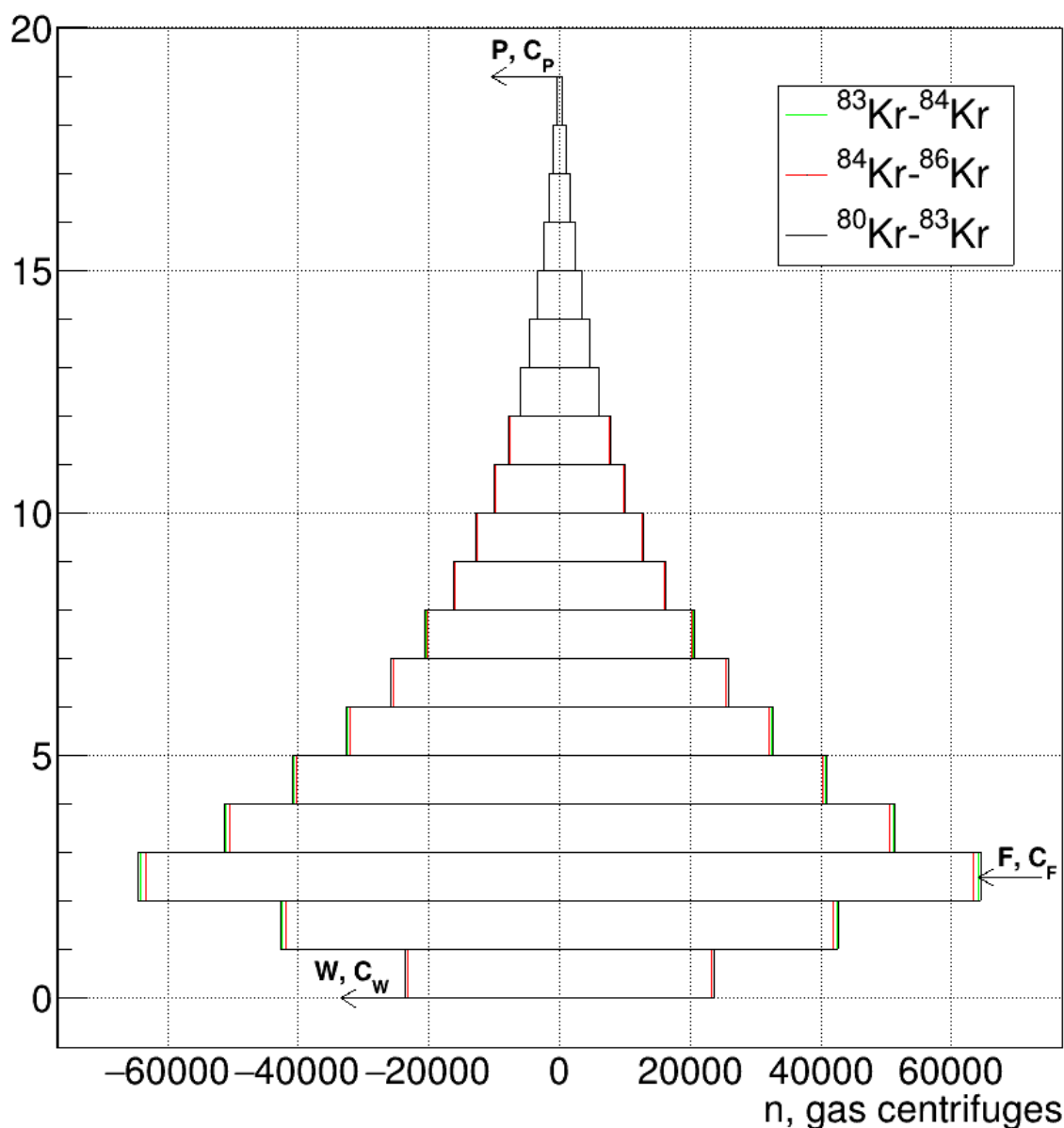


Рисунок 7 – Графические формы каскадов

Из рисунка 7 видно, что для разделения изотопной смеси $^{80}\text{Kr}-^{83}\text{Kr}$ потребуется большее число газовых центрифуг, а наименьшее для изотопной смеси $^{84}\text{Kr}-^{86}\text{Kr}$. Наибольшее отличие числа газовых центрифуг наблюдается на ступени подачи питания. На ступени отбора число газовых центрифуг практически одинаковое.

ВЫВОД

1. Изучена взаимосвязь рабочих параметров газовой центрифуги с параметрами разделительного каскада.
2. Рассчитаны параметры каскада для изотопных смесей $^{80}\text{Kr} - ^{83}\text{Kr}$ и $^{84}\text{Kr} - ^{86}\text{Kr}$ при полном коэффициенте разделения 1,56 и 1,3225 соответственно.
3. Установлено, что для разделения изотопной смеси $^{84}\text{Kr} - ^{86}\text{Kr}$ требуется больше газовых центрифуг в каскаде и большее число ступеней, чем для разделения изотопной смеси $^{80}\text{Kr} - ^{83}\text{Kr}$ – 30 и 19 ступеней в каскаде соответственно.
4. Показано, что для разделения изотопной смеси $^{80}\text{Kr} - ^{83}\text{Kr}$ потребуется большее число газовых центрифуг, а наименьшее для изотопной смеси $^{84}\text{Kr} - ^{86}\text{Kr}$. Наибольшее отличие числа газовых центрифуг наблюдается на ступени подачи питания. На ступени отбора число газовых центрифуг практически одинаковое.